

**KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT**

VERSLAGEN

V - 346

A. G. M. Driedonks

Het optreden van een nachtelijk
windmaximum op lage hoogte.

Verslag van een voordracht gehouden op
het synoptisch colloquium te De Bilt, november 1979.

De Bilt 1980

Publikatienummer: K.N.M.I. V-346 (FM)

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut,
Fysisch Meteorologisch onderzoek (FM)
Postbus 201,
3730 AE De Bilt,
Nederland.

U.D.C.: 551.554 :

551.507.7

1. Inleiding

In weersituaties die niet onder directe invloed staan van synoptische storingen, zal het gedrag van de atmosferische grenslaag een belangrijke rol spelen in de weersverschijnselen. Wanneer we bovendien praten over situaties waarin de instraling door de zon overdag en de uitstraling door het aardoppervlak 's nachts niet of nauwelijks gehinderd worden door bewolking, dan zal de atmosferische grenslaag boven land een grote dagelijkse gang vertonen. Om in dergelijke gevallen uitspraken te kunnen doen over weersverschijnselen is het belangrijk om inzicht te hebben in de turbulente uitwisselingsprocessen die in de grenslaag een rol spelen.

Op een heldere dag zal het aardoppervlak opgewarmd worden door de zon. Konvektieve bellen zullen met een relatief temperatuuroverschot opstijgen en menging veroorzaken in de grenslaag. Naar mate de dag voortschrijdt zal de intensiteit van deze konvektie versterkt worden en de grenslaag zowel in temperatuur als dikte doen toenemen. Dit is een algemeen bekend verschijnsel en er bestaan modellen waarmee zowel de temperatuur in de grenslaag als de dikte er van uitgerekend kunnen worden (b.v. Tennekes, 1973).

In een heldere nacht zal de uitstraling van lang-golvige straling door het aardoppervlak een dominerend effect hebben. Door deze netto uitstraling koelt het aardoppervlak af. De stabiliteit neemt toe en verticale bewegingen worden belemmerd. Alleen in een betrekkelijk dunne laag bij het aardoppervlak zal turbulente uitwisseling nog mogelijk blijven t.g.v. wrijvingsturbulentie. Er bestaan ook modellen die een inzicht geven in de ontwikkeling van deze nachtelijke grenslaag (b.v. Nieuwstadt & Driedonks, 1979).

Ook zonder gebruik te maken van numerieke modellen kunnen we echter uit de voorgaande algemene beschouwing proberen om enkele kwalitatieve conclusies te trekken over de dagelijkse gang in verschillende grenslaagparameters in een onbewolkte situatie (of in ieder geval geen grote belemmering van de uitstraling) zonder invloed van synoptische storingen. We laten bovendien eventuele mistvorming buiten beschouwing.

In een dergelijke situatie vertoont de grenslaag een grote variatie in dikte. Overdag is een typische hoogte 1000 m, 's nachts kunnen we denken aan een typische hoogte van 100 m.

De dagelijkse gang in de temperatuur zal afhangen van de hoogte waarop we deze waarnemen. Onder in de grenslaag zal deze dagelijkse gang groot zijn (typische waarde van de amplitude 15°C), boven in echter (d.w.z. boven de hoogte van de nachtelijke grenslaag), zal de temperatuur nauwelijks een dagelijkse gang vertonen, omdat het effect van de nachtelijke afkoeling niet tot dit niveau doordringt.

Het tijdsverloop van de wind op verschillende hoogten is niet kwalitatief uit dergelijke eenvoudige beschouwingen te voorspellen. In eerste instantie lijkt het aannemelijk om te verwachten dat de wind boven de grenslaag zich aan zal passen aan b.v. de geowind wegens de afwezigheid daar van wrijving, terwijl in de nachtelijke grenslaag zelf de wind met de hoogte toeneemt tot aan de geowind. Deze voorstelling is echter foutief en leidt tot een onjuiste voorspelling van de wind, met name boven de nachtelijke grenslaag.

2. De gang van de wind

De in werkelijkheid gemeten dagelijkse gang van de wind onder en boven de hoogte van de nachtelijke grenslaag vertoont een geheel ander beeld. Een mooi voorbeeld hiervan is Fig. 1. Hierin wordt gedurende zes achtereenvolgende heldere dagen de wind op 10 m (onder in de nachtelijke grenslaag) en die op 200 m (boven in de nachtelijke grenslaag) te Cabauw gegeven, alsmede de geostrofische wind. We zien dat juist boven de nachtelijke grenslaag de wind een enorme dagelijkse gang vertoont en de geostrofische wind ver kan overschrijden in de nacht. In de nacht leidt de wind boven de grenslaag blijkbaar een eigen leven en is volledig ontkoppeld van wat er aan de grond gebeurt. Overdag daarentegen zien we dat door de sterke menging (grenslaagdikte $\gg 200$ m) de winden op 10 en 200 meter hoogte wel gekoppeld zijn. Ver boven de nachtelijke grenslaag zal de wind gelijk moeten zijn aan de geowind. Dit heeft tot gevolg dat de wind in de nacht blijkbaar kan toenemen vanaf de grond tot een sterk super-geostrofische waarde boven de nachtelijke grenslaag en daarboven weer afnemen. Dit verschijnsel staat bekend als het nachtelijk windmaximum (Fig. 2).

Aangezien dit windmaximum zich op betrekkelijk lage hoogte voordoet, zijn vrij gedetailleerde metingen nodig om het zichtbaar te maken. In radiosonde-waarnemingen is het i.h.a. niet duidelijk aanwezig. Dit is een reden waarom men zich pas vrij laat bewust werd van dit

verschijnsel. Wel was reeds eerder een dergelijk windmaximum opgemerkt dat samenhangt met synoptische verschijnselen of met de orografie (bergen). Het bovengenoemde nachtelijk windmaximum moet hier los van gezien worden en hangt direct samen met de dagelijkse gang in de stabiliteit. De dagelijkse gang in de wind die hier het gevolg van is, is de volgende: op lage hoogte vertoont de windsnelheid een relatief maximum overdag en een relatief minimum 's nachts. op grotere hoogte (boven de nachtelijke grenslaag) vertoont de windsnelheid een relatief minimum overdag en een relatief maximum 's nachts.

De dagelijkse gang in de windsnelheid boven de nachtelijke grenslaag is dus tegengesteld aan die onder in de nachtelijke grenslaag. Zie ook Rijkoort (1970).

3. Verklaring voor het nachtelijk windmaximum

We zullen nu een eenvoudig model bespreken dat een dergelijk windmaximum kan verklaren en tevens aangeeft onder welke voorwaarden het optreedt (Blackadar, 1957). Dit model geeft een sterk vereenvoudigde voorstelling van zaken en in de praktijk zullen er allerlei neveneffecten mogelijk zijn. Het beeld dat er door wordt gevormd is echter in grote trekken juist en geschikt om een belangrijk deel van de variabiliteit in de wind te verklaren. Uit vergelijking met waarnemingen moet de waarde in de praktijk volgen.

Om dit model te begrijpen bekijken we de vergelijkingen voor impuls in een turbulente grenslaagstroming. Voor de wind-komponenten U (Oostwaarts) en V (Noordwaarts) luiden die:

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

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -f(U - U_g) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (2)$$

waarin f de coriolis-parameter is en de laatste termen de wrijvingskrachten beschrijven. Deze vergelijkingen gelden voor een hoogte z, zodat in feite U_g en V_g (de componenten van de geowind) nog als functie van de hoogte beschouwd moeten worden. We beschouwen een situatie waarin de geowind niet afhangt van de tijd.

Aan het eind van de middag zullen we een situatie hebben waarin de wind in de grenslaag vrijwel stationair is, zodat de linkerleden van (1) en (2) nul gesteld mogen worden. De windcomponenten in de grenslaag, die hierbij horen, noemen we $U_o(z)$ en $V_o(z)$. Voor deze componenten geldt dus:

$$0 = f(V_o - V_g) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (3)$$

$$0 = -f(U_o - U_g) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (4)$$

Het model dat we nu gebruiken, luidt als volgt: zodra de grenslaag aan het eind van de middag overgaat van onstabiel naar stabiel wordt boven de hoogte van de nachtelijke grenslaag de turbulente uitwisseling snel nul.

Dit betekent in vgl. (3) en (4) dat de laatste termen snel nul worden. Er is dan geen evenwicht van krachten meer, zodat vgl. (3) en (4) niet meer op gaan en we te maken krijgen met vgl. (1) en (2) waarin de laatste termen nul zijn.

De vergelijkingen die de windvector boven de nachtelijke grenslaag beschrijven zullen dus luiden:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f(V - V_g) \quad (5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -f(U - U_g) \quad (6)$$

Deze vergelijkingen moeten we oplossen onder de beginvoorwaarden op $t = 0$ (overgang onstabiel \rightarrow stabiel):

$$U(0) = U_o$$

$$V(0) = V_o$$

De oplossing is eenvoudig en luidt:

$$U - U_g = (U_o - U_g) \cos ft + (V_o - V_g) \sin ft$$

$$V - V_g = -(U_o - U_g) \sin ft + (V_o - V_g) \cos ft$$

Dit betekent dat de verschilvector $\vec{U} - \vec{G}$ een cirkel om de geowind beschrijft met straal $|\vec{U}_o - \vec{G}|$ en een omlooptijd $T = 2\pi/f \approx 15$ uur. (\vec{G} is de geowind-vector). Dus het eindpunt van de windvector \vec{U} boven de nachtelijke grenslaag ligt op een cirkel met als middelpunt de geowind-vector en als straal $|\vec{U}_o - \vec{G}|$. Zie Fig. 3.

Uit dit resultaat kunnen we nu de volgende konklusies trekken voor de wind \vec{U} boven de nachtelijke grenslaag \vec{U} .

- a. de windsnelheid wordt maximaal op een tijdstip dat afhangt van de beginvoorwaarde, i.h.b. van $\vec{U}_0 - \vec{G}$.
- b. op dat moment is de windrichting gelijk aan die van de geowind.
- c. op dat moment hebben we dus de grootste verandering van de windsnelheid met de hoogte tussen de grond en de positie van het windmaximum.
- d. de grootte van het maximum wordt bepaald door de geowind en het verschil tussen windvector en geowind op het moment van overgang onstabiel \rightarrow stabiel.
- e. de windvector ruimt in de tijd en is maximaal geruimd op een tijdstip dat $\frac{1}{4} T \approx 4$ uur later ligt dan het bereiken van de maximum snelheid.

Bovenstaand model veronderstelt dat op het moment van overgang onstabiel \rightarrow stabiel de turbulente uitwisseling momentaan nul wordt overal boven de nachtelijke grenslaaghoogte. Dit betekent dat op elke hoogte z daar boven bovenstaande oplossing geldig is, mits we het lokale verschil $\vec{U}_0(z) - \vec{G}$ nemen. Aangezien de wind aan het eind van de middag toeneemt met de hoogte tot een waarde gelijk aan de geowind boven in de grenslaag overdag, zal deze verschil-vector afnemen met de hoogte en dus ook de draaiingsamplitude. Vlak boven de grenslaaghoogte 's nachts is de amplitude maximaal en daar zal dan ook de positie van het windmaximum te vinden zijn (Fig. 4)

In Fig. 5 is het verloop van de windvector op twee verschillende hoogten boven de nachtelijke grenslaag in detail getekend. We nemen een geval waarin deze nachtelijke grenslaag ca. 100 meter dik is, en beschouwen de draaiing van de windvector op 120 en 200 m. Alles draait om de beginvoorwaarden op tijdstip nul. We nemen aan dat aan het einde van een convectieve dag de windrichtingen op 120 en 200 m niet veel verschillen. Als er wel een snelheidsverschil is tussen deze hoogten aan het eind van de dag (in Fig. 5 is genomen $U_{120}^0 = 0,7 U_{200}^0$) dan verschillen alleen daardoor al zowel de amplitude als de fase van de draaiende windvector op deze hoogten. We zien dat de windsnelheid op 120 m een grotere maximale waarde heeft dan op 200 m en dat het tijdstip van optreden van dit maximum op 120 m later ligt dan op 200 m. Dus: bij een lage grenslaaghoogte 's nachts vinden we een relatief windmaximum $\frac{U_{\max}}{G}$ met een grotere waarde en optredend op een later tijdstip dan bij een grote grenslaaghoogte 's nachts.

Verder kunnen we aan deze figuur zien dat als de geowind afneemt met de hoogte, de afname van de wind boven de hoogte waar het maximum wordt bereikt geprononceerder zal zijn (de stippellijn waar omheen de windvector draait, buigt dan naar links af met de hoogte). Dit is het geval als er een thermische wind is, tegengesteld aan de geowind \vec{G} , dus in het geval van koude lucht rechts van de geowind (In een dergelijk geval kan zelfs onafhankelijk van deze draaiing een windmaximum ontstaan, dat ook overdag aanhoudt). Dit verschijnsel wordt 's winters wel waargenomen.

De waarde van bovenstaand eenvoudig model zal moeten blijken aan de hand van voorbeelden uit de praktijk. We geven nu enkele gevallen zoals gemeten aan de 200 m mast in Cabauw.

4. Voorbeelden van de ontwikkeling van een nachtelijk windmaximum in Cabauw

Om de ontwikkeling van een windmaximum na te gaan werden twee perioden in 1978 geselecteerd van meerdere heldere dagen achter elkaar: 29 mei t/m 1 juni 1978 en 11 t/m 13 oktober 1978.

We bespreken eerst de periode van 29 mei-1 juni 1978.

In Fig. 6 is een tijd-hoogte diagram gegeven van de potentiële temperatuur tussen 0 en 200 meter. Isolijnen zijn getrokken met een interval van 1°C . We zien duidelijk de opbouw van een nachtelijke inversie die in de ochtend-uren door konvektie afgebroken wordt.

Fig. 7 geeft het tijd-hoogte diagram voor de windsnelheid ff met isolijnen om de 2 m/s. Gebieden met $ff > 12$ m/s zijn schuin, met $ff > 14$ m/s horizontaal gearceerd. Duidelijk is dat de windsnelheid op 200 m gedurende elk van de nachten een maximum bereikt in de loop van de nacht en vervolgens weer afneemt. Het tijdstip van optreden van het maximum is in deze nachten respectievelijk om ca. 2 gmt op 30 mei, om ca. 00 gmt op 31 mei en om ca. 22 gmt op 1 juni. Het tijdstip van zonsondergang ligt op deze dagen op ca. 19.50 gmt. Het tijdstip van omslag onstabiel \rightarrow stabiel ligt hier nog geruime tijd voor. Uit analyse van turbulentiemetingen blijkt dat we hiervoor ca. 19 gmt moeten nemen. Het verschil in tijdstip van optreden van het windmaximum kan volgens het model samenhangen met verschillende beginvoorwaarden. We komen hier dadelijk op terug.

In Fig. 8 wordt het tijd-hoogte diagram van de windrichting gegeven. We hebben eerder gezien dat volgens het model de wind boven de nachtelijke grenslaag maximaal geruimd is op een tijdstip dat $\frac{1}{4} T \approx 4$ uur ligt na het bereiken van de maximale windsnelheid. Op dat tijdstip zal dan ook

de windrichtingsvariatie met de hoogte in de grenslaag maximaal zijn. In Fig. 10 zijn de tijdstippen van maximale ruiming van de wind op 200 meter (en van maximale richtings-schering) aangegeven. Dit is respectievelijk op ca. 05.30 gmt, 02.30 gmt, 01.30 gmt.

Het tijdsverschil met het optreden van het windsnelheidsmaximum in deze nachten is dan respectievelijk:

op 30 mei 1978 : ca. $3\frac{1}{2}$ uur

31 mei 1978 : ca. $2\frac{1}{2}$ uur

1 juni 1978 : ca. $3\frac{1}{2}$ uur.

Dit is in redelijke overeenstemming met het door het model voorspelde verschil.

In de Fig. 9, 10, 11 zijn de hodografen gegeven van de wind op 200 en 20 m voor de nachten van 30, 31 mei en 1 juni, vanaf ca. 2 uur voor zonsondergang tot ca. 2 uur na zonsopkomst. Verder is hierin aangegeven de geowind-vector. Deze geowind is de gemiddelde "Geowind West" gedurende de nacht. Duidelijk is dat in alle gevallen de windvector op 200 m ruimt in de tijd en in de loop van de nacht een maximale waarde bereikt om daarna weer af te nemen.

Wanneer we dit kwantitatief proberen te verklaren met het model met als beginvoorwaarden de situatie op 19 gmt, dan kunnen we het tijdstip van optreden van een windmaximum en de grootte er van bepalen uit de cirkel die beschreven wordt door $|\vec{U}_{19} - \vec{G}|$ om de geowind.

Doen we dit voor deze dagen dan krijgen we de volgende tabel:

<u>Nacht</u>	<u>Verwacht</u>		<u>Optreden</u>	
	max. ff	tijdstip (gmt)	max. ff	tijdstip (gmt)
29/30 mei	13	00	12	02
30/31 mei	12	23	14	00
31 mei/1 juni	11	23	12	22

De overeenstemming is goed.

Voor de periode 11-13 oktober 1978 worden de tijd-hoogte diagrammen gegeven in Fig. 12, 13, 14 voor respectievelijk potentiële temperaturen, windsnelheid, windrichting. In de nacht van 11 op 12 oktober zien we twee windmaxima optreden op ca. 140 m hoogte, een op ca. 18 gmt en een op ca. 06 gmt.

Het vroegtijdig optreden van dit windmaximum rond zonsondergang kan alleen verklaard worden als de inertial-oscillatie zeer vroeg begint of als er boven 140 m een sterke afname van de geowind is. Beide ver-

klaringen zijn niet waarschijnlijk. Het eenvoudige model geeft hier geen goede resultaten. In de nacht van 12 op 13 oktober treedt een zeer sterk windmaximum op 200 meter op om ca. 21 gmt. De windrichtingsverandering met de hoogte heeft in deze nacht een maximum om ca. 01.30, in redelijke overeenstemming met de verschuiving van ca. 4 uur die uit het model volgt. De hodografen voor deze beide nachten worden gegeven in Fig. 15 en 16. In beide gevallen ruimt de wind op 200 meter in de loop van de tijd en vertoont een maximum.

Op 11/12 oktober is er echter een draaiing van de wind tussen 01 en 07 gmt die niet met een dergelijk eenvoudig model verklaard kan worden. De geowind vertoont weinig variatie in deze nacht.

In de nacht van 12/13 oktober is er wel een inertiaal-oscillatie aanwezig, die het gedrag van de windvector redelijk beschrijft. De waarde van het maximum op 21 gmt (17.5 m/s) kan hiermee echter niet verklaard worden. Toch is de waarde wel realistisch en wordt bevestigd door waarnemingen met andere instrumenten en op andere hoogten.

Van dezelfde nacht (12/13) zijn waarnemingen gepubliceerd, gemeten op 200 meter hoogte in Hamburg (Roth, 1979). De twee hodografen van 200 meter hoogte Cabauw en Hamburg zijn te zien in Fig. 17. Op beide plaatsen is een inertiaal-oscillatie aanwezig op 200 meter. De twee vectoren draaien echter om verschillende geowinden, terwijl in Hamburg de extreem hoge windsnelheid uit Cabauw op 21 gmt niet aanwezig is. Een conclusie uit deze grafiek kan wel zijn dat het verschijnsel van een nachtelijk windmaximum grote horizontale uitgestrektheid kan hebben boven land.

5. Konklusies

In heldere nachten kan boven de nachtelijke grenslaag een windmaximum voorkomen. Met behulp van een eenvoudig model zijn we in staat om een belangrijk deel van de windvariatie boven de nachtelijke grenslaag te verklaren, hoewel allerlei neveneffecten het ideale beeld kunnen verstoren. Tevens zagen we dat het verschijnsel van een windmaximum een grote horizontale uitgestrektheid kan hebben.

We kunnen nu nagaan welke omstandigheden gunstig zijn voor het optreden van een nachtelijk windmaximum.

a. Het is van belang dat het bovenste deel van de grenslaag snel ontkoppeld wordt van het onderste deel. Daarvoor is het nodig dat het oppervlak snel afkoelt en er dus een grote dagelijkse gang is in de grond-temperatuur.

Langs de trajectorie van de lucht die naar ons land komt moet ten minste gedurende een tijd $\frac{1}{2} T \approx 7\frac{1}{2}$ uur geen lage bewolking aanwezig zijn. Dit komt overeen met een afstand van ca. 250 km. Over deze afstand moeten de omstandigheden homogeen zijn. Bij wind van zee is de kans op een nachtelijk windmaximum dus klein.

b. Er moet een ageostrofische windcomponent zijn in de grenslaag aan het einde van de dag. Hoe groter deze is, hoe duidelijker een nachtelijk windmaximum zal optreden. Bij een lage grenslaaghoogte 's nachts zal het windmaximum relatief sterker zijn en later optreden dan bij een grote grenslaaghoogte.

c. Een thermische wind die tegengesteld is aan de geowind zal het effect van een windmaximum vergroten (koude lucht rechts van de geowind).

d. De meest gunstige condities voor het optreden van een nachtelijk windmaximum zijn dus gelegen in anti-cyclonale Zuidoostelijke stromingen.

Het juist voorspellen van de hodograaf voor de wind boven de grenslaag met het beschreven model is sterk afhankelijk van de beginvoorwaarden. We moeten beschikken over een goede schatting van de geowind-vector gemiddeld over de nacht en over de ageostrofische windvector op een tijdstip ca. $1\frac{1}{2}$ uur voor zonsondergang. De schatting van deze geowind is vaak een van de lastigste problemen.

Vervolgens moeten we nog beschikken over een schatting van de grenslaaghoogte 's nachts. Deze kan benaderd worden door een formule: $k = c G^2$ met de konstante $c \approx 1.5$, (G in m/s). Vervolgens bepalen we op verschillende hoogten boven deze grenslaagdikte de ageostrofische component ca. $1\frac{1}{2}$ uur voor zonsondergang. We kunnen dan de hodografen van de windvector op deze hoogten bepalen, en het tijdstip van optreden van een windmaximum en de waarde er van schatten voor verschillende hoogten boven de nachtelijke grenslaag. In het algemeen zal 200 meter een representatieve hoogte zijn om een nachtelijk windmaximum te schatten.

Literatuur

1. Blackadar, A.K., 1957: Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions. Bull. Am. Meteor. Soc., 38 (5), 283-290.
2. Nieuwstadt, F.T.M. and A.G.M. Driedonks, 1979: The nocturnal boundary layer: a case study compared with model calculations. J. Appl. Met., 18, 1397-1404.
3. Roth, R., Kottmeier and D. Lege, 1979: Die lokale Feinstruktur eines Grenzschichtstrahlstroms. Meteorol. Rdsch., 32, 65-72.
4. Rijkoort, P.J. (1970): Wind, een meteorologische grootheid. De Ingenieur, 82, B93-101.
5. Tennekes, H., 1973: A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer. J. Atmos. Sci., 30, 558-567.
6. Thorpe, A.J., and T.H. Gymer (1977): The nocturnal jet. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 103, 633-653.

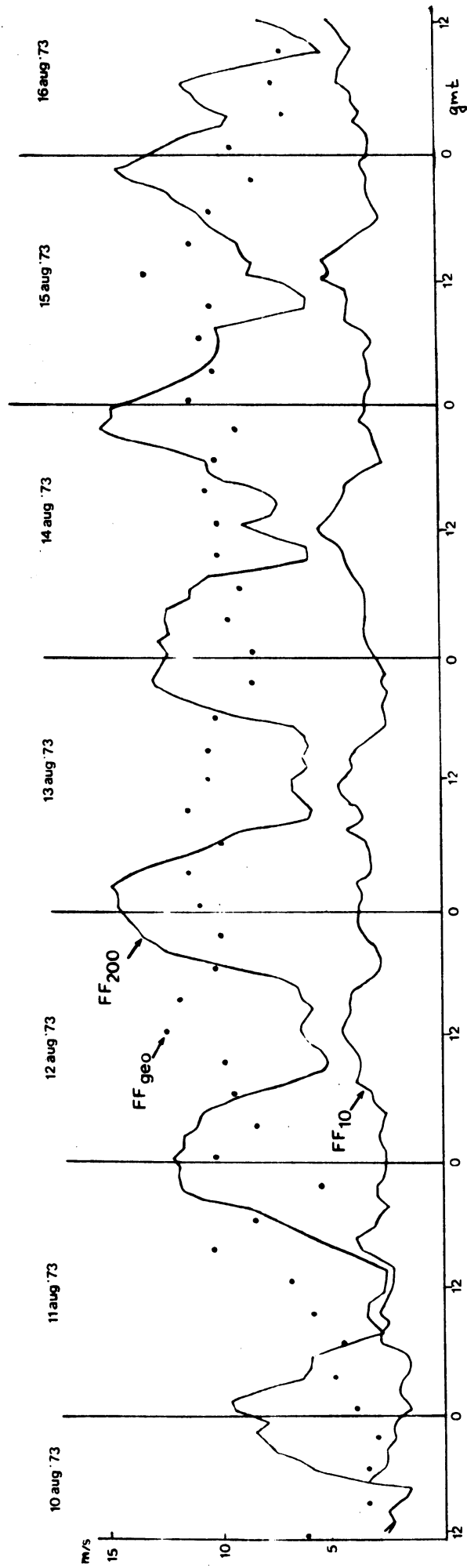


Fig. 1 De variatie in windsnelheid op 10 en 200 m hoogte te Cabauw alsmede de geostrofische windsnelheid ("geowind West") voor de periode 10/8/73-16/8/73.

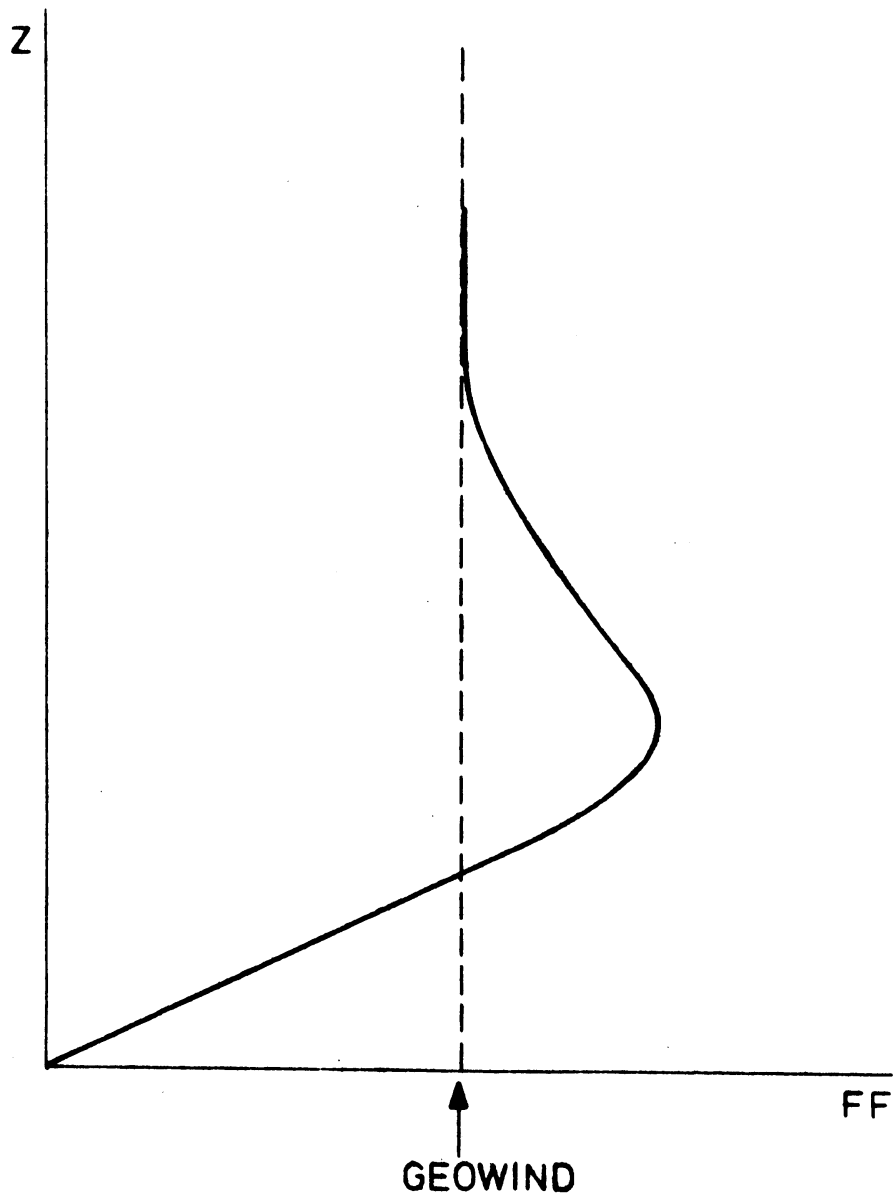


Fig. 2. Schematisch beeld van een windsnelheids profiel in de nacht.

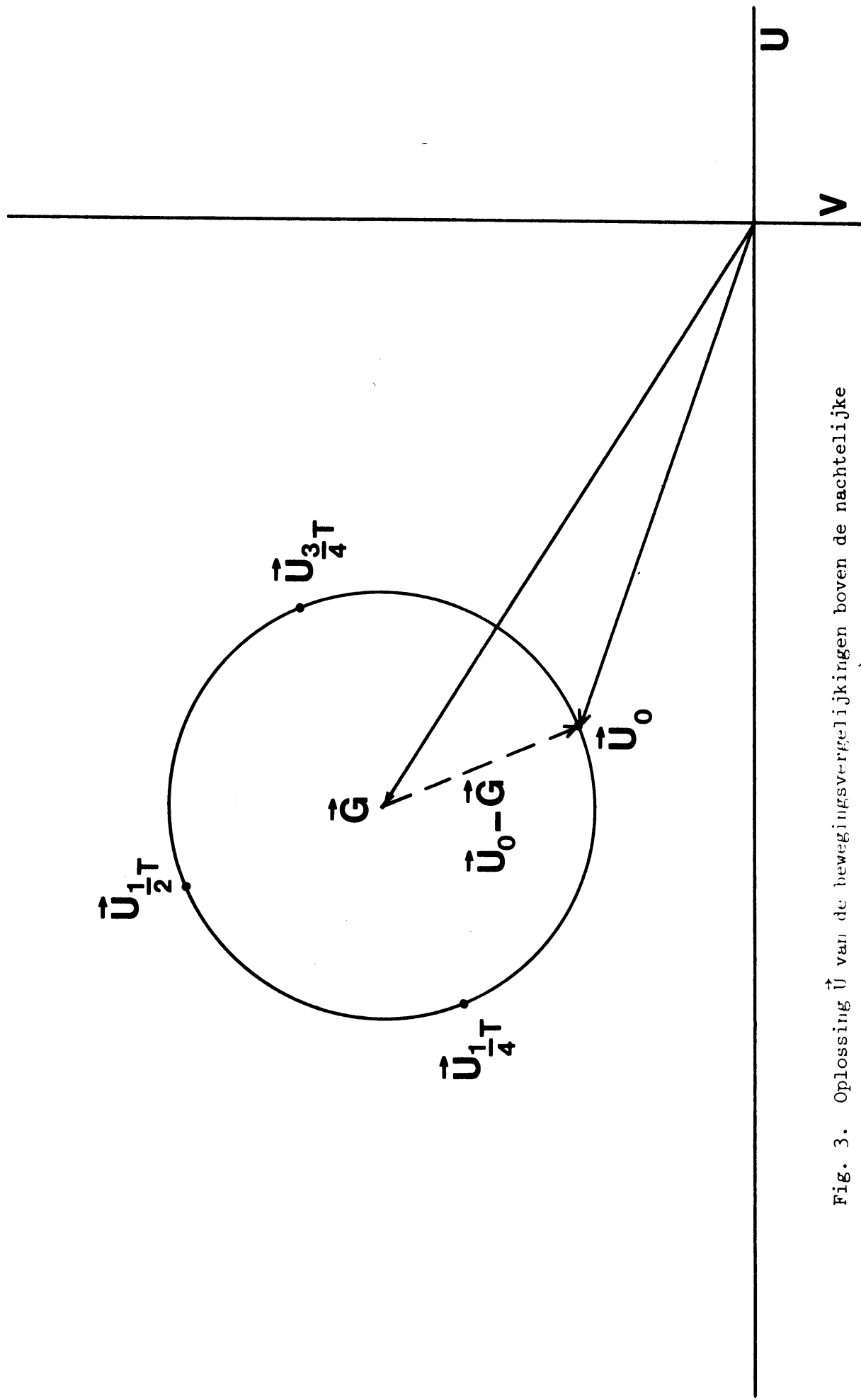


Fig. 3. Oplossing \vec{U} van de bewegingsvergelijkingen boven de nachtelijke grenslaag. Periode $T = 2\pi/f \approx 15$ uur. \vec{G} is de geostrofische wind.

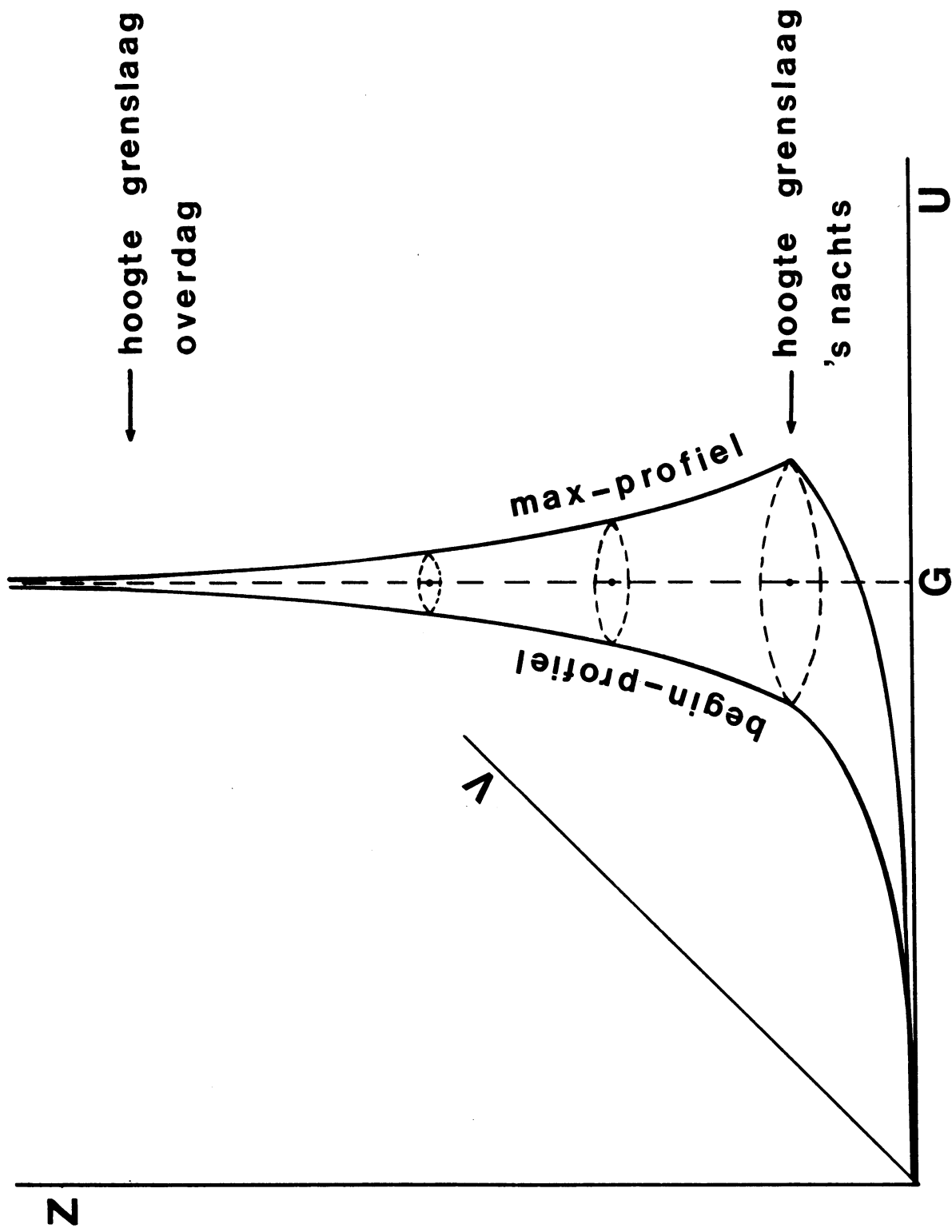
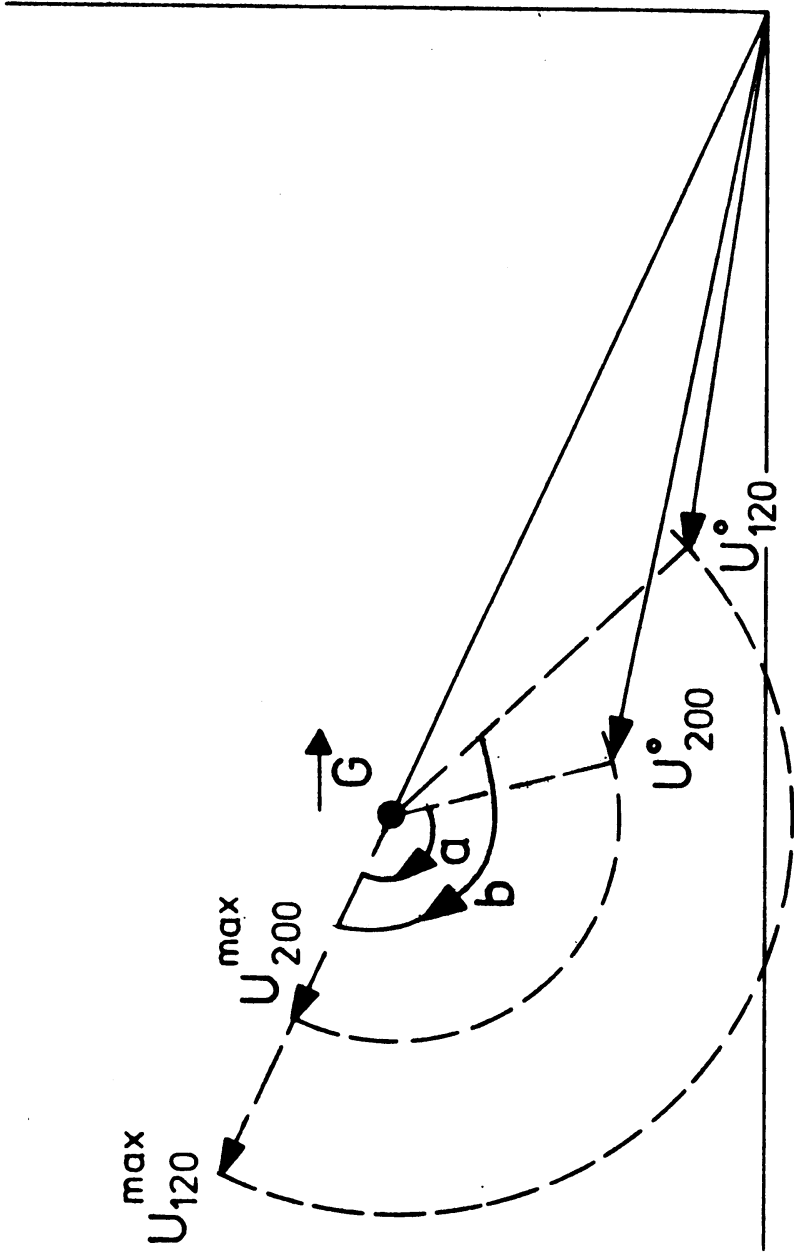


Fig. 4. Oplossing \vec{U} op verschillende hoogten boven de nachtelijke grens-
 laag vanuit een g-geven beginprofiel. Oscillatie van $\vec{U}_0(z) - \vec{G}$ om
 \vec{G} leidt tot een windsnelheidsmaximum ter hoogte van de nachtelijke
 grenslaaghoogte.



$$U_{120}^{\max} > U_{200}^{\max}$$

$$t_{120}^{\max} - t_{200}^{\max} = \frac{b-a}{360} \times 15 \text{ hrs}$$

Fig. 5. Gedetailleerd verloop van de windvector op twee verschillende hoogten boven de nachtelijke grenslaag (bv. 120 en 200 m) met verschillende beginvoorwaarden. De windsnelheid bereikt zijn grootste waarde op 120 m later dan op 200 m.

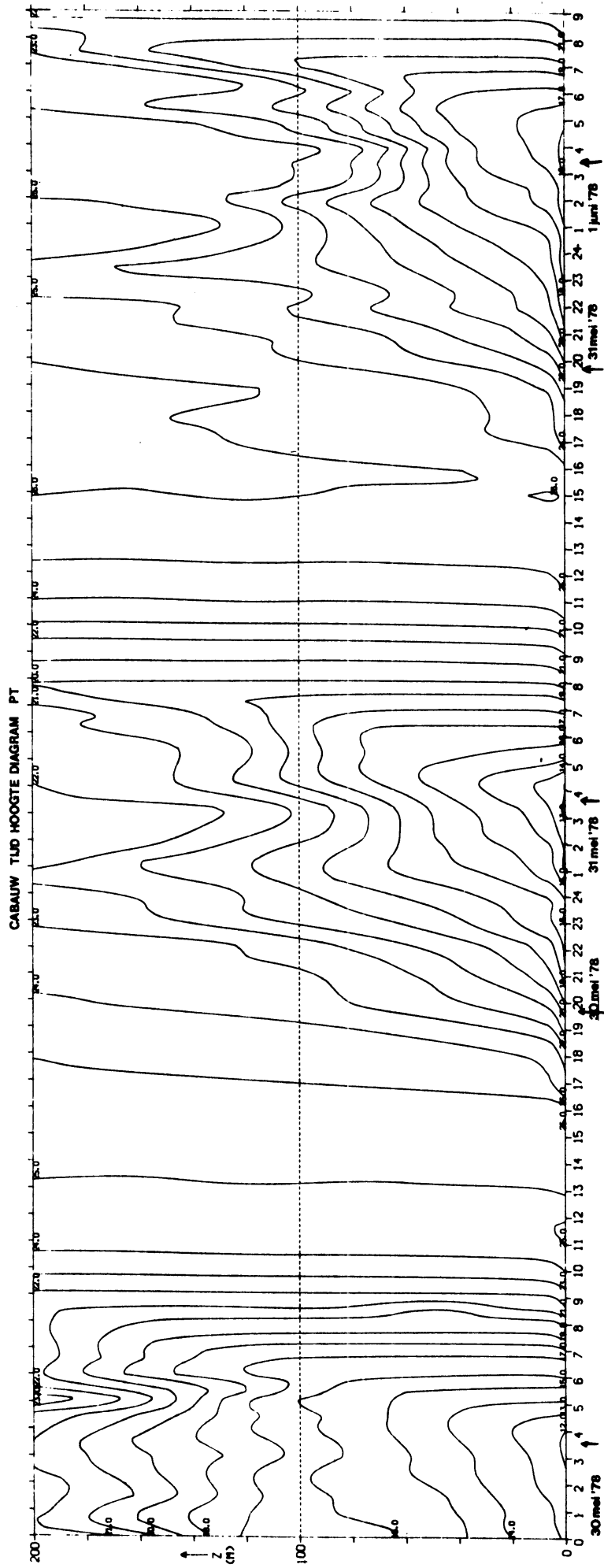


Fig. 6. Tijd-hoogte diagram van potentiële temperatuur te Cabauw tot 200 m hoogte, 29 mei-1 juni '78. Isolijnen om de 1°C.

CABAUW TIJD-HOOGTE DIAGRAM FF

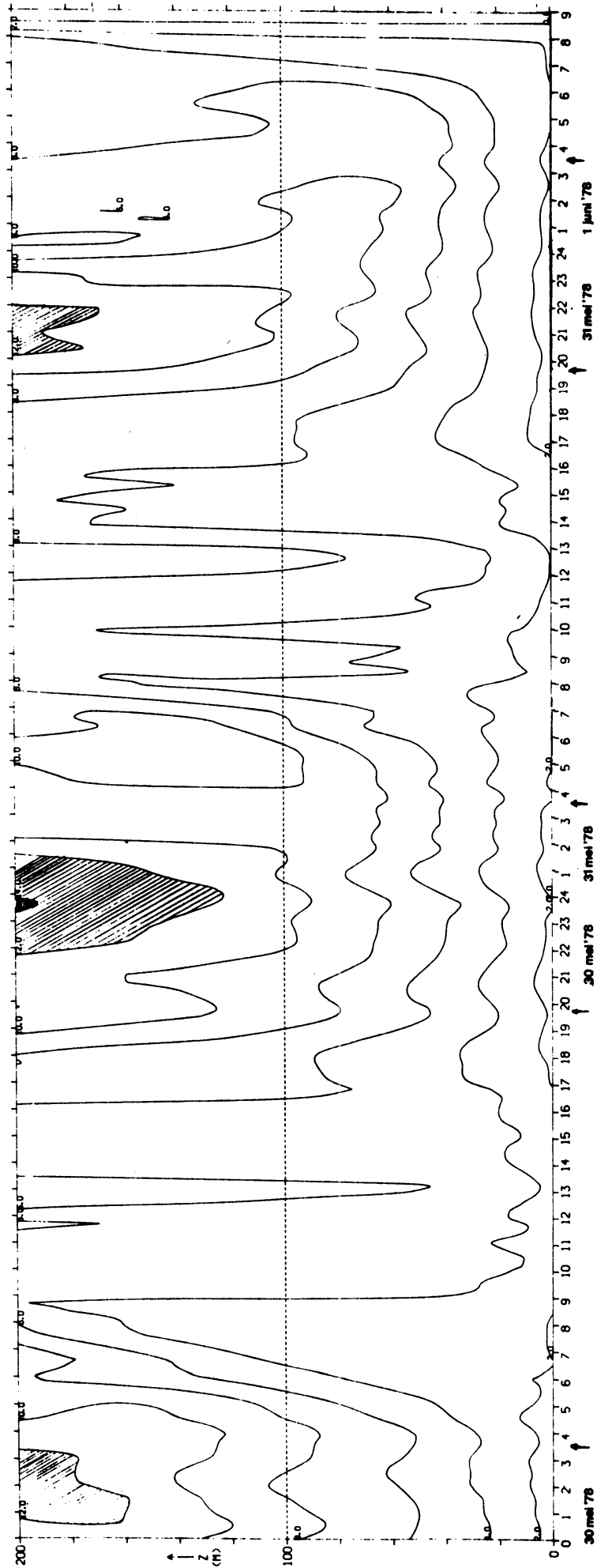


Fig. 7. Tijd-hoogte diagram van windsnelheid, 29 mei-1 juni 1978. Iso-
lijnen om de 2 m/s.

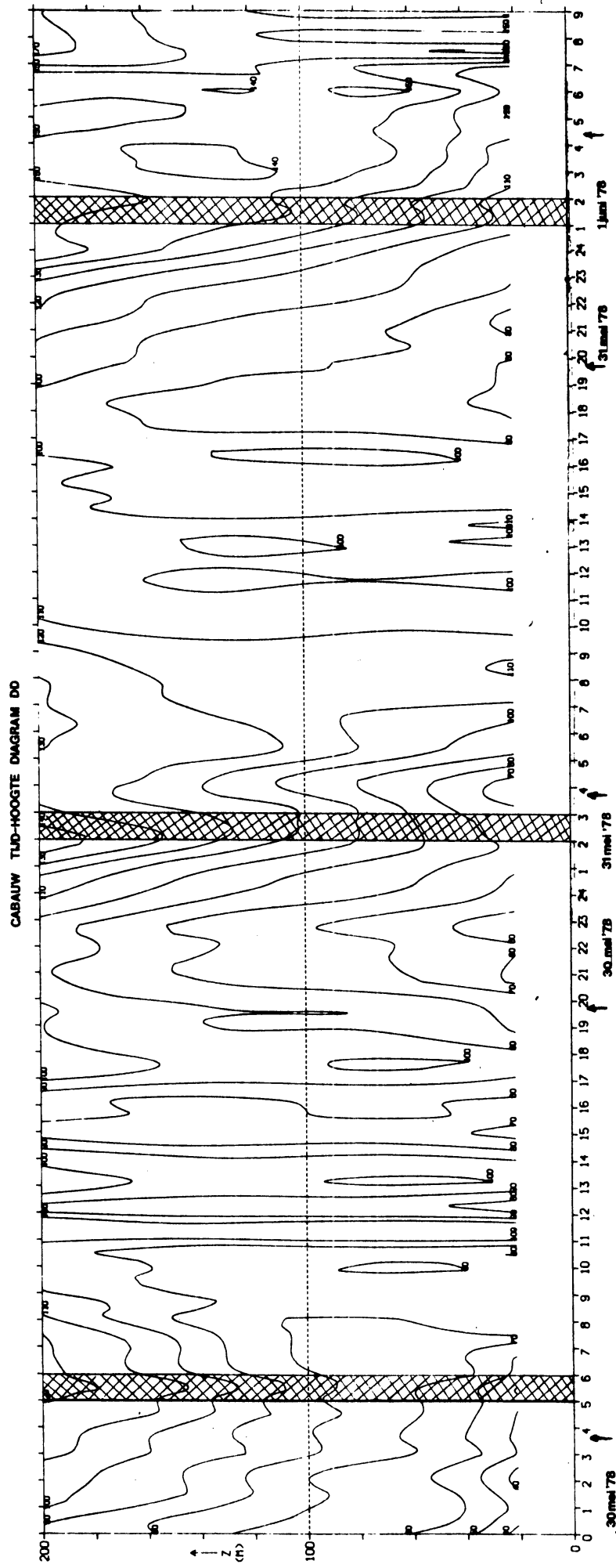


Fig. 8. Tijd-hoogte diagram van windrichting, 29 mei-1 juni 1978. Iso-
lijnen om de 10° . Aangegeven zijn de tijdstippen met grootste
verandering van windrichting met de hoogte.

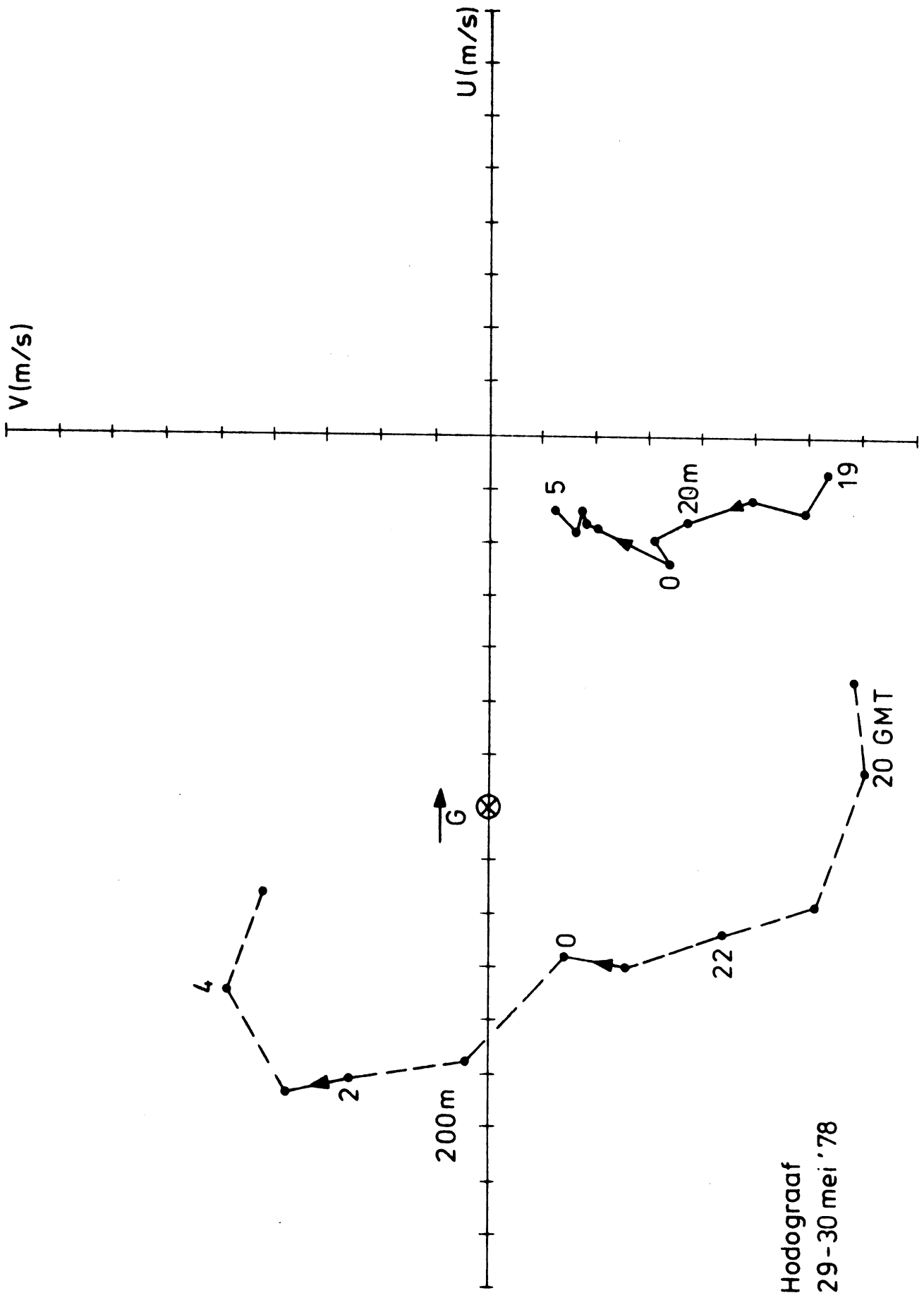


Fig. 9. Hodograaf 29-30 mei 1978, 200 en 20 m, Cabauw.

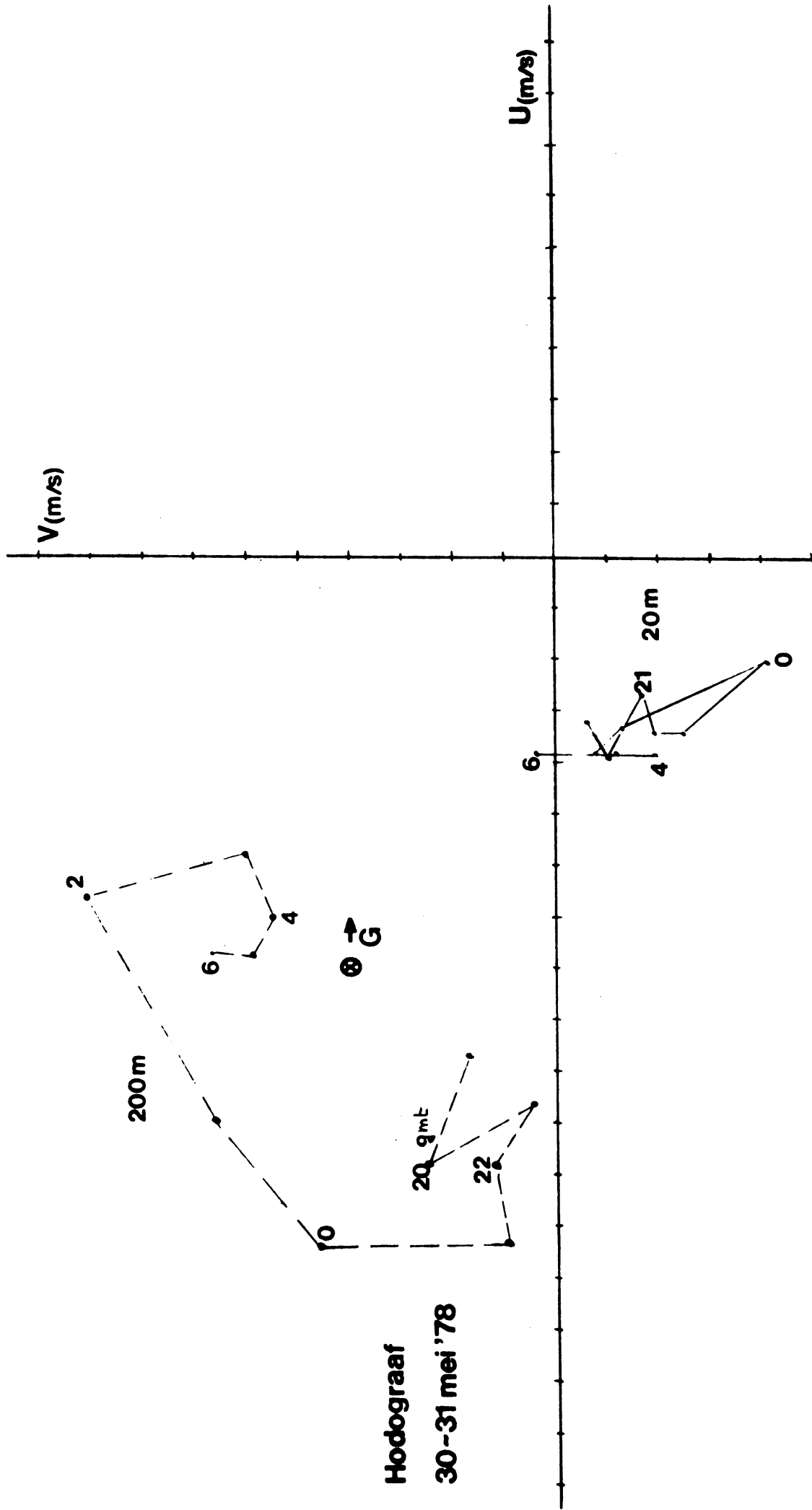
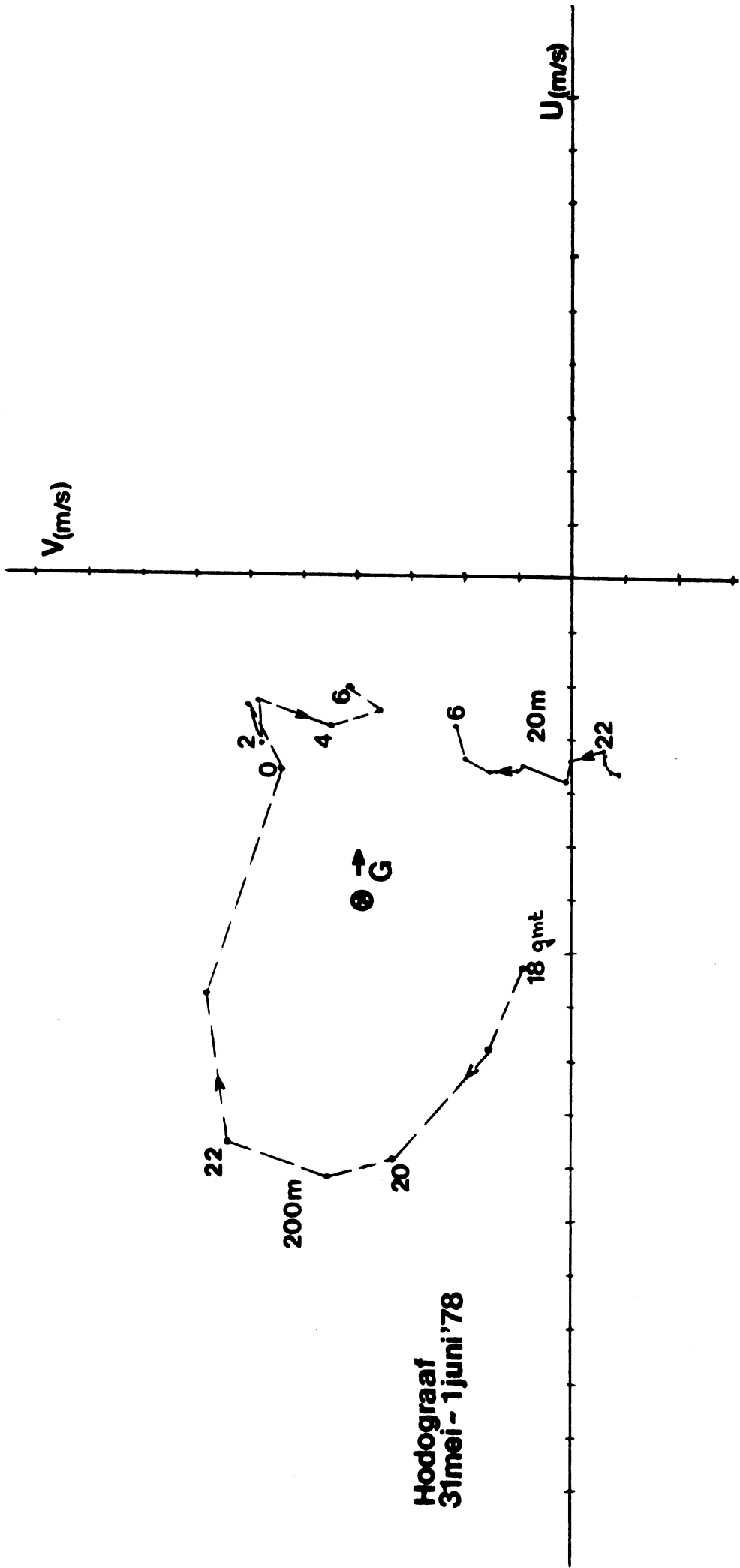


Fig. 10. Hodograaf 30-31 mei 1978, 200 en 20 m, Cabauw.



**Hodograaf
31 mei - 1 juni '78**

Fig. 11. Hodograaf 31 mei-1 juni 1978, 200 en 20 m, Cabauw.

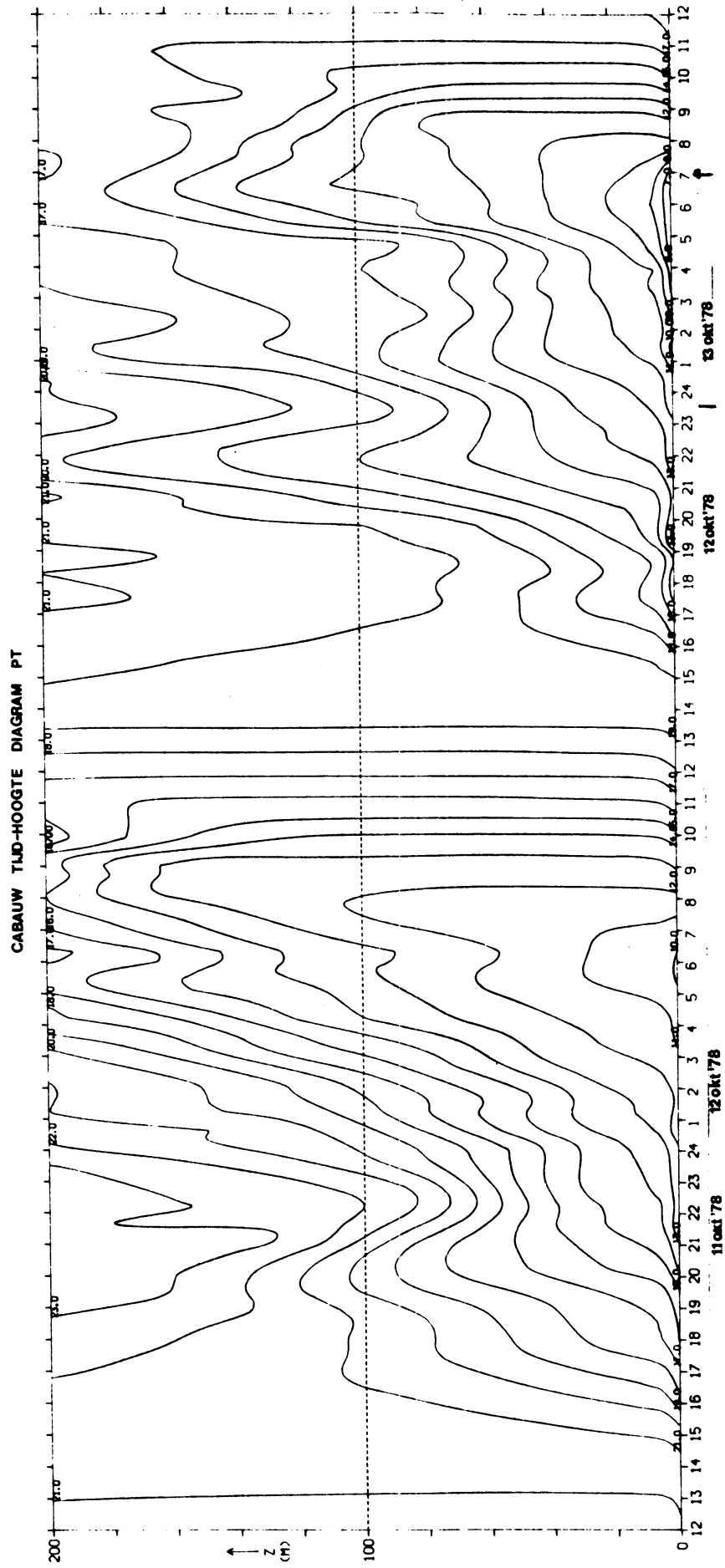
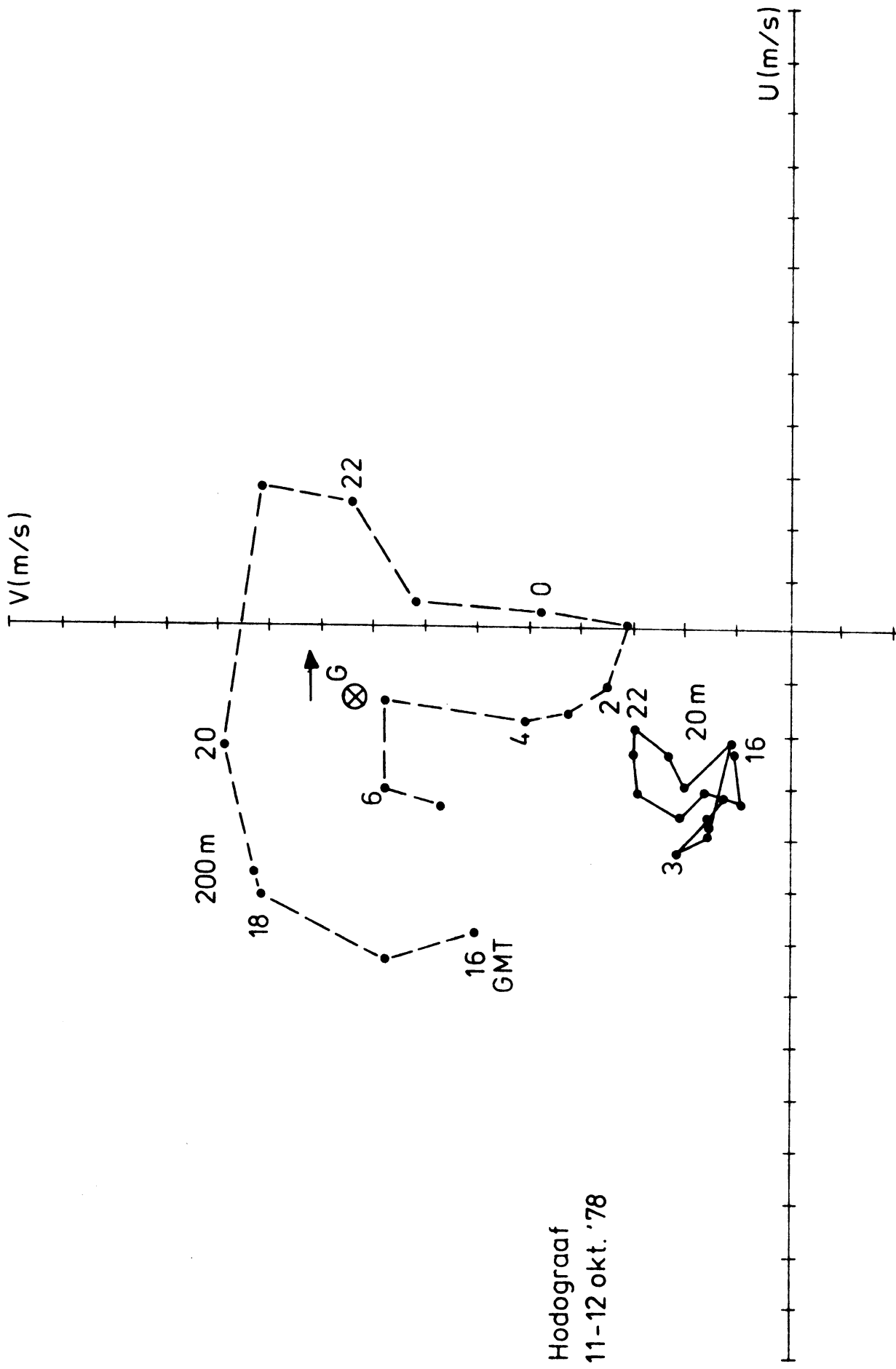


Fig. 12. Als Fig. 6, nu voor 11-13 oktober 1978.



Hodograaf
11-12 okt. '78

Fig. 15. Hodograaf 11-12 oktober 1978, 200 en 20 m, Cabauw.

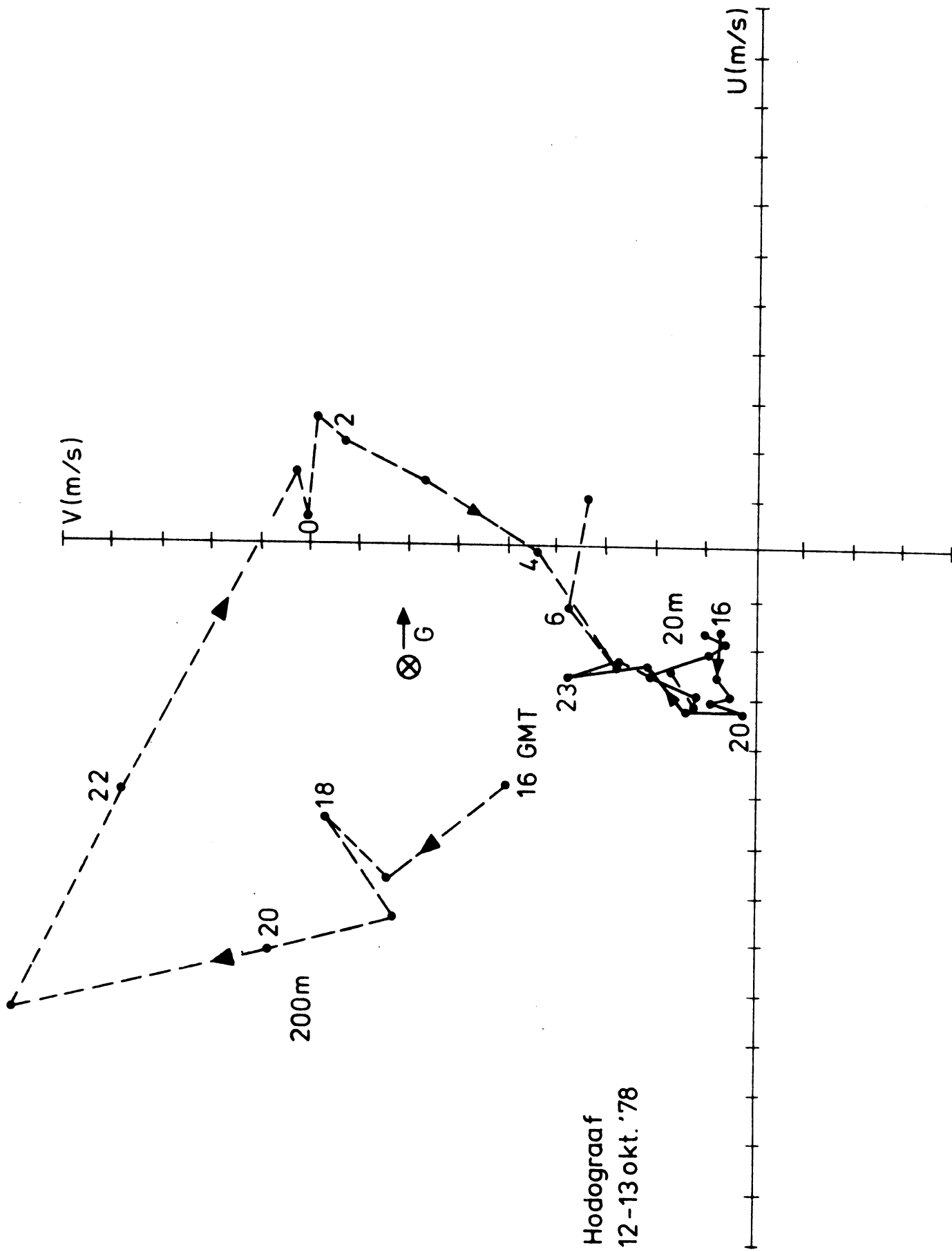


Fig. 16. Hodograaf 12-13 oktober 1978, 100 en 20 m, Cabauw.

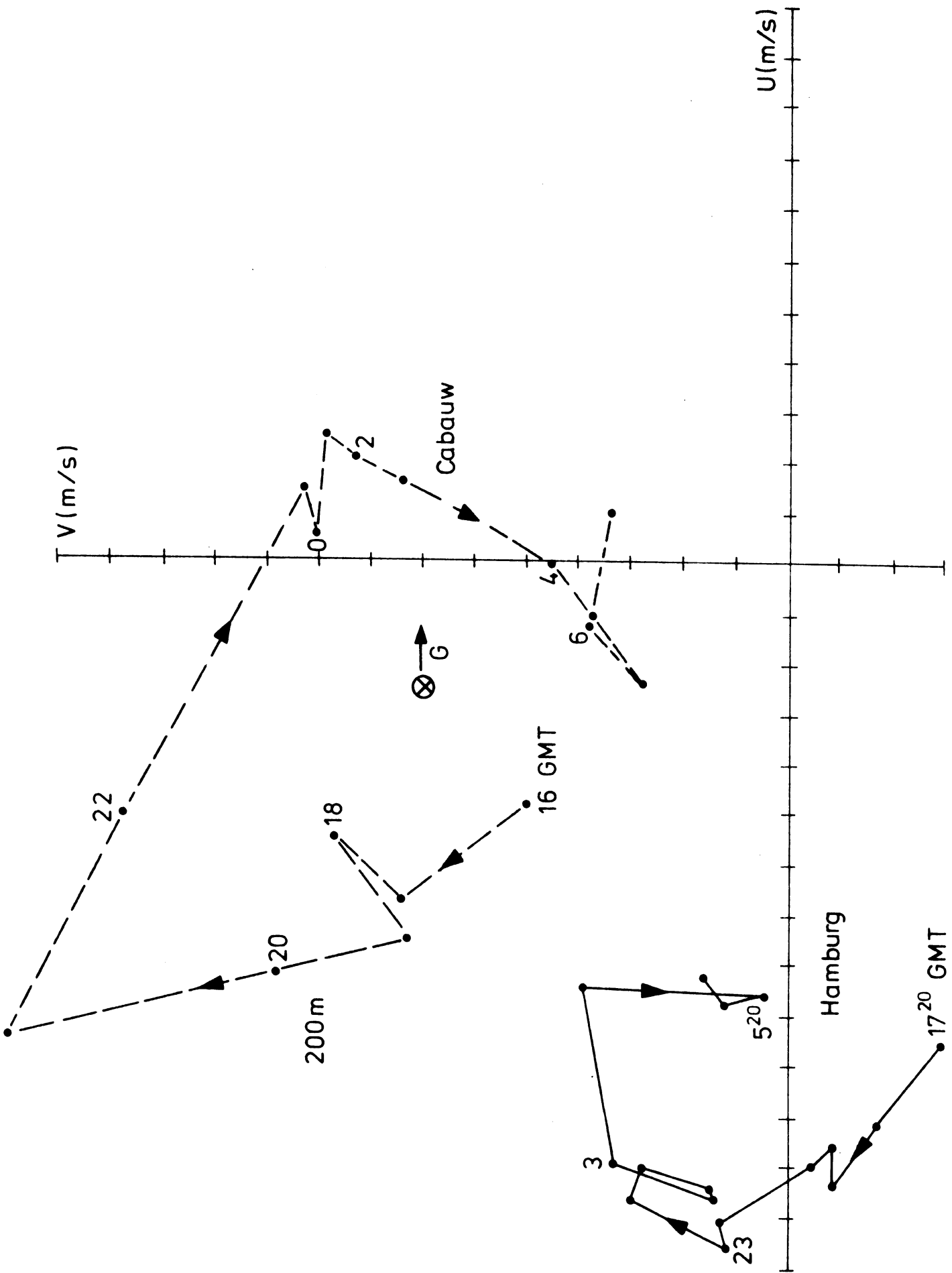


Fig. 17. Hodografen Cabauw en Hamburg, 200 m hoogte, 12-13 oktober 1978.