

**KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT**

VERSLAGEN

V - 355

L. J. Beenker

"Windshear" bij zware buien.

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

De Bilt 1980

Publikatienummer: K. N. M. I. V-3 55(LMD)

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut,
Luchtvaart Meteorologische Dienst,
Postbus 201,
3730 AE De Bilt,
Nederland.

U.D.C.: 551.554 :
551.509.58 :
551.551.2

L.J. Beenker

Windshear bij zware buien.

1. Inleiding.
2. Procedures in de luchtvaart.
3. Windshear, soorten en sterkte.
4. Verticale stromingen in de atmosfeer.
5. Windshear in de neutrale atmosfeer.
6. Windshear als gevolg van buien. Voorbeelden uit de luchtvaart.
7. Oorzaken van windstoten vóór buien.
8. Onderzoek van Goff.

1. Inleiding.

Ter implementatie van een ICAO requirement is vanaf januari 1976 een voorschrift aan vliegers van kracht, dat inhoudt, dat hinderlijke of gevaarlijke windshear in de onderste 150 m. direct via de verkeerstoren aan de Meteo wordt gemeld. Zodra de Meteo-waarnemer deze melding heeft ontvangen dient hij hem op de ATIS (Automatic Terminal Information System) in te spreken.

Windshear kan in 3 verschillende typen voorkomen n.l.:

- a. Bij een bijzonder sterke inversie. In de onderste 150 m. zal dit op Schiphol meestal een door uitstraling gevormde grondinversie of een frontinversie zijn.
- b. Bij windstoten ten gevolge van zware buien.
- c. Bij harde wind.

Sinds de invoering werden per jaar slechts 10 - 15 gevallen gemeld. Hieruit moge al blijken dat Schiphol weinig gevoelig is voor windshear. Merkwaardig is, dat in tegenstelling tot de verwachting, type a. zelden lijkt voor te komen en ook type b. in zuivere vorm althans, slechts sporadisch werd gerapporteerd. Veelvuldig bleek ofwel type c. sec ofwel in combinatie met buiachtige verschijnselen op te treden (procentueel uiteraard).

Om deze reden zal spreker zich dan ook niet beperken tot, zoals in de convocatie vermeld, alleen maar type b. maar ook even ingaan op type c.

2. Procedures in de luchtvaart.

Vooraf ten behoeve van de aanwezigen, die weinig of geen contact met de luchtvaart hebben of hebben gehad, wordt het wenselijk geacht eerst even enkele principes van het vliegen en enkele procedures, die bij de landing gevolgd worden aan te tippen.

Snelheden.

De draagkracht van een vliegtuigvleugel hangt o.a. af van de snelheid ten opzichte van de lucht en van de luchtdichtheid. De snelheid wordt met een pitotbuis gemeten en heet ongecorrigeerd voor luchtdichtheid IAS (Indicated Airspeed).

Als er geen wind is, zijn de IAS en de grondsnelheid aan elkaar gelijk. (We zullen gemakshalve de luchtdichtheid constant veronderstellen.) Is er wel wind, dan is de vectorële som van IAS en wind gelijk aan de grondwindvector.

Overtreksnelheid.

Dit is de voor een vliegtuig belangrijkste (lucht)snelheid. Indien de snelheid onder deze snelheid daalt, raakt de luchtstroming los van de vleugel en valt de draagkracht weg: dus valt het vliegtuig.!

Het zal duidelijk zijn, dat elke vlieger altijd zal trachten te vermijden, dat dit gebeurt. De overtreksnelheid is afhankelijk van de vleugelbelasting dus van de belading. Bij moderne verkeersvliegtuigen ligt hij op ongeveer 140 knopen (70 m/sec.).

Naderings- en landingshulpmiddelen.

Om bij nacht en ontij te kunnen vliegen zijn steeds meer hulpmiddelen ontwikkeld tot en met de volledig automatische landing.

Een belangrijk hulpmiddel is de ILS (Instrument Landing System) waarbij een smalle bundel radiogolven de richting aangeeft, waarin een vlieger moet vliegen om de landingsbaan te bereiken.

Deze straal maakt een hoek van 3 graden met het horizontale vlak. Deze stralenbundel heet in de luchtvaart "Glidepath". De nadering op de Glidepath geschiedt langs een lange (10 - 25 km) rechte lijn en de snelheid waarmee dit gebeurt is ongeveer 70 m/sec, althans indien er geen wind is. De daalsnelheid is dan $70 \sin 3^\circ$ dus ongeveer 3.60-3.70 m/sec. Daarbij zijn wielen en landingsklappen uit en wordt zoveel motorvermogen gebruikt, dat samen met de vrijkomende potentiële energie de wrijvingsweerstand juist wordt overwonnen.

Correcties.

Bij landingen tegen een krachtige wind in behoort de vlieger het vermogen op te voeren om op de Glidepath te blijven want zijn grondsnelheid vermindert hierdoor, maar in eerste instantie blijft de daalsnelheid gelijk. Hetzelfde geldt bij het vliegen door een dalwindgebied. Uiteraard dient bij landingen met wind mee, wat tegenwoordig als gevolg van de bepalingen met betrekking tot geluidshinder vrij regelmatig voorkomt, en bij het vliegen door stijgwindgebieden vermogen te worden teruggenomen.

Straalmotoren.

De hebbelijkheid van straalmotoren is, dat door de hoge rotatiesnelheden van de turbinedelen niet zoals bij zuigermotoren plotselinge veranderingen van het vermogen mogelijk zijn. Het opvoeren van een laag vermogen naar het toegestane maximumvermogen kan 6-8 sec. duren. Kost het tijd, voordat een stuurcorrectie alléén geleid heeft tot het terugkomen op de ideale naderingslijn, dit motorgedrag kan er soms toe bijdragen, dat de benodigde tijd er niet meer is.

Ongevallen.

Men bedenke, dat het met vol startvermogen mogelijk is bij gelijkblijvende snelheid te klimmen met een snelheid van 4-8 m/sec. afhankelijk van de belading óf horizontaal te versnellen met ca. 1.5 m/sec.

De gevaarlijkste situatie doet zich voor indien een vlieger eerst de combinatie van stijgwind en harde tegenwind ontmoet en korte tijd later in meewind gecombineerd met daalwind terechtkomt en dan nog vooral indien dit in de laatste fase van de nadering gebeurt dus op geringe hoogte.

3. Windshear. Soorten en Sterkte.

In de Meteorologie wordt onder "Vertical windshear" gewoonlijk de verschilvector verstaan van de windvectoren op 2 verschillende hoogten op de verticaal. Men kan de shear bepalen van de momentane wind en van de over 10 min. of een half uur gemiddelde wind. Het is evident, dat de shear een meer constante waarde verkrijgt naarmate de duur, waarover gemiddeld wordt, langer is. Men kan, indachtig de onderverdeling in de inleiding, bij een uitgesproken sterke inversie een langdurige shear met een hoge waarde aantreffen en bij zware buien een sterke shear met een duur van in het algemeen slechts enkele min. tot mogelijk 15 min.

Bij harde wind blijft door de sterke uitwisseling de shear van de 10 min. wind vrij klein maar vertoont de shear van de momentane wind zeer hoge waarden gedurende slechts enkele seconden.

De ICAO heeft een schaal gepubliceerd voor de grootte van windshear en de belangrijkheid voor de luchtvaart. Deze luidt als volgt:

Licht	: tot	5 knopen/100 voet ofwel tot	8.2 m/sec. per 100 m.
Matig	: 5-9	" " "	8.2-14.75 m/sec. per 100 m.
Zwaar	: 9-12	" " "	14.75-19.7 m/sec. per 100 m.
Zeer zwaar	: meer dan 12 kn./100 voet ofwel meer dan	19.7 m/sec. per 100 m.	

In de luchtvaart moet men bij het begrip shear veel water in de wijn doen. In de eerste plaats is de techniek nog niet zover gevorderd, dat verkeersvliegtuigen verticaal landen en starten. In de tweede plaats doet een vliegtuig zijn naam pas eer aan indien het zich elke sec. op een andere plaats bevindt. Men kan nauwelijks verwachten, dat de per sec. ondervonden wind constant is en zeker niet in de onstabiele atmosfeer.

Er zijn schrijvers, die het vectorieel verschil tussen de op twee verschillende plaatsen in het horizontale vlak bestaande windvectoren horizontale windshear noemen.

Men kan ook het vectorieel verschil bepalen tussen de vectoren, die de gemiddelde wind voorstellen over elk partje van de baan dat per sec. wordt afgelegd en dit vectorieel verschil dan windshear per sec. noemen. In de loop van 1979 is dit o.a. door de K.L.M. ingevoerd.

Het is mogelijk de ICAO-schaal voor shear-intensiteiten om te rekenen naar een shearwaarde per sec. door uit te gaan van de onder normale omstandigheden gebruikelijke daalsnelheid op de "Glidepath". Deze is ongeveer 3.6 m/sec. of 100 m in 27 à 28 sec.

We krijgen dan de volgende cijfers: Lichte shear tot $0,3 \text{ m/sec}^2$, matige shear van $0,3-0,53 \text{ m/sec}^2$, zware shear van $0,53-0,71 \text{ m/sec}^2$ en zeer zware shear bij meer dan $0,71 \text{ m/sec}^2$.

4. Verticale stromingen in de atmosfeer.

Het behoeft geen betoog, dat behalve de al of niet verticale windshear de verticale component van de wind uiterst belangrijk is. We geven enkele getallen van verticale snelheden en houden daarbij in gedachten de maximaal bereikbare klimsnelheden van 4-8 m/sec. en de daalsnelheid op de "Glidepath" van ca 3,6 m/sec.

- 1.) Modelvliegtuigen die tegen de wind in opgetrokken worden met een lijntje van 50 m. en een eigen daalsnelheid hebben van 0.6-1 m/sec. blijken op mooie zomerse dagen in de thermiek weg te vliegen.
- 2.) Zweefvliegers treffen op deze dagen op wat grotere hoogten stijgsnelheden aan (tot aan de wolkenbasis) tot soms 4-5 m/sec.
- 3.) In Cu.congestus vonden zij opwaartse snelheden van soms 10 m/sec.
- 4.) De grootste door een barograaf geregistreerde stijgsnelheid ooit door een zweefvlieger gerealiseerd was ruim 40 m/sec. (Abel Sintora, 28-2-1966 te Cordoba-Argentinië).
- 5.) De daalsnelheden, die zweefvliegers ondervinden, blijken vrij veelvuldig half zo sterk te zijn als de op die dag gevonden thermieksterkte.
- 6.) Enkele malen zijn door zweefvliegers in de invloedssfeer van onweersbuien daalsnelheden over grote gebieden (1-3 km breed) aangetroffen o.a. door Hanna Reitsch bij de wereldkampioenschappen zweefvliegen 1952 te Madrid. Vanaf 4000 m. hoogte zag zijn zich na enkele minuten gedwongen te landen toen zij in een daalwindgebied van 20 m/sec. terechtkwam.

5. Windshear in de neutrale atmosfeer.

Uit de op Schiphol geruime tijd ontvangen halfuurlijkse Cabauwwinden bleek, dat de shear van de gemiddelde wind tussen 80 en 10 m. slechts zéér incidenteel een waarde van 5 knopen/100 voet overschrijdt.

In een publicatie van zijn hand constateert George Fichtl van het Marshall Spaceflight Center, dat tot een gemiddelde wind van 44 knopen de shear een waarde van 5 knopen/100 voet niet overschrijdt en dat derhalve in de neutrale atmosfeer slechts van lichte shear sprake is ook al waait het hard.

Uit de in Nederland gebruikelijke windregistraties met een langzaam papiertransport kan weliswaar goed het 10 min. gemiddelde van de wind worden bepaald, maar veel inzicht in de windstructuur kan er niet mee worden verkregen. Het signaal van de anemometer van baan 24 is op verzoek van o.g. door INSA op een snelle recorder met een papiertransport van 1 mm per sec. en 1 mm per 3 sec. (o.a.) geplaatst. Aan de hand van enkele registraties hiervan zullen we trachten iets te weten te komen van de snelheid, waarmede de turbulente elementen de windmeter passeren en hieruit enkele conclusies trekken.

Allereerst moet worden opgemerkt, dat de registratie bij het hoogste papiertransport van 1 mm/sec. reeds een enigszins vloeiend beeld vertoont, wat veroorzaakt zou kunnen worden door het overschrijden van de meetmogelijkheden van de combinatie anemometer-recorder. Kennelijk worden de kleine wervels met een duur van korter dan 2 à 3 sec. gladgestreken.

Om deze reden zijn de registraties overwegend met de snelheid van 1 mm/3 sec. gedaan.

Enkele conclusies.

Vergelijking van de registraties bij gemiddelde windsnelheden van 15-30 knopen (7.5-15 m/sec.) 's nachts bij heldere hemel, bij aanwezigheid van een gesloten stratodek, bij stratocumulusbewolking al of niet afgewisseld met restanten van boven zee gevormde buien, met registraties, overdag onder zeer uiteenlopende omstandigheden tot en met situaties met droge thermiek en met overdrijvende Cumulusbewolking toont dat deze niet of nauwelijks (in het laatste geval) van elkaar onderscheiden kunnen worden. Blijkbaar overheerst de turbulentie ten gevolge van wrijving het beeld.

Pas bij overdrijvende actieve Cumuli beginnen er wat meer pieken in de snelheid op te treden zonder hier reeds van echte uitschieters te willen spreken.

Een echt mooie langgolvlige beweging blijkt slechts bij uitzondering voor te komen. Indien al aanwezig fluctueert de frequentie tussen zeer wijde grenzen. Wat de registraties interessant maakt zijn elkaar vrijwel continu opvolgende reeksen "gusts" met een tijdsduur variërend van 5-15 sec. Bij de forse windsnelheden laat zich hieruit een "gustwavelength" (zie publikaties van Wieringa) berekenen van 30-200 m.

Door (om enig rekenwerk mogelijk te maken) even aan te nemen, dat de fluctuaties van de windsnelheid veroorzaakt worden door het overschuiven van een als het ware bevroren systeem en dan een vliegtuig op 10 m. hoogte in dit bevroren systeem een vlucht in de windrichting of er tegenin (dat maakt geen verschil) te laten uitvoeren kan de shear per sec., die aldus ondervonden wordt, worden berekend.

Fig. 1 Op 7 november 1979 passeerde omstreeks 20 uur GMT een occlusie Schiphol. De Metars van 1955 resp. 2025 GMT luiden als volgt:

1955 20012 2700 63 ra 5st003 8sc012 09/08 990
2025 25027/37 5000 61 ra 2 st004 4st008 8sc012 12/12 989.

Spreker, die wachtmeteoroloog was, schakelde de recorder pas na de front-passage in toen de momentane wind reeds tussen 18 en 29 knopen varieerde. Tussen 20.18 en 20.20 GMT lag hij tussen 17 en 34 knopen. Daarna viel de wind weer terug tot (over 45 sec. gemiddeld) 18 knopen om vervolgens in 16 sec. van 17 naar 41 knopen op te lopen. Dit waren echter de uiterste minima en maxima. Wel bleef 14 sec. nadat de wind opliep gedurende 25 sec. de wind gehandhaafd op over deze periode gemiddeld 33 knopen.

Uitgaande van de toename van de (over enkele tientallen sec. gemiddelde) wind van 18 naar 33 knopen in 14 sec. mag gesteld worden, dat de horizontale afstand, die in dit "bevroren" systeem de luchtpakketten in 14 sec. afgelegd hebben, bij deze windsnelheid ca. 180 m. zal hebben bedragen.

Ons hypothetisch vliegtuig met een snelheid van 70 m/sec doet over 180 m, 2,6 sec. en ondervindt dus een "shear" van 7,5 m/sec in 2,6 sec. hetgeen neerkomt op een shearwaarde van $2,9 \text{ m/sec}^2$. en dan te bedenken dat we reeds van zeer zware shear mochten spreken bij waarden groter dan $0,71 \text{ m/sec}^2$.

We dienen ons echter zeer goed te realiseren, dat deze uitermate hoge waarde slechts gedurende 2,6 sec. aanwezig was en zien in fig. 1, dat onmiddellijk hierop volgend de shear van teken verandert en de opgetreden afwijking van de ideale baan weer geheel of ten dele corrigeert.

Het zal niemand verbazen, dat vliegtuigen zoals DC-10 en B-747, die met zeer geavanceerde meetapparatuur en zg. Flight recorders zijn uitgerust, deze kortdurende shear eveneens meten. In het AIDS (Aircraft Integrated Data System) worden vele tientallen meetgegevens elke sec. op magneetband vastgelegd. Na de vlucht kan deze band worden uitgeprint.

Fig. 2 geeft een dergelijke print te zien. Het betreft hier de laatste fase van de vlucht van de PH-BUC, die op 7-10-1979 om 06.58 GMT op Schiphol landde. De gehele nacht hadden vliegers geklaagd over sterke dwarswind-shear.

De zwaar omlijnde kolom geeft de berekende shear tussen de per sec. bepaalde gemiddelde wind in Kts/sec. Geheel rechts zijn deze waarden nog eens grafisch uitgezet.

Uit de (hier niet afgedrukte) lijst met windgegevens kan tussen 500 voet hoogte en de grond een gemiddelde shear worden berekend van 3.5-4 kts/100 voet dus ca. 1.9 m/sec. per 30 m. ofwel een gemiddeld lichte shear.

De FORECAST van kortdurende shear.

Het is uit de aard der zaak niet mogelijk het verloop van de windsnelheid langs de vliegbaan te forecasten. Wel kan een taxatie worden gemaakt van de maximaal mogelijke shear in de laatste fase van de vlucht. Cannemeijer en Wieringa hebben hiervoor een nomogram ontworpen. Daarbij zijn zij uitgegaan van de Gustfactor (U_{max}/\bar{U}), die van hoogte, windsnelheid en bodemruwheid afhankelijk is en door langjarige metingen aan windmasten bekend is.

Door te veronderstellen, dat een naderend vliegtuig op 60 m. hoogte de maximaal mogelijke en op het begin van de landingsbaan de minimaal mogelijke wind ondervindt, kan de hieruit voortvloeiende maximum shear worden bepaald (zie ref. 2).

6. Windshear tengevolge van buien. Voorbeelden uit de luchtvaart.

Er zijn in het verleden tal van vliegtuigongelukken gebeurd, waarvan de oorzaak nooit opgehelderd is. Sinds de intrede van de "Black box" aan boord van vliegtuigen is het mogelijk achteraf na te gaan, welke oorzaken tot de ramp hebben geleid. Vooral sinds in 1975 in de USA enkele vliegtuigongelukken plaats vonden staat het verschijnsel windshear volop in de belangstelling.

Fig. 3. Een geval van uitermate sterke windshear deed zich tijdens de wereldkampioenschappen zweefvliegen 1952 in Madrid voor. Het bericht haalde de pers niet, maar werd slechts in enkele zweefvliegperiodieken beschreven.

Wallington (ref. 3) schildert in zijn boek "Meteorology for gliderpilots" de gebeurtenissen als volgt:

De Argentijn R. Ortner dook na een geslaagde wedstrijdvlucht met retour naar Madrid, met een snelheid van 140 km/uur voor een "zoemertje" op de finish af, waar een veelkoppig publiek verzameld was, toen hij plotseling zijn snelheidsmeter op 200 km/uur zag springen. Op dat moment zagen de toeschouwers de vleugel van zijn "Sky" angstwekkend doorbuigen. Dit gebeurde op 40 m hoogte!

Even later arriveerde een tweezitter. Deze vloog een ander circuit, waarbij hij op 40 m. hoogte plotseling in harde rugwind terechtkwam. Hij stortte letterlijk neer. De oorzaak van deze extreme windshear lag in het katabatisch uitvloeien van koude lucht, die afkomstig was van buien, die tegen de berg-hellingen 40 km N.W. van Madrid waren gevormd. (Althans volgens de lezing van Wallington.)

Als aangenomen mag worden, dat de shearlaag op 40 m. hoogte een vijftal meters dik was, kan de grootte van de shear per 30 m worden berekend op 100 m/sec. zijnde 5x de ICAO grens voor zeer zware shear (zie par. 3).

Fig. 4. Op 7-8-1975 startte een Boeing 727 van Stapleton, het vliegveld van Denver. De regen van een naderende onweersbui was reeds tot ongeveer het midden van de startbaan gevorderd. Enkele honderden meters verder trok de vlieger het toestel op. Het kwam niet hoger dan 30 m. doordat binnen 5 sec. de snelheid van 158 tot 116 knopen terugviel. Bij het passeren van de kern van een daalwindgebied veranderde de aanvankelijke tegenwind in een harde rugwind. Het toestel smakte reeds voor het eind van de baan tegen de grond. Uit de beschikbare gegevens werd achteraf een rugwindcomponent berekend van tenminste 60 knopen. Het verlies van draagkracht door teruglopen van de IAS (luchtsnelheid) was in dit geval veel belangrijker dan de daalwind, die op deze geringe hoogte nooit meer sterk kan zijn geweest.

Fig. 5. Op 24-6-1975 naderde een Lockheed Tristar Kennedy-airport, het vliegveld van New York, nadat de machine ervóór, vlak voor hij de baan bereikte, een dwarswind van ca. 50 knopen had ondervonden. De L-1011 Tristar kreeg beneden 400 voet in zeer zware regen plotseling een harde dwarswind en de IAS viel terug van 144 tot 121 knopen. Door vol startvermogen in te zetten kon de snelle daling op 60 voet worden beëindigd en slaagde de piloot erin een z.g. overshoot te maken.

Fig. 6. Nadat intussen twee vliegtuigen onder moeilijke omstandigheden een goede landing hadden gemaakt, naderde 7 min. na de overshoot van de Tristar een B-727 de baan.

Deze machine vloog op 700 voet hoogte een regengebied binnen. Daarna kwam hij door toename van de tegenwind en afname van de daalwind tussen 500 en 400 voet hoogte eerst bóven het glijpad. Vervolgens liep door afname van de tegenwind de IAS in enkele seconden terug van 138 tot 122 knopen en doordat tegelijk de daalwindcomponent toenam tot ruim 21 voet/sec. verloor het toestel zeer snel hoogte. (Daalsnelheid ruim verdubbeld.) Ondanks vol startvermogen gelukte het de piloot niet meer de baan te bereiken en ca. 700 m. voor het begin van de startbaan smakte het toestel temidden van de aanloopverlichting tegen de grond (ref. 4 en 5).

Hier wordt wegens ruimtegebrek volstaan met het bovenstaande en met de zeer instructieve figuren. Op een ander geval, waarvan de K.L.M. uitgebreide gegevens verstrekke wordt uitgebreider ingegaan.

Fig. 7 en 7a. Op 1 juni 1979 naderde de KLM Boeing 747 het vliegveld van Bahrein voor een landing. De verkeerstoren waarschuwde voor turbulentie t.g.v. buien, waarom de naderingssnelheid ruim aan de hoge kant werd gehouden (20-30 knopen hoger dan normaal gebruikelijk). Geland werd op de N.W.-baan. De wind was van 2200-1800 voet N.W. en varieerde tussen 20 en 37 knopen. Bij de toename van de tegenwind tussen 1900 en 1800 voet liep de TAS (True Airspeed d.i. de voor temperatuur gecorrigeerde luchtsnelheid) op tot ruim 180 knopen. (Zie tabellen en grafiek fig. 7 en 7a). Doordat met deze hoge snelheid een gebied met stijgwind (kolom 7) werd gepasseerd ging tijdelijk de daling in een stijging over. Enkele seconden later ging de stijgwind in daalwind over, die snel sterker werd en even 38-39 knopen (19 m/sec. !) bereikte. (Kolom 7).

Bovendien veranderde de windrichting van N.W. naar Z.W. (Kolom 9). Daardoor liep de TAS terug tot ca. 145 knopen. Deze combinatie had tot gevolg, dat de daalsnelheid van het vliegtuig geruime tijd 50 voet/sec. bedroeg. Dit is 4 maal de normale daalsnelheid!

Bij de krachtige dwarswind was de drifthoek gedurende 9 sec. 10-12 graden. (Zie kolom 4). De piloot voerde bij de duik in 3 etappes het vermogen op tot vol startvermogen, dat hij 30 seconden aanhield. Daarbij nam de daalwind geleidelijk in sterkte af, zodat ondanks de verdere afname van de tegenwindcomponent na enige tijd weer hoogte kon worden gewonnen. Beschouw nu eens aandachtig kolom 9 en let op de geweldige variaties in de wind!

Het behoeft geen betoog, dat daardoor de shear af en toe zeer hoge waarden bereikte hetgeen uit de kolommen 8^1 en 8^2 blijkt. Zowel in de langsshear als in de dwarsshear komt eenmaal een waarde voor van 7.5 - 7.6 knopen/sec.

Dit is 3.8 m/sec^2 . (ICAO grens voor zeer zware shear 0.71 m/sec^2 !)

Ook hier is de enorme variabiliteit zeer opvallend.

7. Oorzaken van windstoten vóór buien.

In het kader van deze voordracht kan helaas nauwelijks op het verschijnsel buien en op de oorzaak van windstoten t.g.v. buien worden ingegaan. Daarom zal het verschijnsel slechts zeer beknopt worden beschreven.

In de Cumulusfase bestaat de wolk uit waterdruppeltjes met diameters tussen ca. 0.005 en 0.03 mm . Bij de sterke afkoeling, die optreedt bij het bereiken van steeds grotere hoogten groeien de waterdruppeltjes verder aan en vormen zich ijsnaaldjes, sneeuwvlokken en hagelkorrels. Waterdruppels worden niet groter dan ca. 4 mm diameter, doordat grote druppels niet bolvormig blijven tijdens de val. De valsnelheid wordt niet hoger dan ca. 8 m/sec . Slechts de wat grotere hagelstenen vallen sneller. Het is dus duidelijk, dat bij stijgsnelheden in de Cumulonimbus van $10-40 \text{ m/sec}$. de maximale hoeveelheid vloeibaar water per m^3 hoog in deze wolk en in de kern van het stijgsgebied wordt aange troffen. Dit laatste houdt verband met de "entrainment" d.i. menging met van de omgeving afkomstige drogere lucht. De kern van het stijgsgebied koelt zeer waarschijnlijk keurig verzadigdadiabatisch af, doordat de entrainment niet tot zover in de kern doordringt. Uiteraard is hierbij uitgegaan van zeer volumineuze Cb's. Deze kern behoudt daardoor de grootste stijgkracht en de uit de kern afkomstige lucht, die bij het bereiken van de Tropopause nog een stijgsnelheid bezit van enkele tientallen m/sec . kan daardoor ver de Stratosfeer binnendringen. Daarna wordt deze lucht snel véél kouder dan de stratosferische omgevingslucht. Entrainment blijft plaatsvinden maar nu is dit menging met veel warmere omgevingslucht (ref. 15).

Het beschreven proces geldt natuurlijk het best indien er slechts geringe windverschillen aanwezig zijn in de gehele Troposfeer. Vooral bij buien, die zich aan fronten vormen zal dit laatste niet het geval zijn. Deze Cb's staan niet meer verticaal maar hellen al of niet sterk over. Het zijn nu vooral deze gigantische Cb's, die in de USA bestudeerd zijn en waarover de laatste 10 jaren is gepubliceerd. Vooral bij deze buien treedt squall-line-vorming op en hier vindt in de middelbare niveaus entrainment van droge lucht aan de achterkant onder de wolk plaats, waardoor in de laatste jaren de afkoeling van lucht in het neerslaggebied vooral aan verdamping in de drogere a.h.w. ondergeschoven lucht werd toegeschreven.

Dit behoeft natuurlijk niet te betekenen, dat de oudere theorieën hun geldigheid verliezen. Mogelijk is vroeger de "meesleurende" werking van vallende neerslag wat overschat, maar ongetwijfeld wordt in het gebied, waar neerslag door valt, lucht afgekoeld, omdat deze van bovenkomende neerslag nu eenmaal altijd een lagere temperatuur heeft. Zeer zeker is ook altijd onder het nul-graden-niveau de afkoelende werking t.g.v. smeltende sneeuw en hagel aanwezig. Oudere onderzoekers (Brancato 1942) vestigden vooral hierop sterk de aandacht. Men zal echter altijd voor ogen moeten houden, dat er vele soorten Cb's zijn en dat bepaalde mechanismen in het ene geval domineren en in het andere geval nauwelijks herkend worden.

Fawbush en Miller publiceerden in 1954 een artikel, waarin een regel werd gegeven voor het opstellen van een verwachting voor de max. snelheid van te verwachten windstoten. Zij onderzochten daartoe 62 onweersbuien. Zij ontdekten een correlatie tussen de sterkte van de max. windstoot enerzijds en het verschil in temperatuur van de lucht vlak voor de onweersbui en nádat de eerste zware regen was gevallen anderzijds (Zie ref. 11).

Ook Wallington deed een regeltje aan de hand voor het forecasten van de max. windstoot (Ref. 3). Hij ging eveneens uit van het temperatuurverschil en stelde, dat de max. stoot gelijk is aan de gemiddelde wind, die aanwezig was vóór de bui plus 5x de temperatuurdaling in gr.C. Ook Wallington wijst op een relatie tussen deze temperatuurdaling en de hoogte van het nul-graden-niveau. Hij hechtte vooral waarde aan de verdamping van vallende neerslag onder de Cb.

Fujita, die al jarenlang tot de experts op het gebied van buien mag worden gerekend, geeft in Ref. 5 een, naar eigen zeggen, speculatieve verklaring voor de zeer sterke daalwinden, die hij "Downbursts" noemde. Dat zijn daalwinden die op een hoogte van 300 voet nog een verticale component hebben van 12 voet per sec. (dus gelijk aan de verticale component van een vliegtuig op het glijpad).

Bij een onderzoek met behulp van een straalvliegtuig viel de grote daalsnelheid op van wolke toppen, die (ver) de stratosfeer waren binnengedrongen. Uit opeenvolgende foto's berekende Fujita eenmaal een daalsnelheid van 41 (!) m/sec. (Fig. 8). De redenering van Fujita is, dat wolke toppen, die na penetratie ver in de Stratosfeer zeer veel kouder dan de omgevingslucht zijn geworden (volgens hem tot 30 gr. C!), daardoor aan een enorme neerwaartse versnelling onderworpen worden. Deze terugvallende wolke top zou bij zijn verblijf in de

Stratosfeer een grote horizontale snelheid hebben verkregen en daardoor tot gevolg hebben dat er een zeer sterke daalwind schuin door de wolk optreedt, die bij het bereiken van de daalwind, die in de middelbare niveaus ontstaat nog sterker zou worden (Zie fig. 9.).

Bij vooral deze laatste postulatie kunnen wel enige vraagtekens worden geplaatst. Een aldus schuin neerwaarts schietende daalwind zou vermoedelijk eerder de daalwind van een naburige cel versterken, dan die van de eigen cel, maar er rijzen meer problemen. Een uit de Stratosfeer terugvallende top zal óf aan sterke menging met de omgevingsvlucht onderworpen zijn en dan ook de snelheid van deze lucht overnemen óf zich van entrainment niets aantrekken, maar dan ook zijn eigen oorspronkelijk van onderaf meegebrachte snelheid behouden. (Zie vooral hiervoor Newton Ref. 15.)

Newton wijst herhaaldelijk op de invloeden van entrainment. Lucht afkomstig van de buitenkant van een stijgkolom, mengt zich door de wervels, die door de grote snelheidsverschillen aldaar ontstaan, intensief met omgevingslucht. Daarbij treedt een sterke verdamping op en dus afkoeling. Entrainment heeft dus tot gevolg, dat de buitenste mantel van de stijgkolom voortdurend wordt afgestroopt en achterblijft. Slechts de kern van de kolom behoudt zijn stijgkracht en slechts indien de kolom met stijgende lucht zeer breed is kan de stijging gehandhaafd blijven. (Hetzelfde geldt voor thermiek. Dat lucht in de kern van grote thermiekkolommen niet met omgevingslucht wordt gemengd blijkt uit de juistheid van de bepaling van het condensatieniveau.)

Menging treedt uiteraard altijd zeer sterk op langs de top van de stijgkolom. De lucht heeft vlak onder de wol Kentop een veel grotere verticale snelheid, dan de wol Kentop zelf. Op het scheidingsvlak vindt zeer sterke menging en verdamping plaats en de gemengde lucht wijkt opzij om plaats te maken voor verse van onderaf aangevoerde onverdunde lucht. De uitgeweken gemengde lucht verliest door verdamping alle stijgkracht en wordt prooi van de op die hoogte heersende wind en vormt dan het materiaal waaruit het ~~aam~~beeld wordt opgebouwd.

Het zeer kleine deel van de stijgkolom, dat de stratosfeer binnendringt, zal na intensieve menging met stratosferische omgevingslucht in nog véél kleinere hoeveelheid terugvallen tot onder de Tropopause, maar zolang er grote snelheidsverschillen zijn blijft er langs de voortdurend kleiner wordende kern menging optreden. Newton stelt dat door menging met eerder achtergebleven wolkenlucht de daling reeds op een hoogte van 10-11 km tot staan wordt gebracht.

Fig. 10 en 11 geven beide een doorsnede (evenwijdig aan de windrichting) weer van een groot buiencomplex, waarin zich regelmatig op enige afstand vóór de "laatste" cel weer een nieuwe cel vormde. Dit soort complexen gigantische buien wordt vrij regelmatig aan de oostzijde van de Rocky Mountains aangetroffen. Overigens wordt erop gewezen dat er ook bij gigantische Cb complexen niet altijd een uitstroming van koude lucht is waargenomen (Fig. 12).

Fig. 13. Strauch (Ref.8) deed in het kader van de N.H.R.E. (National Hail Research Experiment 1973) met behulp van 2 Doppler radarapparaten onderzoek, toen toevallig de kern van een hagelbui pal over een ervan trok. De baan die deze cel volgde, week slechts 5 gr. af van de verbindingslijn tussen de 2 radars. Dit was een der cellen van dezelfde "Raymer storm" van Fig. 11. Gedurende 12 minuten werden met elke radar ca. 28000 snelheidsspectra verkregen, waarom een computer met hoge snelheid ingezet moest worden om de gegevens te bewerken. Toen beide radarapparaten werden ingeschakeld was het onderste deel van het stijgsgebied al gepasseerd. Niettemin bevestigt het resultaat van deze metingen dat (hier) de daalwind ontstond op hoogten van minder dan 8 km en dat daar- onder de snelheid van de daalwind toenam (12 m/sec.).

8. Het onderzoek van Goff.

R.C. Goff verrichtte als medewerker van het National Severe Storms Laboratory onderzoek naar de wijze, waarop koude lucht, die van een daalwind- gebied van een zware bui afkomstig was, voor de bui uitvloeide. Hij kon daar- voor gebruik maken van een 461 m hoge T.V.-mast, waarop op 7 hoogten metingen konden worden gedaan van wind en temperatuur, en op 3 hoogten van verticale wind en natte boltemperatuur. Drukmetingen vonden plaats aan de top en de voet van de mast.

Goff publiceerde de resultaten van zijn onderzoek, toen hij 20 gevallen had onderzocht. Het ging hem vooral om de vorm van de voorkant van de uit- vloeïende koude lucht. Het bleek, dat er duidelijk stadia waren te onderschei- den, afhankelijk vooral van de ouderdom van de cel, die de daalwind produceerde.

In het eerste stadium, kort nadat de daalwind de grond bereikt heeft, bevindt de voorkant van de uitvloeïende koude lucht zich nog dicht bij de voor- kant van de neerslagzone, maar de eerstgenoemde, die wij verder "gustfront" noemen, versnelt geleidelijk en loopt steeds verder voor de neerslagzone uit. Daarbij neemt de dikte van de koude laag geleidelijk af.

Zodra de toestand quasi-stationair is geworden kan van het tweede stadium worden gesproken. Het gustfront verwijdert zich in dit stadium niet meer verder van de bui.

In het derde stadium neemt de intensiteit van de bui af en vertraagt het gustfront. De afstand tussen gustfront en bui neemt geleidelijk weer af.

Tenslotte gaat in het vierde stadium de structuur van het gustfront geheel verloren.

Van de 20 gevallen, die Goff bestudeerde vielen er 8 in het tweede stadium en in elk der overige stadia 4. Vooral de stadia 1 en 2 zijn interessant. In stadium 2 was de gemiddelde treksnelheid van het gustfront ruim 11 m/sec, verliepen er 18 minuten tussen het passeren van het gustfront en de neerslagzone en lag de gemiddelde afstand daartussen op bijna 12 km.

Het aantal gevallen lag in elk der stadia zó laag en de onderlinge verschillen waren daarbij zó groot, dat Goff er de voorkeur aan gaf voor elk stadium een representatief geval uit te zoeken in plaats van een soort gemiddelde te construeren.

Fig. 14. Van boven naar beneden wordt de aandacht op het volgende gevestigd:

Streamline analysis: De neus ligt zeer laag. De warme lucht wordt door de koude lucht gedwongen op te stijgen. De koude lucht stijgt vlak achter het gustfront echter óók op door contact met de warme lucht.

Vert. velocity: De stijgsnelheid van de warme lucht is boven de neus 4 m/sec. Die in de koude lucht +1 m/sec. vlak achter de neus geleidelijk overgaand in -1 m/sec. verder naar achteren.

Wet Bulb pot. temp: De verschillen zijn bijzonder gering.

Potential temp: (In halve gr.K). De verschillen zijn (althans hier) óók niet erg groot. Slechts 2.5 - 3 gr.

Windspeed parallel to front: In de warme lucht max. 14 m/sec. in de koude lucht slechts 2 m/sec.

Wind normal to front: De warme lucht stroomt met max. 8 m/sec. naar het front toe (naar links). De koude met 6-8 m/sec. naar rechts.

Pressure: Bij het naderen van de regenzone stijgt de druk geleidelijk met ca. 2 mb.

Fig. 15. Het tweede stadium. In de stroomlijnanalyse is te zien, dat de neus op grotere hoogte is terecht gekomen, waarschijnlijk onder invloed van de bodemwrijving. Op enige afstand achter het gustfront heeft zich een duidelijke wervel gevormd.

De stijgsnelheid is maximaal wederom pal voor en boven het gustfront. (5 m/sec.). In de koude lucht vóór de wervel daalt de lucht ook. (Uiteraard.) Uit de analyse van de potentiële temperatuur blijkt de helling van het front zeer steil te zijn geworden en de (toegenomen) verschillen zijn geconcentreerd in het gebied pal achter het gustfront.

De relatieve windsnelheden loodrecht op het front zijn zeer duidelijk toegenomen. De warme lucht beweegt met maximaal 14-16 m/sec. naar links en de koude lucht (bovenin de laag) met max. 10 m/sec. naar rechts. Vlak boven het aardoppervlak stroomt de koude lucht echter óók naar links met op enkele plaatsen 6 m/sec. Let wel, relatief t.o.v. het snel bewegende gustfront! Er is dus relatief sprake van een terugstroming.

Tenslotte is de drukstijging in dit voorbeeld spectaculair n.l. 3 mb in nog geen 4 minuten.

Fig. 16. Het derde stadium. De verschillen beginnen weer af te nemen.

De wervel in de stroomlijnanalyse is echter nog belangrijker geworden dan in Fig. 15. De neus zowel als de wervel liggen weer hoger.

De grootste stijgsnelheden worden nog steeds in de warme lucht vlak voor het gustfront gevonden en wel 4 m/sec. Niettegenstaande de uitgesproken wervel zijn slechts in de koude lucht daalsnelheden van 1 m/sec. aanwezig. In de analyse van de pot. temp. zijn de hellingen weer vlakker geworden en zijn de verschillen weer over een iets grotere afstand uitgesmeerd.

Relatief stroomt de warme lucht nog steeds naar het gustfront toe, maar de snelheid is tot 10 m/sec. afgenomen, terwijl in de koude lucht alleen nog in de bovenste helft van de laag een uitvloeien naar rechts van max. 4 m/sec. plaatsvindt. In de onderste helft is slechts van terugstroming sprake. Ook in dit geval 4-6 m/sec.

De druk verandering is niet meer erg interessant. Na een aanvankelijke toename van ca. 1 mb volgt al spoedig weer een afname.

Goff geeft nog meer voorbeelden, maar het zou te ver voeren alle gevallen hier te herhalen. Wel lijkt het zinvol enkele conclusies weer te geven, die Goff meent te kunnen trekken. Zo is in het algemeen de zone met krachtige stijgwind in de warme lucht slechts ongeveer 1,5 km breed, althans op 450 m hoogte. In de hogere niveaus zou volgens Goff de breedte van het stijgwindgebied met de hoogte toenemen, maar onderin (nog in de warme lucht) neemt direct achter het gustfront de stijgsnelheid af.

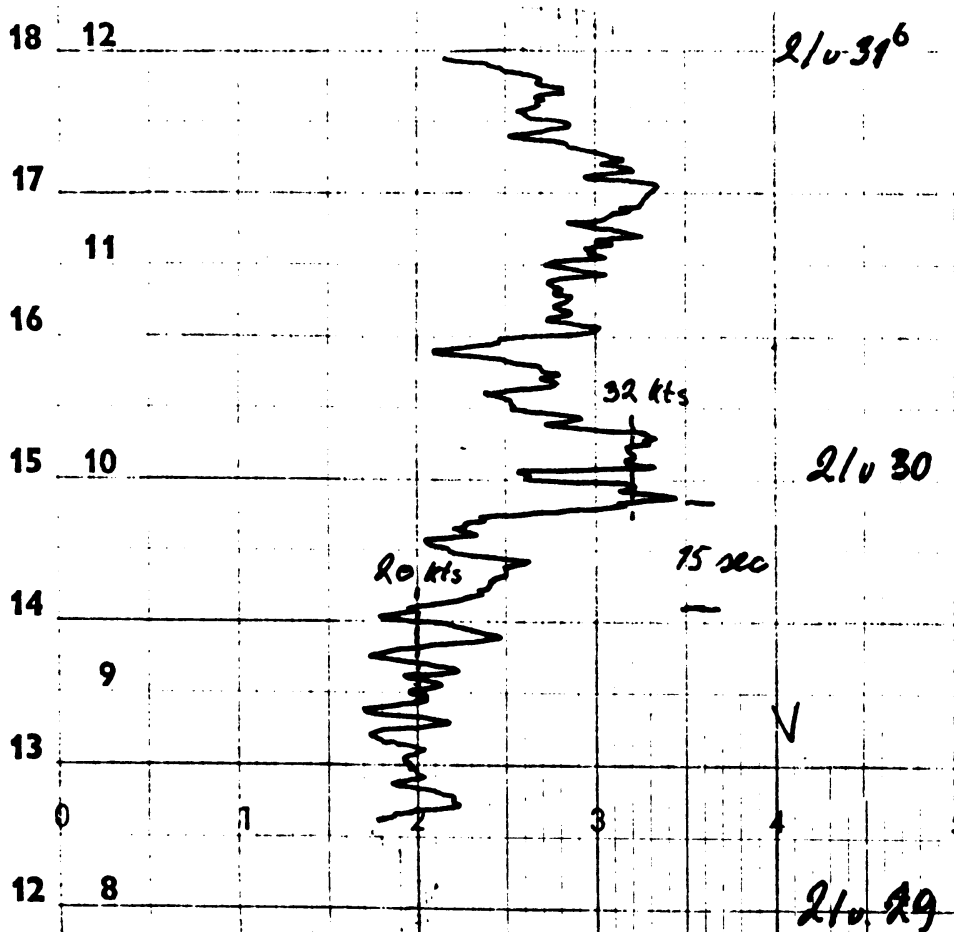
Verder maakt Goff de opmerking, dat naarmate de koude lucht zich verder voor de bui uitspreidt, de diepte van de koude laag schijnt af te nemen.

Een andere opmerking, die de moeite waard lijkt, is dat bij het stijgen en vooroverhellen van de neus tengevolge van de bodemwrijving er onder de neus warme lucht is achtergebleven, waardoor er in toenemende mate entrainment van warme in de koude lucht gaat optreden en dat deze entrainment wezenlijk bijdraagt tot afbraak van de "outflow".

Hoewel tot nu toe slechts over "de" outflow gesproken is leidt het geen twijfel, dat er meerdere outflows achter elkaar kunnen optreden en inderdaad ook werden gevonden. Soms was er sprake van een duidelijke tweede discontinuïteit in de temperatuur alleen, soms in de windsnelheid alleen en soms in beide. Het zal echter duidelijk zijn, dat in de reusachtige Cb's, die in het centrale deel van de Verenigde Staten regelmatig voorkomen en waarin soms met de regelmaat van een klok elke 5 minuten een nieuwe cel tot ontwikkeling komt (soms wel 15 maal achter elkaar) met dezelfde regelmaat nieuwe outflows ontstaan, die iedere keer weer de restanten van de oudere outflows domineren.

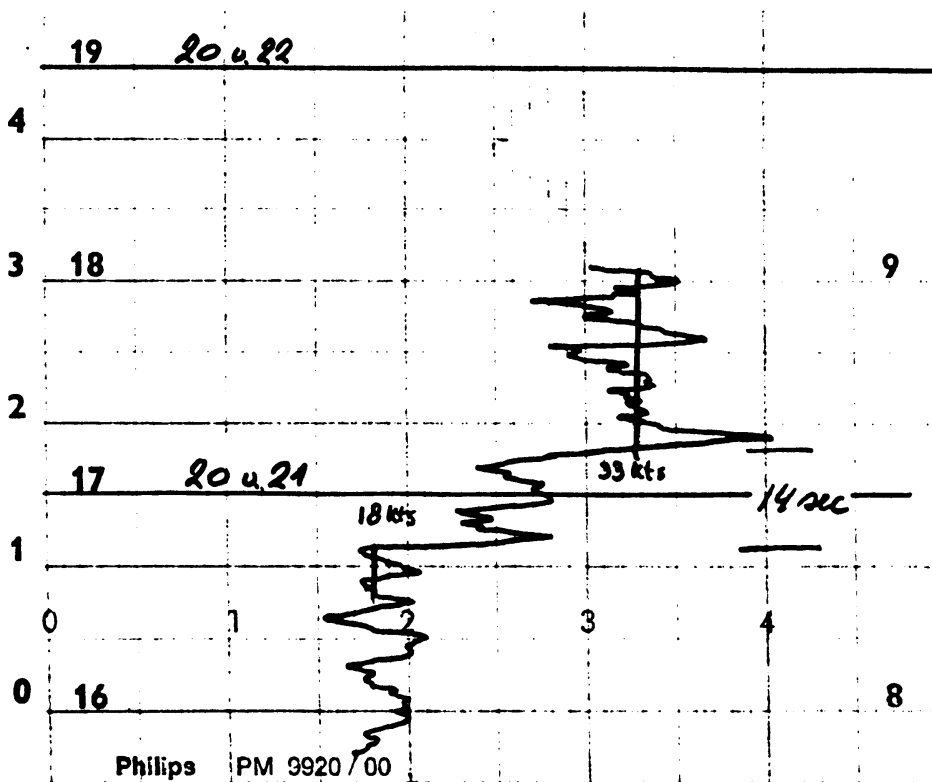
Geraadpleegde literatuur.

1. Fichtl George. H. Windshear near the ground and aircraft operations. J. Aircraft Vol 9 no. 11 Nov. 1972 pp 765-770.
2. Cannemeijer F. en Wieringa J. A model for estimating gustiness below 60 m, applied to the estimation of windshear extremes. Working paper 19 Air Navigation Conference, Montreal 1974.
3. Wallington C.E. Meteorology for glider pilots. John Murray London 3d. ed.
4. Fujita T.T. en Caracena F. An analysis of three weather related aircraft accidents. Bull.Am.Met.Soc., 58, 1977, p.1163-1186.
5. Fujita T.T. Spearhead echo and downburst near the approach end of a Kennedy airport runway, New York. S.M.R.P. research paper Dept. Geophys. Sciences Chicago. No. 137.
6. Chalon J.P. Fankhauser J.C. en Eccles P.J. Structure of an evolving hailstorm Part 1 Mon.Wea.Rev. Vol. 104 May 1976 pp 564-575.
7. Fankhauser J.C. Structure of an evolving hailstorm Part 2. Mon.Wea.Rev. Vol 104 May 1976 pp 576-587.
8. Strauch R.G. en Merrem F.H. Structure of an evolving hailstorm Part 3 Internal structure from Doppler Radar. Mon.Wea.Rev. Vol 104 May 1976 pp 588-595.
9. Musil D.J. May E.L. Smith P.L. en Sand W.R. Structure of an evolving hailstorm Part 4: Internal structure from penetrating aircraft. Mon.Wea.Rev. Vol 104 May 1976 pp 596-602.
10. Caracena F. Maddox A. Hoxit L.R. en Chappell C.F. Mesoanalysis of the Big Thomson storm. Mon.Wea.Rev. Vol 107 1979 pp 1-17.
11. Fawbush E.J. en Miller R.C. A basis for forecasting peak wind gusts in non-frontal thunderstorms. Bull.Am.Met.Soc., 35, 1954, p.14-19.
12. Goff R.C. Vertical structure of thunderstorm outflows. Mon.Wea.Rev. Vol 104 1976 pp 1429-1440.
13. Goff R.C. Some observations of thunderstorm-induced low level wind variations. J. Aircraft Vol 14 May 1977 pp 423-427.
14. Brancato G.N. The meteorological behaviour and characteristics of thunderstorms. Publ. by U.S.Weather Bureau, Apr. 1942.
15. Newton C.W. Circulations in large sheared cumulonimbus. Tellus 18 pp 699-713.
16. Rogers R.R. Doppler radar investigation of Hawaiian rain. Tellus 19 1967 pp 432-455.
17. Mitchell K.E. A numerical investigation of severe Thunderstorm gustfronts. Monthly Weather Review 105 May 1975 pp 657-675.



Bij een gemiddelde windsnelheid van 26 knopen dus 13 m/sec. leggen de turbulente elementen ca. 200 m af in 15 sec. Een vliegtuig met een snelheid van 140 kn. (70 m/sec) zou in dit geval in bijna 3 sec. een "shear" van $\frac{1}{3} \times 12$ dus $\frac{4}{3}$ kn/sec ofwel 2 m/sec^2 ondergaan. Deze shear in de neutrale atmosfeer is van zeer korte duur maar kan startende of landende toestellen veel hinder bezorgen.

Fig.1 Een tweetal voorbeelden van een snelle windmeter. Het papiertransport was hier 60 mm/min.



Bij een gemiddelde wind van 26 kn. dus 13 m/sec. kan hier een "shear" van 15 kn. in 2.6 sec. worden berekend dus voor een vliegtuig een shear van 5.8 kn-sec. ofwel 2.9 m/sec^2

SEC	C	KTS	KTS	KTS	KTS/SEC	KTS/SEC	KTS/SEC	DLG-KTS	G/SEC	I	101	201	301	FL
524	13	19	1	-1	-0.7	-0.0	160	19	-0.02	1	1	1	1	522
525	14	19	1	-1	-0.3	0.4	179	20	-0.23	1	1	1	1	500
526	14	19	1	0	-0.0	0.4	170-19	19	0.02	1	1	1	1	492
527	13	17	2	-1	-1.2	0.6	174	17	-0.06	1	1	1	1	470
528	13	15	2	-1	-1.9	0.6	173	16	-0.05	1	1	1	1	404
529	14	17	3	-1	-0.1	0.4	171	17	0.04	1	1	1	1	446
530	14	16	4	0	1.4	0.5	170	19	0.04	1	1	1	1	427
531	13	14	3	-1	-1.2	0.2	168	15	0.15	1	1	1	1	422
532	13	18	4	0	-0.3	-0.0	170	18	0.16	1	1	1	1	390
533	14	17	4	0	1.1	0.0	159	17	0.05	1	1	1	1	380
534	14	15	3	0	-1.0	-0.0	169	16	0.04	1	1	1	1	308
535	13	15	4	1	-0.6	0.1	168	16	0.04	1	1	1	1	301
536	13	13	4	0	-1.1	0.1	166	14	0.05	1	1	1	1	250
537	14	14	4	0	-0.7	-0.0	167	15	0.05	1	1	1	1	350
538	14	13	4	0	-0.4	-0.0	165	13	0.04	1	1	1	1	325
539	13	13	4	1	-0.8	-0.0	165	13	0.04	1	1	1	1	315
540	13	14	3	0	0.7	-0.1	168	14	0.06	1	1	1	1	302
541	14	12	3	0	-0.2	-0.2	167	13	0.04	1	1	1	1	295
542	14	12	3	0	-0.9	-0.2	160	13	0.04	1	1	1	1	289
543	13	10	2	0	-1.2	-0.4	168-10	10	0.04	1	1	1	1	270
544	13	11	2	-1	-0.7	-0.3	169	11	-0.02	1	1	1	1	265
545	14	12	2	-1	1.1	-0.1	172	12	0.01	1	1	1	1	240
546	14	13	3	-1	1.4	0.0	172	14	0.05	1	1	1	1	232
547	13	11	3	0	-0.2	0.1	170	12	0.09	1	1	1	1	218
548	13	10	2	1	-1.8	-0.0	169	10	0.04	1	1	1	1	212
549	14	11	2	1	-0.2	-0.1	171	11	0.04	1	1	1	1	197
550	14	11	2	0	0.3	-0.1	171	11	0.03	1	1	1	1	192
551	13	6	2	0	-1.5	-0.1	169	6	-0.05	1	1	1	1	185
552	13	11	2	0	-0.0	-0.3	173	11	-0.05	1	1	1	1	171
553	14	6	2	-1	0.2	-0.1	171	9	-0.07	1	1	1	1	150
554	14	8	1	1	-1.3	-0.1	172	8	0.04	1	1	1	1	14
555	13	7	1	2	-0.9	-0.1	169	7	0.07	1	1	1	1	132
556	13	8	2	-1	-0.1	0.0	171	8	0.05	1	1	1	1	129
557	14	6	2	1	-0.5	0.1	166	6	0.12	1	1	1	1	100
558	14	9	2	1	0.5	0.1	171	9	0.02	1	1	1	1	94
559	13	8	2	1	1.2	0.1	168	9	0.04	1	1	1	1	63
560	13	9	2	2	0.2	0.1	170	9	0.11	1	1	1	1	71
561	15	11	2	1	1.3	0.0	171	11	0.02	1	1	1	1	59
562	15	7	2	-1	-1.1	-0.1	168	7	0.02	1	1	1	1	47
563	13	6	1	0	-2.7	-0.3	167	6	0.05	1	1	1	1	30
564	13	9	2	2	1.1	-0.1	173	10	0.14	1	1	1	1	21
565	15	9	2	2	1.0	0.0	172	9	1.32	1	1	1	1	10
566	15	8	2	2	-0.9	-0.1	173	8	0.15	1	1	1	1	11
567	13	4	2	0	-2.2	0.1	161	5	0.05	1	1	1	1	11

GROSS-SHEAR
9 kts/203 ft

8.44 kts
/1000 ft

FIG 2a

19R

06.58

KL-884

PH-BUC

HEAD → FROM → TRUE A/C → A/C → A/C → A/C

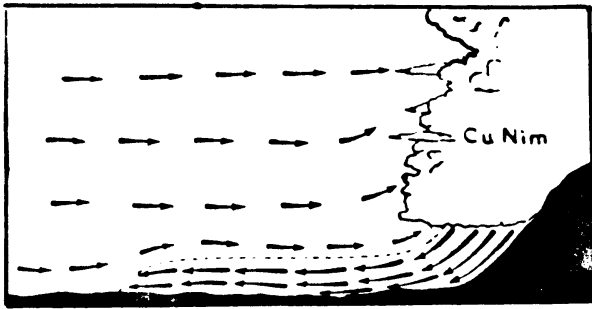


Fig.3 (Wallington) Het uitspreiden van zeer krachtige dalwind en de daaruit volgende sterke windshear te Madrid op 11 Juli 1952.

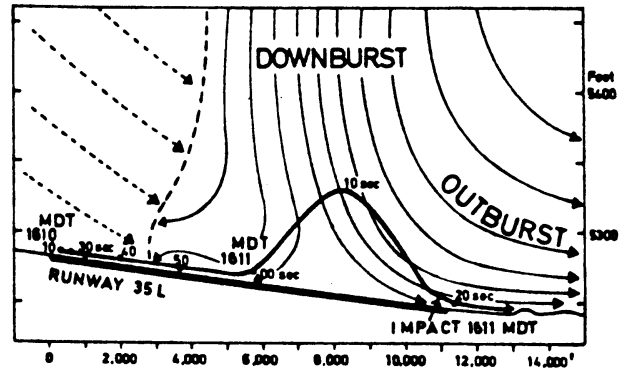


Fig.4 Windrichtingsveranderingen tengevolge van zeer sterke dalwind. Op 7 Aug. 1975 stortte een Boeing-727 bij deze situatie neer op Stapleton, het vliegveld van Denver (U.S.A.)

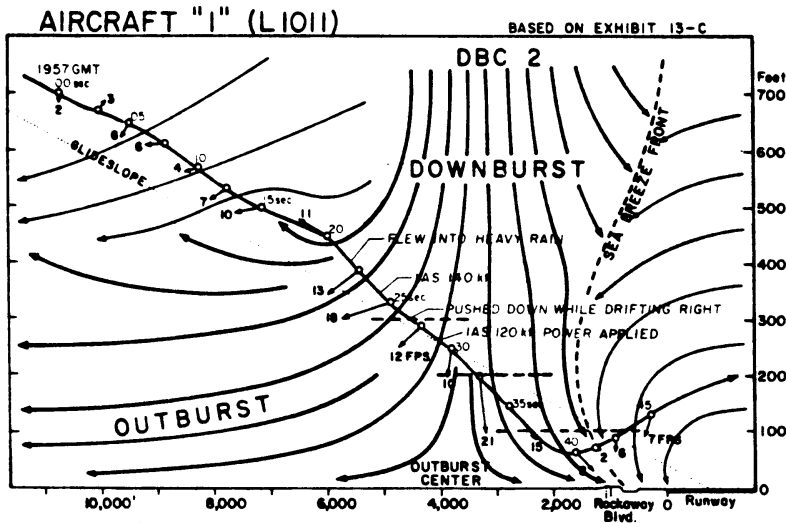


Fig.5

Op 24 Juni 1975 ondervond een Lockheed-1011 Tristar beneden een hoogte van 400 voet plotseling een afname van de tegenwind en tegelijk een krachtige dalwind.

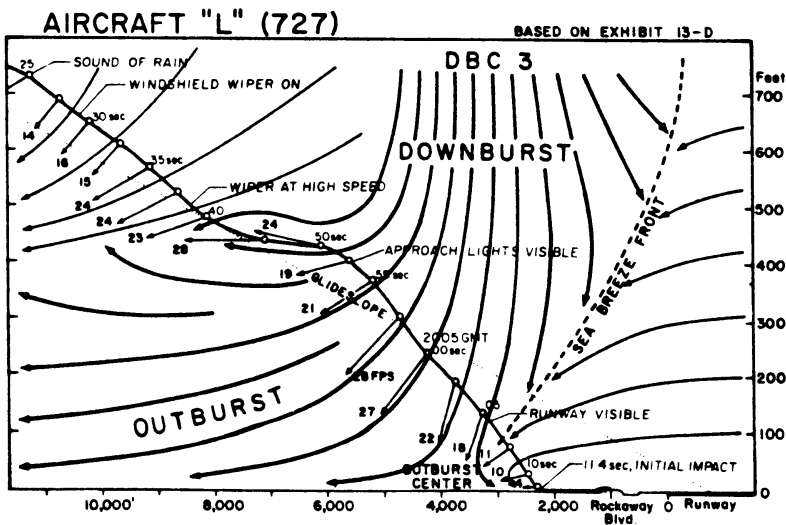


Fig.6

7 min. na de Tristar van Fig.5 vloog een Boeing-727 eerst door een stijgwindgebied van 5 voet/sec. en kwam daarna in een dalwind van 21 voet/sec. en tegelijk nam de tegenwindcomponent af. Het vliegtuig stortte neer.

Along track windshear
Kolom 84

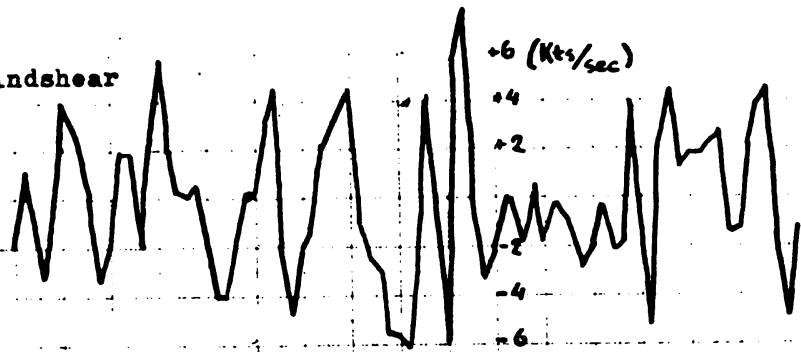
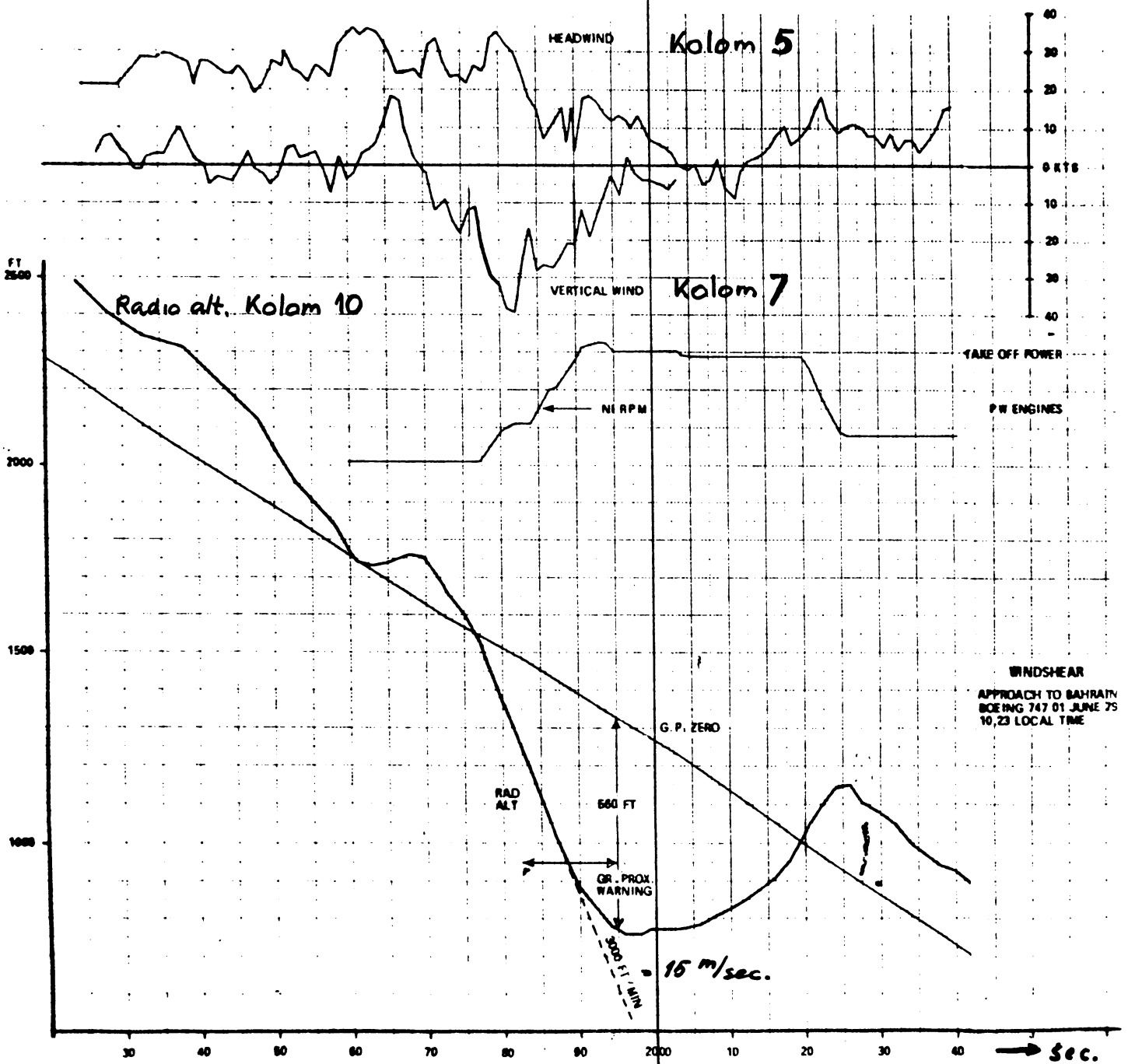
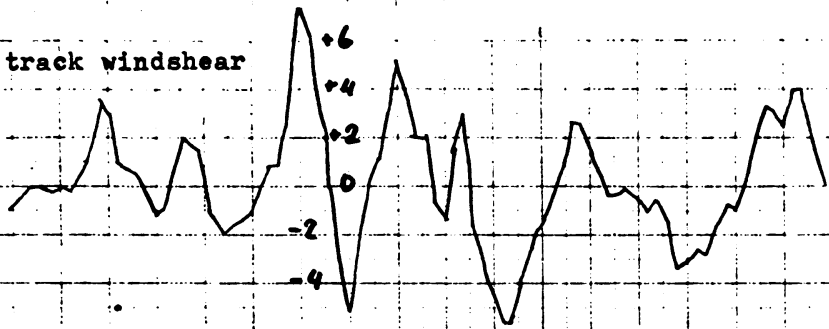


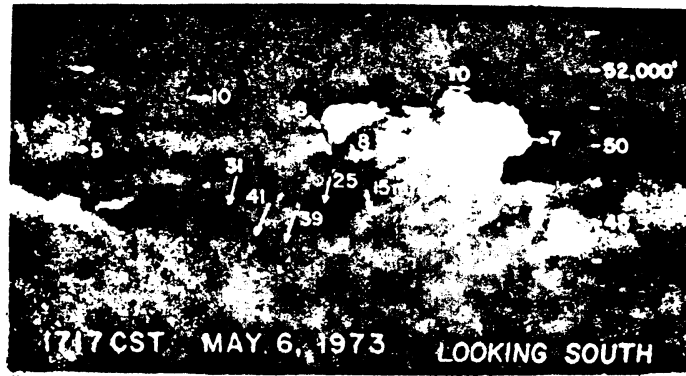
FIG-7

Cross track windshear
Kolom 82



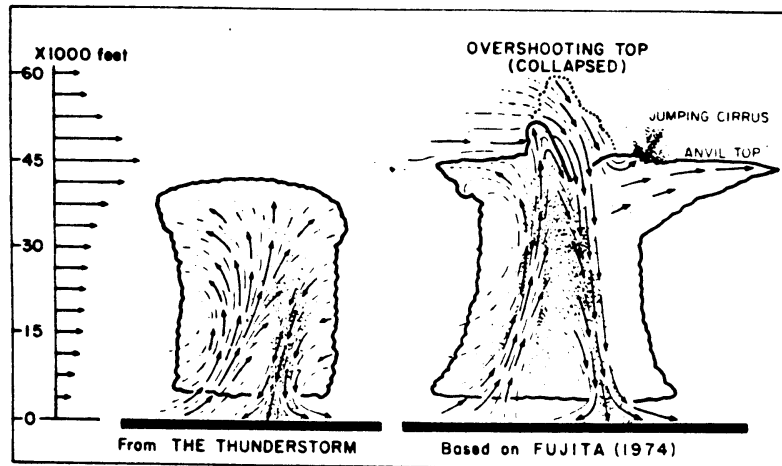
WINDSHEAR
APPROACH TO BAHRAIN
BOEING 747 01 JUNE 75
10,23 LOCAL TIME

Fig.8



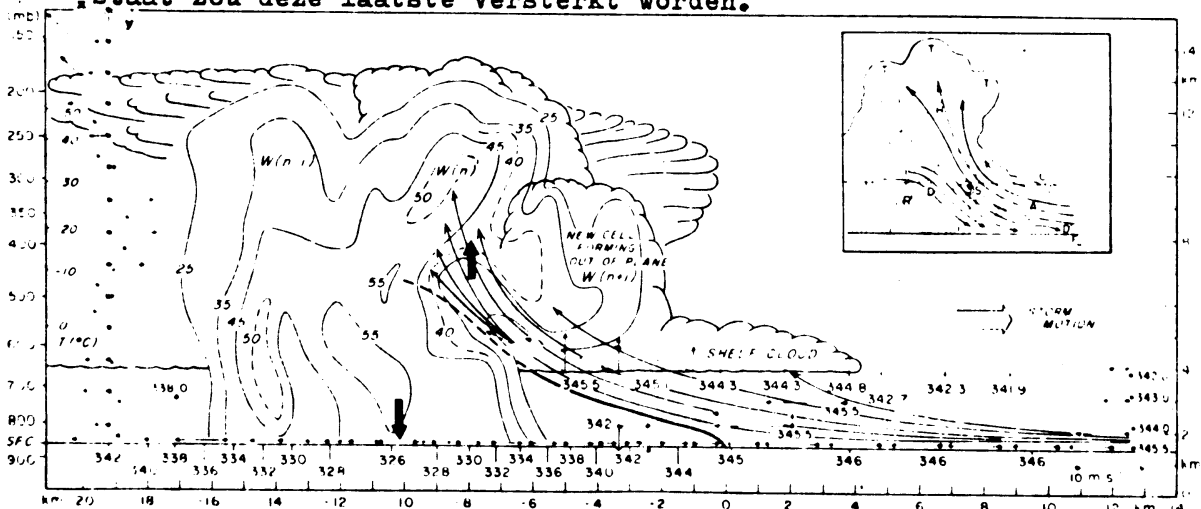
In 1974 maakte Fujita vanuit een Lear-jet "time lapse" foto's van Cb toppen, die de Stratosfeer binnendrongen en daarna weer terugzakten. De daalsnelheid van de zichtbare bewolking bleek in dit geval tot 41 m/sec op te lopen.

Fig.9



Speculatieve poging tot verklaring van uitzonderlijk sterke daalwinden. De in de Stratosfeer binnengedrongen top kan soms tot 30 gr.C kouder worden dan de omringende lucht. Als de daaruit volgende hoge daalsnelheid tussen 300 mb en 500 mb tot het gebied kan doordringen, waar normaal de daalwindontstaat zou deze laatste versterkt worden.

Fig.10



Uit Fankhauser (Ref.7). Dwarsdoorsnede door een "multicellular" Cb. De uitstromende koude lucht ploegt onder de reeds verwarmde lucht en geeft de eerste aanzet tot de vorming van een nieuwe cel. Deze ligt dan, voor de reeds bestaande cellen. De uitstroming behoort hier bij W(n).

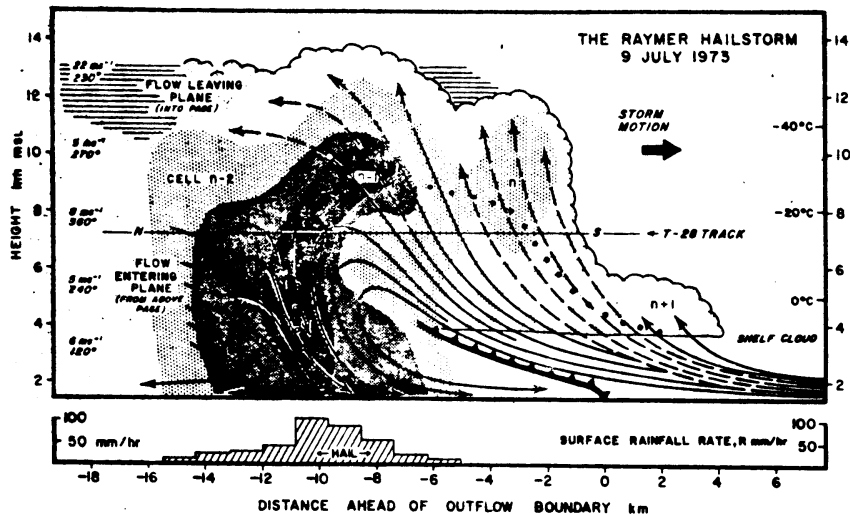


Fig.11 (Browning) Uit hetzelfde onderzoek van Fig.10. Let op de variaties in de wind over de gehele diepte van het Cb.complex.Elke 15 min. ontstond 5-10 km vóór de oude cel een nieuwe.Elke cel had een levensduur van ca.45 min.Hagelstenen tot 15 mm werden gerapporteerd. Wolkenbasis ca.650 mb.

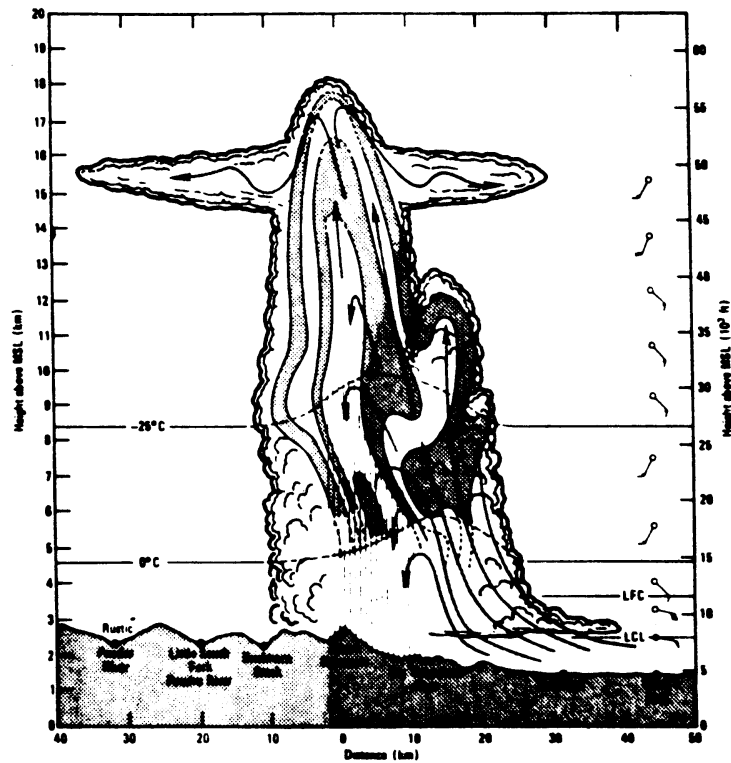


Fig.12 Uit Ref.10 Caracena:The Big Thomson Storm. Dit enorme Cb complex ontstond in een atmosfeer, waarin over de diepte van 12000-50000 voet vrijwel geen shear aanwezig was.Er kwam nauwelijks hagel in voor en géén uitstroming.Vlgs Caracena was de oorzaak,dat in het regengebied de basis aan de grond (bergen) lag en er geen verdamping plaatsvond.

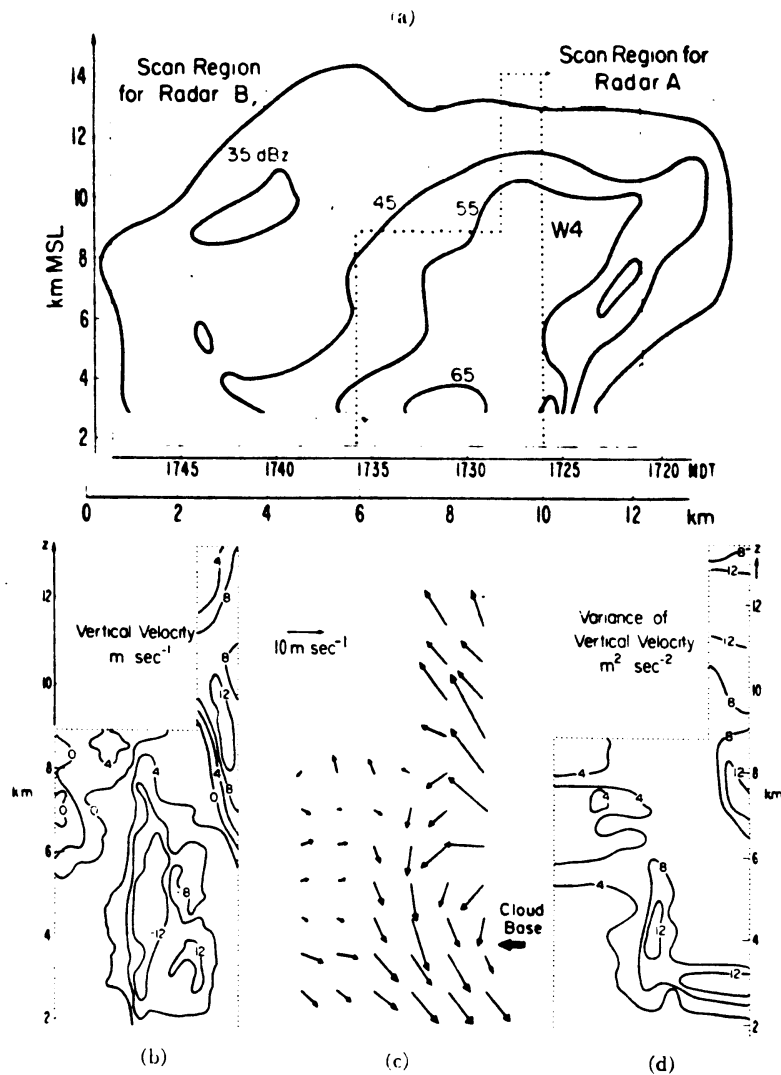


Fig.13 Uit ref.8 Strauch. Een hagelbui passeerde de verticaal gerichte Doppler-radar A terwijl met Doppler-radar B op 52 km afstand "gescanned" werd. In de meetperiode van 12 min. werden ca. 28000 snelheidsspectra verkregen, die met behulp van een high-speed computer werden geanalyseerd. Na 1 min. werd op 8-10 km hoogte een stijgsnelheid van 12 m/sec bepaald en na 3 min op 3-6 km een daalsnelheid van eveneens 12 m/sec.

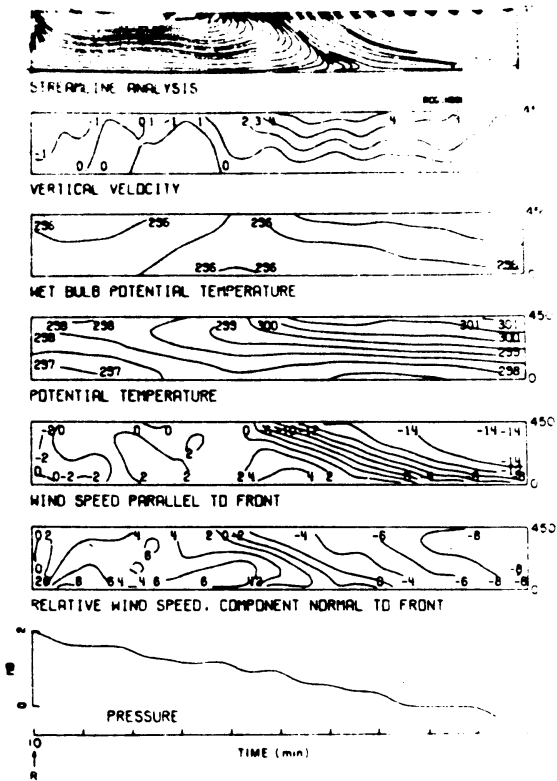


Fig.14 Eerste stadium. Het Gustfront verwijdt zich steeds verder vóór de regenzone.

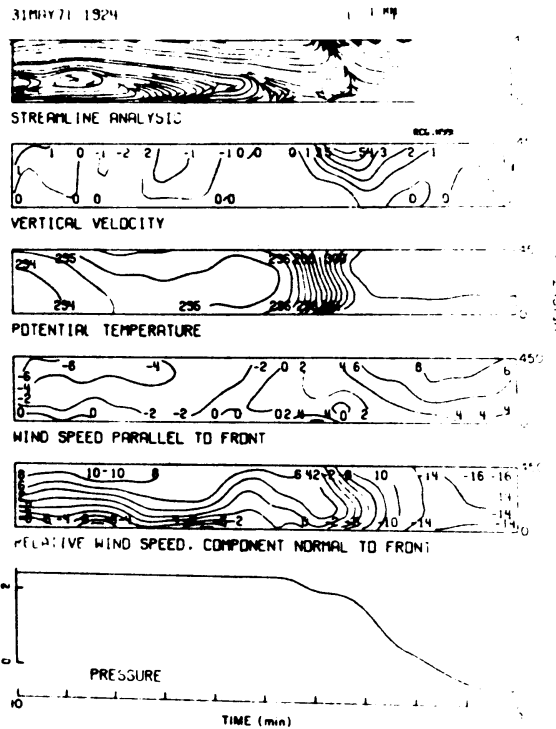


Fig.15 Tweede stadium. Het Gustfront heeft nu zijn grootste snelheid bereikt.

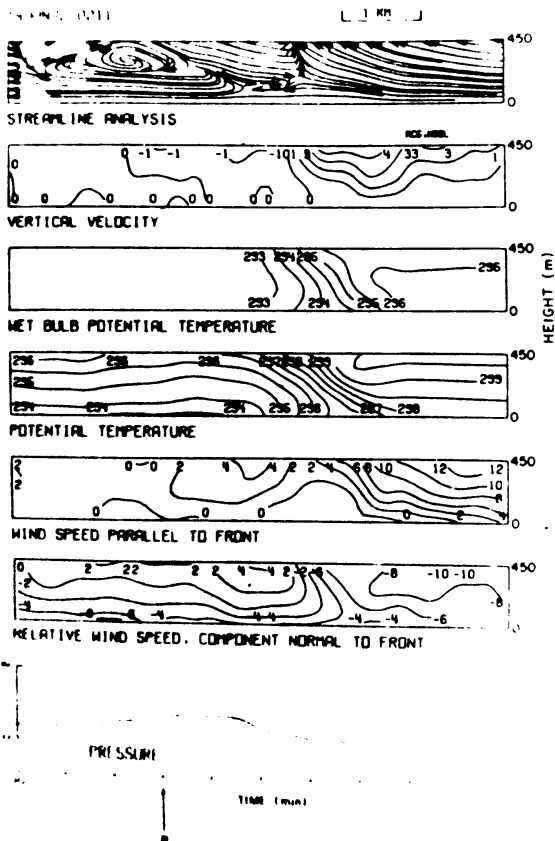


Fig.16 Derde stadium. Geleidelijk vervagen de karakteristieke verschillen en neemt de snelheid af.

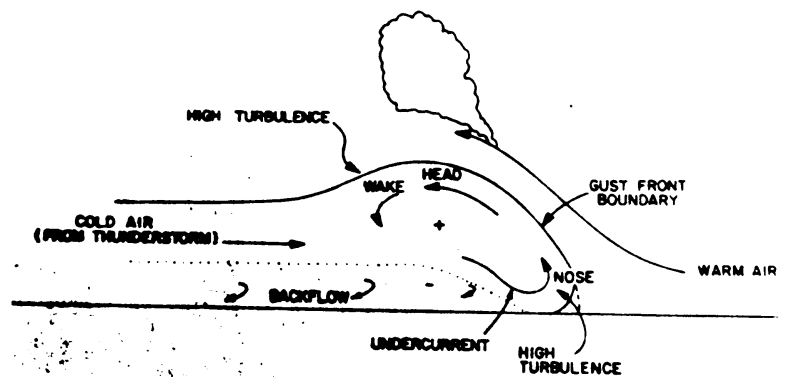


Fig.17 Het Gustfront met enkele benamingen.