

**KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT**

WETENSCHAPPELIJK RAPPORT

SCIENTIFIC REPORT

W.R. 84 - 7

Dr. H.M. de Jong

Methoden van bewerking van rawinsonde metingen bij daling per parachute.



De Bilt, 1984

Publikatienummer: K.N.M.I. W.R. 84 - 7 (DM)

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
Dynamische Meteorologie
Postbus 201
3730 AE DE BILT
Nederland

U.D.C.: 551.507.361 :
551.501.8

ISSN : 0169-1651

Inhoud

	Abstract
	Samenvatting
0	Inleiding
1	De techniek van de sonde oplating bij gebruik van de Vaisala RS/21-12C sonde.
	1.1 De Bilt
	1.2 Op zee
2	Methodieken toegepast in De Bilt bij de normale rawinsonde bewerking.
3	De geopotential- en luchtdrukberekening en het belang van een goed referentiepunt.
4	Bewerking van parachute sonderingen.
	4.1 Gebruik van de basislijn informatie in het grondpunt.
	4.2 Gebruik van het eindpunt als referentiepunt.
	4.2.1 Gebruik van het kimduikpunt als referentiepunt.
	4.2.2 Gebruik van de radar hoogte in het eindpunt.
5	Generalisering van de geopotential berekening bij de bewerking van rawinsonde waarnemingen.
	5.1 Toepassingen van een integraal theorema op bewerkingen van parachute sonderingen.
	5.1.1 Gebruik van een synoptisch station als referentiepunt.
	5.1.2 Gebruik van standaarddrukvlakgegevens als referentiebasis.
	5.2 Introductie van referentie data sets.
6	Discussie en besluit.
7	Literatuur.
	Appendix
	A Bepaling van de kimduikhoogte.
	B Derivation of a line integral theorem.
	C Experimenten.

Abstract

Internationally interest is expressed in the operational consideration for the employment of selected systems of observation essential for the provision of the global data set. One of these selected systems in the Global Observing System comprises in situ measurements of rawinsondes which meet the upper air data requirements for temperature, wind and moisture.

For this selected system of rawinsondes the Commission of Basic Systems of WMO recommends (a) to promote research needed on techniques for merging satellite and in situ soundings in the analyses (b) to consider international coordination of procedures for processing the data (c) to investigate the application of automated techniques, especially the inclusion of Navaid techniques and (d) to investigate possibilities of "descent" soundings using automated systems (cf. [1], Appendix H).

This investigation is concerned with the last item of descent soundings.

At present descent soundings are not processed, presumably for the following reasons:

1. supposed degradation of the quality of observations
2. difficulties encountered in the data processing and data reduction
3. to avoid duplication.

The relatively high investments and costs involved in the launching of hundreds of rawinsondes daily may evoke the question whether the cost-benefit factor could be enhanced by considering also the use of the descent part of the rawinsonde observations.

What obstructs the use of descent soundings most are probably the difficulties encountered in the data processing. Like in the ascent there is a need in the descent part to have the disposal of an appropriate reference point and reference information in order to start and support the necessary computations. In the ascent part the reference information is provided by the "base line information" (terrain elevation, station pressure etc.). In the descent part, however, such information is difficult to obtain.

The reference point problem is an intricate problem and not easy to solve. With the tools of automation now available it appears, however, that this problem is within reach of a solution. After presenting a short review of the

automation methodology in use for more than a decade in De Bilt and a short description of what happens during a release of the Vaisala RS/21 sonde in an operational environment the problem of reference point information is clarified and discussed.

Some approaches to solve the problem are put forward afterwards.

A few of the suggested solutions turn out to be impracticable, others are useful under favourable conditions but the most promising are those based on a special computational approach diverting from the classical procedures used in rawinsonde processing schemes.

This computational approach rests on the interpretation of a special line integral theorem derivable from an elementary application of the equations of state and equations of motion in the free atmosphere (cf. Appendix B).

As this integral theorem allows a special interpretation making it valid not only along regular integration paths but also along branched curves (graph) and is applicable to observations provided by different types of observation systems (synoptic stations, satellites) one is able to select a variety of reference data points meeting the requirement of high quality data processing.

The feasibility of the proposed methods is demonstrated by the analysis of three parachute carried soundings, one over sea and two over land. See Appendix C.

Samenvatting

Dit rapport kan gezien worden als een bijdrage tot wat er o.a. aanbevolen is in de Commission of Basic Systems (CBS) van WMO om onderzoek te verrichten naar de toepassing van geselecteerde waarnemingssystemen die in de praktijk de creatie van "global data sets" van hoge kwaliteit bevorderen.

In concreto wordt door de CBS terzake van het rawinsonde systeem gesteld (a) research te bevorderen m.b.t. het gecombineerd gebruik van satelliet- en in situ sonderingen in analyses (b) de internationale coordinatie van procedures voor bewerking van de gegevens in beschouwing te nemen (c) de toepassing van automatiseringstechnieken te onderzoeken o.a. Navaid technieken en (d) de mogelijkheid na te gaan sonderingen in de daling (E.: "descent" soundings) te gebruiken.

Het onderzoek waarover hier verslag gedaan wordt haakt in op het laatste punt, in het bijzonder op de verwerking van aerologische data die nog ontvangen worden wanneer de sonde terugkeert naar de aarde per parachute of zelfs zonder.

Tot op heden blijven zulke waarnemingen veelal onaangeroerd. Vermoedelijk om drie redenen:

1. de vermeende degradatie van de kwaliteit van de metingen.
2. moeilijkheden die ondervonden worden bij de gegevensverwerking en data reductie.
3. het vermijden van duplicatie.

Met de moderne middelen van automatisering blijkt het lastige "referentiepunt" probleem te kunnen worden opgelost.

Na een kort overzicht van de automatiseringsmethodieken die meer dan een decade in De Bilt operationeel worden toegepast en een korte beschrijving van de gang van zaken bij radiosonde oplatingen in De Bilt en op OSV Cumulus van de Vaisala RS/21 sonde wordt de beschikbaarheid van voldoende nauwkeurige referentie-informatie onder de loep genomen. In het licht daarvan wordt een aantal mogelijke oplossingen aangedragen.

Sommige hiervan blijken ongeschikt te zijn voor een praktische toepassing, andere slechts bruikbaar onder bepaalde condities. De meest belovende zijn geënt op een nieuwe bewerkingsprocedure afwijkend van de klassieke rawinsonde procedures.

De nieuwe aanpak berust op de toepassing van een speciaal lijn integraal theorema dat herleidbaar is uit de bewegings- en toestandsvergelijkingen in de vrije atmosfeer (cf. Appendix B).

Aangezien het betreffende integraal theorema een interpretatie toelaat waardoor het niet alleen geldt voor reguliere integratie curven maar ook langs vertakte curven (graph, boom) en bovendien voor waarnemingen verkregen uit verschillende bronnen (synoptische stations, satellieten), wordt de keuze mogelijkheid van bruikbare referentie bases sterk vergroot.

De toepasbaarheid van verschillende voorgestelde methoden is beproefd aan de hand van drie parachute sonderingen, één boven zee en twee boven land, zie Appendix C.

0. Inleiding

Van de investeringen om het dagelijkse programma van de radiosonde dienst tot uitvoering te brengen heeft het de schijn dat de helft niet ten nutte gemaakt wordt. In De Bilt en op het weerschip Cumulus namelijk worden de registrering en bewerking van de sonde gegevens na het bereiken van het springpunt gestaakt.

Boven land daalt de sonde aan een parachute maar dat is meer uit het oogpunt van beveiliging dan om de waarneming te continueren. Op de OSV Cumulus laat men de extra ballast van een parachute geheel achterwege temeer omdat er geen volgradar voor windbepaling meer aan boord is.

Technisch is de daling per parachute geen belemmering voor het blijven functioneren van de meet sensors, het continueren van de peilingen met radar en het localiseren van de sonde met Navaid systemen zoals het Omega Navigatie Systeem.

Waarom men in de praktijk de zaak toch afsluit wordt gedictieerd door overwegingen van efficiënte bedrijfsvoering. Men acht het volgen en bewerken van de sonde na het springpunt, gelet op de korte spanne tijd die verloopt tussen het stijg- en daalgedeelte, een doublure terwijl voorts de sondering in de daalfase bijzondere eisen stelt t.a.v. de bewerking waaraan niet gemakkelijk te voldoen is.

Vooraf het laatste wordt hoog opgenomen aangezien de gedachte leeft dat de kwaliteit van de meting een degradatie ondergaat zodra de parachute de rol van waarnemingsplatform overneemt van de ballon. Elke sensor reageert op eigen, niet altijd reproduceerbare wijze op de omgeving waarin gemeten wordt, hetgeen duidelijk tot uiting komt in de noodzaak bij de bewerking van het materiaal een reeks correcties te moeten aanbrengen. Bij voorbeeld bij de meting van de luchttemperatuur correcties voor de effecten van calibratie, straling, hysteresis, Albedo, recorder correctie.

Ongetwijfeld zijn bij de parachute daling de correcties verschillend van die in de opgaande tak (ballon). Dit heeft te maken met factoren als (1) het niet gehinderd worden door de slipstroom achter de ballon of parachute (2) een gewijzigde stralingshuishouding (3) een verhoogde ventilatie snelheid en andere zaken.

Van andere aard zijn de moeilijkheden ondervonden bij de bewerking van de sonde gegevens in het daalgedeelte en de data reductie. Uiteraard worden

in de neergaande tak de berekeningen beheerst door dezelfde fysische- en dynamische betrekkingen als in de opgaande tak maar er ontbreekt feitelijk een betrouwbare referentiebasis waaraan de berekende waarden gerelateerd moeten worden. Deze moeilijkheden meester te worden is het doel van dit onderzoek.

Alvorens hierover verslag te doen wordt ingegaan op de techniek van de radiosonde waarnemingen die anno 1984 in gebruik is op het station De Bilt en op OSV Cumulus. Daarna volgt een korte samenvatting van de methodieken zoals deze al meer dan een decade in De Bilt met behulp van elektronische data processing worden toegepast.

1. De techniek van de sonde oplating bij gebruik van de Vaisala RS/21-12C sonde

Sedert 1945 zijn op het KNMI een drietal types radio sondes in bedrijf geweest. Na één van Engelse en één van Amerikaanse makelij is sedert vijf jaar de Finse sonde Vaisala RS/21-12C in gebruik.

In het kort wordt beschreven hoe één en ander bij de laatste sonde in de praktijk in z'n werk gaat met de nadruk op wat er in het daalgedeelte plaats vindt.

1.1 De Bilt

Een schets als weergegeven in Fig. 1 is voldoende om een algemeen beeld te geven van de huidige radiosonde oplatingen in De Bilt. In het stijgedeelte bestaat de "ballontrein" uit een nog niet ontplooid parachute, een radar reflector en de sonde. De ballon zwelt op tot een diameter van ongeveer 10 m bereikt is. Dit volgt gemakkelijk uit de gaswet. Karakteristiek is dat deze Vaisala sonde uitgerust is met een uitloop mechanisme dat het schakelen van de circuits van de meet sensors P, T en U en de ijkingen verzorgt. Een koord van ca. 100 m lengte, waaraan alleen de sonde bevestigd is, ontrolt zich met een snelheid van ongeveer 1 m min^{-1} . Dit resulteert in een schakelfrequentie van 8 à 10 contacten per minuut per circuit, ijksignalen inbegrepen.

Een automatische volgradar registreert ieder halve minuut de locatie-elementen van de ballon, waaruit o.a. de hoogtewind wordt afgeleid.

Na het springpunt volgt een stuk vrije val en opent de parachute zich.

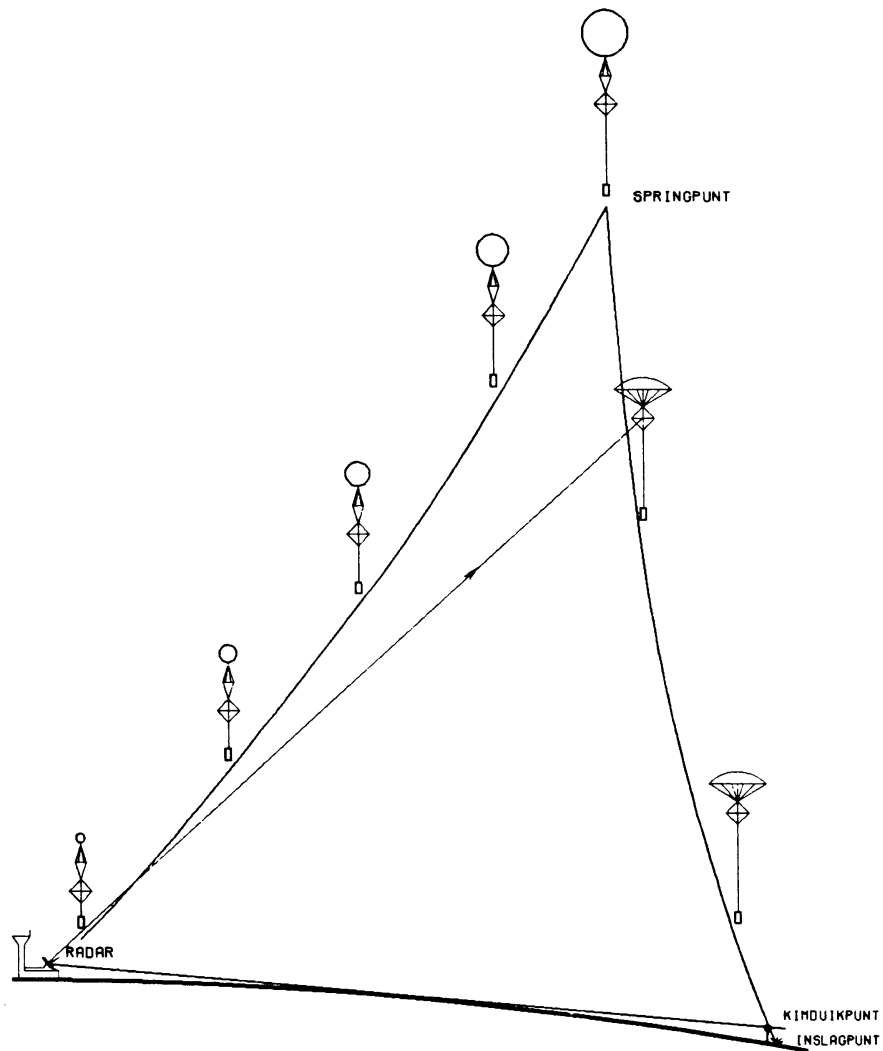


FIG.1 GEOMETRIE VAISALA RS21 SONDERING

De sonde blijft overigens normaal functioneren in de dalende tak. De daal-snelheid is doorgaans 2 à 3 keer zo hoog als de stijgsnelheid.

Er komt een eind aan de meting door vier mogelijke oorzaken (1) de batterij raakt uitgeput (2) het koord loopt niet verder uit (3) de sonde verdwijnt achter de kim ("kimduikpunt") (4) de sonde treft de bodem binnen het radiosonde ontvangstbereik ("inslagpunt").

De ontvangst van radio- en radar signalen behoeft niet op hetzelfde moment te stoppen.

Bij lage elevatie en rakelingse inval van de radarstralen treden buigingsverschijnselen op die bij bepaalde toepassingen hinderlijk kunnen zijn (zie 4.2.1).

1.2 Op zee

Op het weerschip Cumulus verloopt de sondering als boven land. Alleen de windbepaling geschiedt d.m.v. het Omega Navigatie Systeem en de bewerking is verder bijna volautomatisch, codering inbegrepen (CORA).

Er worden geen parachute en radar reflector meegevoerd. De afwezigheid van een parachute en radar reflector zou doen vermoeden dat de daling de vrije val benadert d.w.z. een valtijd tot het zeeoppervlak van 1 à 1.5 minuut van een hoogte boven 20 km. Maar de remmende werking van ballon relicten en van de sonde zelf is nog dusdanig groot dat de daling in werkelijkheid nog 15 à 20 minuten in beslag neemt. De werking van sensors alsmede de transmissie en registrering blijven voldoende intact om ook dan de radiosonde bewerking te kunnen voortzetten.

Een voordeel van snelle daling (ca. 900 m min^{-1} , bij terugkeer) is dat de ventilatie snelheid hoog is en de actie radius waarbinnen radio ontvangst nog mogelijk is aanzienlijk bekort wordt. Het eindpunt van de ontvangst is dan veelal het kimduikpunt.

2. Methodieken toegepast in De Bilt bij de normale rawinsonde bewerking

Waar het in de operationele dienst om gaat is het herleiden van alle bovenluchtgegevens die ingecodeerd worden in één van de TEMP codes (FM 35-V TEMP, FM 36-V TEMP SHIP, FM 37-VII TEMP DROP^{*)}).

Deze gegevens dienen gerelateerd te worden aan een verticale coördinaat waarvoor de luchtdruk of de geopotentieel dienst kan doen. De regelingen die geformuleerd zijn terwille van de codes en de algorithmes die ontwikkeld zijn om aan de regelingen te voldoen zijn gebaseerd op een aantal begrippen uit de dynamica, thermodynamica en statica zoals de hydrostatische vergelijking, de definitie van de geopotentiaal, gaswet, virtuele temperatuur, dauwpunt etc.

De programmatuur die al meer dan een decade operationeel is in De Bilt, is ontworpen aan de hand van standaard procedures, algorithmes, regels, functies, expressies en constanten als vervat in het geregulariseerde materiaal van WMO (Manual on Codes, WMO No. 36, International Meteorological Tables, WMO No. 188, ICAO Standard Atmosphere, etc.).

*) FM 37-VII TEMP DROP is speciaal bestemd voor het incoderen van gegevens van "drop sondes" die worden neergelaten uit een vliegtuig of vrachtballon.

Daar komt bij dat de architectuur van het geheel een unieke constructie herbergt die toestaat dat nog een keuze te maken valt tussen verschillende bewerkingsmethodieken. Mogelijk gemaakt door het feit dat bij rawinsondes een radiosondemeting aangevuld wordt met een radarmeting en het aantal meetvariabelen daardoor groter is dan strikt noodzakelijk voor de sonde uitwerking. Met de onafhankelijke metingen van luchtdruk P , temperatuur T , vochtigheid U en radarhoogte c.q. geopotentiaal H is het systeem als zodanig overbepaald.

Voegt met T en U samen tot de virtuele temperatuur T_v dan komt het erop neer dat de sonde uitwerking mogelijk wordt op basis van drie combinaties: $\{P, T_v\}$ (Stüve methode), $\{T_v, H\}$ (rasonneer methode) en $\{P, H\}$. Bij exacte metingen zouden uiteraard deze drie methodieken dezelfde uitkomsten leveren, maar een fouten-analyse wijst uit dat de uitkomsten juist sterk gaan verschillen indien de metingen niet exact zijn. Het maakt dan veel uit welke methodiek men verkiest binnen een gegeven bereik van de meting. In de troposfeer heeft de Stüve methode de voorkeur, in de stratosfeer de rasonneer methode. De combinatie $\{P, H\}$ moet op grond van de fouten-analyse sterk worden ontraden.

Een interessant gegeven is dat de theorie van vereffening in overbepaalde systemen [2] leert dat er zelfs een combinatie $\{P, T_v, H\}$ bestaat die in de zin van de fouten-voortplantingswetten optimaal is in het hele meetbereik. De uitkomsten van de "vereffeningsmethode" $\{P, T_v, H\}$ zijn nauwkeuriger dan die van de $\{P, T_v\}$, $\{T_v, H\}$ en $\{P, H\}$ methodes afzonderlijk in het gehele meetbereik.

De genoemde programmatuur bevat faciliteiten waarmee men in staat is één der methodieken naar wens te genereren, met inbegrip van de vereffeningmethode. Voor een uitvoeriger resumé zij verwezen naar [3].

In principe kan de programmatuur ook worden ingezet om de rawinsonde bewerking na overschrijding van het springpunt voort te zetten. Het is echter van wezenlijk belang dat men in het daalgedeelte over een even betrouwbaar en nauwkeurig referentiepunt kan beschikken als in het ballongedeelte.

In dit rapport worden middelen aangedragen om het "referentiepunt probleem" tot een oplossing te brengen. De programmatuur werd zodanig gemodificeerd dat de diverse oplossingen op hun bruikbaarheid getoetst konden worden (Appendix C).

3. De geopotential- en/of luchtdrukberekening en het belang van een nauwkeurig referentiepunt

Wat in de rawinsonde uitwerking in de $\{P, T_v\}$, $\{T_v, H\}$ en $\{P, T_v, H\}$ modes centraal gesteld wordt is de geopotential en/of luchtdrukberekening.

De relatie

$$dH = -RT_v d \ln p \quad \text{of} \quad (1)$$

$$d \ln p = - \frac{1}{RT_v} dH \quad (2)$$

speelt hierbij een cruciale rol. Dit omdat alle bovenluchtgegevens in de karakteristieke- en standaarddrumniveaus, tropopauze etc. worden gerelateerd aan de berekende geopotential hoogte of aan de luchtdruk.

(1) en (2) dienen geïntegreerd te worden vanaf zeeniveau maar dat is in de praktijk niet mogelijk, zelfs niet boven zee. De integratie is wel te bewerkstelligen door te beginnen bij de terrein oplaathoogte, door het grondpunt in het station als integratiegrens te nemen en, in geval van de te berekenen geopotential de terrein elevatie (gemiddelde van de hoogte van het terrein boven zeeniveau in de onmiddellijke omgeving van het station) algebraïsch erbij op te tellen (zie WMO No. 9, Vol. A).

In de $\{P, T_v\}$ mode of Stüve methode berekent men uiteindelijk de absolute geopotential hoogte d.m.v.

$$H = H_s + \int_P^{P_s} RT_v d \ln p \quad (3)$$

waarin H_s de terrein elevatie is of de hoogte van het dek van een weerschip boven zeeniveau. P_s is de stationsluchtdruk.

De terrein elevatie H_s die uit andere bron dan de rawinsonde meting bekend is, tezamen met de stations luchtdruk, temperatuur en vochtigheid vormen de basislijn informatie in het grondpunt. In een normale uitwerking dient dus het grondpunt als referentiepunt voor de integratie van (1).

In de $\{T_v, H\}$ mode of rasonneer methode wordt de luchtdruk berekend middels:

$$\ln P = \ln P_s - \int_{H_s}^H \frac{1}{RT_v} dH \quad (4)$$

Hier is P_s de luchtdruk zoals afzonderlijk gemeten op het station (stations druk) en H_s de terrein elevatie als boven omschreven bij (3). Ook

nu speelt de basislijn informatie (H_s , P_s , T_s , U_s) de rol van referentiepunt informatie.

- noot: 1. terrein elevaties zijn vermeld in volume A van WMO No. 9: Observing Stations. Onlangs is komen vast te staan dat het document onduidelijk is op het punt van terrein elevaties wanneer er sprake is van colocatie van synoptische- en rawinsonde stations bij ongelijke elevaties.
2. ook bij het uitwerken van satelliet profielen is de beschikbaarheid van betrouwbare referentiepunt informatie een vereiste. Het is een ernstige tekortkoming dat boven land in het grondpunt van een profiel de terreinhoogte niet met voldoende precisie bekend is (topografie) d.w.z. op enkele meters nauwkeurig. Een ander bezwaar is dat de "emissiviteit" van de bodem in het grondpunt onvoldoende nauwkeurig bekend is.

Terloops zij opgemerkt dat het irrelevant is waar precies het referentiepunt van integratie van (1) of (2) zich bevindt. Elk punt in een P- of H-interval kan hiervoor dienst doen mits men onafhankelijk van de rawinsonde waarneming zelf de bijbehorende startwaarde van H of P in dit punt maar kent. Zulks is van primair belang bij parachute sonderingen.

Uiteraard dient de startwaarde voldoende nauwkeurig te zijn: voor H_s een paar gpm bij het aardoppervlak tot beter dan 1 gpdam bij de tropopauze, voor P .5 tot 1 h Pa in het hele bereik van de troposfeer. Referentiepunten boven de tropopauze zijn veelal onbruikbaar.

Indien men niet over een referentiepunt beschikt of één met te geringe nauwkeurigheid dan is te overwegen uit te zien naar referentiepunten van andere waarnemingsbronnen die de rol van integratiegrens kunnen overnemen. Daartoe is het noodzakelijk over een integratieproces te beschikken dat de bewerking beheerst van informatie uit meerdere bronnen tegelijk.

4. Bewerking van parachute sonderingen

Zoals reeds in het voorgaande vermeld zijn de bewerkingsmethodieken in het stijgedeelte ook toepasbaar in het daalgedeelte mits een accuraat referentiepunt voor de berekeningen beschikbaar is. Vöðröndersteld wordt dat de meetgegevens in het daalgedeelte (per parachute) aan dezelfde specifieke kwaliteitseisen voldoen als in het ballon gedeelte.

In het volgende worden enkele oplossingen m.b.t. het referentiepunt-probleem voor parachute sonderingen aangegeven.

4.1 Gebruik van de basislijn informatie in het grondpunt

De integratie van (1) in de opgaande tak (ballonbaan) kan na het springpunt gewoon na de top worden voortgezet terwijl de informatie van het springpunt nog werkzaam is. Dit heeft het nadeel echter dat de gewoonlijk sterk met de hoogte toenemende fout in H zich blijft manifesteren na het springpunt en nog verder toeneemt in het daalgedeelte.

noot: een afzonderlijke bewerking van de parachute sondering met gebruikmaking van het springpunt als referentiepunt is een alternatieve aanpak die identieke resultaten oplevert. De startwaarde in het springpunt is doorgaans slechts bekend tot op enkele honderden meters nauwkeurig. Bijv. een fout in de druk van 1 h Pa op 25 h Pa (ca. 25 km hoogte) resulteert in een fout van meer dan 250 m in de startwaarde.

Een voordeel is dat bij deze methode geen baanberekening vereist is maar de methode is gelet op de onnauwkeurige resultaten verder onbruikbaar.

4.2 Gebruik van het eindpunt als referentiepunt

Als "eindpunt" E verstaan we het punt waar geen radiosignalen meer ontvangen worden of waar niet meer geschakeld wordt. Onder welke omstandigheden dit gebeurt is uiteengezet in 2.1.

Theoretisch is het eindpunt als referentiepunt geschikt indien de geopotentiaal hoogte H_E tot enkele meters nauwkeurig bekend is.

Twee gevallen

4.2.1 Gebruik van het kimduikpunt als referentiepunt

Indien E het kimduikpunt is dan is in theorie de hoogte H_E zeer nauwkeurig te bepalen m.b.v. de radar-range (zie bijlage A). Het doet er weinig toe of de identiteit van punt E als kimduikpunt uit het gedrag van de radio-ontvangst van de meetsignalen volgt of uit de ontvangst van radar golven. Wel dienen de refractieverschijnselen ver-

waarloosbaar klein te zijn en dienen zich geen obstakels voor te doen aan de kim zelf.

Boven zee zou de methode het meest succesvol kunnen zijn ware het niet dat er tegenwoordig, althans op de Cumulus, geen radar meer aan boord is.

Bij één van de te beschrijven experimenten (Appendix C) is een parachute sondering bewerkt voor OWS Lima waar de afstand tot het kimduikpunt indirect bepaald werd uit een berekening van de ballon/parachute-baan middels Navaids bovenwind data.

Het al of niet vóórkomen van aanzienlijke refractievervalsingen blijft een onzekere factor en maakt de methode kwetsbaar.

4.2.2 Gebruik van de radarhoogte in het eindpunt

Wanneer de parachute gevolgd wordt met radar is H_E te herleiden uit bemonsteringswaarden van de locatie van de reflector. De nauwkeurigheid laat echter te wensen over. Op meer dan 100 km afstand heeft een miswijzing van de elevatie van 0.1° een fout in H_E tot gevolg van meer dan 150 gpm. Bovendien zijn er onzekerheidsmarges als de lengte van het uitgerolde koord, het tijdstip van de kimduiking en dergelijke. Dit alles maakt dat de methode alleen bruikbaar kan zijn als het inslagpunt zich nog dicht bij het station bevindt bijv. bij zwakke bovenwind.

5. Generalisering van de geopotentialberekening bij de bewerking van rawinsonde waarnemingen

Hoewel in het voorgaande voor wat de keuze van een referentiepunt betreft voor integratie van de hydrostatische vergelijking (1) of (2) enkele voorstellen werden gedaan is er geen bij die in alle opzichten aan de gestelde nauwkeurigheidseisen en betrouwbaarheid kan voldoen.

Dan verdient het aanbeveling naar een alternatieve oplossing uit te zien. Zulks is mogelijk door toepassing van een speciaal integraaltheorema. Dit theorema afgeleid uit elementaire vergelijkingen uit de statica en thermodynamica is te vinden in Appendix B.

Dit theorema, voor vele doeleinden te gebruiken, blijkt bij nadere beschouwing zich uitstekend te lenen voor toepassing in het onderhavige referentiepunt probleem.

De belangrijkste gevolgtrekking in Appendix B is dat, gegeven een willekeurige curve Γ in de atmosfeer tussen twee punten A en B, het geopotentiaal verschil zich laat berekenen uit

$$H_B - H_A = \int_A^B f \cdot (vdx - udy) + \int_A^B R T_v d \ln p \quad (5)$$

Het geopotentialverschil is samengesteld uit een bijdrage (eerste term rechts) van de component van de geo-wind normaal op de horizontale projectie van de curve Γ en een bijdrage (tweede term) van de hydrostatische vergelijking berekend langs de curve Γ . (5) is alleen toepasbaar in extra tropische gebieden.

Past men (5) toe bij de bewerking van ballon- en parachute sonderingen dan kan men twee gevallen onderscheiden:

- a) de curve Γ is de verticaal door het station
- b) de curve Γ valt samen met de ballon/parachute-baan.

In beide gevallen verdwijnt de eerste term rechts, immers de component van de wind normaal op Γ is in het eerste geval triviaal nul, in het tweede eveneens omdat de ballon en de parachute met de wind meedrijven.

Blijkbaar reduceert de formule (5) zich bij normale radiosonde waarnemingen tot de algemeen gebezigde relatie (3).

Het theorema wordt interessant als Γ een curve is die data punten van verschillende origine en verschillende waarnemingsbronnen verbindt.

Het theorema is te interpreteren voor willekeurige reeksen waarnemingen ongeacht door welke systemen de waarnemingen worden verkregen. Indien verschaft door waarnemingsplatforms zoals vliegtuigen, ballons, parachutes en satellieten vormen de banen zelf een onderdeel van de integratie curve en moet bij de geopotentialberekening rekening gehouden worden met de baanelementen.

Dat ballons en parachutes een uitzondering hierop maken komt door het wegvallen van de geo-wind term in (5). Terwille van de economie van de bewerking wordt in de praktijk dan volstaan met de keuze van de verticaal door het station als integratieweg.

noot: zou men bij de conventionele rawinsonde uitwerking met de computer de baan meeberekenen aan de hand van wind data en ballonstijgsnelheid en/of parachute daalsnelheid of zou men eenvoudig de baanelementen afleiden uit radarpeilingen dan zouden de aerologische waarnemingen gerelateerd kunnen worden aan de juiste posities van de waarnemingen en dit zou de

data coherentie in WWW netwerken bevorderen. Er bestaan echter geen voorzieningen in de TEMP en PILOT codes deze extra informatie in te coderen. Dit geldt evenzeer voor de tijd van waarneming. Ook rawinsonde waarnemingen zijn asynoptisch (zie Appendix C.1).

Waar in het theorema de keuze van een integratieweg essentieel is kan worden opgemerkt dat het in mathematische zin er niet toe doet of de curve vertakt is of niet. In de context van de graph theorie kan zulk een vertakte curve als boom geïdentificeerd worden. Omdat het theorema voor boomstructuren (E.: tree) onverminderd van kracht blijft opent dit het perspectief zeer concrete toepassingen te vinden in de meteorologische praktijk indien sprake is van combinaties van waarnemingssystemen (zie 5.2).

Ook bij de algemene aanpak van het theorema is de beschikbaarheid van een referentiepunt een hoofdvereiste, maar de grotere vrijheid in de keuze van zulk een referentiepunt brengt het hoofdprobleem dichter bij een oplossing.

5.1 Toepassingen van het integraal theorema op bewerkingen van parachute sonderingen

Indien men de integratie (5) introduceert behoeft het referentiepunt niet meer een datapunt te zijn van de rawinsonde waarneming zelf.

Enkele keuzes:

5.1.1 Gebruik van een synoptisch station als referentiepunt

Voorgesteld wordt om de geopotentialberekening uit te voeren met behulp van de integraal (5) en een synoptisch station (of meerdere, zie 5.2) in de nabijheid van het eindpunt E als referentiepunt te nemen, zie Fig. 2.

De bewerkingsmethode wordt dan een graph methode waarbij de integratieweg Γ bestaat uit de parachutebaan en het verbindingsstuk van het eindpunt E en het synoptisch station S.

De parachutebaan is (1) te herleiden uit radar data of (2) te berekenen uit bovenwind gegevens. De waarneming van het synoptisch station dient naast de grondgegevens P, T en U ook de terreinhoogte, de geografische coördinaten en de grondwind te bevatten.

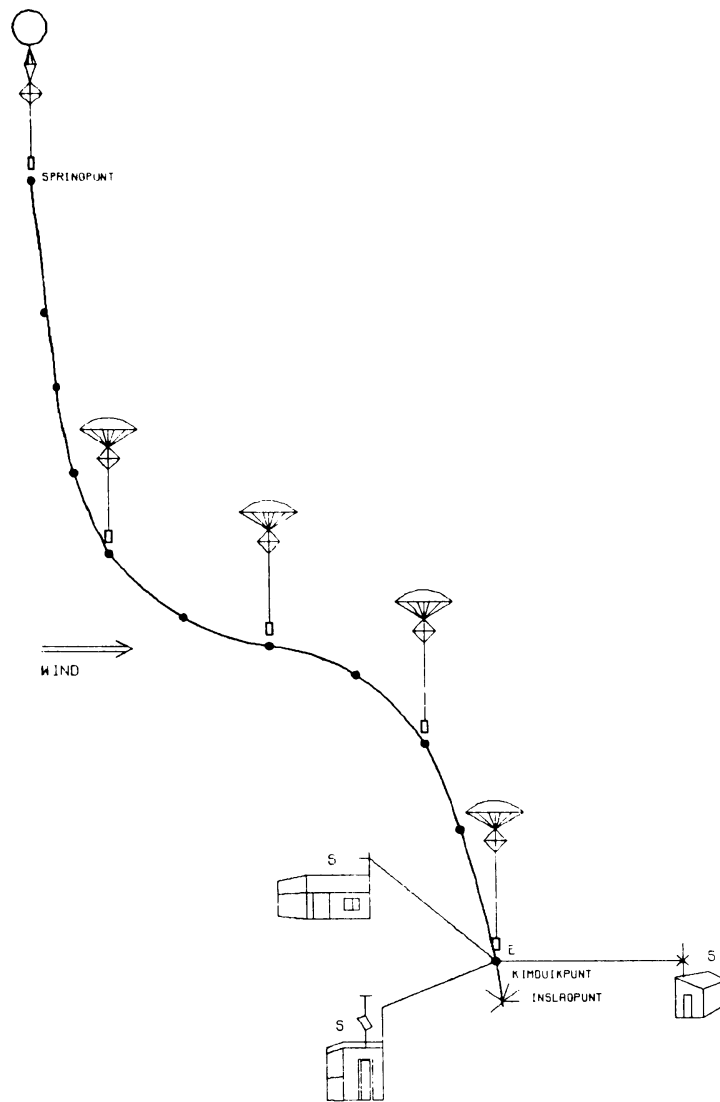


FIG.2 GEOMETRIE BIJ GRAPH METHODE

Beschouwt men de formule (5) dan levert de geo-wind term alleen een bijdrage over het segment \overline{ES} . Weliswaar is de keuze van het synoptisch station vrij maar het verdient uiteraard wel aanbeveling het meest nabije station bij het eindpunt van de parachutebaan te kiezen. Zelfs het grondpunt in het radiosonde station zou kunnen worden gekozen als referentiepunt voor de parachute sondering indien het eindpunt E niet te ver van het station is verwijderd.

De resultaten van experimenten met deze graph methode komen ter sprake in Appendix C.

5.1.2 Gebruik van standaarddrukvlakgegevens als referentiebasis

Aangezien vertakte integratiewegen toelaatbaar zijn kan men een curve Γ nemen bestaande uit de parachutebaan en een verbinding tussen een punt op de ballonbaan (niet de top) en een punt op de parachutebaan, zie Fig. 3.

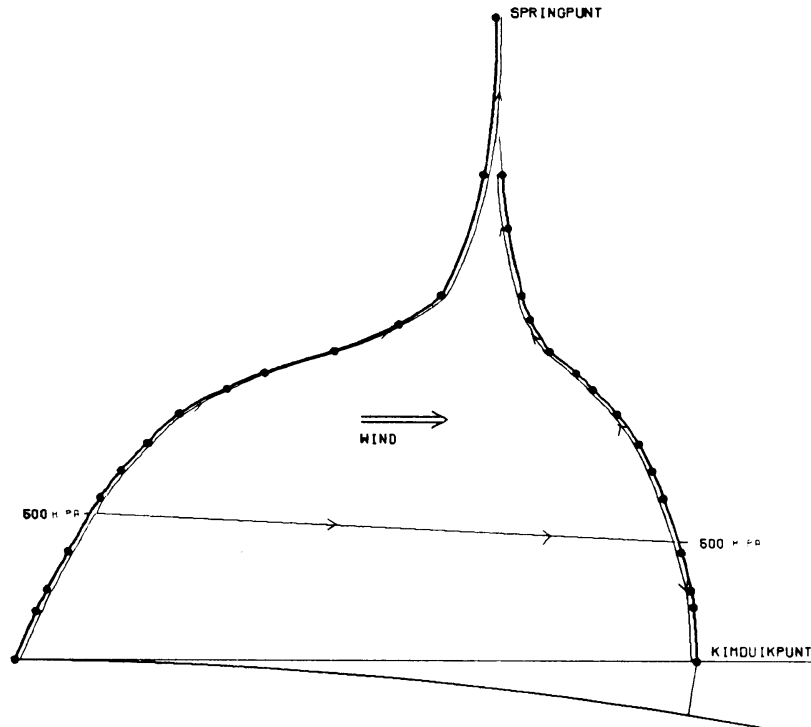


FIG.3 INTEGRATIEWEG M.B.V. 500 MB KOPPELING

Het punt op de ballonbaan dient als referentiepunt voor de integratie. Maar om het even kan men de verbinding opvatten eenvoudig als verbinding tussen de ballon- en parachutebaan zelf zodat men (5) toepast in een boom met het grondpunt als referentiepunt en de basislijn informatie om de integratie te starten.

In principe is elk punt op de ballonbaan acceptabel maar een standaarddrukniveau heeft gezien de nauwkeurigheid van de gegevens sterk de voorkeur boven een karakteristiek niveau.

Bovendien is het aan te raden de verbinding aan te brengen binnen de divergentievrije zone zo tussen 400 en 600 hPa om ageostrofische effecten te onderdrukken!

De bewerking in de ballon-parachute constellatie als hier omschreven en getoond in Fig. 3 kan gezien worden als aanvullend op de

bewerkingsmethode van parachute sonderingen in sectie 4. Het is tevens de beste.

- noot: 1. onder omstandigheden is het beter de verbinding tussen stijg- en daaltak nog wat lager aan te brengen dan rond ca. 500 h Pa, indien namelijk systematische fouten in het spel zijn met een in hoogte toenemende fout in de geopotentialen.
2. in sectie 3 werd genoteerd dat het bepalen van satellietprofielen gedetailleerde informatie behoeft boven land van de topografie en de emissiviteit van de bodem. Hierin wordt in onvoldoende mate voorzien.

Het idee wordt hier geopperd zulke gegevens in het geheel niet te gebruiken en daarvoor in de plaats een geschikter referentiebasis te nemen zoals standaarddrukvlakgegevens van rawinsonde oplatingen in de directe nabijheid van satellietprofielen of gegevens van synoptische stations in de directe nabijheid van de profielen.

Daartoe dient de methodiek van bewerking van deze profielen geënt te worden op integraal theorema (5).

5.2 Introductie van referentie data sets

Overwegingen van betrouwbaarheids- en nauwkeurigheidseisen bij toepassing van het integraaltheorema doen vermoeden dat het introduceren van meerdere referentiepunten stabiliserend kan werken op de kwaliteit van de rekenresultaten.

Het is mogelijk dit te realiseren door in de integratie curve meerdere synoptische stations als referentiepunten op te nemen. Schematisch is dit al in Fig. 2 aangegeven waar Γ een boom is bestaande uit de parachutebaan en de verbindingen van het eindpunt met drie stations.

Echter, wanneer men integreert over Γ , beginnend in één van de stations, dan zullen de en passant berekende geopotentialen in de andere synoptische stations veelal afwijken van de aldaar bekend veronderstelde terrein elevaties. Dit maakt het noodzakelijk na integreren een proces van vereffening op alle gevonden geopotentialen waarden in werking te zetten zodanig dat in de synoptische stations de terrein elevaties in ieder geval gehonoreerd worden.

Of nog neutraler, wanneer de integratie wordt gestart in een willekeurige vertex van de vertakte curve terwijl in dit punt de geopotentialen (voorlopig) op een nulwaarde wordt gezet dan dient na het integreren een

aanpassing te worden bewerkstelligd zodanig dat de aangepaste geopotentialwaarden ook nu de terrein elevaties in de synoptische stations honoreren.

De volgende methode is toegepast in één van de gerapporteerde experimenten (cf. Appendix C).

Stel men heeft s synoptische stations S_j ($j = 1 \dots s$) ingeschakeld en stel k karakteristieke punten K_i ($i = 1 \dots k$). De boom waarlangs geïntegreerd wordt met (5) heeft de punten K_i en S_j als vertices. Met (5) berekent men eerst de geopotentialen H' uit in de punten K_i en S_j uitgaande van een willekeurig startpunt en voorlopig met 0-waarde voor de geopotential in dit punt. De berekende waarden voor H' in de vertices K_i en S_j zijn H'_{K_i} ($i = 1 \dots k$) en H'_{S_j} ($j = 1 \dots s$).

Vervolgens wordt de aanpassing begonnen door H' te vermeerderen met een gewogen gemiddelde van de in de eerste stap gevonden afwijkingen van de geopotentialen H'_{S_j} en de referentiewaarden (terreinhoogtes) H_{S_j} in de

synoptische stations:

$$H'' = H' + \frac{\sum_{j=1}^s a_j^{-\alpha} (H_{S_j} - H'_{S_j})}{\sum_{j=1}^s a_j^{-\alpha}} \quad (6)$$

a_j vertegenwoordigt een "afstandsfunctie" tussen een willekeurige vertex en het synoptisch station S_j . In de boom kan men "afstand" preciseren door bijv. de "lengte" van de altijd in een boom aanwezige (éénduidige) weg tussen twee vertices te nemen. Men kan voor α_j ook simpelweg de euclidische afstand tot S_j substitueren. De exponent α regelt de afstandsinvloed van de gewichtsfactoren.

Het is duidelijk dat de formule voor H'' in de synoptische stations voor alle α metterdaad de waarde H_{S_j} honoreert, immers:

$$H''_{S_j} (a_j=0) = H_{S_j}$$

Overigens is het effect van de vereffening gering, enkele meters vermoedelijk, in afhankelijkheid van de constellatie van de stations, hun onderlinge afstanden e.d.

Enkele toepassingen:

- a. Indien $s=1$ dan is men terug bij de toepassing zoals uiteengezet in 5.1.1. Als het radiosonde station tevens synoptisch station is - bij gelijke terrein elevatie - dan reduceert de methodiek zich tot de conventionele.
- b. Men kan een referentie data set ook specificeren voor alleen het ballongedeelte. Men kan hiermee empirisch de kwaliteitsaspecten onderzoeken van de methode. Heeft men voor de synoptische stations $S_j (j=1...s)$ afzonderlijk of voor combinaties van deze de berekeningen uitgevoerd dan geeft een vergelijking van de uitkomsten met de normale gecodeerde een indruk van de data consistentie, bias en variantie of RMS fout (Appendix C).
- c. Een referentie data set kan ook worden geïntroduceerd voor het totaal van de ballon en parachute sondering mits een verbinding tot stand gebracht wordt tussen de opgaande en neergaande tak hetzij d.m.v. een koorde of eenvoudig via de top.
- d. Een nog algemener aanpak is te realiseren door de integratie curve T twee of meer radiosonde oplatingen te laten omvatten. Dit leidt er zelfs toe dat men in staat gesteld wordt een heel netwerk van rawinsonde waarnemingen met één activering van een computerprogramma door te rekenen. Proeven zijn op dit punt succesvol gebleken waarbij vooral de verbetering van de data coherentie opviel. Dat de data coherentie bevorderd wordt is enigszins geforceerd omdat ook hier een operatie van vereffening nodig blijkt te zijn.
De integratiecurve is hier een boom bestaande uit de trajectorieën van de ballons en/of parachutes verbonden door koorden bij voorkeur weer binnen de zone rond ca. 500 h Pa.

Indien men de methode, gebaseerd op referentie data sets, algemeen hanteert dan is het in de praktijk zaak om uit alle synoptische hoofdstations in Nederland en aangrenzende regio's in het buitenland een selectie te maken van de stations welke nog binnen een redelijke afstand, bijv. 50 km, van het eindpunt E en/of het startpunt worden aangetroffen. Om E te

localiseren moeten de banen worden meeberekend of moet de sonde bij de daling tot het eindpunt met radar worden gevolgd.

6. Discussie en besluit

Betrekkelijk eenvoudige hulpmiddelen blijken ons in staat te stellen de processing van rawinsonde oplatingen te kunnen voortzetten na het bereiken van het hoogste punt met vergelijkbare resultaten in de opgaande en neergaande tak.

De bewering dat bij een complete bewerking er sprake zou zijn van duplicatie is voor het overgrote deel van de ballon lancerings juist omdat binnen de tijdsduur van de meting, 1.5 à 2 uur, de toestand van de atmosfeer niet noemenswaardig verandert. Maar dubbelmetingen hebben dan toch het gunstige effect toevallige fouten zo'n 30% te reduceren indien men de uitkomsten middelt.

Anders wordt het wanneer er coïncidentie optreedt van de meting met een meso- of kleinschalig atmosferisch verschijnsel. Dan is een bewerking in duplo geschikt het verschijnsel beter te analyseren.

Waar sprake is van hinderlijke systematische afwijkingen in de meetwaarden, bijv. een "te warme TEMP" kan het gebeuren dat de neergaande tak de systematische fouten niet vertoont. Bij een experiment als beschreven in C.1 bleek zulks het geval te zijn. Het parachute deel van de oplating zou dan de data coherentie in het netwerk kunnen vergroten.

Er zijn in dit rapport vijf of zes potentiële oplossingen van het referentiepunt probleem aangedragen. De basislijn informatie in het grondpunt is essentieel bij normale rawinsonde metingen maar ongeschikt voor het daalgedeelte tenzij het eindpunt niet ver verwijderd is van het station of de integratie wordt voortgezet via een verbinding in de divergentievrije zone en niet via de top. Het kimduikpunt is toepasbaar boven zee, niet boven land, maar dan is de refractie nog een onzekerheidsfactor. De radarhoogte in het eindpunt is bruikbaar alleen wanneer het inslagpunt in de buurt van het station blijft. Algemeen toepasbaar is de aanwijzing van één of meer synoptische stations als referentiepunt(en). Bij meer dan één synoptisch station zijn de uitkomsten vereffend. In alle voorgestelde methodes vormt een bepaling van de trajectorieën een belangrijk bestanddeel uitgezonderd bij conventionele bewerkingen of wanneer de berekeningen normaal worden voortgezet via de top van de sondering.

In sectie 5.1.2 noot 2 werd gesuggereerd dat TOVS profielen boven land een hogere informatie-inhoud te zien zullen geven indien afgezien wordt van topografie- en emissiviteitsgegevens van de bodem en daarvoor in de plaats de informatie in sets van bijzondere referentiepunten wordt geraadpleegd. Men zou kunnen experimenteren met een gecombineerde processing techniek geënt op TOVS data en data van hoofdsynoptische stations of TOVS data en rawinsonde data of TOVS data en beide.

Tot nu toe is ervan uitgegaan dat de bewerking van het daalgedeelte, per parachute of zelfs zonder (cf. 2.2), geschiedde in de $\{P T_v\}$ - of Stüve mode. Interessant is ook de $\{T_v H\}$ - of rasonneer mode te beschouwen in de neergaande tak.

In dit rapport is weinig aandacht besteed aan de nauwkeurighedsaspecten bij de geopotentialberekening. De resultaten van de proeven in Appendix C suggereren echter dat de berekende geopotentialwaarden binnen een nauwkeurigheds marge van 5 gpm gelijk zijn. Een alleszins aanvaardbare grens. Kwantitatief is dit afhankelijk van de precisie van de gemeten of berekende locatie van het eindpunt E, de hoogte van E boven zeeniveau, de afstand van de referentiepunten tot E en de kwaliteit van de referentie informatie zelf.

Tenslotte zij vermeld dat het integraal theorema even trefzeker ingeschakeld kan worden bij de bewerking van ASDAR data. Gegeven de specificaties van het thans in ontwikkeling zijnde operationele ASDAR systeem [5] is te voorzien dat het toekomstige ASDAR systeem fijnstructuur profielen van temperatuur en wind zal produceren die kwalitatief vergelijkbaar zullen zijn met rawinsonde profielen. Hierover wordt afzonderlijk gerapporteerd.

7. Literatuur

- [1] WMO, 1983: Final report, CBS Working Group on the Global Observing System, Study Group on Optimized Observing System, 19-23 Sept., 1983, Geneva.

- [2] Linnik, Y.V., 1962: Method of least square and principle of the theory of observations, Pergamon Press.

- [3] De Jong, H.M., 1973: Automatisering van radiosonde/radar waarnemingen, KNMI, WR 73-3.

- [4] WMO, 1984: Final report, CBS Working Group on the Global Data Processing System, Study Group on monitoring procedures of the GDPS, 19-23 March, 1984, Geneva.

- [5] 1983: ASDAR Aircraft to Satellite Data Relay, GEC Mc Michael, Slough, England.

Appendix A

Bepaling van de "kimduikhoogte"

De geometrie van ballon/parachute sonderingen brengt met zich mee dat in bepaalde situaties correcties op de hoogte aangebracht dienen te worden ten gevolge van de aardkromming.

Meest elementair is de hoogte correctie t.g.v. de "kimduiking".

Een eenvoudige formule, dagelijks in gebruik, voor de "kimduikhoogte" h is:

$$h = \frac{d^2}{2a} \quad (7)$$

In deze benaderingsformule is a de aardradius en d de boogafstand van het station tot de sonde of bij benadering de radar range.

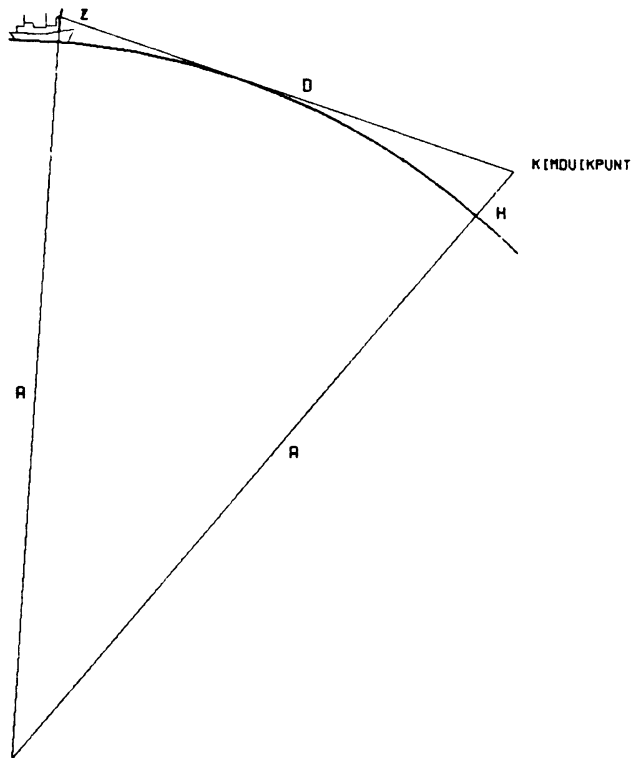


FIG.4 KIMDUIKING BIJ AARDKROMMING

Het bovenstaande geldt alleen bij nul-elevatie van de antenne. Bij een willekeurige antenne elevatie z t.o.v. zeeniveau volgt de kimduikhoogte h impliciet uit (cf. Fig. 4):

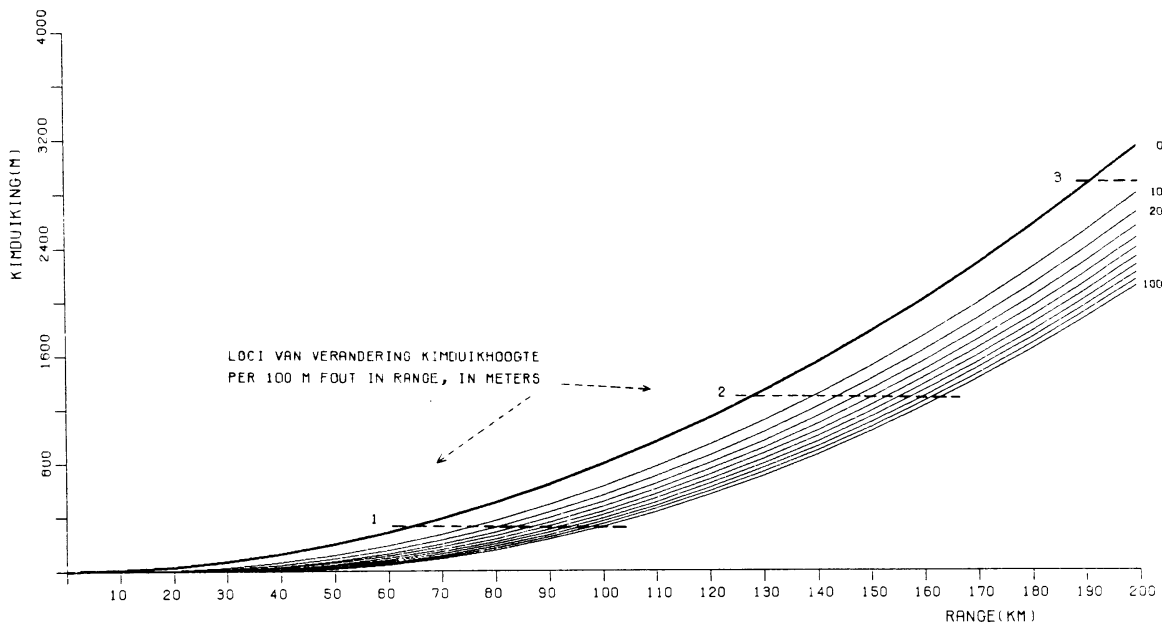


FIG.5 KIMDUIKHOOGTE(M) VOOR ANTENNE ELEVATIES 0(10)100 M.

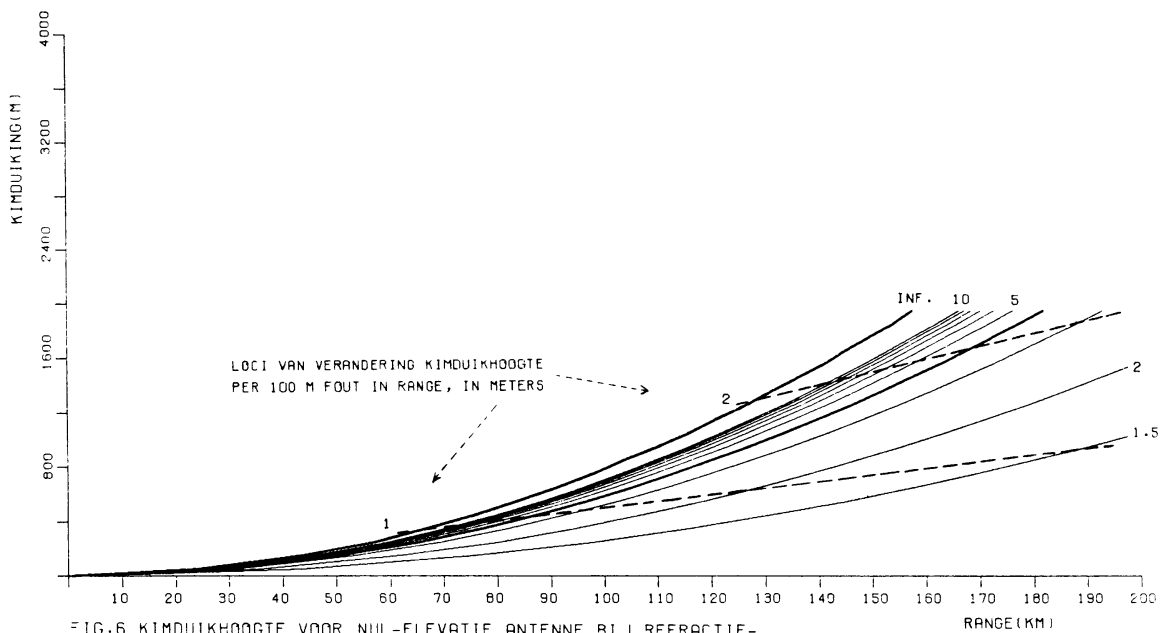


FIG.6 KIMDUIKHOOGTE VOOR NUL-ELEVATIE ANTENNE BIJ REFRACTIE-KROMTESTRALEN INF, .10A (1A) 2A, .15A, A = AARDSTRaal

$$d = \{(z+a)^2 - a^2\}^{\frac{1}{2}} + \{(h+a)^2 - a^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Fig. 5 toont een grafiek van het verloop van de kimduikhoogte als functie van de range voor antenne elevaties z in de reeks 0 (10) 100 m. De stippellijnen zijn loci van punten waar de kimduikhoogte verandert met 1, 2, 3 m per 100 m fout in de radar range. Dit volgt na differentiëren van (8) bij constante z :

$$\frac{\partial h}{\partial d} = \{1 - a^2(a+h)^{-2}\}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Blijkbaar is de kimduikhoogte binnen het bereik van de radardetectie bijzonder ongevoelig voor fouten in de radar range.

noot: het ideaalbeeld, Fig. 4 is alleen te realiseren boven zee; boven land verstoort de locale topografie van de bodem een exacte definitie van de horizon.

Dit alles is legitiem wanneer geen rekening gehouden wordt met refractie verschijnselen maar bij de in de praktijk gebezigde frequenties en golflengtes (403 MHz bij de sonde en 3.2 cm bij de ECCII radar) kan de refractie aanzienlijk zijn en dit heeft onmiddellijk invloed op de bepaling van de kimduikhoogte.

Het refractiepatroon, in de praktijk hoofdzakelijk geconditioneerd door de temperatuur- en vochtigheidsverdeling, is veelal dusdanig complex dat zonder toepassing van "ray-tracing" technieken niets zinnigs te zeggen valt in kwantitatieve zin over het effect op de kimduikhoogte.

Een eenvoudig experiment vermag wel plausibel te maken dat het effect beïndrukkend kan zijn. Fig. 6 toont de grafiek van het verloop van de kimduikhoogte tegen de radar range bij nul-elevatie van de radar antenne en gekromde radarstralen (circlbogen) met radii in de reeks ∞ ; 10a (a) 2a; 1.5a. Ook hier zijn de loci weergegeven voor $\frac{\Delta h}{\Delta d} (\Delta d = 100 \text{ m}) = 1, 2, \dots$

Terwijl de kimduikhoogte in absolute zin nog ongevoeliger is geworden voor range fouten blijkt dat een kimduikhoogte zelf veranderingen vertoont van de orde van vele tientallen m als gevolg van refractie over grote afstanden. Bijv. voor een afstand van 100 km bij een kromtestraal van 10 aardstralen is de kimduikhoogte 80 m lager dan bij geen refractie.

Appendix BDerivation of a line integral theorem.*)

In an elementary application of the equation of horizontal motion a special integral theorem may be formulated, which can be utilized as a powerful diagnostic tool for various purposes especially to process meteorological data which are provided by different systems of observation.

In mid- and high latitude synoptic scale systems the wind and pressure fields are in approximated geostrophic balance. In vector form this balance may be expressed as

$$f \vec{v}_g = \vec{k} \times \frac{1}{\rho} \nabla_z p \quad (1)$$

where \vec{v}_g is the geostrophic velocity and $\nabla_z p$ the horizontal pressure gradient.

$f = 2\Omega \sin\phi$ is the Coriolis parameter;

Ω = the angular speed of rotation of the earth;

ϕ = latitude;

ρ = density;

\vec{k} = a unit vector pointing to zenith.

In isobaric coördinates the vectorial form of the geostrophic relationship is:

$$f \vec{v}_g = g \vec{k} \times \nabla_p z \equiv \vec{k} \times \nabla_p \phi$$

g = the acceleration of gravity;

ϕ = the geopotential defined as the work required to raise unit mass from the surface to the height z ;

$$\phi = \int_0^z g \, dz$$

To represent the atmospheric flow in arbitrary surfaces, which are not level, we shall have to derive the horizontal pressure gradient along the surface.

*) reproduced from: Description of the quality control procedures used by the FGGE and its regional experimental data management centres, sixth issue, WMO, Dec. 1980.

Let Σ be an arbitrarily defined sloping surface in the atmosphere. The surface Σ is specified by some scalar quantity $S = \text{const.}$ The surface Σ is a physical surface if S represents a physical parameter.

Consider a cross section in the (xz) plane. Then the following holds:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_z = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_S - \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_S$$

The subscript S means "holding S constant".

If we substitute on the right from the hydrostatic equation and introduce the geopotential, we obtain:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_z = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_S + \rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_S$$

A similar equation may be written for a cross section in the (yz) plane.

These equations relate the horizontal pressure gradient force per unit mass to the pressure gradient force per unit mass on the surface.

In vectorial form:

$$\nabla_z p = \nabla_S p + \rho \nabla_S \Phi \quad (2)$$

where $\nabla \equiv i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y}$ denotes the horizontal gradient operator.

When Eq. (1) and Eq. (2) are taken together, then the result is the appropriate form of the geostrophic relationship in the Σ surface:

$$f \vec{v}_g = \vec{k} \times \nabla_S \Phi + \frac{1}{\rho} \vec{k} \times \nabla_S p \quad (3)$$

Let Σ be the support of an arbitrarily chosen curve Γ connecting the points P and Q located on the surface. Then we consider the line integral:

$$\int_P^Q f [\vec{k} \times d\vec{s}] \cdot \vec{v}_g \quad (4)$$

where \vec{s} defines the integration path.

Substitution of Eq. (3) in Eq. (4) yields:

$$\begin{aligned} \Gamma \int_P^Q f[\vec{k} \times d\vec{s}] \vec{v}_g &= \Gamma \int_P^Q f[d\vec{s} \times \vec{v}_g] \vec{k} \\ &= \Gamma \int_P^Q (d\vec{s} \times [\vec{k} \times \nabla_S \phi]) \vec{k} + \Gamma \int_P^Q \frac{1}{\rho} (d\vec{s} \times [\vec{k} \times \nabla_{Sp}]) \vec{k} \end{aligned}$$

In view of the vector rule

$$\vec{a} \times [\vec{b} \times \vec{c}] = (\vec{a} \cdot \vec{c}) \vec{b} - (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c} \quad \text{we have}$$

$$\begin{aligned} \Gamma \int_P^Q f[d\vec{s} \times \vec{v}_g] \vec{k} &= \Gamma \int_P^Q (d\vec{s} \cdot \nabla_S \phi) (\vec{k} \cdot \vec{k}) - \Gamma \int_P^Q (d\vec{s} \cdot \vec{k}) (\nabla_S \phi \cdot \vec{k}) \\ &+ \Gamma \int_P^Q \frac{1}{\rho} (d\vec{s} \cdot \nabla_{Sp}) (\vec{k} \cdot \vec{k}) - \Gamma \int_P^Q \frac{1}{\rho} (d\vec{s} \cdot \vec{k}) (\nabla_{Sp} \cdot \vec{k}) \end{aligned}$$

Observing that

$$\begin{aligned} \vec{k} \cdot \vec{k} &= 1 \\ \text{and } \vec{k} \cdot \nabla_S \phi &= 0 \\ \vec{k} \cdot \nabla_{Sp} &= 0 \end{aligned}$$

the expression on the right can be written:

$$\begin{aligned} &\Gamma \int_P^Q \nabla_S \phi \cdot d\vec{s} + \Gamma \int_P^Q \frac{1}{\rho} \nabla_{Sp} \cdot d\vec{s} \\ \text{but } \Gamma \int_P^Q \nabla_S \phi \cdot d\vec{s} &= \Gamma \int_P^Q d_\Gamma \phi = \phi_Q - \phi_P \\ \text{and } \Gamma \int_P^Q \frac{1}{\rho} \nabla_{Sp} \cdot d\vec{s} &= \Gamma \int_P^Q \frac{d_\Gamma p}{\rho} \end{aligned}$$

The index Γ indicates here that the increments in ϕ and p have to be taken along the curve Γ . In a local (xyz) coordinate system the integrand $f[d\vec{s} \times \vec{v}_g] \vec{k}$ takes the form $f(v_g dx - u_g dy)$. The integral (4) can best be expressed in a fixed Cartesian coordinate system referring to a conformal map projection. The integral becomes

$$\Gamma \int_P^Q f(v_g dx - u_g dy)$$

Furthermore, by substituting from the equation of state for moist air:

$$p = \rho RT_v,$$

where R is the gas constant for dry air and T_v the adjusted virtual temperature, we obtain the following expression:

$$\Phi_Q - \Phi_P = \Gamma \int_P^Q (v_g dx - u_g dy) - \Gamma \int_P^Q RT_v d \ln p$$

This theorem holds within a geostrophically approximated air motion at a fixed time. The theorem admits various interpretations, dependent on its use in selected applications. A specialization of the theorem offers the possibility to process series of observations provided by all kinds of moving platforms whose trajectories may be or may not be Lagrangian such as aircraft, satellites, balloons and parachutes.

Appendix C

Experimenten

Het materiaal dat verzameld is om het daalgedeelte van radiosonde oplatingen uit te werken werd onderworpen aan een speciale versie van het operationele radiosonde programma van station De Bilt (06260). Er vond een samenvoeging plaats met een ander programma dat enkele jaren geleden ontwikkeld is om het integraal theorema te beproeven in algemene graph structuren. Bij deze samenvoeging werd een dusdanige flexibiliteit in acht genomen dat door geringe ingrepen een diversiteit van experimenten mogelijk werd.

Wat de extractie van de data uit de registraties betreft werden in het parachute gedeelte de karakteristieke punten op dezelfde manier als in het ballongedeelte opgespoord.

Fig. 7 toont een voorbeeld van de registratie zoals die eruit ziet bij een volledige waarneming. Ook de radar peiling werd gecontinueerd na het springpunt en alle elementen uitgeprint waaronder ook windrichting en windsnelheid elke halve minuut.

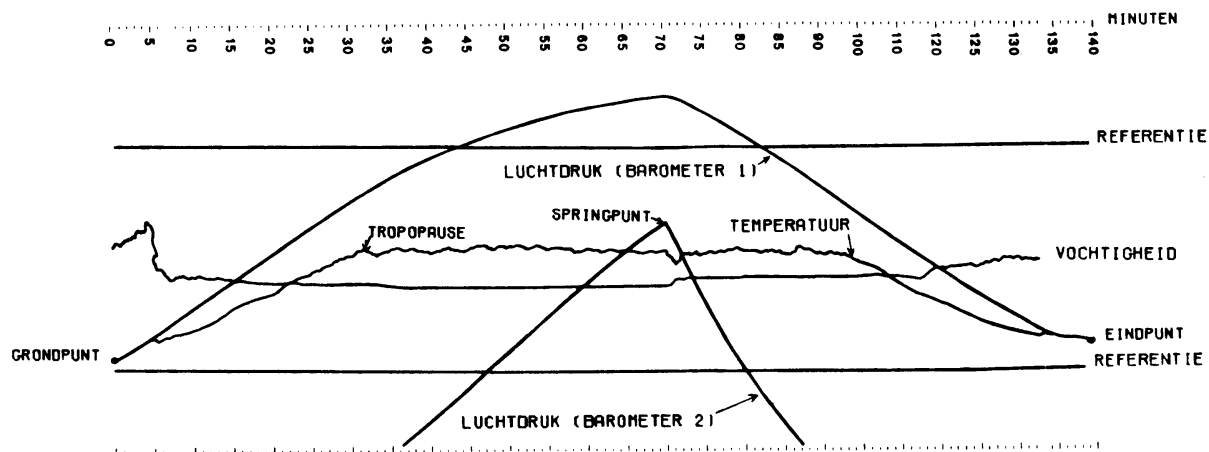


FIG 7. REGISTRATIE VAN COMPLETE RAWINSONDE OPLATING

C.1 Rawinsonde waarneming, De Bilt, 3 juni 1983, 12 Z

De geplote kaarten in Fig. 8 tonen een algemeen overzicht in W-Europa van de beschikbare informatie voor de 500, 300, 250 en 200 h Pa niveaus, zoals ontleend aan de TEMP berichten. Geplot zijn de geopotentialhoogtes (gpdam), temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) en de wind (knopen).

Bijzonder is dat de ballonbanen werden meeberekend zodat de data gegroepeerd zijn rond de posities waar de gegevens werkelijk geldig zijn. De kaarten tonen (de projecties van de) ballon trajectorieën tot het 200 h Pa vlak.

De data coherentie, o.a. in en rond Nederland, laat te wensen over. De geopotentialen in De Bilt zijn enkele decameters te hoog: "De Bilt TEMP is te warm".

Fig. 9 toont de hoogte profielen voor de opgaande en neergaande tak. De profielcurven verbinden de karakteristieke punten en standaarddruk niveaus. De drukhoogte in het eindpunt is 798 m. Later bleek de in de $\{PT_v\}$ mode berekende hoogte van het eindpunt boven zeeniveau, afhankelijk van referentiepunten, ca. 885 gpm te bedragen. Met de 3.2 cm ECC WF100-5 radar werd het eindpunt gepeild op een afstand van 101,55 km. Hierbij hoort bij nul-elevatie van de ontvangst antenne een kimduikhoogte van 808 m. Gelet op verstoringen door (onbekende) obstakels aan de horizon mag geconcludeerd worden dat het eindpunt hier als kimduikpunt geïdentificeerd kan worden.

In Fig. 9 is een goede overeenstemming vast te stellen van de gemeten radar hoogtes en de middels de $\{PT_v\}$ methode berekende hoogtes binnen de geldende nauwkeurigheidsmarge van een honderdtal meters. De berekende hoogte in het springpunt bedraagt ca. 23650 gpm. Voorts is de gemiddelde stijgsnelheid 343 m min^{-1} en de gemiddelde daalsnelheid 563 m min^{-1} .

Teneinde de temperaturen met elkaar te vergelijken zijn in een Stüve -Bijvoet diagram de profielen weergegeven voor zowel het ballon- als het parachute deel (Fig. 10) van de virtuele temperatuur in het regime van de troposfeer.

Fig. 11 is de projectie van de ballon en parachute baan, gevat in een set van range cirkels rond station De Bilt.

Als eerste proef is alleen het klimgedeelte uitgewerkt door eerst De Bilt (06260), Soesterberg (06265) en Gilze Rije (06350) afzonderlijk als referentiepunt te kiezen (cf. 5.1.1) en daarna de berekening te baseren op alle drie stations gezamenlijk als referentie data set (cf. 5.2). Opgemerkt dient te worden dat wanneer men De Bilt als referentiepunt neemt men de normale procedure volgt van een rawinsonde bewerking.

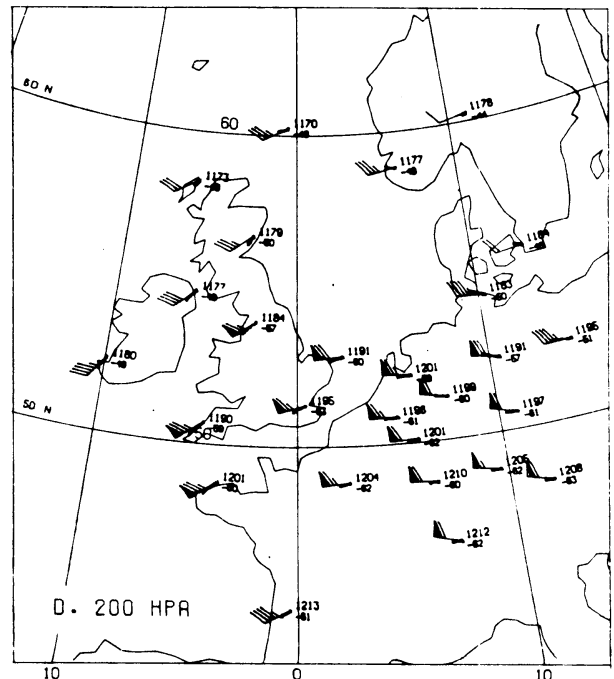
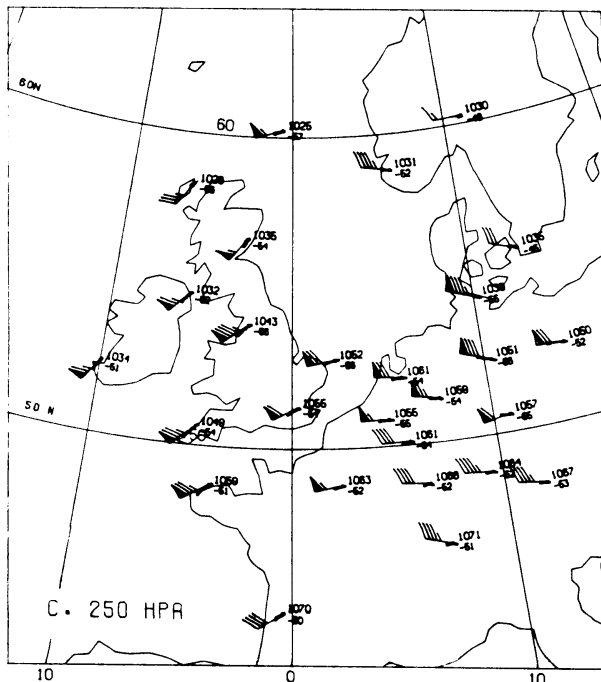
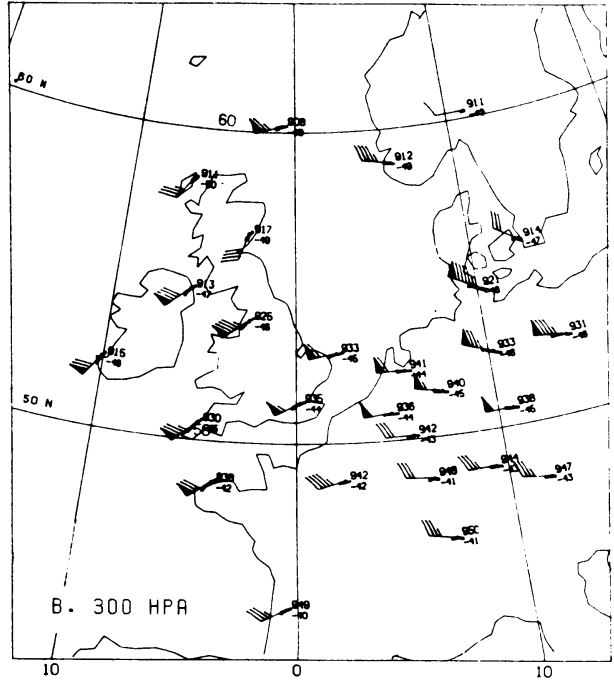
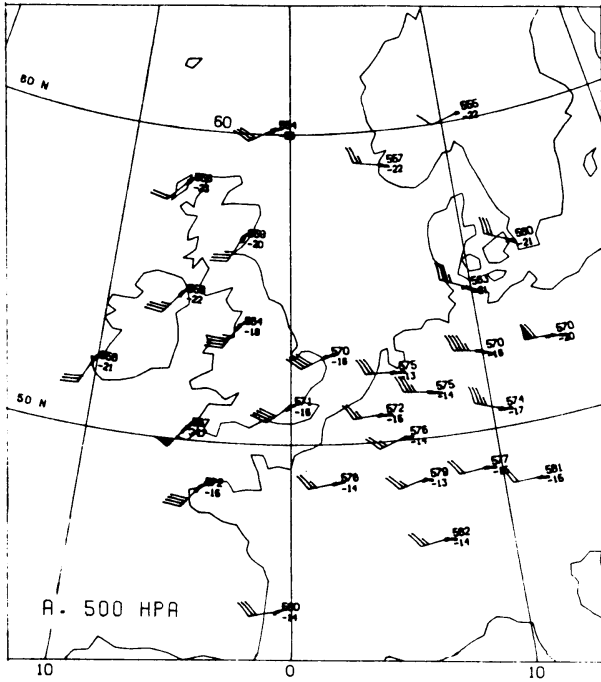
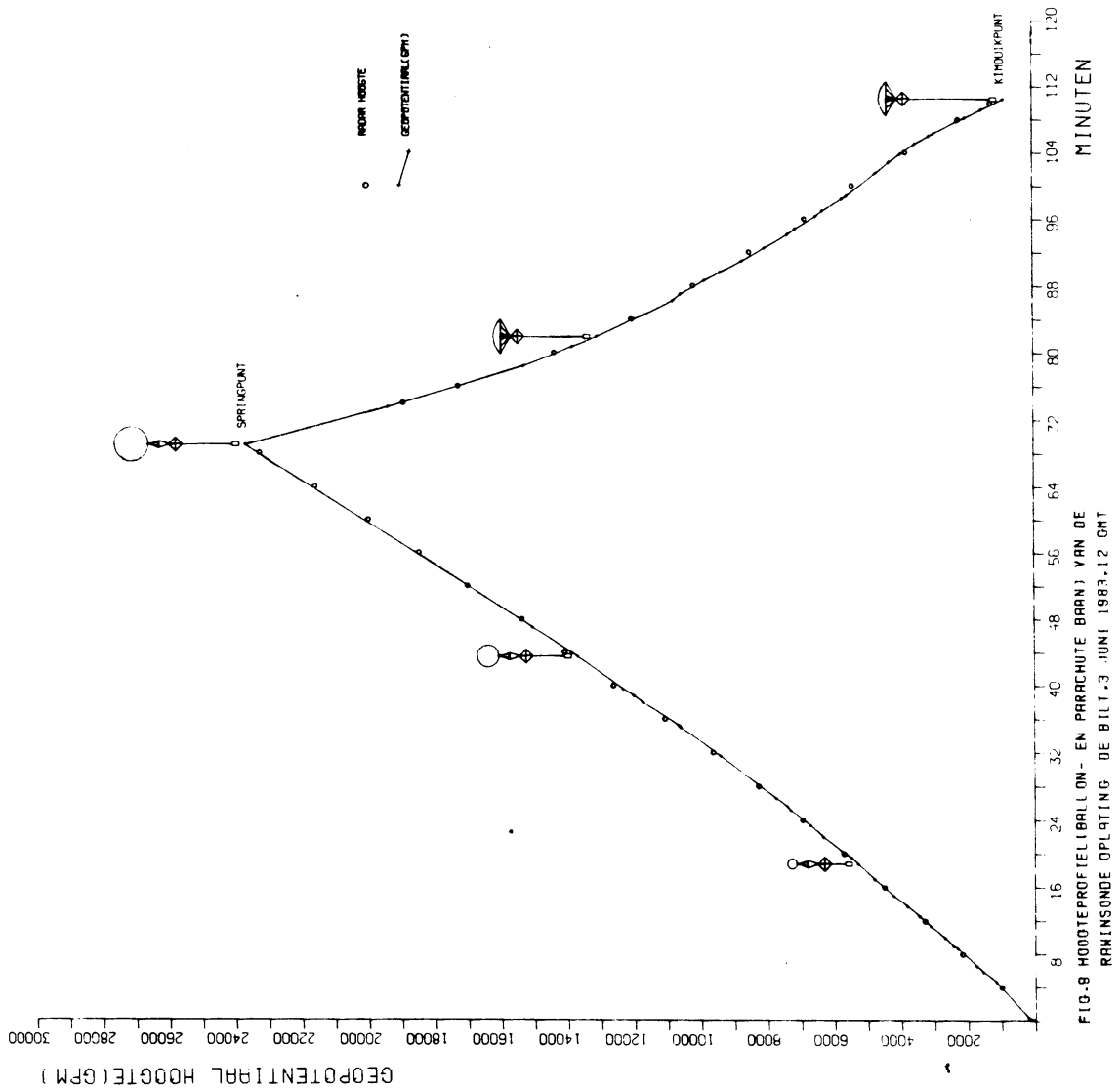
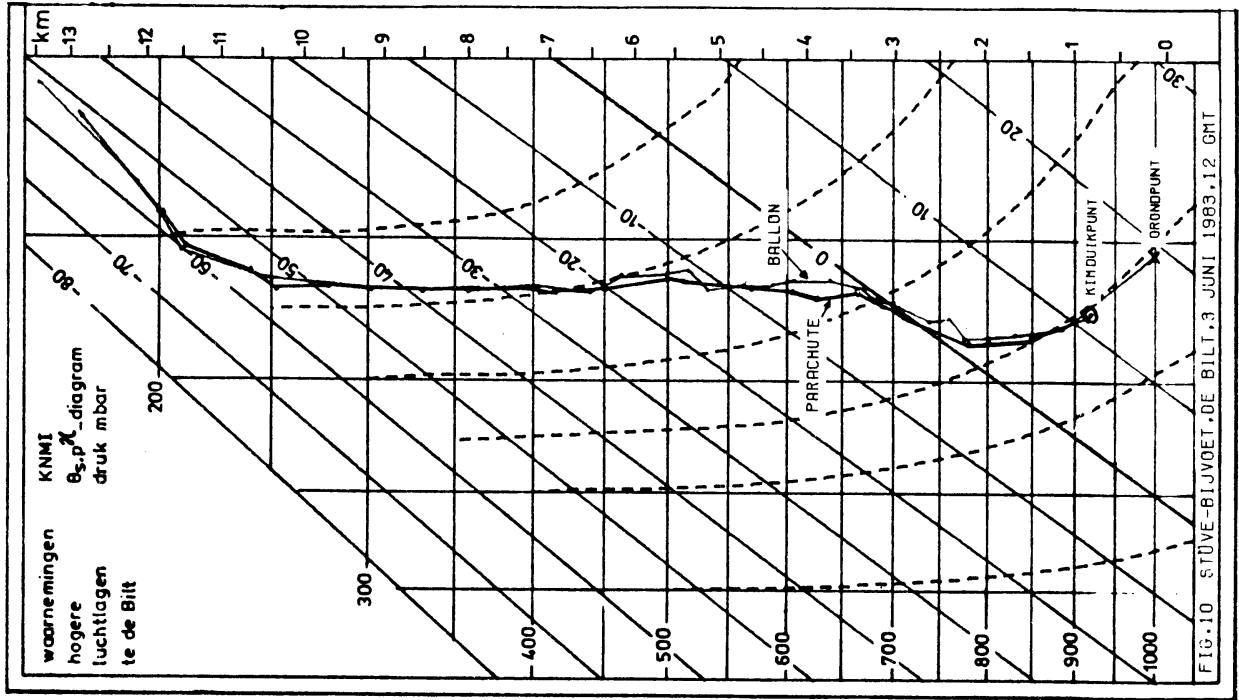


FIG. 8 'TEMP' GEGEVENS VOOR 3 JUNI 1983, 12 GMT, 500, 300, 250 EN 200 HPA
INCLUSIEF BALLON TRAJECTORIEN TOT 200 HPA



Tabel 1 vat de resultaten samen voor de niveaus van 500, 300, 250 en 200 h Pa. De tabel vermeldt ook de afstanden van de referentie stations tot De Bilt.

TABEL 1 Geopotentieelberekening in het stijgedeelte (ballon) voor de radiosonde waarneming van 3 juni 1983, 12 Z.

referentiepunt(en)	standaard druk niveaus				afstand (km) tot De Bilt
	500	300	250	200	
De Bilt	5751*	9408*	10605*	12014*	-
Soesterberg	5747	9404	10601	12010	6.452
Gilze Rije	5746	9403	10600	12009	62.097
De Bilt, Soesterberg, Gilze Rije	5747	9405	10601	12012	-

De uitkomsten zijn op alle niveaus binnen een marge van 5 gpm aan elkaar gelijk. Asterisks geven aan dat de waarden voor De Bilt volgens de gangbare procedure berekend zijn en de te coderen waarden vertegenwoordigen in het TEMP bericht. De afwijkingen t.o.v. De Bilt geven langs empirische weg een indruk van de kwaliteit van de methode.

Als tweede proef is de neergaande tak uitgewerkt door eerst Twente (06290) en Bocholt (FDR, 10406) afzonderlijk als referentiepunt te nemen en daarna beide tezamen als een set referentiepunten. Het resultaat staat in tabel 2.

TABEL 2 Geopotentialberekening in het daalgedeelte (parachute) voor de rawinsonde waarneming van 3 juni 1983, 12 Z.

referentiepunt(en)	standaarddruk niveaus				afstand tot eindpunt (km)	hoogte eindpunt
	500	300	250	200		
Twente	5739	9393	10588	12000	23.387	884
Bocholt	5742	9396	10591	12003	33.064	887
Twente, Bocholt	5741	9395	10590	12001	-	885

De tabel vermeldt ook de hoogtes berekend voor de kimduikhoogte en de afstand van de referentie stations tot het eindpunt.

De uitkomsten zijn nu op alle niveaus binnen 3 gpm aan elkaar gelijk. In Fig. 11 zijn de verbindingen van het eindpunt met beide referentie stations weergegeven. Deze maken deel uit van de boom waarlangs geïntegreerd wordt.

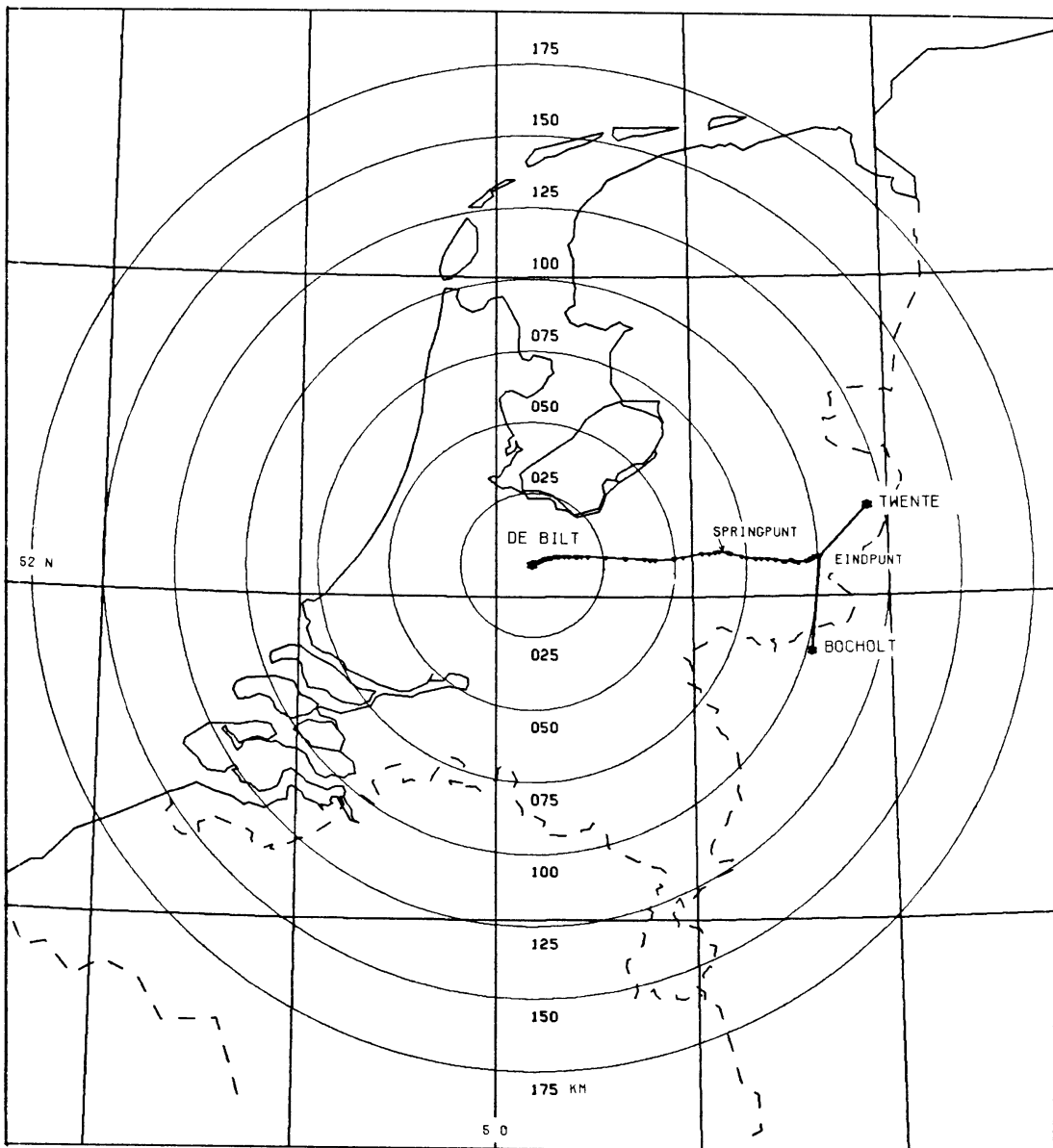


FIG. 11 BALLON- EN PARACHUTEBAAN ,DE BILT,3 JUNI 1983, 12 GMT

Vergelijkt men de waarden in tabel 1 en 2 dan is in het parachute deel de geopotentialhoogte circa 1 gdam lager dan in het ballondeel. Zou men de waarden voor het parachute deel substitueren in de 4 kaartjes van Fig. 7 dan zou blijken dat dit de data coherentie ten goede zou komen maar niet in afdoende mate.

Effectiever is het de bewerking nog eens te herhalen maar nu voor de gehele oplating dus voor ballon- en parachute baan en alle vijf stations als een set referentiepunten. Het resultaat, na toepassing van de graph methode voor het integraaltheorema is samengevat in tabel 3.

TABEL 3 Geopotentialberekening langs de complete ballon/parachute baan voor de rawinsonde oplating, De Bilt, 3 juni 1983, 12 Z.

referentiepunten	standaard druk niveaus			
	500	300	250	200
De Bilt, Soesterberg (ballondeel)	5748	9406	10603	12012
Gilze Rije, Twente, Bocholt (parachutedeel)	5733	9380	10572	11981

Terwijl nu de geopotentialen voor het ballongedeelte weinig verschillen met die in tabel 1 zijn de waarden voor het parachutedeel zodanig, dat bij substitutie in de kaarten van Fig. 7 de data coherentie sterk verbetert.

C.2 Radiosonde waarneming, OWS Lima (57N, 20W) aan boord van OSV Cumulus, 4 augustus 1983, 12 Z

Op het weerschip Cumulus is het Vaisala CORA systeem in gebruik terwijl de hoogtewind wordt bepaald m.b.v. het Omega Navigatie Systeem. Daardoor is het overbodig radarapparatuur aan boord te hebben voor windmeting en hoeft er geen radarreflector te worden meegevoerd. Veelal laat men ook een parachute achterwege (cf. 2.2).

De bewerking in de neergaande tak zou alleen kunnen plaats vinden als (1) de basislijn informatie op het hoofddek van het weerschip ook werkzaam blijft voor het daalgedeelte (2) het kimduikpunt als referentiepunt is te gebruiken.

In het eerste geval kan de geopotentialberekening langs de neergaande tak worden voortgezet via de top of wat beter is via een verbinding tussen stijgen en daaltak binnen de divergentievrije zone of wat lager nog. In het tweede geval, om de kimduikhoogte vast te stellen, is een redelijk betrouwbare afstandsbepaling van het kimduikpunt tot het weerschip vereist. In Appendix A

GEOPOTENTIAAL HOOGTE (GPM)

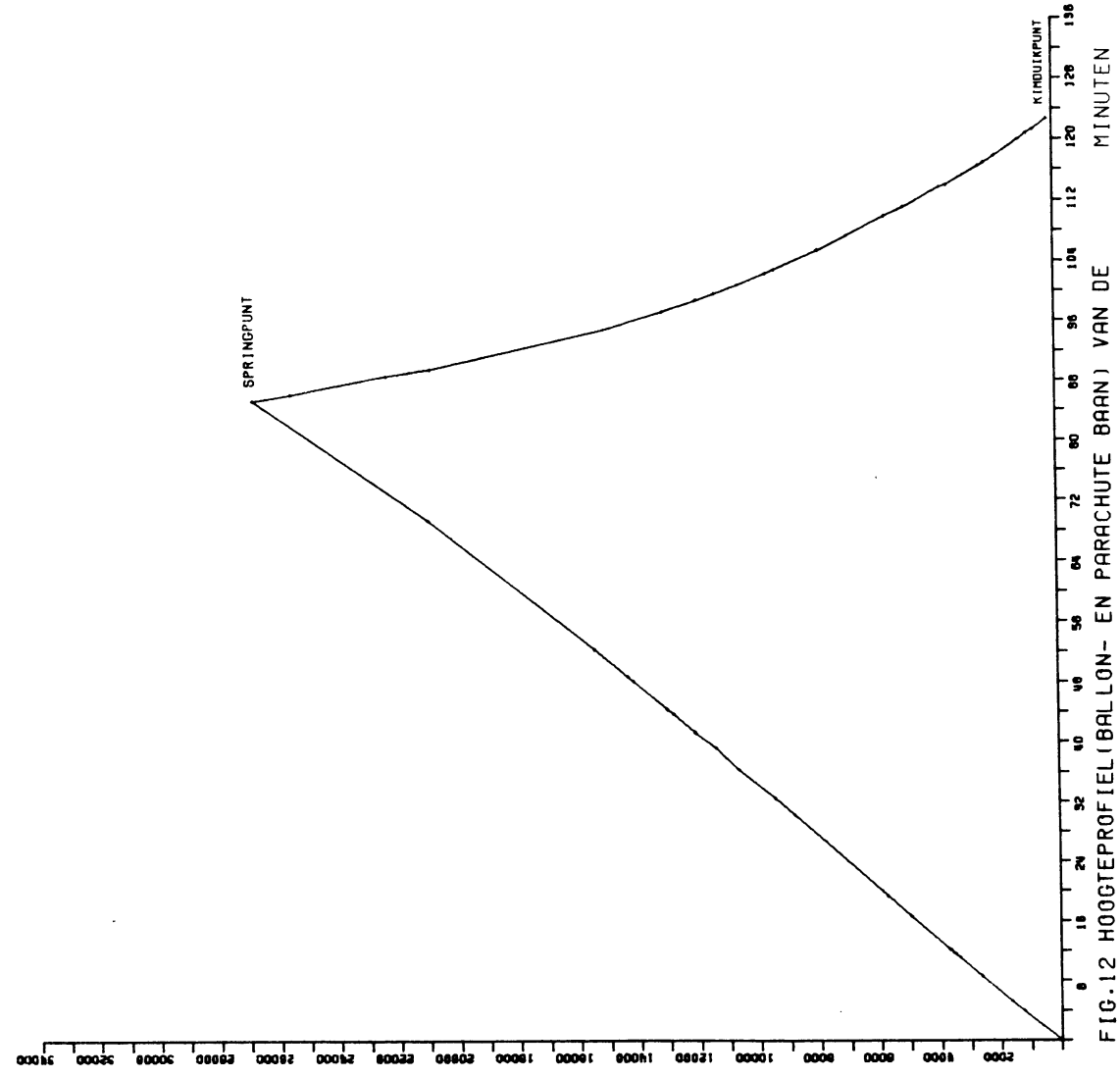
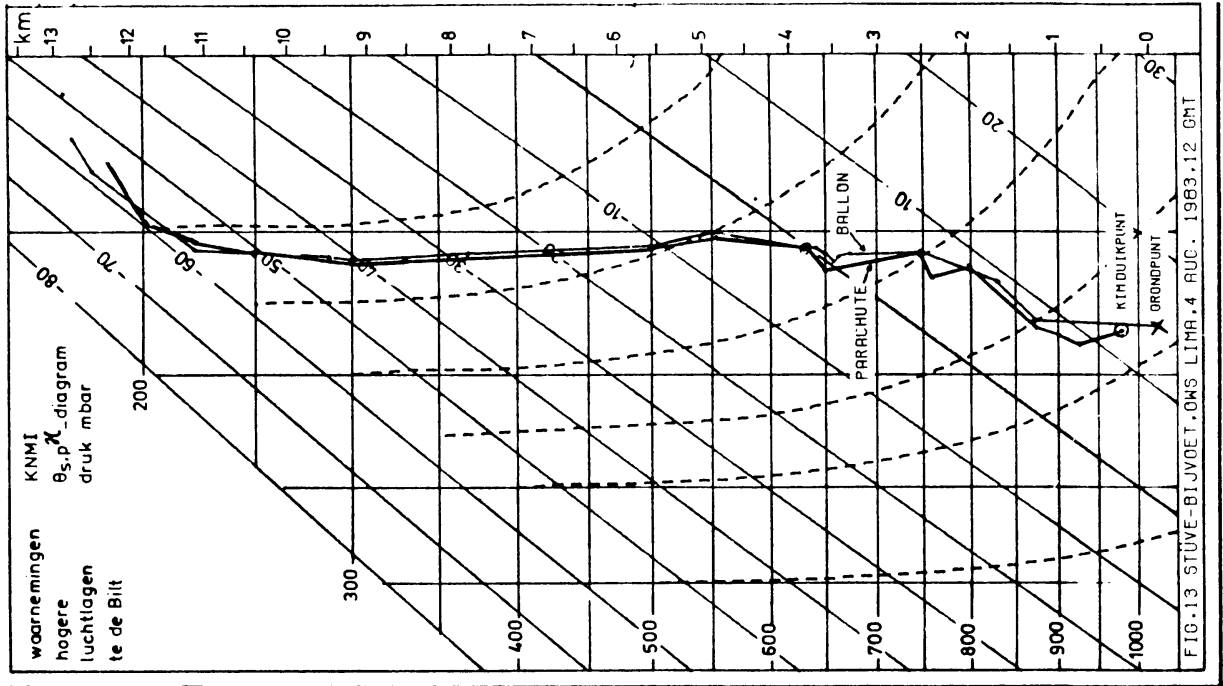


FIG.12 HOOGTEPROFIEL (BALLON- EN PARACHUTE BAAN) VAN DE
RAWINSONDE OPLATING OWS LIMA.4 AUG. 1983, 12 GMT



werd aangetoond dat de kimduikhoogte vrij ongevoelig is voor een fout in deze afstand. Met radar aan boord zou de kimduikhoogte tot enkele gpm nauwkeurig uit de radar range van het eindpunt zijn af te leiden mits refractie is te verwaarlozen.

Om de methode gebaseerd op de kimduikhoogte te beproeven voor sonde oplatingen boven zee werd een waarneming op OWS Lima (57N, 20W) zo ingericht dat de daling van de sonde toch geschiedde per parachute. De afstand tot het weerschip werd indirect verkregen uit een baanberekening van de sonde aan de hand van Omega wind data. Aangezien de CORA geen Omega signalen in het daalgedeelte bewerkt werden in de daaltak de Omega wind data geldig in de stijgtak gesubstitueerd.

Fig. 12 toont de hoogteprofielen voor de stijg- en daaltak. Het Stüve-Bijvoet diagram in Fig. 13 representeert de profielen van de virtuele temperatuur voor deze Lima oplating. Fig. 14 geeft de projectie weer van de ballon- en parachute baan gevat in een set van range cirkels 0(25)175 km.

Het eindpunt dat metterdaad als kimduikpunt geïdentificeerd kan worden blijkt op grond van de baanelementen zich op een afstand van 82.5 km van de Cumulus te bevinden. Bij een antenne hoogte van 22 m hoort hier bij rechtlijnige voortplanting een kimduikhoogte bij van 339 m.

De geopotentialberekening in het stijggedeelte met de basislijn informatie aan dek als startwaarde enerzijds en die met het kimduikpunt als referentiepunt anderzijds produceerde de geopotentialwaarden in tabel 4.

TABEL 4 Geopotentialberekening in het stijggedeelte (ballon) voor de radiosonde waarneming van 4 augustus 1983, 12 Z op OWS Lima (57N, 20W).

referentiepunt	standaarddruk niveaus			
	500	300	250	200
hoofddek Cumulus	5777	9477	10692	12110
kimduikpunt	5768	9466	10681	12099

De overeenkomstige berekening in het daalgedeelte (parachute) met enerzijds het kimduikpunt als referentiepunt en anderzijds het hoofddek op de Cumulus als referentiepunt gaf de uitkomsten van tabel 5.

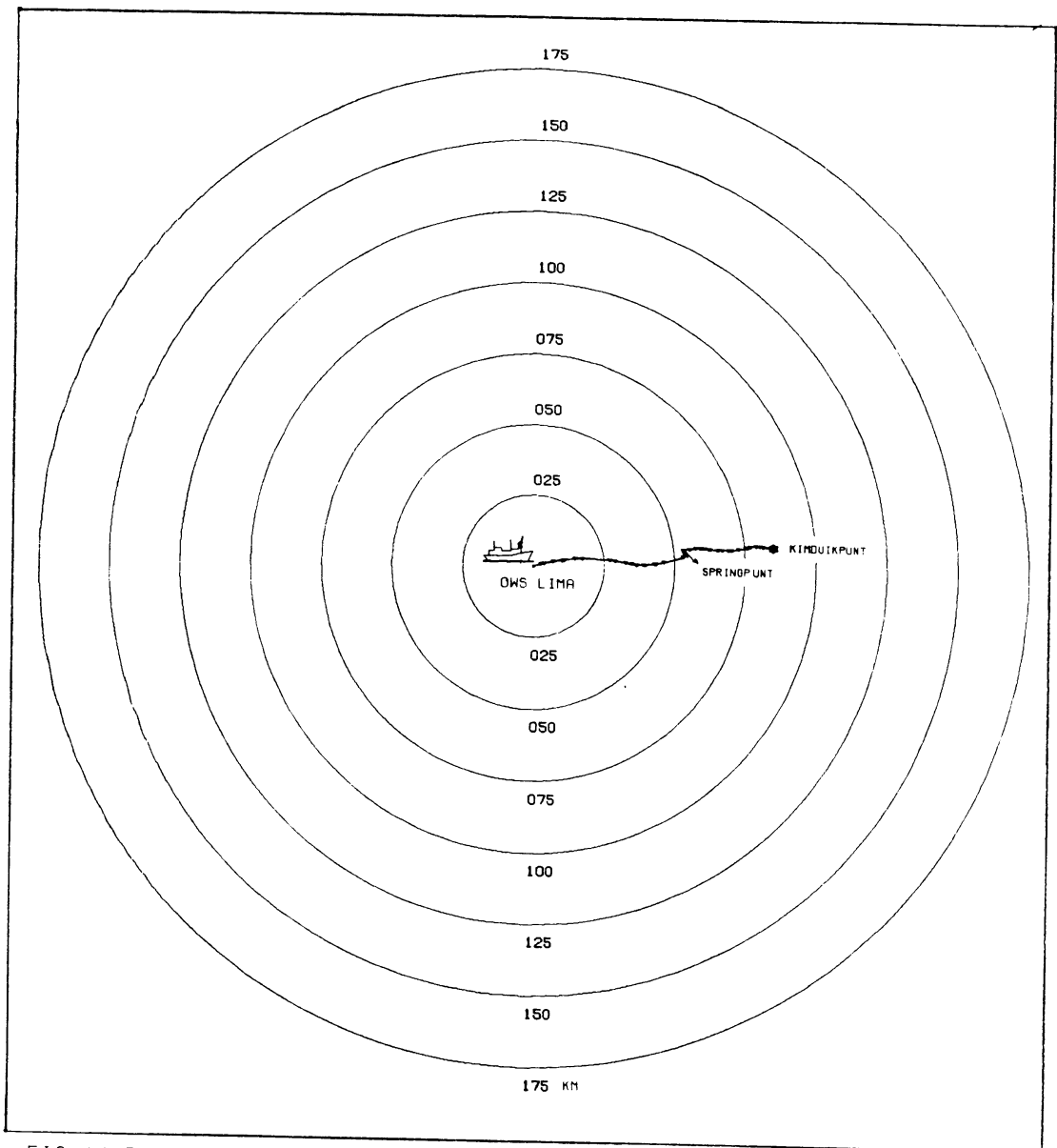


FIG.14 BALLON- EN PARACHUTEBAAN OWS LIMA.4 AUG.1983. 12 GMT

TABEL 5 Geopotentialberekening in het daalgedeelte (parachute) voor de radiosonde waarneming van 4 augustus 1983, 12 Z op OWS Lima (57N, 20W).

referentiepunt	standaarddruk niveaus			
	500	300	250	200
hoofddek Cumulus	5768	9475	10690	12110
kimduikpunt	5779	9486	10701	12121

De waarden stemmen tot ca. 1 gdam met elkaar overeen zowel in tabel 4 als 5 en onderling.

Tenslotte, door beide referentiepunten in een berekening te betrekken langs de totale baan (cf. 5.2) wordt gevonden:

TABEL 6 Geopotentialberekening langs de totale baan met twee referentiepunten.

referentiepunten	standaarddruk niveaus			
	500	300	250	200
hoofddek Cumulus en (ballon deel)	5779	9474	10689	12106
kimduikpunt (parachute deel)	5768	9474	10692	12112

De verschillen tussen de waarden in het ballon- en het parachute deel zijn ook hier binnen een aanvaardbare grens van ca. 1 gdam. De verbindingskoorde tussen stijg- en daaltak was bij al deze proeven tussen 400 en 600 h Pa. Een proef met een verbinding vlak bij het springpunt gaf slechte resultaten: verschillen van 2 à 3 gdam.

C.3 Bewerking van een experimentele rawinsonde oplating aan boord van de Cumulus in de haven van Pernis op 12 juli 1983, 12 Z

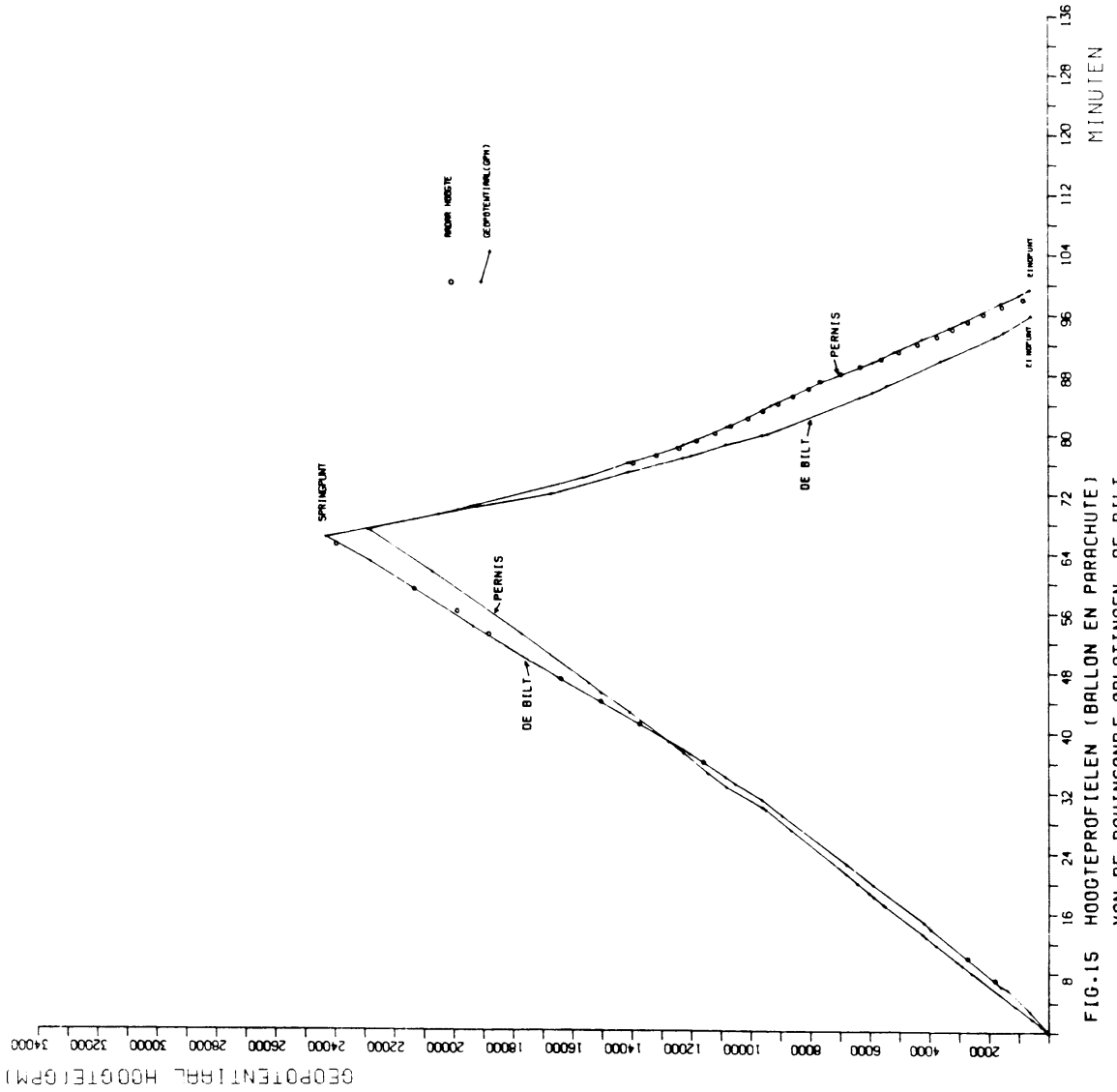
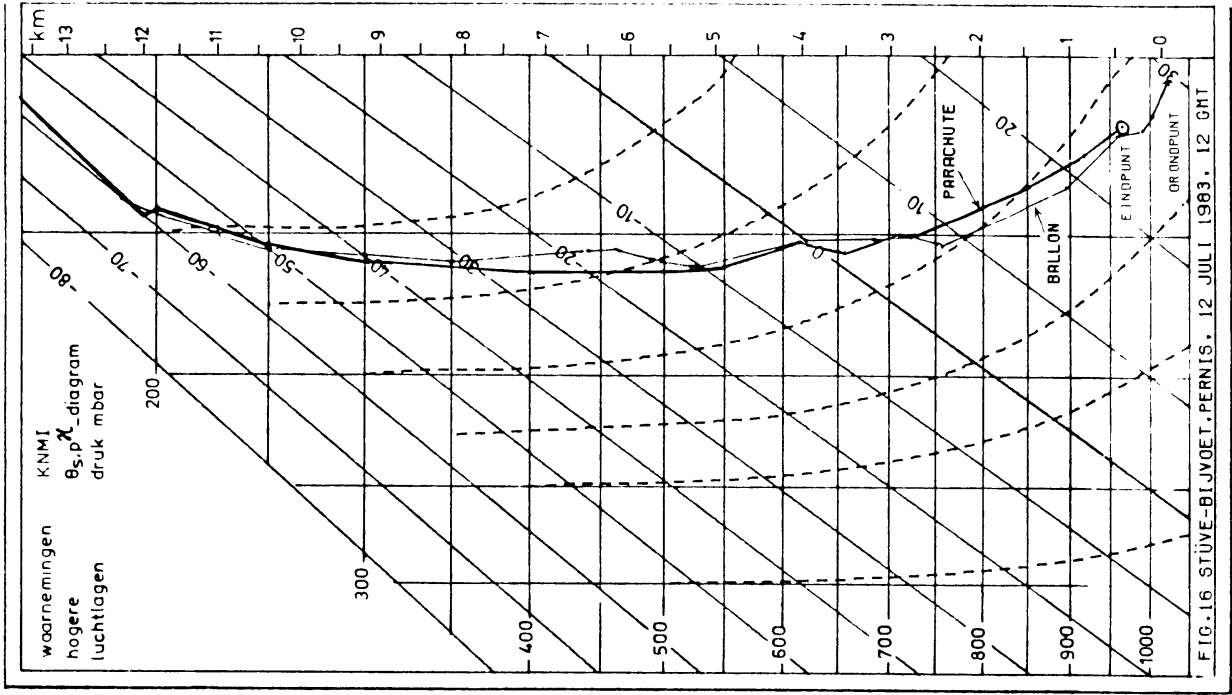
Teneinde de ontvangstkwaliteit van het Omega Navigatie Systeem in Nederland nader te onderzoeken werd op experimentele basis op 12 juli 1983, 12 Z op het weerschip Cumulus in de haven Pernis bij R'dam een radiosonde opgelaten en met CORA processing systeem uitgewerkt.

De gelegenheid werd aangegrepen om de sondesignalen te blijven registreren na het bereiken van het springpunt en bovendien de sonde te peilen met de radar in De Bilt. Dit laatste om winddata in het parachute deel te verkrijgen welke het CORA systeem in de tegenwoordige versie niet kan verschaffen.

De operationele rawinsonde in De Bilt was op deze dag van slechte kwaliteit. De TEMP van De Bilt gaf waarden die vergeleken met omringende stations en vergeleken met analyses te hoog waren, ca. 1°C en 2 à 3 gdam.

Fig. 15 toont het hoogteprofiel van de Pernis oplating alsmede voor de oplating in De Bilt op dezelfde tijd.

Het Stüve-Bijvoet diagram in Fig. 16 laat de profielen zien van de virtuele temperatuur in het regime van de troposfeer voor de Pernis oplating. Hoewel de overeenkomst van de profielen voor de opgaande- en neergaande tak globaal rede-



lijk goed is vertonen sommige lagen een discrepantie van 1 à 2°C maar met verschillend teken.

Tabel 7 vat karakteristieke gegevens samen te weten de (berekende) geopotentialhoogtes van de top en het eindpunt, de gemiddelde stijgsnelheid en gemiddelde daalsnelheid.

TABEL 7 Enkele karakteristieken van de Pernis oplating op 12 juli 1983, 12 Z.

plaats	berekende geopotentialhoogte (gpm)		gemiddelde snelheid (m min ⁻¹)	
	top	eindpunt	stijggedeelte	daalgedeelte
De Bilt	24220	550	361	807
Pernis	22815	475	335	691

Het eindpunt kan hier niet geïdentificeerd worden met het kimduikpunt omdat het kimduikpunt vele honderden m verschilt met de werkelijke kimduikhoogte. Deze zou op grond van de afstand niet meer dan ca. 100 m bedragen.

In het ballondeel van de oplating in De Bilt en het parachute deel van de Pernis oplating (Fig. 15) zijn de minuutwaarden van de gemeten radar geopotentialhoogtes geplot. De ECC WF 100-5 radar in De Bilt werd namelijk na het bereiken van het springpunt in De Bilt oplating gedraaid naar en gericht op de sonde van de Pernis oplating. Deze verkeerde toen in de daalfase. Binnen de nauwkeurigheidsmarge van een honderdtal meters kloppen de waarden goed met de berekende geopotentialhoogtes.

Fig. 17 toont de projecties van de trajectorieën van beide rawinsonde waarnemingen gevat in een set van range cirkels rond De Bilt. Uiteraard is er gelijkvormigheid van de trajectorieën te bespeuren.

Om te experimenteren met de geopotentialberekening voor de Pernis oplating werden uit de lijst van hoofdsynoptische stations van Nederland en België de volgende stations uitgeselecteerd: Pernis (51°57'N, 4°24'O), Valkenburg (06210), Hoek van Holland (06330), Gilze Rije (06350), Zierikzee (06325), Vlissingen (06310), Gent (06431), Antwerpen (06450) en Brasschaat (06452).

De configuratie van stations is weergegeven in Fig. 17 tegelijk met de verbindingen van de stations met Pernis en het eindpunt van de Pernis sondering. De vier eerste stations dienden als referentie stations voor de uitwerking van het ballongedeelte, de overige vijf als referentiepunten voor de uitwerking van het parachute deel.

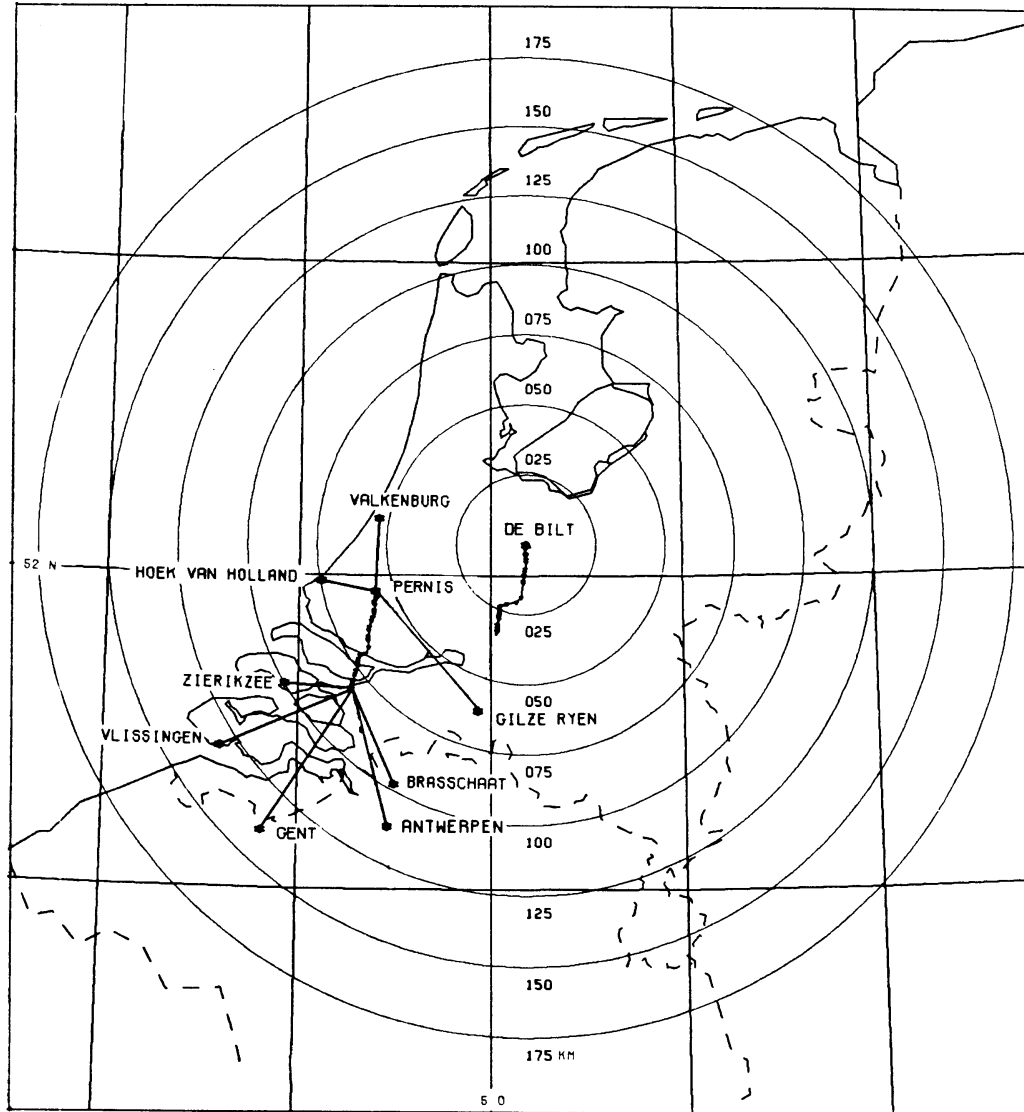


FIG.17 BALLON-EN PARACHUTEBAAN DE BILT EN PERNIS, 12 JULI 1983, 12 GMT

Tabel 8 vermeldt de resultaten voor de vier standaarddruk niveaus in het stijgedeelte.

TABEL 8 Geopotentialberekening in het stijgedeelte (ballon) voor de Pernis rawinsonde oplating van 12 juli 1983, 12 Z

referentiepunt	standaarddruk niveaus				afstand tot Pernis (km)
	500	300	250	200	
Pernis	5865*	9575*	10792*	12226*	-
Valkenburg	5861	9571	10788	12222	28.806
Hoek van Holland	5866	9576	10793	12229	19.355
Gilze Rije	5864	9575	10792	12226	56.452

De uitkomsten zijn binnen de marge van 5 gpm op alle niveaus aan elkaar gelijk. Bekeken t.o.v. Pernis zelf (asterisks) waar de normale rekenprocedure gevolgd is, zijn de deviaties maatgevend voor de nauwkeurigheid van de nieuwe methode.

Tabel 9 vat de analoge resultaten samen voor het parachute deel met de overige vijf stations als referentiepunten.

TABEL 9 Geopotentialberekening in het daalgedeelte (parachute) voor de Pernis rawinsonde oplating van 12 juli 1983, 12 Z

referentiepunt	standaarddruk niveaus				afstand tot eindpunt(km)	berekende hoogte eindpunt (gpm)
	500	300	250	200		
Vlissingen	5872	9553	10771	12207	51.612	480
Gent	5867	9548	10766	12202	59.667	475
Antwerpen	5869	9550	10768	12204	50.000	477
Brasschaat	5870	9551	10769	12205	37.097	478
Zierikzee	5872	9553	10771	12207	24.194	480

Ook hier weer overeenstemming binnen 5 gpm op alle niveaus.

Als men alle negen stations als een set van referentiepunten introduceert produceert de methode 5.2 de volgende waarden (tabel 10):

TABEL 10 Geopotentialberekening in stijg- en daaltak voor de Pernis opla-
ting van 12 juli 1983, 12 Z

referentiepunten		standaard druk niveaus			
		500	300	250	200
Alle negen	(ballon deel)	5865	9575	10791	12227
stations	(parachute deel)	5866	9546	10764	12199

In grote lijnen weerspiegelen de tabelwaarden hier wat al gevonden werd bij de berekeningen in de opgaande en neergaande tak afzonderlijk, zie tabel 8 en 9. De discrepanties tussen die van de opgaande en neergaande tak zijn verklaarbaar als men de temperatuurprofielen in Fig. 16 beschouwt.