

het nachtelijk windmaximum:  
een interactieve  
verwachtingsmethode

N. Maat  
H. Bakker

technische rapporten; TR-142

de bilt 1992

publicatienummer: technische rapporten; TR142 (CWD)  
Afdeling Centrale Weerdienst

postbus 201  
3730 AE de bilt  
wilhelminalaan 10  
tel. (030) 206 911  
telex 470 96

Scriptie voortgezette opleiding  
meteorologie 1990-1991

UDC: 551.509.322  
551.55"345"  
681.3.06

ISSN: 0169-1708

ISBN 90-369-2014-0

© KNMI, De Bilt. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en / of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotocopie, microfilm, of op welke wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijk toestemming van het KNMI.

## 1.0 INLEIDING

Van de verschillende soorten windmaxima aan de bovenzijde van de grenslaag is het nachtelijk windmaximum de bekendste. Dit maximum treedt op aan de top van nachtelijke temperatuurinversies in de grenslaag. Van een windmaximum is slechts dan sprake wanneer de wind in de laag boven het maximum weer afneemt. Het nachtelijk windmaximum dat wij hier bespreken komt vrijwel uitsluitend voor bij situaties met ongestoord stralingsweer. Een modelvoorstelling van dit windmaximum werd reeds in 1957 gegeven door Alfred K. Blackadar. Hij verklaarde dit verschijnsel met behulp van een rond de geowind draaiende verschilvector.

Het mag dan ook verrassend zijn dat, ondanks het feit dat een theoretische benadering al geruime tijd bekend is en het fenomeen nachtelijk windmaximum op lage hoogte met name voor de kleine luchtvaart van groot belang kan zijn, de praktijkmeteoroloog in Nederland het tot nu toe zonder een handzame verwachtingsmethode moest stellen.

In het kader van de Voortgezette Opleiding Meteorologie 1990-1991 hebben we, op grond van een (eenvoudig) model dat Driedonks (1980) presenteerde tijdens een synoptisch colloquium in november 1979 te De Bilt, en dat eveneens gebaseerd is op de verschilvector-methode, een interactieve verwachtingsmethode ontwikkeld voor het nachtelijk windmaximum op lage hoogte.

Nog een opmerking over de terminologie. Vaak wordt in Nederland de benaming low-level jet gehanteerd in plaats van nachtelijk windmaximum (op lage hoogte). Dat is jammer, temeer omdat de term low-level jet goed beschouwd een benaming is voor een ander verschijnsel. De term low-level jet werd het eerst gebruikt door Means (1952), en wel in verband met het voorkomen van lokale windmaxima op een laag niveau in de squall-lines. Helaas is dezelfde benaming later onder andere door Lettau (1954) gebruikt om het nachtelijk windmaximum aan te duiden. Vanzelfsprekend gebruiken wij de Nederlandse benaming. Een overzicht van windmaxima op geringe hoogte in de atmosfeer wordt gegeven door Van der Ham, 1980.

## 2.0 DE THEORETISCHE BASIS

De verwachtingsmethodiek voor het nachtelijk windmaximum is gebaseerd op een (eenvoudig) model zoals dat onder andere beschreven is door Driedonks (1980). Hoewel in de praktijk allerlei neveneffecten optreden is het beeld dat door het model wordt gevormd in grote trekken juist en bruikbaar om de veranderingen in de wind te verklaren. We geven eerst een korte samenvatting van de theoretische basis, waarbij we er van uitgaan dat de geostrofische wind (geowind) in de loop van de nacht niet verandert.

We starten met de vergelijkingen voor de impuls in een turbulente grenslaag, waarbij we de niet-lineaire en advectione termen verwaarlozen:

$$\partial U / \partial t = f(V - V_g) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (2.1)$$

$$\partial V / \partial t = -f(U - U_g) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (2.2)$$

met  $U$ : de x-component van de actuele wind i/d grenslaag

$V$ : de y-component van de actuele wind i/d grenslaag

$f$ : de coriolisparameter

$U_g$ : de x-component van de geowind

$V_g$ : de y-component van de geowind

$\rho$ : de dichtheid van de lucht

$\tau_x$ : de x-component van de schuifspanning

$\tau_y$ : de y-component van de schuifspanning

Deze vergelijkingen gelden voor een hoogte  $z$ .

We veronderstellen dat aan het eind van de middag een situatie is ontstaan waarin de wind in de onstabiele grenslaag vrijwel stationair is. We kunnen dan de linkertermen van (2.1) en (2.2) gelijkstellen aan nul. De windcomponenten in de grenslaag die hierbij

horen, noemen we  $U_0(z)$  en  $V_0(z)$ . Dan gaan (2.1) en (2.2) over in:

$$0 = f(V_0 - V_g) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (2.3)$$

$$0 = -f(U_0 - U_g) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (2.4)$$

Aan het eind van de middag gaat bij onbewolkt weer en verder gunstige synoptische omstandigheden (zie § 5.1) de grenslaag over van een onstabiele opbouw naar een stabiele opbouw. Dit proces is van cruciaal belang voor het ontwikkelen van een nachtelijk windmaximum.

We nemen aan dat vanaf dat moment boven de hoogte van de (nachtelijke) grenslaag de turbulente impulsuitwisseling momentaan nul wordt. De wind aan de grond wordt volledig losgekoppeld van het impulsmoment boven de grenslaag. Dit betekent voor de vergelijkingen (2.3) en (2.4) dat de wrijvingstermen ook snel gelijk worden aan nul.

Het gevolg: het evenwicht zoals we dat in (2.3) en (2.4) beschreven hebben is verstoord en we moeten, met behulp van (2.1) en (2.2), een nieuw evenwicht beschrijven. De vergelijkingen die de windvector boven de nachtelijke grenslaag beschrijven gaan nu luiden:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f(V - V_g) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -f(U - U_g) \quad (2.6)$$

Deze vergelijkingen moeten we oplossen met als beginvoorwaarde dat op  $t=0$ , d.w.z. op het moment van overgang van een onstabiele naar een stabiele grenslaag, geldt:  $U(t=0)=U_0$  en  $V(t=0)=V_0$ .

De oplossing van vergelijkingen (2.5) en (2.6) luidt:

$$U - U_g = (U_0 - U_g) \cos(ft) + (V_0 - V_g) \sin(ft) \quad (2.7)$$

$$V - V_g = -(U_0 - U_g) \sin(ft) + (V_0 - V_g) \cos(ft) \quad (2.8)$$

Dit betekent dat de verschilvector  $\vec{U}_0 - \vec{G}$ , dankzij de corioliskracht, een cirkel om de geowind beschrijft met een straal  $|\vec{U}_0 - \vec{G}|$  en een omlooptijd van  $T=2\pi/f \cong 15$  uur (op onze breedte). Eén en ander wordt verduidelijkt in onderstaande figuur.

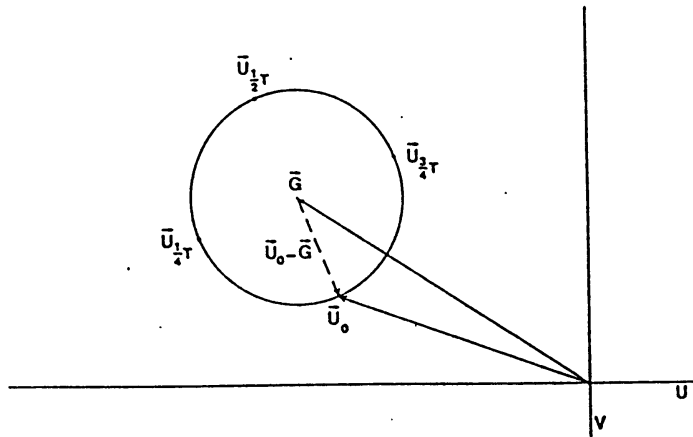


Fig.1. de verschilvector doorloopt in circa 15 uur een cirkel met als middelpunt het einde van de geowindvector

Het eindpunt van de windvector  $U$  boven de nachtelijk grenslaag ligt in het geval van volledige ontkoppeling op een cirkel met als middelpunt de geowindvector en als straal  $|\vec{U}_0 - \vec{G}|$ .

Conclusies:

\* belangrijke elementen zijn:

- het tijdstip van ontkoppeling;
- de wind op hoogte  $z$  op dat tijdstip;<sup>1</sup>
- de geowind (die we constant veronderstellen).

\* het tijdstip waarop de windsnelheid boven de (nachtelijke) grenslaag maximaal is hangt af van de beginvoorwaarde  $U_0 - G$ ;

\* op dat tijdstip is de windrichting gelijk aan de richting van de geowind,

<sup>1</sup> $z$  moet boven het nivo van de nachtelijke grondinversie liggen.

- \* en is het verschil tussen de windsnelheden aan de grond en op het niveau van het windmaximum het grootst;
- \* de grootte van het maximum wordt bepaald door de geowind en het verschil tussen de windvector en de geowind op het moment dat de grenslaag overgaat van onstabiel naar stabiel;
- \* de windvector ruimt in de tijd en is maximaal geruimd op een tijdstip dat circa 4 uur later ligt dan het bereiken van de maximumsnelheid.

### 3.0 HET NUMERIEKE MODEL.

#### 3.1 Algemene beschrijving

In hoofdstuk 2 is getoond dat de eenvoudige vergelijkingen analytisch kunnen worden opgelost. Dit werkt echter alleen als de geowind konstant is. In de praktijk is de geowind zelden konstant en daarom hebben wij de vergelijkingen numeriek opgelost om ook in het geval van een veranderende geowind een zinvolle berekening te kunnen doen.

##### 3.1.1. Het numerieke schema

Uit de basisvergelijkingen is te zien dat voor een kleine verandering van de geowind de forcering aanzienlijk verandert.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f(V - V_g) \qquad \frac{\partial V}{\partial t} = -f(U - U_g) \qquad (3.1)$$

De differentievergelijkingen zien er dan als volgt uit:

$$\frac{U^{n+1}-U^n}{\Delta t} = f(V^n - V_g^n) \quad (3.2)$$

$$\frac{V^{n+1}-V^n}{\Delta t} = -f(U^{n+1} - U_g^{n+1}) \quad (3.3)$$

In deze vergelijkingen staat  $n$  voor het tijdniveau:  $U^n$  geeft de waarde aan voor  $U$  op het tijdstip  $t=n \cdot \Delta t$ , met  $\Delta t$  de tijdstap. In (3.3) wordt dus de reeds bekende nieuwe waarde voor  $U$  gebruikt. Dit "forward-backward" schema is nodig, want als men in (3.3)  $U^{n+1}$  zou vervangen door  $U^n$ , dan is de oplossing lineair onstabiel (Pielke). Het model gebruikt een tijdstap  $\Delta t$  van 60 seconden. De geowind ( $U_g, V_g$ ) kan in dit schema in de tijd variëren.

### 3.1.2. Begintijdstip

Het tijdstip waarop begonnen dient te worden met de integratie is het moment waarop de feitelijke ontkoppeling plaatsvindt. Op dagen met gunstige synoptische omstandigheden voor het optreden van een nachtelijk windmaximum, zoals beschreven in paragraaf 5.1, is dat het moment waarop de netto stralingsbalans negatief wordt. Volgens Holtslag en Van Ulden (1983) gebeurt dit bij helder weer als de elevatiehoek van de zon  $\alpha$  ongeveer  $13^\circ$  is. Uit onze Cabauw dataset bleek zowel voor zomer als voor winter het tijdstip waarop  $\alpha=10^\circ$  het dichtst bij het tijdstip van de gemeten nuldoorgang van de stralingsbalans te komen. Het maximale tijdsverschil tussen  $\alpha=10^\circ$  en  $\alpha=13^\circ$  bleek overigens bijna 1 uur, en wel in januari. In de zomer bleek dit minder dan een half uur te zijn. Omdat op het genoemde tijdstip ook de warmteflux nul moet worden, zullen we dit begintijdstip verder steeds als het tijdstip van flux=0 aanduiden.

De elevatiehoek van de zon wordt berekend met de volgende trigonometrische functies:

$$\cos(z) = \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(uh) \quad (3.4)$$

Hierin is:



z: zenithhoek ( $90^\circ - \alpha$ )  
 $\delta$ : zonsdeklinatie  
 $\varphi$ : geografische breedte  
uh: uurhoek

De uurhoek is per definitie nul als de zon boven de lokale meridiaan staat of, anders gezegd, als de zon zijn hoogste stand van de dag bereikt. De deklinatie  $\delta$  wordt berekend uit het dagnummer dn en de daaruit berekende daghoek dh. 1 Januari heeft dagnummer 1 en 31 December heeft dn = 365. Hierbij dient opgemerkt te worden dat februari altijd 28 dagen moet hebben. Ten gevolge van het schrikkeljaar zal de nauwkeurigheid enigszins variëren.

$$dh = \frac{2\pi}{365} \cdot (dn-1) \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cdot \cos(dh) + 0.070257 \cdot \sin(dh) \\ & - 0.006758 \cdot \cos(2dh) + 0.000907 \cdot \sin(2dh) \\ & - 0.002697 \cdot \cos(3dh) + 0.00148 \cdot \sin(3dh) \end{aligned} \quad (3.6)$$

( $\delta$  en dh in radialen, maximale fout in  $\delta$ : 0.0006 rad)

Nu hebben we voldoende informatie om de uurhoek te berekenen die bij de tevoren ingestelde waarde van  $\alpha$  hoort. Wij rekenen met  $\alpha=10^\circ$ . Om uit deze uurhoek de ware tijd te vinden moeten we nog een correctie toepassen: de tijdvereffening tv. De volgende formule geeft tv in minuten.

$$tv = 229.18 \cdot \{ 7.5 \cdot 10^{-5} + 0.001868 \cdot \cos(dh) - 0.032077 \cdot \sin(dh) - 0.014615 \cdot \cos(2dh) - 0.04089 \cdot \sin(2dh) \} \quad (3.7)$$

### 3.1.3. Wind en geowind

Om het model te initialiseren zijn zowel de actuele wind als de actuele geowind nodig op het tijdstip van flux=0. In de weerdienst is ieder uur een geowindberekening beschikbaar. Hieruit kan men dan de berekende geowind voor De Bilt gebruiken. Voor de actuele

wind is het mema-bericht van Cabauw operationeel beschikbaar. Alleen dient zich natuurlijk direct de vraag aan op welke hoogte deze actuele wind moet worden afgelezen. Als we even teruggaan naar de fysische basisprincipes van dit model, zien we dat er een hoogte gekozen dient te worden die boven de grondinversie blijft, het liefst gedurende de gehele integratieperiode. Meestal bouwt de grondinversielaag zich gedurende een stralingsnacht op tot 100 à 200 m (zie ook § 5.2). De integratieperiode van het model loopt tot 06 uur UT. Vandaar dat wij een hoogte van 200 m adviseren. In enkele gevallen doet het windmaximum zich voor op geringere hoogte. Het model kan dus ook gestart worden met de wind op 140 m, een hoogte die ook gegeven wordt in het mema-bericht. Het mema-bericht is ieder half uur beschikbaar, dus er kan altijd een tijdstip worden gevonden dat dichtbij het berekende tijdstip van flux=0 ligt.

Het model heeft ook de verwachte geowind van 00 UT en van 06 UT nodig. Via lineaire interpolatie wordt dan op iedere tijdstap de actuele geowind berekend. Wanneer er geen redenen zijn om aan te nemen dat de geowind zal veranderen, kan men voor deze tijdstippen gewoon de beginwaarden van de geowind invullen. Wanneer er echter wel een verandering verwacht wordt, kan men de geowind afleiden uit het isobarenpatroon van de verwachte grondkaarten voor resp. 00 en 06 UT.

### 3.2 Modelresultaten

#### 3.2.1. Modeltest

Allereerst is er een testrun gedaan om te kijken of het model in staat is om de analytische oplossing bij konstante geowind te reproduceren. We hebben voor een fictief geval de analytische oplossing vergeleken met de numerieke oplossing. Duidelijk werd dat de numerieke oplossing de werkelijke oplossing voldoende dicht benadert, want de verschillen waren marginaal. We nemen dan ook aan dat de tijdstap klein genoeg is en dat het model ook in gevallen met een veranderende geowind een goede oplossing geeft.

### 3.2.2. Praktijkgevallen in 1991

We hebben 12 nachten geselecteerd waarin de synoptische omstandigheden gunstig waren voor het ontstaan van een nachtelijk windmaximum. In al deze gevallen ontstond ook een windmaximum, zij het de ene keer veel geprononceerder dan de andere keer. Hieronder zullen we enkele gevallen behandelen.

Geval 1: 28/29 januari 1991.

Het tijdstip van flux=0 is hier: 14.47 UT. De 200 m wind was toen 10414 (dddff) en de geowind 13511. Opvallend is dat de actuele windsnelheid hoger is dan de geowind. De modelresultaten en de waargenomen winden staan in Tabel 3.1. In deze tabel staat zowel de berekening voor konstante geowind als voor variabele geowind. De ingevoerde waarden voor de geowind in het laatste geval zijn: dddff=14315 om 00 UT en 14014 om 06 UT. De veranderingen in geowind zorgen hier dus voor een aanzienlijk andere oplossing. De uitkomsten zijn dus vrij gevoelig voor de ingevoerde geowind. Het is echter duidelijk dat de run met variabele geowind veel dichterbij de werkelijkheid komt dan die met konstante geowind. De run met konstante geowind berekende de maximale windsnelheid om 18.15 UT met 18.3 kt. Variabele geowind kwam tot 19.8 kt om 19.30 UT. De maximale wind werd gemeten om 21.20-21.30 UT en bedroeg 20 kt.

Tabel 3.1 De nacht van 28 op 29 januari 1991.

geowind →	konstant		variabel	
	tijd (UT)	dddff-model	dddff-model	dddff-gemeten
	15.00	10514	10514	10715
	16.00	11416	11016	10317
	17.00	12317	11618	11212
	18.00	13218	12319	10014
	19.00	14218	13019	10617
	20.00	15117	13619	11618
	21.00	16015	14219	12019
	22.00	16813	14718	12318

23.00	17410	14916	12113
24.00	17607	15015	11913
1.00	16504	15014	12514
2.00	12703	14913	12916
3.00	09805	14612	13814
4.00	09308	14312	14211
5.00	09711	13912	15310
6.00	10414	13612	14905
max:	18.3	19.8	20
tijd:	18:15	19:30	21:25

Het tijdstip waarop het windmaximum berekend werd verschilt dus zo'n twee uur met het waargenomen tijdstip (variabele geowind). De berekende maximale waarde van de windsnelheid komt echter wel precies overeen.

De tabel geeft de gemeten wind aan de Cabauw mast op 200 m hoogte. Tot 23.00 UT was dit ook de hoogte waarop de maximale windsnelheid werd waargenomen. Daarna gaf de windmeter op 140 m iets hogere waarden. Dit heeft te maken met het temperatuurprofiel. Gedurende deze nacht groeide de grondinversielaag niet verder dan tot 140 m. De temperatuurkromme vertoonde een scherpe knik juist onder de 140 m. Vandaar dat een goede ontkoppeling tot stand kwam, ondanks het relatief geringe temperatuurverschil tussen 200 m en 1.50 m. Dit verschil bedroeg in de loop van de avond en nacht zo'n 3°C. In het algemeen vonden wij dat wanneer dit temperatuurverschil kleiner dan 5°C was, er onvoldoende ontkoppeling plaatsvond, zodat het model aanzienlijk hogere windsnelheden berekende dan waargenomen. Het volgende geval is een goed voorbeeld van zo'n situatie.

Geval 2: 4/5 februari 1991.

Het tijdstip van flux=0 is hier: 15.05 UT. De 200 m wind was toen 06411 (dddff) en de geowind 10421. De geowind om 00 UT was 10721 en om 06 UT 10025. De modelberekeningen en de waargenomen winden staan in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 De nacht van 4 op 5 februari 1991.

tijd (UT)	geowind → konstant	variabel	
	dddff-model	dddff-model	dddff-gemeten
16.00	06016	06116	06713
17.00	06522	06521	06015
18.00	07227	07326	07220
19.00	08131	08230	08223
20.00	09033	09133	08026
21.00	09935	10134	08026
22.00	10935	11134	08829
23.00	11833	12133	07827
24.00	12830	13030	08927
1.00	13626	13826	08324
2.00	14321	14521	07920
3.00	14715	14614	08220
4.00	14009	13208	06919
5.00	10406	08007	06418
6.00	06709	05513	06117
max:	35.4	35.1	29.4
tijd:	21:27	21:31	21:55

De run met konstante geowind berekende de maximale windsnelheid om 21.27 UT met 35.4 kt. Variabele geowind kwam tot 35.1 kt om 21.31 UT. De maximale wind werd gemeten om 21.50-22.00 UT en bedroeg 29.4 kt. Dat de verschillen tussen konstante en variabele geowind niet groot zijn is niet verwonderlijk omdat de veranderingen in de geowind erg klein waren, zeker in het eerste deel van de periode. Duidelijk is dat het model een hogere windsnelheid berekende dan er in werkelijkheid opgetreden is. Zoals gezegd is er in dit geval sprake van onvolledige ontkoppeling. Dit is goed te zien aan het temperatuurprofiel. Het temperatuurverschil tussen 200 m en 1.50 m bedroeg tot 00 UT ongeveer 2°C, daarna werd het zelfs nog minder: ca 1°C. Hier is dus beslist geen sprake van een scherpe grondinversie en er zal dus wel degelijk verticaal impulstransport hebben plaatsgevonden, zodat de stroming geremd werd. De gemeten

wind op 200 m is zo'n 25 graden geruimd en later weer teruggekrompen. In het model doorloopt de windvektor een veel grotere cirkel omdat er volledige ont koppeling aangenomen wordt. In een dergelijk geval met onvolledige ont koppeling is de werkelijke windsnelheid dus lager dan berekend, en ook zal de wind minder ruimen dan dat het model aangeeft. De Corioliskracht is immers evenredig met de windsnelheid.

Geval 3: 28/29 juli 1991.

Het tijdstip van flux=0 is hier: 18.20 UT. Het werd een heldere stralingsnacht waarbij het temperatuurverschil tussen 200 m en 1.5 m opliep tot 5.5°C. De geowind veranderde nogal van richting en nam wat toe. Het model werd geïntialiseerd met een actuele 200 m wind van 08517 (dddff) en een geowind van 10320. De geowind om 00 UT was 12222 en om 06 UT 13424. De resultaten van de berekeningen en de metingen van Cabauw staan in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 De nacht van 28 op 29 juli 1991.

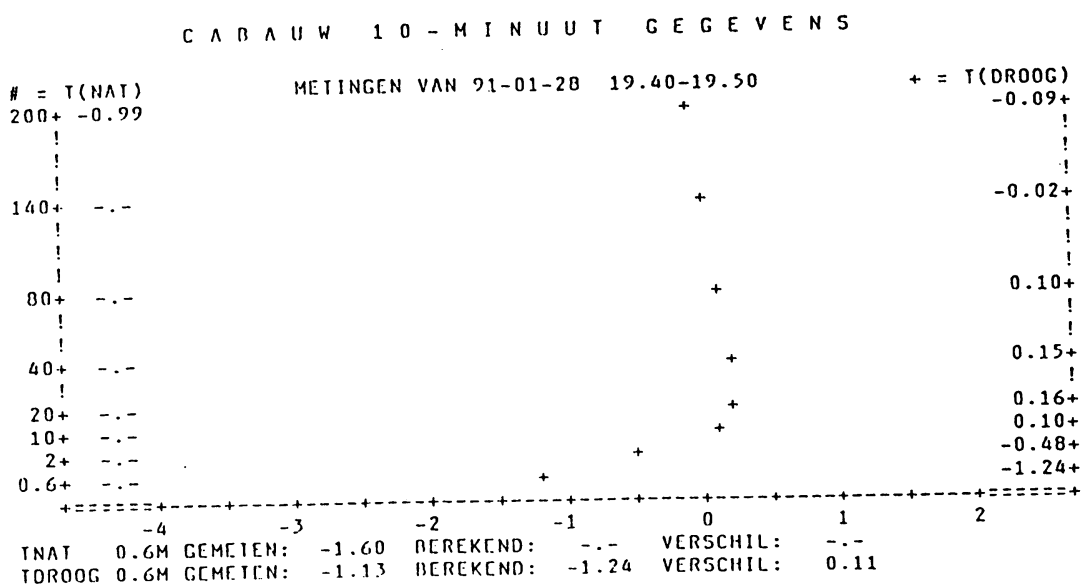
geowind → tijd (UT)	konstant		variabel	
	dddff-model	dddff-model	dddff-model	dddff-gemeten
19.00	08419	08618	08618	08119
20.00	08521	09021	09021	08020
21.00	08824	09623	09623	08729
22.00	09325	10326	10326	09632
23.00	09926	11128	11128	10729
24.00	10526	11929	11929	11630
1.00	11026	12529	12529	11926
2.00	11524	13029	13029	11726
3.00	11922	13528	13528	11925
4.00	12120	13926	13926	12225
5.00	12017	14224	14224	12026
6.00	11515	14223	14223	12025
max:	26.5	29.5	29.5	33
tijd:	23:39	00:43	00:43	21:45

Dit is het enige geval dat wij hebben kunnen vinden, waarin de gemeten maximale windsnelheid groter is dan de berekende. De run met variabele geowind toont dat de richtingen en snelheden in de gehele periode in de goede orde van grootte zitten. De run met constante geowind laat duidelijk lagere windsnelheden zien. We kunnen hier dus concluderen dat het model duidelijk beter scoort wanneer de veranderingen in de geowind worden meegenomen. Het tijdstip waarop de maximale windsnelheid wordt bereikt wijkt echter nogal af van het berekende tijdstip. In de metingen is ook te zien dat er twee maxima zijn: één om 21:45 en één rond 24:00 UT. Wanneer we de actuele wind waarmee het model geïnitieerd is om 18:20 en de betreffende geowinden in een vectordiagram zouden tekenen, dan zien we dat door het ruimen van de geowind tussen 18 en 24 UT volgens de theorie verwacht zou moeten worden dat het windmaximum juist later zou vallen dan dat je zou verwachten bij constante geowind. Dat het windmaximum dan toch zo vroeg gemeten is, zou verklaard kunnen worden door aan te nemen dat de geowind niet lineair geruimd is in de tijd, maar eerst even gekrompen om daarna weer te ruimen. Doordat het model deze veranderingen op kleine tijdschaal niet kan meenemen, maar de geowind lineair interpoleert, kunnen deze forse afwijkingen in het tijdstip van het windmaximum ontstaan.

## 4.0 DISCUSSIE

### 4.1 goede ontkoppeling

Het zal na het lezen van hoofdstuk 2.0 duidelijk zijn dat de stabiliteit van de grenslaag gedurende de verwachtingsperiode van essentieel belang is. De onderzochte situaties laten zien dat het model de werkelijkheid goed benadert wanneer er een scherpe inversie ontstaat, en er dus een sterke ontkoppeling plaatsvindt. In het algemeen kan gesteld worden dat wanneer op de meetmast Cabauw  $T_{200m} - T_{1.50m} \geq 5^{\circ}\text{C}$ , dit het geval is. Een stringente voorwaarde is het echter niet. In fig. 4.1 is het temperatuurverloop in de onderste tientallen meters te zien van 28-1-'91. Het genoemde temperatuurverschil van  $5^{\circ}\text{C}$  trad hier niet op, maar desondanks vond er -door de scherpe temperatuurknik- voldoende ontkoppeling plaats en kwam de modeluitvoer goed overeen met de praktijk. (In § 5.3 geven we hiervoor een richtlijn voor het praktijkgebruik.)



Figuur 4.1 Het temperatuurprofiel te Cabauw in de avond van 28 januari 1991



#### 4.2 matige ontkoppeling

In de onderzochte gevallen waarin  $T_{200m} - T_{1.50m} \leq 5^{\circ}\text{C}$  (maar  $\geq 0^{\circ}\text{C}$ ) bleek de modeluitvoer in de loop van de verwachtingsperiode een te ruime wind te berekenen (zo'n 20 à 30 graden te ruim) die in de praktijk ook minder krachtig was. Dit is begrijpelijk. Op het moment dat de ontkoppeling in onvoldoende mate plaatsvindt, blijven in de verticaal gezien schuifspanningen aanwezig. (zodat aan de vergelijking (2.5) en (2.6) een wrijvingsterm moet worden toegevoegd.) Het resultaat is een minder uitgesproken toename van de wind vlak boven de inversie. Aangezien de ruiming van de wind veroorzaakt wordt door de corioliskracht en dit gekoppeld is aan de windsnelheid, ruimt in zo'n situatie de werkelijke wind minder dan de modelwind. (Men kan in zo'n situatie de modeluitvoer opvatten als "bovengrens".)

In de tweede helft van de verwachtingsperiode werden eventuele afwijkingen tussen modeluitvoer en de praktijk groter. De oorzaak hiervan is terug te leiden tot:

- \* het starten met afwijkingen in de eerste helft van de modeluitvoer;
- \* het lineair interpoleren van de geowind voor de uren die vallen tussen 00.00 UT en 06.00 UT;
- \* het feit dat kleine verschillen in zwakke geowinden kunnen leiden tot grote verschillen in de modeluitvoer.
- \* het feit dat de grondinversie gegroeid kan zijn tot meer dan 200 m, zodat de theorie niet meer van toepassing is voor de top van de Cabauw-mast.

## 5.0 PRAKTIJKGEBRUIK

Het computerprogramma is zowel in de weerkamer in De Bilt als op Meteo Schiphol ondergebracht in "Meteo-menu" op de PC. In de loop van 1992 zal het programma ook via "I'ching" gedraaid kunnen worden.

### 5.1 *synoptische situatie*

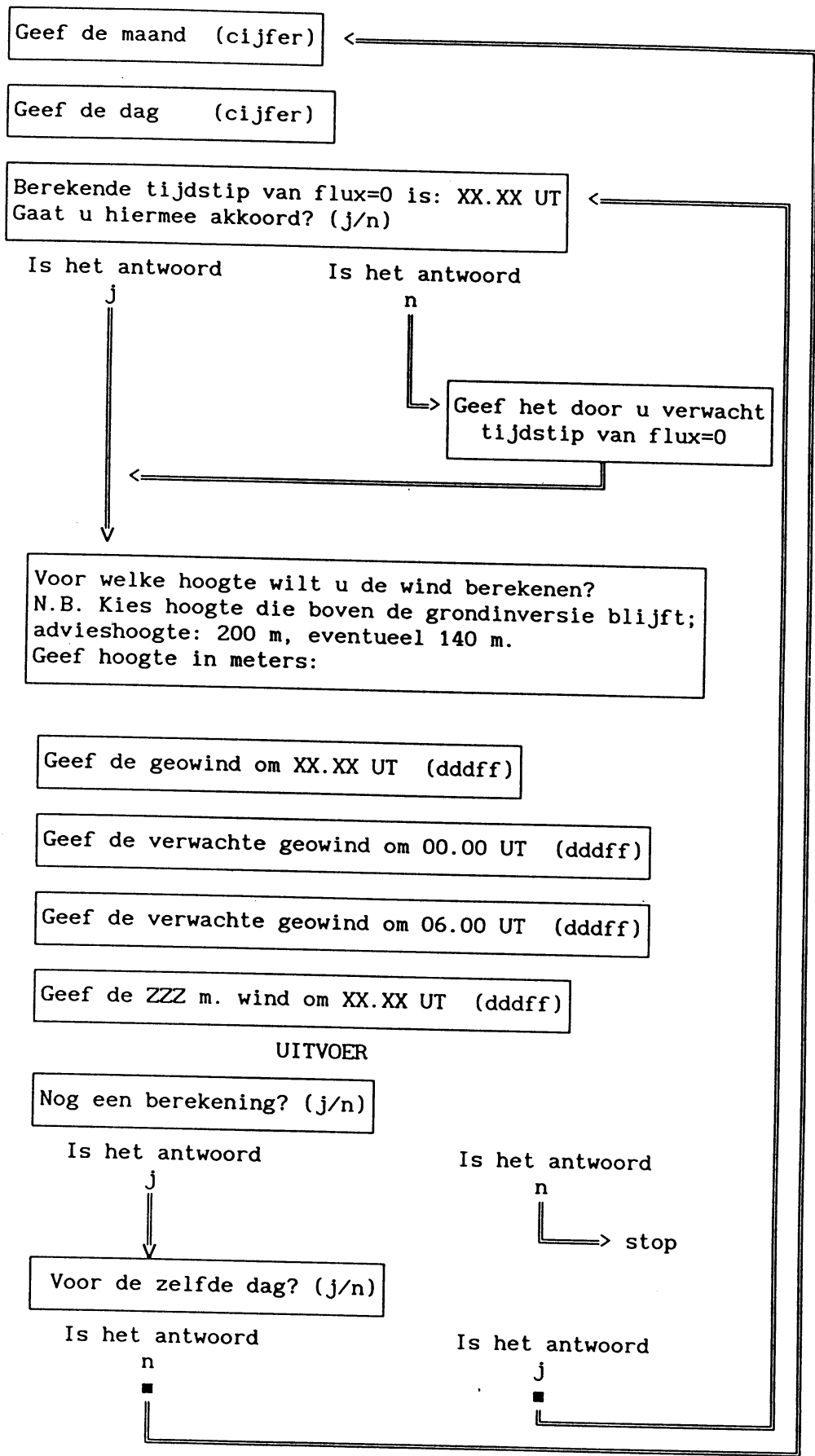
Voordat we het interactieve deel en de uitvoer van het programma bekijken is het nuttig om te bezien onder welke meteorologische omstandigheden de ontwikkeling van een nachtelijk windmaximum op lage hoogte waarschijnlijk is. Driedonks (1980) laat zien dat:

- \* er een grote dagelijkse gang moet zijn in de gras- en huttemperatuur;
- \* over een afstand van ongeveer 250 km. stroomopwaarts de omstandigheden homogeen moeten zijn en geen lage bewolking gemeld mag worden;
- \* er een ageostrofische component in de grenslaag moet zijn op het moment van ontkoppeling;
- \* het effect van het windmaximum vergroot wordt als de thermische wind tegengesteld waait aan de geowind;

De meest gunstige condities voor het optreden van een nachtelijk windmaximum op lage hoogte zijn dus gelegen in een synoptische situatie met een anti-cyclonale Zuidoostelijke stroming.

### 5.2 *het interactieve deel*

Het interactieve deel van het programma is schematisch uitgewerkt op de volgende pagina.



Opmerkingen met betrekking tot de invoer:

\* In § 3.1.2 is uiteengezet hoe het programma het tijdstip van flux=0 bepaalt. In de onderzochte gevallen bleek het berekende tijdstip het ware moment goed te benaderen. Heeft de meteoroloog echter twijfels over het berekende tijdstip dan lijkt het zinvol om het tijdstip in te voeren waarop in de middaguren de temperatuur op 10 cm. hoogte weer lager wordt dan de huttemperatuur. Deze methode geldt met name voor het voorjaar, de zomer en het najaar.

\* In het programma wordt de meteoroloog geadviseerd de wind op een hoogte te berekenen die boven de grondinversie blijft. De hamvraag is dus: tot hoe hoog ontwikkelt zich de grondinversie? De volgende twee empirische benaderingen geven wellicht enig houvast.

1) ontwikkeling van de grondinversiehoogte H (in m) in de tijd:

*Infossi*

$$H \cong 70 * \sqrt{t} \quad \text{met } t = \text{tijd in uren, verlopen sinds } t(\text{flux}=0), \text{ het moment van ontkoppeling.}$$

2) grenslaaghoogte H (in m) op instantaan moment, met  $G \neq 0$ :

$$H \cong 1.5 * G^2 \quad \text{met } G = \text{geowindsnelheid in m/s}$$

Om de actuele ontwikkeling van de grenslaaghoogte te volgen kan gebruik worden gemaakt van het mema-bericht van Cabauw. Hierin zijn op routine basis elk half uur sodargegevens beschikbaar, en wel in sectie 2. Er staan gegevens in betreffende de aanwezigheid en hoogte van inversies tot 980 m. Per bericht worden drie 10-minuten tijdvakken behandeld waarin maximaal twee inversies worden gegeven. Belangrijk is dat de laatste twee cijfers van een groep in deze sectie niet de hoogte van de top van de gemeten inversie geeft, maar de basis! (in decameters). Op Schiphol kan men uiteraard gebruik maken van de aldaar beschikbare Sodar-registratie.

Wij adviseren echter om steeds 200 m als rekenhoogte te kiezen, omdat de grondinversie zich meestal ongeveer tot deze hoogte ontwikkelt. Uit de praktijkgevallen bleek deze hoogte ook steeds het beste te werken.

- \* De gehanteerde modelvoorstelling blijkt erg gevoelig voor de invoergegevens. Het goed verwachten van de geowinden van 00 UT en 06 UT is erg belangrijk, maar ook lastig. Gelukkig zal in de synoptische situatie zoals die beschreven is in § 5.1 de geowind in veel gevallen niet bijzonder sterk fluctueren. Daarnaast moet worden opgemerkt dat in een groot aantal gevallen het windmaximum voor 00 UT zal vallen. De wellicht onjuist verwachte geowindwaarde van 06 UT heeft in dat geval geen invloed op de berekening van het windmaximum en op het tijdstip van optreden. (Uiteraard wel op de uitkomsten na 00 UT.)

### 5.3 Interpretatie uitvoer

Een voorbeeld van de uitvoer van het programma:

19.00 UT	dddff=	90	18
20.00 UT	dddff=	93	20
21.00 UT	dddff=	98	22
22.00 UT	dddff=	104	24
23.00 UT	dddff=	111	26
24.00 UT	dddff=	118	27
1.00 UT	dddff=	123	28
2.00 UT	dddff=	128	28
3.00 UT	dddff=	132	27
4.00 UT	dddff=	136	26
5.00 UT	dddff=	138	25
6.00 UT	dddff=	140	24
windmaximum om 1.10 UT: 124 28.2			

Opmerkingen met betrekking tot de uitvoer:

\* De berekende winden zullen het dichtst bij de werkelijke winden komen in die gevallen waarin de synoptische situatie overeenkomt met het genoemde in § 5.1 en in geval van volledige ontkoppeling. Het volgende kan als richtlijn gelden ter bepaling van de mate van ontkoppeling:

- a)  $T_{180 \text{ m. Cabauw}} - T_{1.50^2 \text{ m. Cabauw}} \leq 0^\circ\text{C}$  : geen
- b)  $0^\circ\text{C} < T_{180 \text{ m. Cabauw}} - T_{1.50 \text{ m. Cabauw}} < 5^\circ\text{C}$  : matig
- c)  $T_{180 \text{ m. Cabauw}} - T_{1.50 \text{ m. Cabauw}} \geq 5^\circ\text{C}$  : goed

In geval a): uitvoer niet bruikbaar;

In geval b): met name in het tweede deel van de uitvoer is de windrichting vaak een graad of dertig te ruim berekend en is de windsnelheid te sterk;

In geval c): uitvoer betrouwbaar.

Bij het vooraf bepalen van de mate van ontkoppeling in de loop van de nacht kan in de praktijk worden uitgegaan van het feit dat in de beschouwde gevallen de temperatuur op 180 m. zo'n 3 graden daalde in de loop van de avond/nacht. Vanzelfsprekend wordt voor T 1.50 m. de verwachte minimumtemperatuur in de hut genomen.

\* Gezien de gevoeligheid van het model voor de aanvangsvariabelen is het vooral in een situatie met zwakke geowinden verstandig om het programma nog eens te runnen. De verschillen in de uitvoer kunnen de meteoroloog een indruk geven over de "hardheid" van de verwachting.

<sup>2</sup> De temperatuur op 1.50 m. wordt in het mema-bericht van Cabauw gegeven in de 1-groep op hoogte 00000.

## Referenties

- <1> Blackadar, A.K. 1957; "Boundary Layer Wind Maximum and Their Significance for the Growth of Nocturnal Inversions". Bulletin of the American Meteorological Society, 38, p 283-290.
- <2> Driedonks, A.G.M. 1980; "Het optreden van een nachtelijk windmaximum op lage hoogte". KNMI-Verslag V-346, De Bilt.
- <3> Van der Ham, C.J. 1980; "Windmaxima op geringe hoogte in de atmosfeer". KNMI-Verslag V-354, De Bilt.
- <4> Holtslag, A.A.M. and A.P. van Ulden 1983; "A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data" Journ. of Climate and Appl. Meteorology, 22, No4, p 517-529.
- <5> Lettau, H. 1954; "Graphs and Illustrations of Diverse Atmospheric States and Processes Observed During the Seventh Test Period of the Great Plains Turbulence Field Program." Occasional Report No. 1, Atmospheric Analysis Laboratory, Air Force Cambridge Research Center.
- <6> Means, L.N. 1952; "On Thunderstorm Forecasting in the Central United States". Monthly Weather Review, 80, p 165-189.
- <7> Pielke, R.A. 1981; "Mesoscale numerical modelling", In: Advances in Geophysics, Vol 23. Ed: B.Saltzman, Academic Press, p 185-344.

Appendix: Listing computerprogramma (Fortran 77)

```
PROGRAM WINDMAX
C Dit programma berekent het nachtelijk windmaximum boven de inversie
C in geval van niet-constante geowind
integer dd,ff,dd0,ff0,dd6,ff6,dda,zz
real maxt,maxffa
logical sameday
character*1 antw
common/const/pi,tf0,tf0sec
common/log/sameday
pi=4.*atan(1.)
f=1.15E-4
sameday=.false.
34 CALL FLUXNUL
print 30,tf0
30 format (' Berekende tijdstip van flux=0 is:',F6.2,' UT')
39 print*, 'Gaat u hiermee akkoord? (j/n)'
read (*, '(A)') antw
if (antw .eq. 'j') goto 40
if (antw .ne. 'n') goto 39
print*, 'ALWEER EEN EIGENWIJZE METEOROLOOG!'
print*, 'Geef het door u verwachte tijdstip van flux=0 (hh.mm)'
read*,tf0
tf0sec=3600*(int(tf0) + 5/3.*(tf0-int(tf0)) )
40 print*, 'Voor welke hoogte wilt u de wind berekenen?'
print*, 'N.B. Kies hoogte die boven de grondinversie blijft;'
print*, 'advieshoogte: 200 m, eventueel 140 m.'
print*, 'Geef hoogte in meters:'
read*,zz
print 31,tf0
31 format(' Geef de geowind om',F6.2,' UT (dddff)')
read (*,25) dd,ff
20 format(2I2)
25 format(I3,I2)
print*, 'Geef de verwachte geowind om 00 UT (dddff)'
read (*,25) dd0,ff0
print*, 'Geef de verwachte geowind om 06 UT (dddff)'
read (*,25) dd6,ff6
print 32,zz,TF0
32 format(' Geef de ',I4,' m wind om',F6.2,' UT (dddff)')
read (*,25) dda,iffa
ffa=iffa
ug=-ff*sin(dd*pi/180.)
vg=-ff*cos(dd*pi/180.)
ug0=-ff0*sin(dd0*pi/180.)
vg0=-ff0*cos(dd0*pi/180.)
ug6=-ff6*sin(dd6*pi/180.)
vg6=-ff6*cos(dd6*pi/180.)
ua=-ffa*sin(dda*pi/180.)
va=-ffa*cos(dda*pi/180.)
maxffa=0
dt=60.
t=INT(tf0sec+0.5)
C Integratie-loop
```



```

do 80 while (t .le. 30*3600.)
  if (t .le. 24*3600.) vga=vg+(t-tf0sec)/(24*3600.-tf0sec)*(vg0-vg)
  if (t .gt. 24*3600.) vga=vg0+(t-24*3600.)/6/3600.*(vg6-vg0)
  ua1=ua+dt*f*(va-vga)
  t=t+dt
  if (t .le. 24*3600.) uga=ug+(t-tf0sec)/(24*3600.-tf0sec)*(ug0-ug)
  if (t .gt. 24*3600.) uga=ug0+(t-24*3600.)/6/3600.*(ug6-ug0)
  va1=va+dt*(-f)*(ua1-uga)
  ua=ua1
  va=va1

C
  ffa=sqrt(ua*ua+va*va)
  if (ua .eq. 0.) then
    if (va .ge. 0.) dda=180
    if (va .lt. 0.) dda=360
  else
    alfa=180./PI*atan(va/ua)
  endif
  if (ua .lt. 0.) dda=90-alfa
  if (ua .gt. 0.) dda=270-alfa
C  controle op maximum wind
  if (ffa .gt. maxffa) then
    maxffa=ffa
    maxdda=dda
    maxt=t
  endif
C  uitvoer
  it=INT(t/60+0.5)
  if (it/60 - it/60. .EQ. 0.) then
    iffa=int(ffa+0.5)
    th=t/3600
    thm=int(th)+0.6*(th-int(th))
C  Voorkomen van bijvoorbeeld thm=18.60 i.p.v. 19.00
    if (thm-int(th) .ge. 0.59499) thm=int(th)+1.
    if (thm .gt. 24.005) thm=thm-24.
    WRITE (*,22) thm, dda,iffa
22  format(' ',F6.2,' UT   dddff= ',2I3)
    endif
80  continue
    uurut=maxt/3600.
    uurut=int(uurut)+0.6*(uurut-int(uurut))
    if (uurut-int(uurut) .ge. 0.595) uurut=int(uurut)+1.
    if (uurut .gt. 24.) uurut=uurut-24.
    write (*,23) UURUT,maxdda,maxffa
23  format( /,' windmaximum om',F6.2,' UT: ',I3,F5.1/)
45  print*, 'Nog een berekening? (j/n)'
    read (*, '(A)') antw
    if (antw .eq. 'j') then
46  print*, 'voor dezelfde dag? (j/n)'
    read (*, '(A)') antw1
    if (antw1 .eq. 'j') sameday=.true.
    if (antw1 .ne. 'n'.and. antw1.ne.'j') goto 46
    goto 34
    endif
  if (antw .ne. 'n') goto 45
end

```

SUBROUTINE FLUXNUL

C

```

logical sameday
common/const/pi,tf0,tf0sec
common/log/sameday
integer dag,dn
if (sameday) goto 60
print*, 'geef de maand (cijfer)'
read*,maand
print*, 'Geef de dag (cijfer)'
read*,dag
IF(MAAND.EQ.1) DN=DAG
IF(MAAND.EQ.2) DN=DAG+31
IF(MAAND.EQ.3) DN=DAG+59
IF(MAAND.EQ.4) DN=DAG+90
IF(MAAND.EQ.5) DN=DAG+120
IF(MAAND.EQ.6) DN=DAG+151
IF(MAAND.EQ.7) DN=DAG+181
IF(MAAND.EQ.8) DN=DAG+212
IF(MAAND.EQ.9) DN=DAG+243
IF(MAAND.EQ.10) DN=DAG+273
IF(MAAND.EQ.11) DN=DAG+304
IF(MAAND.EQ.12) DN=DAG+334

```

C De daghoek:

```
dh=2*pi*(dn-1)/365.
```

C declinatie:

```

d=0.006918-0.399912*cos(dh)+0.070257*sin(dh)-.006758*cos(2*dh)
>+.000907*sin(2*dh)-.002697*cos(3*dh)+.00148*sin(3*dh)

```

C tijdvereffening (minuten):

```

tv=(7.5E-5+.001868*cos(dh)-.032077*sin(dh)-.014615*cos(2*dh)
>-.04089*sin(2*dh))*229.18

```

C

C print\*, 'Geef elevatiehoek zonshoogte in graden'

C read\*,zh

```
zh=10.
```

```
zgr=90-zh
```

```
z=pi/180*zgr
```

```
fi=52*pi/180.
```

60 uh=acos((cos(z)-sin(d)\*sin(fi))/(cos(d)\*cos(fi)))

```
tf0 = 11.666667 -tv/60. + uh*180/pi/15.
```

```
tf0sec=tf0*3600.
```

C Omrekenen tf0 naar uren+minuten

```
tf0=int(tf0) + 0.6*(tf0-int(tf0))
```

```
return
```

```
end
```