

Drie objectieve indices voor clear-air turbulence nader bekeken

H. Bakker

Technische rapporten; TR-160

De Bilt 1993
Postbus 201
3730 AE De Bilt
Wilhelminalaan 10
Telefoon 030-206 911
Telefax 030-210 407

Technische rapporten; TR-160

Auteur: H. Bakker

UDC: 551.551.5
551.509.329

ISSN: 0169-1708

ISSN: 90-369-2047-7

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

Technisch Rapport

**DRIE OBJECTIEVE INDICES VOOR CLEAR-AIR TURBULENCE
NADER BEKEKEN**

HARRY BAKKER

DECEMBER 1993

SAMENVATTING

Dit technisch rapport gaat over drie objectieve verwachtingsmethodieken voor Clear-Air Turbulence (CAT). Het zijn de Diagnostische Richardson Tendens (DRT) en twee CAT-indices zoals deze in Bracknell respectievelijk het NMC in Washington worden gebruikt.

De DRT-methodiek bepaalt het actuele Richardson-getal op de roosterpunten van het model en de verandering ervan. Daarna wordt uitgerekend hoelang het eventueel duurt voordat het Richardson-getal de kritische waarde 1 passeert. De CAT-index van Bracknell wordt gegeven door een functie waarin horizontale en verticale windschering de twee variabelen zijn. Het geeft de kans op 'matige of zware turbulentie'. De NMC-index is het produkt van horizontale deformatie en verticale windschering. Deze index maakt onderscheidt tussen 'matige turbulentie' en 'matige of zware turbulentie'.

Door middel van een aantal case-studies wordt bekeken welke methodiek de voorkeur verdient voor toepassing in het Verticale Informatie Model (VIM). Dit model is momenteel binnen de afdeling Ontwikkeling Wetenschappelijk Onderzoek in ontwikkeling en dient ter ondersteuning van de meteorologen van de Luchtvaart Meteorologische Dienst.

De case-studies laten zien dat het resultaat van de DRT-methodiek te wensen overlaat. De twee andere indices presteren ongeveer even goed. De CAT-index van het NMC verdient echter een lichte voorkeur voor implementatie in VIM, mede omdat verificatie, uitgevoerd aan het Canadian Newfoundland Weather Centre, aantoont dat de NMC-index iets beter scoort dan de CAT-index van Bracknell.

INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding	1
2	Achtergronden van CAT	2
2.1	De kenmerken	2
2.2	Waarom waarschuwen?	2
2.3	Kelvin-Helmholtz instabiliteit	3
3	De methodieken	5
3.1	Diagnostische Richardson Tendens	5
3.1.1	Het Richardson-getal	5
3.1.2	De methodiek	6
3.2	CAT-index Bracknell	7
3.3	CAT-index NMC	8
3.3.1	De deformatieterm	8
3.3.2	De fysische basis	11
4	De case-studies	14
4.1	23 september 1992	14
4.2	29 en 30 september 1991	18
5	Conclusies en vervolg	22
6	Literatuur	24

1 Inleiding

Luchtvaartmeteorologen moeten het vliegverkeer waarschuwen voor weersverschijnselen die gevaarlijk kunnen zijn. Ijsafzetting op de vleugels (icing) is hiervan een voorbeeld, maar ook hevige turbulentie nabij het aardoppervlak (low-level turbulence) of turbulentie op grotere hoogte (Clear-Air Turbulence of CAT). Het verwachten van zulke fenomenen gebeurt in de Nederlandse weerdienstpraktijk vaak op basis van herkenning van synoptische situaties, aangevuld met een enkele eenvoudige forecastregel. Speciaal op de luchtvaart gerichte (objectieve) verwachtingsmethodieken zijn in ons land niet voorhanden.

Daarom is kort geleden binnen de afdeling Ontwikkeling Wetenschappelijk Onderzoek (OWO) het VIM-project begonnen. VIM staat voor Verticale Informatie Modellen en voorziet in specifieke luchtvaartinformatie ten behoeve van de Luchtvaart Meteorologische Dienst (LMD). Het gaat onder andere om de berekening en presentatie van CAT- en icingindices op basis van HIRLAM-gegevens (High Resolution Limited Area Model).

Een belangrijke vraag is: welke verwachtingsmethodiek voor CAT of icing kan het beste in VIM worden geïmplementeerd? Dit technisch rapport probeert die vraag voor CAT te beantwoorden, en wel door middel van een aantal case-studies.

Maar eerst gaan we in hoofdstuk 2 in op vragen als: wat is CAT, waar komt het voor en waarom willen piloten er voor worden gewaarschuwd? In hoofdstuk 3 vindt de introductie plaats van drie verwachtingsmethodieken voor CAT en in hoofdstuk 4 worden twee case-studies beschreven waarin deze methodieken centraal staan. Hoofdstuk 5 gaat over "conclusies en vervolg".

2 Achtergronden van CAT

2.1 De kenmerken

Clear-air turbulence of CAT is turbulentie in de vrije atmosfeer waarbij convectorie *geen* rol speelt. Het komt vrijwel altijd voor in het bovenste deel van de troposfeer, laten we zeggen vanaf het 500 hPa-vlak tot aan de tropopauze.

De belangrijkste oorzaken van CAT zijn:

- een sterke verticale windschering in een stabiele atmosfeer;
- lijgolgen in de buurt van bergen (mountain waves);
en in minder mate:
- een sterke horizontale windschering in een stabiele atmosfeer.

Mountain waves blijven in dit rapport buiten beschouwing.

Aangezien we de sterkste verticale windschering vlak onder hoogtefronten en tropopauze vinden, zijn dit bekende voorkeursplaatsen voor het optreden van CAT.

Men ontdekte in de vijftiger en zestiger jaren dat CAT een brokkelige structuur heeft en dat het een fenomeen op microschaal is. De gebieden waarin de turbulentie voorkomt hebben horizontale afmetingen van 10 - 500 kilometer en verticale van 200 - 1500 meter. De karakteristieke levensduur is een half uur tot een dag (WMO Technical Note No.155).

(Hier ligt dus het probleem van de over zijn hoogtekaart gebogen meteoroloog. Hij moet het al dan niet optreden van een micro-schaalfenomeen inschatten aan de hand van analyses op macroschaal of synoptische schaal.)

CAT heeft verschillende intensiteiten. Wij richten ons op *matige* en *zware* turbulentie. De International Civil Aviation Organisation (ICAO) heeft vastgelegd wat hiervoor de criteria zijn:

- matige CAT: versnellingen tussen 0,5 en 1 g. Lopen in het vliegtuig wordt moeilijk. Reizigers voelen dat ze in hun stoel worden gedrukt en losse voorwerpen beginnen te schuiven.
- zware CAT: versnellingen groter dan 1 g. Het vliegtuig verandert plotseling van gedrag en/of hoogte en kan enkele momenten onbestuurbaar zijn. Vaak treden ook grote variaties op in de horizontale snelheid. Reizigers worden met kracht in hun stoelen gedrukt en losse voorwerpen vliegen rond.

2.2 Waarom waarschuwen?

Zolang vliegtuigen geen real-time detectiesystemen voor CAT aan boord hebben, zullen luchtvaartmeteorologen verplicht zijn om binnen hun bewakingsgebied te waarschuwen voor zware CAT. Waarom?

CAT geeft zelden aanleiding tot een vliegtuigongeluk. Toch is het voor de luchtvaartwereld belangrijk te weten in welke gebieden CAT kan voorkomen,

want zware (of extreem zware) CAT kan tot ernstig persoonlijk letsel leiden en tot structurele schade aan het vliegtuig. Van belang is tevens dat het brandstofverbruik tijdens CAT-condities beduidend toeneemt (Pocock 1980).

Ondervindt een piloot hinder van CAT, dan zal hij de verkeersleiding verzoe- ken om van vlieghoogte te mogen veranderen. Realiseren we ons daarbij dat het aantal vluchten nog steeds toeneemt, dan begrijpen we dat ook een ver- keersleider zo vroeg mogelijk wil worden gewaarschuwd voor CAT (monde- linge mededeling verkeersleider Voortgezette Opleiding Meteorologie 1991).

2.3 Kelvin-Helmholtz instabiliteit

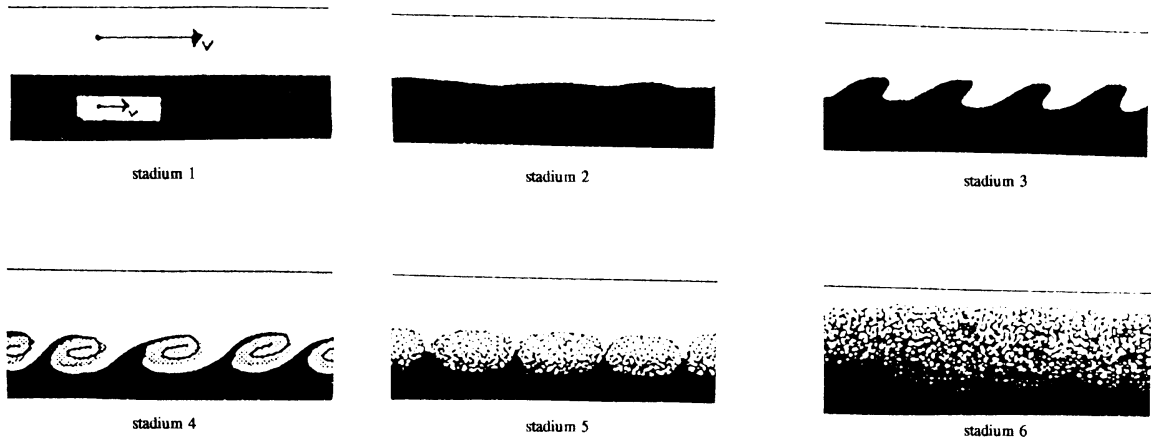
Om het ontstaan van CAT te begrijpen, moeten we ons richten op de Kelvin- Helmholtz instabiliteit (KHI). Dit is namelijk het *basismechanisme* van CAT. Het komt er in het kort op neer dat een stabiel opgebouwde luchtlaag door windschering turbulent kan worden.

In het boek "An Introduction to Boundary Layer Meteorology" beschrijft Roland B. Stull dit proces als volgt:

- .. 1. In een statisch stabiele laag (een lichte vloeistof boven op een zwaardere) wordt een verticale snelheidsschering (windschering) aangebracht.
- .. 2. Als de grootte van de schering een kritische waarde overschrijdt, wordt de stabiele laag dynamisch onstabiel; dat wil zeggen: er ontstaan kleine golfjes langs het raakvlak van de beide vloeistoffen.
- .. 3. Bij aanhoudende schering neemt de amplitude van de golven toe, eventueel uiteindelijk resulterend in het breken van de golven (de zogenaamde Kelvin-Helmholtz golven).
- .. 4. In elke brekende golf is een deel van de lichtere vloeistof gevangen in zwaardere vloeistof, met als resultaat kleine gebieden met statische onstabieleiteit.
- .. 5. Door deze statische onstabieleiteit en de aanhoudende dynamische onstabieleiteit wordt elke brekende golf turbulent.
- .. 6. Deze turbulentie breidt zich verder uit en zorgt ervoor dat de twee oorspronkelijke lagen zich mengen. Door deze menging ontstaat er een diffuse laag waarin zowel de verticale schering als de oorspronkelijke statische stabiliteit afneemt.
- .. 7. Door deze menging kan de verticale schering afnemen tot beneden de kritische waarde.
- .. 8. en als er verder geen forcerende kracht is wordt de vloeistof weer laminair.

In het geval van CAT kan met name de straalstroom voor een langdurige forcering zorgen. De windschering blijft dan gehandhaafd en de CAT-intensiteit neemt niet af.

Een aantal tekeningen illustreert de beschreven stadia.



3 De methodieken

Ik heb drie (objectieve) verwachtingsmethodieken voor CAT door middel van een aantal case-studies met elkaar vergeleken. In dit hoofdstuk gaan we in op de achtergronden van de methodieken.

3.1 Diagnostische Richardson Tendens

Centraal in deze methodiek staat het Richardson-getal (Ri). Het is misschien dan ook verstandig om, voordat we ons in de methodiek verdiepen, even stil te staan bij het Ri-getal.

3.1.1 Het Richardson-getal

Het Ri-getal wordt gebruikt als *indicator* voor het al dan niet optreden van turbulentie in een stabiele luchtlaag. Het is gedefinieerd als:

$$Ri = \frac{\frac{g}{\bar{\theta}_v} \frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial z}}{\left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)^2 \right]}$$

- g = zwaartekrachtsversnelling
- $\bar{\theta}_v$ = virtuele potentiële temperatuur
- u = component van de wind in de oostrichting
- v = component van de wind in de noordrichting
- z = hoogte

Het is de verhouding tussen een, in een stabiele atmosfeer, energieconsumerende factor (het rechterdeel van de term boven de breukstreep) en een energieproducerende windscheringsfactor (de term onder de breukstreep).

We hebben in paragraaf 2.3 gezien dat toename van de verticale windschering in een stabiele atmosfeer tot turbulentie kan leiden (KHI). Onder dergelijke omstandigheden neemt het Ri-getal af. Immers, de term boven de breukstreep blijft constant (positief) terwijl de term er onder toeneemt (ook positief)

Een voor de hand liggende vraag is nu: bij welk Ri-getal wordt een van oorsprong laminaire stroming turbulent? Uit onderzoek is gebleken dat dit gebeurt als Ri kleiner wordt dan 0,25. De waarde 0,25 hoort dan ook bij wat we noemen: het kritische Ri-getal R_{c} .

Voor alle duidelijkheid: het Ri-getal zegt niets over de intensiteit van de turbulentie, alleen over het al dan niet (kunnen) voorkomen ervan.

3.1.2 De methodiek

In 1970 kwam Roach met een publikatie waarin hij de *Diagnostische Richardson Tendens* (DRT) introduceerde.

Hij definieerde de DRT als:

$$DRT = d(\ln Ri)/dt$$

of wel in woorden: de DRT is de verandering in de tijd van de logaritme van het Ri-getal, het volumepakketje volgend (de totale afgeleide).

Een negatieve DRT duidt op het afnemen van het Ri-getal door bewegingen op synoptische schaal. Zoals we in paragraaf 3.1.1 zagen betekent dit dat er door windschering meer kinetische energie wordt geproduceerd dan de statische stabiliteit kan onderdrukken, met als eventueel gevolg: turbulentie.

Oard (1974) deed het werk dunnetjes over en bracht enkele aanpassingen aan. Hij liet zien dat

$$DRT = d(\ln \text{stab})/dt - d(\ln \text{windschering})/dt$$

of wel in woorden: de DRT is het verschil tussen de verandering in de tijd van de logaritme van de stabiliteit en de verandering in de tijd van de logaritme van de verticale windschering, het volumepakketje volgend.

Het effect van de verandering in de verticale windschering bleek ongeveer vier maal groter dan het effect van de verandering in de stabiliteit.

DRT is dus een maat voor de intensiteit van de processen die CAT veroorzaken. Volgens Stankovic (1986) biedt DRT daardoor in principe de mogelijkheid om de hevigheid van CAT te verwachten.

Stel: we weten de waarde van het Ri-getal op een bepaald punt in de stroming en het blijkt dat door veranderingen in de stabiliteit en/of verticale windschering dit Ri-getal in de tijd afneemt (dus de $DRT < 0$). De hamvraag is dan: hoelang duurt het voordat het Ri-getal gelijk is aan het kritische Ri-getal; of met andere woorden: hoe lang duurt het voordat de laminaire stroming turbulent kan worden en er CAT op kan treden?

Oard introduceerde hiervoor de *kritische tijd*

$$t_r = - \ln Ri (d(\ln Ri)/dt)^{-1} .$$

De kritische tijd hangt af van de beginwaarde van Ri en de grootte van de DRT (lees: de mate van afname van het Ri-getal). Evenals het Ri-getal zegt de kritische tijd dus niets over de mate van intensiteit.

Nu is er nog één probleem. Tijdens de case-studies bepalen we het Ri-getal over een laag tussen twee standaarddrukvlakken. We praten over een laagdikte van 1,5 tot 2 km. In paragraaf 2.1 zagen we dat CAT voorkomt in lagen met een karakteristieke dikte van 200 - 1500 meter. Wanneer we nu uitrekenen dat op een bepaalde plaats het Ri-getal over een 2 km. dikke laag ongeveer 10 is, dan kunnen er in die laag gebieden zijn, van bijvoorbeeld 300 meter dikte, waar het Ri-getal kleiner is dan de kritische waarde $R_c = 0,25$ en waar dus CAT kan voorkomen. We ondervangen dit probleem enigszins door de kritische waarde R_c te verhogen. In navolging van Oard is bij de case-studies R_c op de (arbitraire) waarde 1 gezet.

3.2 CAT-index Bracknell

In 1980 gebruikte Dutton meervoudige regressietechnieken om pilot-reports van CAT te correleren met verwachte parameters van het Numerical Weather Prediction model (NWP). De parameters waren de horizontale en de verticale windschering, het resultaat de CAT-index E.

Deze index wordt berekend met de functie

$$E = 1,25 S_h + 0,25 S_v^2 + 10,5$$

S_h = horizontale windschering in $\text{ms}^{-1}/100 \text{ km}$

S_v = verticale windschering in ms^{-1}/km

De index E wordt omgezet naar de kans p, waarbij p de kans is op matige of zware turbulentie *per 100 km afgelegde weg*. De CAT-index van Bracknell geeft geen nadere informatie over de te verwachten intensiteit.

De achtergrondwaarde (of gemiddelde waarde) van de kans op CAT is 2% (Forrester 1986). Alleen hogere kansen zijn dus interessant. In tabel 1 kunnen we zien dat dit overeenkomt met waarden van $E \geq 20$. Daarom zijn voor deze index bij de case-studies (hoofdstuk 4) alleen isolijnen van $E=20$ of hoger geplot.

E	p(%)	S_v (met $S_h=0$)		S_h (met $S_v=0$)	
		ms^{-1}/km	kn/1000 ft	$\text{ms}^{-1}/100 \text{ km}$	kn/100 mijl
5	0,0	-	-	- 4,4	-15,8
7,5	0,95	-	-	- 2,4	- 8,6
10	1,55	-	-	- 0,4	- 1,4
15	2,2	4,2	2,5	3,6	13,0
20	2,8	6,2	3,7	7,6	27,4
25	4,2	7,6	4,5	11,6	41,8
30	7,5	8,8	5,2	15,6	56,2

Tabel 1

CAT-index E, de kans p en bijbehorende windscheringswaarden

Deze CAT-index geeft zoals gezegd op elk willekeurig punt de kans (p) op matige of zware CAT per 100 km afgelegde weg. Om de kans P voor een langere afstand te berekenen, moeten we de individuele kansen combineren, en wel door middel van:

$$1 - P = (1 - p_1) (1 - p_2) \dots (1 - p_n)$$

een voorbeeld:

afgelegde weg	100 km	500 km	1000 km
kans	4 %	18 %	34 %
kans	6 %	27 %	46 %

3.3 CAT-index NMC

Het National Meteorological Center (NMC) in Washington gebruikt sinds 1988 de CAT-index TI (Turbulentie-Index) als objectieve verwachtingsmethodiek voor CAT.

De TI-index is het produkt van horizontale deformatie (DEF) en verticale windschering (VWS):

$$TI = DEF * VWS$$

De TI-waarden variëren meest tussen de 0 en $15 * 10^{-7} s^{-2}$.

Het NMC hanteert als drempelwaarden:

- TI-waarde $\geq 2 (* 10^{-7} s^{-2})$ matige turbulentie
- TI-waarde $\geq 4 (* 10^{-7} s^{-2})$ matige of zware turbulentie.

Deze drempelwaarden zijn mede bepaald door het rekenrooster van het NMC global aviation model (AVN). Dit model had tot maart 1991 een horizontale resolutie van 160 km. Aangezien de berekeningen voor de case-studies zijn uitgevoerd op een rekenrooster met een gridafstand van 150 km, heb ik deze drempelwaarden overgenomen.

Er zijn nog twee interessante vragen:

- 1. Wat gaat er schuil achter de deformatieterm DEF?
- 2. Waarom zou de TI-index een goed resultaat geven?

De eerste vraag wordt in de volgende paragraaf beantwoord, de tweede in paragraaf 3.3.2.

3.3.1 De deformatieterm

Ontwikkende, golfvormige storingen onttrekken potentiële energie aan de gemiddelde stroming. Het ontwikkelen van een barokliene golf zorgt er dus

voor dat de noord-zuid-temperatuurgradiënt afneemt. Nu wordt deze gradiënt wel enigszins hersteld door het dagelijks verschil in aanwarming door de zon tussen noordpool en evenaar, maar het effect hiervan is niet voldoende om bijvoorbeeld de temperatuurgradiënt langs het polaire front te handhaven. Hier spelen andere zaken een rol.

Er is een aantal stromingsbasispatronen die kunnen zorgen voor een verandering in de horizontale temperatuurgradiënt. Voor ons zijn belangrijk:

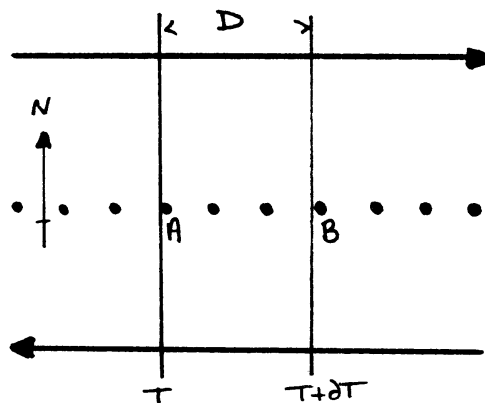
- 1. deformatie door horizontale schering (DSH)
en
- 2. deformatie door horizontale stretching (DST).

DSH is gedefinieerd als:

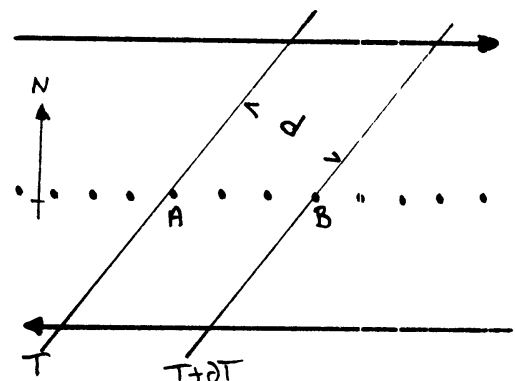
$$DSH = \partial v / \partial x + \partial u / \partial y$$

- u = component van de wind in de oostrichting
- v = component van de wind in de noordrichting

De figuren 1 en 2 tonen een situatie waarin een horizontale windschering zorgt voor een toename van de temperatuurgradiënt. Figuur 1 geeft de situatie op tijdstip t. De vette lijnen geven de windrichting aan, de dunne de isothermen en de stippellijn is de scheringsas. De afstand D is de loodrechte afstand tussen twee isothermen. In het noorden geeft een westenwind kou-advectie, een oostenwind zorgt in het zuiden voor aanvoer van warmere lucht. Op tijdstip t + δt (figuur 2) zijn de isothermen gekanteld. Het draaipunt bevindt zich op de scheringsas, in de punten A en B. De loodrechte afstand tussen de isothermen (d) is kleiner geworden. Kortom, door de horizontale windschering is de temperatuurgradiënt is toegenomen.



figuur 1: DSH
vette pijl: windrichting
dunne lijn: isotherm
stippellijn: scheringsas
tijdstip: t



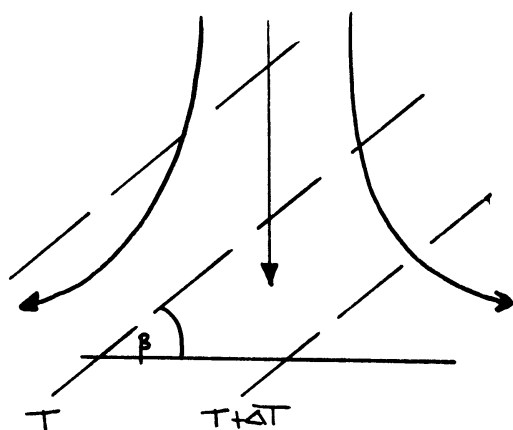
figuur 2: DSH
vette pijl: windrichting
dunne lijn: isotherm
stippellijn: scheringsas
tijdstip: t + delta t

Ook DST kan leiden tot versterking van een temperatuurgradiënt. Het wordt gegeven door:

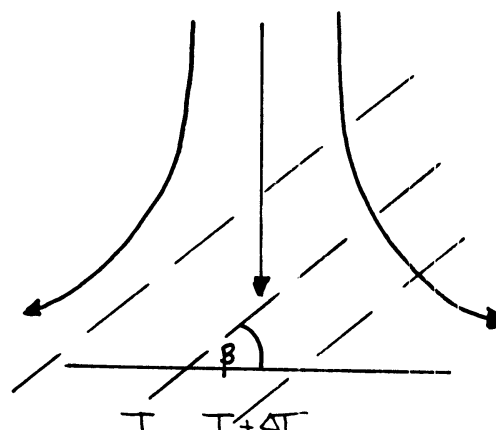
$$DST = \partial u / \partial x - \partial v / \partial y$$

u = component van de wind in de oostrichting
 v = component van de wind in de noordrichting

Een voorbeeld van DST is getekend in de *figuren 3 en 4*. In figuur 3 zien we, op tijdstip t , een noordelijke stroming met daarin een temperatuurgradiënt. Deze stroming krijgt verder zuidwaarts een west- en oostcomponent. Dit betekent dat daar de windcomponent loodrecht op de isothermen afneemt. Met andere woorden: de isothermen naderen vanuit het noorden sneller dan dat ze in het zuiden doorschuiven (figuur 4). Dit zorgt voor een deformatie van het oorspronkelijke temperatuurgradiënt. Het leidt tenslotte tot een concentratie van de isothermen, of wel tot een toename van de temperatuurgradiënt.



figuur 3: DST
 getrokken lijn: stroomlijnen
 onderbroken lijn: isotherm
 β : hoek tussen isothermen en uitstromingsas
 tijdstip: t



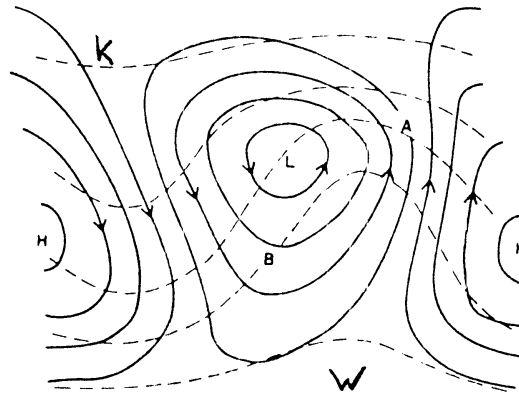
figuur 4: DST
 getrokken lijn: stroomlijnen
 onderbroken lijn: isotherm
 β : hoek tussen isothermen en uitstromingsas
 tijdstip: $t + \Delta t$

Figuur 5 geeft een voorbeeld van een synoptische situatie waarin zowel DSH als DST een horizontale temperatuurgradiënt versterken (uit: "An introduction to Dynamic Meteorology", James R. Holton).

In A speelt DST een rol; de isothermen komen hier na verloop van tijd dichterbij elkaar te liggen. Dit resulteert in het activeren van het warmtefront (frontogenese). DST is dan ook vooral van belang bij frontogenese van warmtefronten (op lagere niveaus).

Op positie B deformeert de temperatuurgradiënt (lees: neemt de temperatuurgradiënt toe) door een horizontale windschering. De noordwestenwind zorgt voor een stevige kou-advectie terwijl de zuidwestenwind in de trog nauwelijks

voor advectie zorgt. Het is nu eenvoudig in te zien dat DSH kan leiden tot frontogenese van koufronten.



figuur 5:

In A neemt de temperatuurgradiënt toe als gevolg van DST. In B zorgt DSH hiervoor.
 getrokken lijnen isobaren L: lagedrukgebied K: koude lucht
 stippellijn: isothermen H: hogedrukgebied W: warme lucht

Saucier combineerde in 1955 beide termen tot de deformatieterm die we in de CAT-index van het NMC tegenkomen:

$$DEF = (DST^2 + DSH^2)^{1/2}$$

Voor alle duidelijkheid: DSH en DST zijn dus twee vormen van horizontale windschering. Evenals in de CAT-index van Bracknell (paragraaf 3.2) draait het dus ook in de CAT-index van het NMC om horizontale en verticale windscheringen.

Resteert vraag 2 uit de vorige paragraaf: waarom zou de CAT-index van het NMC tot goede resultaten leiden? Hierover gaat de volgende paragraaf.

3.3.2 De fysische basis

Gezien de betekenis van de deformatieterm, speelt versterking van een bestaand temperatuurgradiënt blijkbaar een grote rol bij de kans op CAT. Het proces van frontogenese verdient dus onze aandacht.

De *thermische windvergelijking* legt een relatie tussen de grootte van de temperatuurgradiënt en de verticale windschering:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{fT}{g} \frac{\Delta V}{\Delta z}$$

$\partial T/\partial n$ = verandering van de temperatuur in de normaalrichting;
 f = coriolisparameter;
 g = zwaartekrachtsversnelling;
 $\Delta V/\Delta z$ = verandering van windsnelheid en -richting met de hoogte, of wel: *de verticale windschering VWS*;

Frontogenese leidt dus tot een toename van de verticale windschering.

We zagen in paragraaf 2.1 dat CAT onder andere voorkomt vlak onder hoogtefronten. We kunnen dat ook begrijpen. Immers, nabij een hoogtefront vinden we een temperatuurgradiënt. Wanneer de temperatuurgradiënt groter wordt (frontogenese), bijvoorbeeld dankzij vormen van horizontale windschering (DSH en DST), neemt ook de verticale windschering toe (thermische windvergelijking). Deze verticale windschering is de noodzakelijke voorwaarde om het proces van de Kelvin-Helmholtz instabiliteit (paragraaf 2.3) in gang te zetten. Aan de voorwaarde dat de windschering plaats heeft in een stabiel opgebouwde atmosfeer wordt voldaan onder het hoogtefront.

Een goede vraag is nu: wat bepaalt de mate van frontogenese? Petterssen stelde in 1956 een formule op die de mate van frontogenese weer-geeft. Deze formule luidt:

$$I_f = |\nabla\theta| (0,5) [DEF(\cos 2\beta) + CVG]$$

$\nabla\theta$ = bestaande potentiële temperatuurgradiënt
 DEF = deformatieterm van Saucier (paragraaf 3.1.1)
 β = hoek tussen de uitstromingsas en isothermen
 (zie figuren 3 en 4).
 CVG = convergentieterm: $-(\delta u/\delta x + \delta v/\delta y)$

De laatste drie termen bepalen in hoeverre de bestaande temperatuurgradiënt wordt versterkt.

Nu bedenken we het volgende:

- 1. De grootte van de bestaande potentiële temperatuurgradiënt is gelijk aan de verandering van de temperatuur loodrecht op de isothermen, of wel $|\nabla\theta| = \partial T/\partial n$;
- 2. de thermische windvergelijking koppelt een horizontale temperatuurgradiënt aan een verticale windschering (zie boven);
- 3. $\cos 2\beta$ kan maximaal de waarde 1 krijgen.

Met deze kennis kunnen we de formule van Pettersen herschrijven tot:

$$I_f = (0,5) (fT/g) [DEF + CVG] (VWS)$$

of tot:

$$I_f \approx constante [DEF + CVG] (VWS)$$

Gezien de relatie tussen frontogenese en CAT ligt het voor de hand om nu te schrijven:

$$INDEX_{CAT} = [DEF + CVG] (VWS)$$

Manusco en Endlich (1966) toonden aan dat het produkt van horizontale deformatie en verticale windschering een hogere correlatie had met het optreden van CAT dan andere (combinaties van) meteorologische parameters, namelijk 0,43 - 0,48.

De CAT-index van het NMC luidt dan ook eenvoudig:

$$TI = DEF * VWS$$

Het Air Force Global Weather Central (AFGWC) in Omaha, Nebraska handhaaft de convergentieterm wel. Deze term is veel kleiner dan de deformatieterm, maar kan desondanks in sommige gevallen toch van belang zijn (Kao and Sizoo 1966).

Verificatie toont aan dat de AFGWC-index op het niveau 250 - 300 hPa een grotere "vals alarm"-verhouding heeft dan de index van het NMC (Ellrod et al. 1991), namelijk respectievelijk 39% en 29%. Onder "vals alarm" wordt verstaan: waarschuwen voor CAT terwijl er geen daadwerkelijke melding plaatsvindt, of de mate van CAT overschatten.

4 De case-studies

Ik heb vier dagen uitgezocht waarop vliegtuigbemanningen matige of zware CAT hebben gemeld aan de wachtmeteoroloog op Schiphol. Gekeken is of de methodieken van hoofdstuk 3 op deze dagen een indicatie zouden hebben gegeven voor CAT. We moeten ons trouwens wel realiseren dat het inschatten van de CAT-intensiteit door de bemanning enigszins subjectief is.

Paragrafen 4.1 en 4.2 behandelen twee van de vier praktijkgevallen. De resultaten van de resterende twee komen hiermee sterk overeen.

Na binnenkomst van een CAT-melding geeft de wachtmeteoroloog op Schiphol een waarschuwing uit voor CAT, soms aangevuld met een indicatie omtrent de te verwachten ontwikkeling. Deze waarschuwing geldt voor zijn bewakingsgebied, het Amsterdam Flight Information Region - kortweg Amsterdam-FIR. Dit gebied beslaat Nederland en het Nederlandse deel van het continentale plat. De uitgegeven waarschuwingen staan aan het begin van de volgende twee paragrafen.

De berekeningen zijn uitgevoerd op een rekenrooster met een horizontale gridafstand van 150 km. De velden waren afkomstig van het ECMWF. Voor de verticale afgeleiden werden de waarden van de standaardhoogten genomen. Het niveau waarop de berekeningen plaatsvonden was steeds het standaard-drukkniveau dat het dichtst lag bij het midden van de laag waarin volgens de waarschuwing CAT voorkwam.

Op het ECMWF wordt elke 6 uur (mainhours) een modelanalyse gemaakt dat dient om het model tussen twee rekensessies in het juiste spoor te houden. Alleen deze analyses zijn gebruikt; er zijn dus geen berekeningen uitgevoerd op prognostische ECMWF-kaarten.

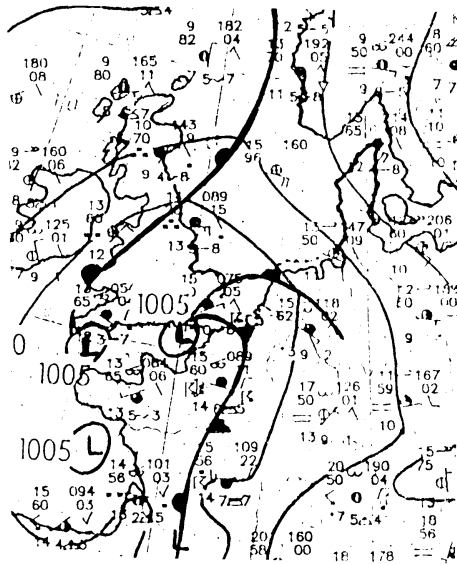
4.1 23 september 1992

de waarschuwing:

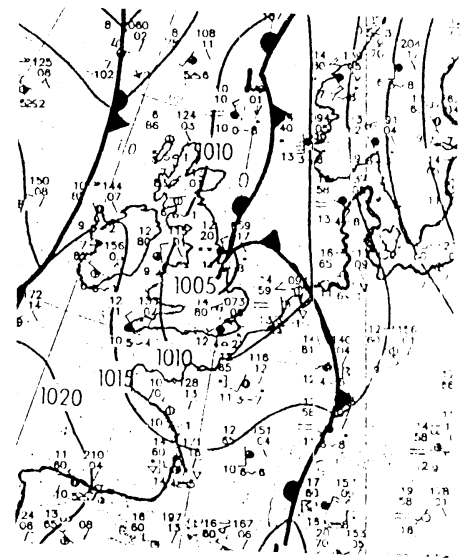
geldig van 230000 - 230300 (UTC)
matige tot zware CAT waargenomen en verwacht in het **westelijke** deel van het Amsterdam-FIR tussen 25000 en 35000 voet (circa 400 hPa - 250 hPa).

de synoptische situatie:

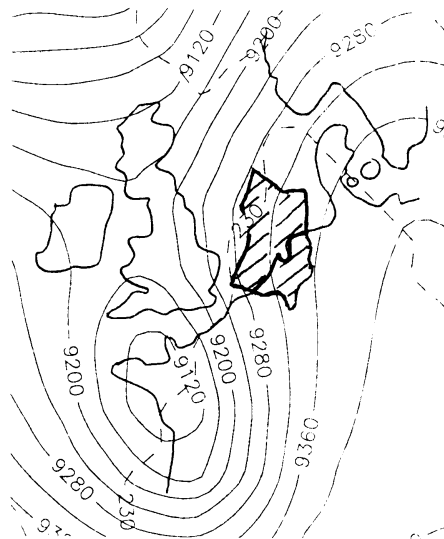
op 22 september 1992 ligt een complex-lagedrukgebied over Engeland en een groot deel van Frankrijk. Een koufront trekt vanuit Frankrijk naar het noorden en is Nederland op 23 september 00.00 UTC grotendeels gepasseerd. Op 300 hPa vertoont de stroming een omega-patroon, met een afgesloten lagedrukkern boven west-Frankrijk. Deze kern trekt naar het noordoosten en op 23 september 00.00 UTC ligt het centrum ervan boven Normandië (zie figuren 6, 7, 8, 9).



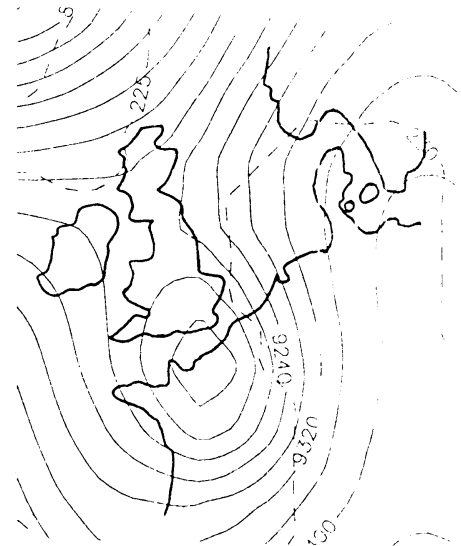
figuur 6: analyse
grondkaart 22/09/92 00.00 UTC



figuur 7: analyse
grondkaart 23/09/92 00.00 UTC



figuur 8: analyse
300 hPa 22/09/92 12.00 UTC
gearceerd gebied: Amsterdam-FIR



figuur 9: analyse
300 hPa 23/09/92 00.00 UTC

de resultaten:

a) Diagnostische Richardson Tendens

Drie vragen zijn interessant:

- 1. Liggen er binnen het Amsterdam-FIR Ri-waarden van 1 of lager?
- 2. Zo nee, liggen er binnen het Amsterdam-FIR negatieve DRT-waarden?
- 3. Zo ja, hoelang duurt het dan nog voordat de kritische Ri-waarde bereikt is?

Figuur 10 laat het Ri-patroon op 300 hPa zien van 23 september 00.00 UTC. De band met de laagste Ri-waarden heeft een sterk meanderend patroon en volgt gedeeltelijk de isotherm van 230 K. Gezien de definitie van het Ri-getal (paragraaf 3.1.1) is het Ri-patroon uiteraard sterk bepaald door het patroon van de verticale windschering (zie *figuur 11*). Het bleek trouwens dat in alle gevallen het Ri-patroon, windscherings- en isothermenpatroon grotendeels gelijkvormig waren. De laagste Ri-waarden in de buurt van Nederland liggen iets onder de waarde 10. Dat is hoog, want er werd op dat moment al turbulentie geconstateerd.



figuur 10: analyse
300 hPa 23/09/92 00:00 UTC
Ri-patroon
intervalwaarde: 5



figuur 11: analyse
300 hPa 23/09/92 00:00 UTC
verticale windschering
intervalwaarde: $0.05 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

In *figuur 12* is te zien dat een aantal gebieden met een negatieve DRT rond Nederland ligt en dat één ervan samenvalt met de laagste Ri-waarden. De afname van circa $-4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ betekent dat, uitgaande van een Ri-waarde van 7, het nog ongeveer 40 uur zal duren voordat de kritische grenswaarde wordt benaderd. Dit is geen bemoedigend resultaat.

b) CAT-index Bracknell

De drempelwaarde voor deze index is gesteld op $E=20$. Bij deze waarde is de kans op matige of zware CAT groter dan de gemiddelde kans (paragraaf 3.2). In *figuur 13* zien we het resultaat van de berekeningen. De hoogste indexwaarden liggen rond het lagedrukgebied in de bovenlucht. De overeenkomst met de aanduiding "het westelijk deel" uit de waarschuwing is redelijk; volgens de berekeningen beslaat het CAT-gebied meer het zuidwestelijke deel van het Amsterdam-FIR.

c) CAT-index NMC

Figuur 14 geeft de isolijnen van de CAT-index zoals deze wordt gebruikt op het NMC. De drempelwaarde voor matige turbulentie is $2 * 10^{-7} s^{-2}$, vanaf $4 * 10^{-7} s^{-2}$ kan matige tot zware turbulentie optreden. Het patroon is vergelijkbaar met de CAT-index van Bracknell. Ook hier blijkt het patroon trouwens sterk beïnvloed door de verticale windschering.



figuur 12. analyse
300 hPa 23/09/92 00.00 UTC
DRT ≤ 0
intervalwaarde: $5 * 10^{-5} s^{-1}$



figuur: 13 analyse
300 hPa 23/09/92 00.00 UTC
CAT-index Bracknell
intervalwaarde: 5



figuur 14: analyse
300 hPa 23/09/92 00.00 UTC
CAT-index NMC
intervalwaarde: $2 * 10^{-7} s^{-2}$

4.2 29 en 30 september 1991

Op 29 september 1991 werd 's middags om 15.30 UTC de eerste waarschuwing voor CAT in het Amsterdam-FIR uitgegeven. Daarna volgden er maar liefst vijf andere waarschuwingen, elk voor drie uur geldig. Een interessante situatie om te bekijken.

de eerste waarschuwing:

geldig van 291530 - 291930 (UTC)
matige tot zware CAT waargenomen in het **oostelijk** deel van het Amsterdam-FIR tussen 24000 en 36000 voet (circa 410 hPa - 230 hPa); verwacht wordt dat het gebied zich niet verplaatst en dat de CAT-intensiteit niet verandert.

de laatste waarschuwing:

geldig van 300300 - 300600 (UTC)
matige tot zware CAT waargenomen en verwacht in het **gehele** Amsterdam-FIR tussen 24000 en 36000 voet (circa 410 hPa - 230 hPa); naar verwachting is het gebied stationair en verandert de intensiteit van de turbulentie niet.

de synoptische situatie:

op 29 september 1991 ligt om 00.00 UTC een lagedrukgebied boven Bretagne. De bijbehorende occlusie ligt iets ten zuiden van de Ierse Zee. De volgende 24 uur trekt het lagedrukgebied naar het noordoosten. Op 30 september 00.00 UTC vinden we de laagste barometerstanden dan ook voor de Deense kust. De bend-back, in de analyse getekend als koufront, ligt op de Nederlandse westkust. Een nieuw frontaal systeem nadert op dat moment Ierland.

Op 300 hPa zien we op 29 september om 12.00 UTC een scherpe trog boven de Noordzee en west-Frankrijk. 18 Uur later heeft een afgesnoerd lagedrukgebied zich genesteld boven Barcelona en ligt de trog voor onze kust (zie figuren 15, 16, 17, 18).

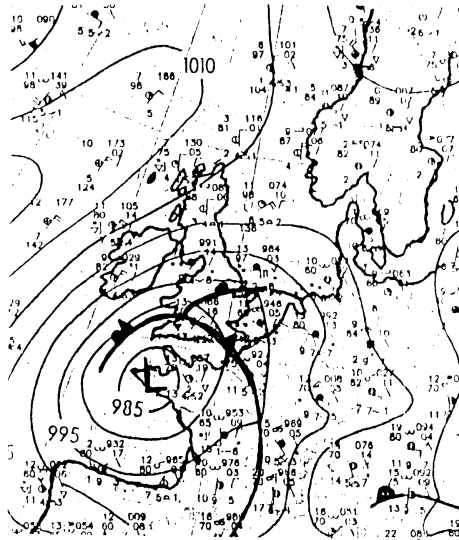
de resultaten:

a) Diagnostische Richardson Tendens

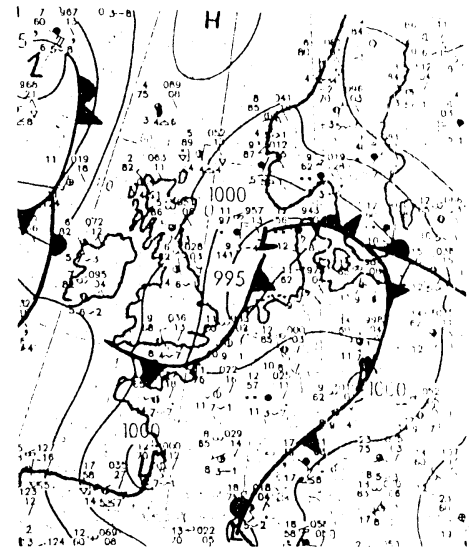
Op het moment dat de eerste waarschuwing wordt uitgegeven vinden we de laagste Ri-waarden boven de oostelijke helft van het land (zie figuur 19).

Een ander gebied met lage Ri-waarden, samenvallend met de warmte-advectie op 300 hPa die voorafgaat aan het nieuwe frontensysteem, ligt boven het noordwestelijk deel van het Verenigd Koninkrijk.

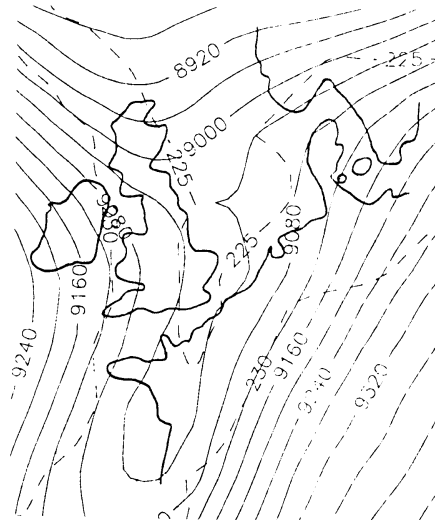
De laagste Ri-waarden in het noordoosten zijn iets boven de 5. Er bleek in dit gebied geen sprake van een negatieve DRT (niet getoond).



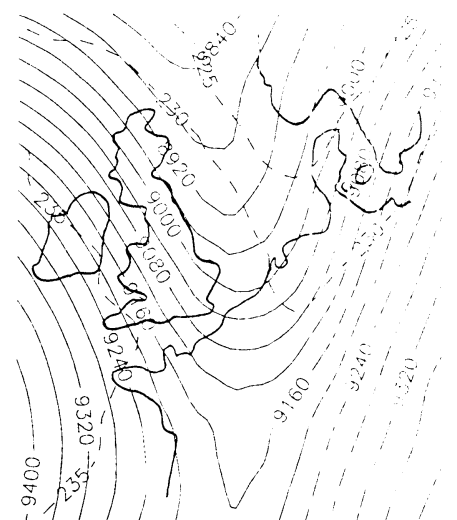
figuur 15: analyse
grondkaart 29/09/91 00.00 UTC



figuur 16: analyse
grondkaart 30/09/91 00.00 UTC



figuur 17: analyse
300 hPa 29/09/91 12.00 UTC



figuur 18: analyse
300 hPa 30/09/91 06.00 UTC

Als de laatste waarschuwing ingaat zijn de lage Ri-waarden in het oosten vervangen door hogere. Boven de Noordzee zijn de Ri-waarden gedaald van waarden boven de 20 tot circa 15 (figuur 20). De DRT-waarde in dit gebied is om 18.00 UTC circa $-12 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (niet getoond). Dit betekent dat het nog ruim 30 uur (!) duurt voordat het Ri-getal de kritische Ri-waarde benadert...

Het blijkt opnieuw dat het Ri-patroon de gebieden met verhoogde kans op CAT redelijk aangeeft. De Ri-waarden vallen echter duidelijk te hoog uit. Het resultaat van de DRT-berekening, en daaruit voortvloeiend de kritische tijd is op zijn zachtst gezegd voor verbetering vatbaar.



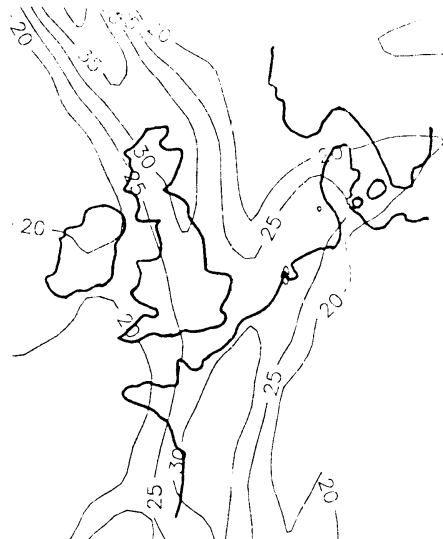
figuur 19: analyse
300 hPa 29/09/91 18.00 UTC
Ri-patroon
intervalwaarde: 5



figuur 20: analyse
300 hPa 30/09/91 06.30 UTC
Ri-patroon
intervalwaarde: 5

b) CAT-index Bracknell

Hiervan staat het resultaat in de *figuren 21 en 22*. Om 18.00 UTC ligt het zwaartepunt van het patroon over het westen van het land. Verder zien we ten noordwesten van Schotland een gebied met bijzonder hoge indexwaarden. 12 Uur later, dus op 30 september om 06.00 UTC, ligt dit gebied boven de Noordzee. In het westelijk deel van het Amsterdam-FIR zijn de kansen op CAT dus beduidend toegenomen.



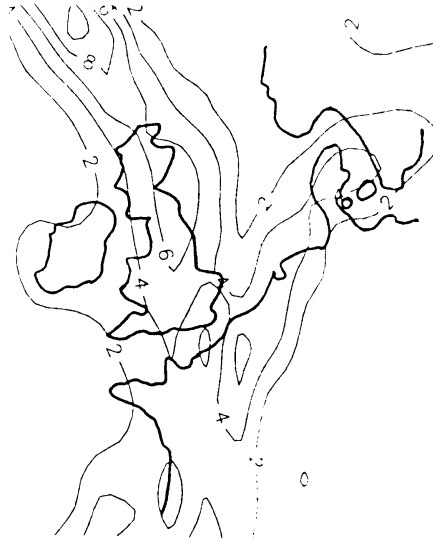
figuur: 21 analyse
300 hPa 29/09/91 18.00 UTC
CAT-index Bracknell
intervalwaarde: 5



figuur 22: analyse
300 hPa 30/09/91 06.00 UTC
CAT-index Bracknell
intervalwaarde: 5

c) CAT-index NMC

De uitkomsten van de berekeningen voor deze CAT-index wijken niet veel af van de vorige (zie figuren 23 en 24). Ook hier zien we dat een nieuw gebied met verhoogde kans op CAT vanuit het westen nadert. Wellicht is het gebied iets beperkter in omvang, maar het verschil is minimaal.



figuur: 23 analyse
300 hPa 29/09/91 18.00 UTC
CAT-index NMC
intervalwaarde: $2 * 10^{-7} s^{-2}$



figuur 24: analyse
300 hPa 30/09/91 06.00 UTC
CAT-index NMC
intervalwaarde: $2 * 10^{-7} s^{-2}$

5 Conclusies en vervolg

De door Oard ontwikkelde verwachtingsmethodiek van de Diagnostische Richardson Tendens laat duidelijk te wensen over. De DRT-uitvoer laat veel kleinschalige structuren zien, zonder duidelijk interpreteerbare patronen. Daarnaast blijft het berekenen van de actuele Ri-waarden een zwak punt omdat dit sterk afhangt van de verticale resolutie van het gebruikte atmosfeermodel. Het door Stankovic ter sprake gebracht verband tussen CAT-intensiteit en DRT-grootte werd niet bevestigd. Mede gezien het resultaat van de andere twee indices is het dan ook verstandig om de DRT-methodiek verder buiten beschouwing te laten en niet toe te passen binnen het Verticale Informatie Model (VIM).

De andere twee CAT-indices ontlopen elkaar niet veel; de uitvoer is grotendeels identiek.

Wanneer een keuze moet worden gemaakt verdient de NMC-index een lichte voorkeur en wel om drie redenen:

- een studie, uitgevoerd aan het Canadian Newfoundland Weather Centre, laat zien dat de NMC-index iets hoger scoort dan de CAT-index van Bracknell (Côté et al. 1990).
- de CAT-index van Bracknell is wellicht iets moeilijker te interpreteren. Deze empirische index geeft namelijk op elk willekeurig punt de kans op matige of zware CAT per 100 km afgelegde weg. Dat betekent dat voor langere afstanden de individuele kansen moeten worden gecombineerd.
- de CAT-index van Bracknell geeft geen indicatie over de te verwachten intensiteit van de CAT; de NMC-index maakt verschil tussen "matige turbulentie" en "matige of zware turbulentie".

Uiteraard is ook de CAT-index van het NMC niet volmaakt. Winst kan wellicht worden geboekt doordat VIM rekent op het fijnmaziger HIRLAM-rooster. Daarbij moet wel bedacht worden dat bij gebruik van HIRLAM-velden de drempelwaarden moeten worden bijgesteld.

Het lijkt zinvol om de windscheringsterm te berekenen over een minder dikke laag. Wanneer bij de nu onderzochte gevallen de CAT zich voordeed rond 400 hPa, werd de deformatieterm berekend op het 400 hPa-vlak en de verticale windschering over de laag 500 - 300 hPa. Waarschijnlijk is het verstandiger om de verticale windscheringsterm in dat geval te berekenen over de laag 400 - 300 hPa. Op deze manier neemt men het maximum aan verticale windschering binnen de polaire straalstroom beter mee (omdat dit maximum zich vaak in deze laag bevindt, vooral in de koudere perioden).

Daarnaast moet tijdens een ruime testperiode in de praktijk van alledag nog aandacht worden geschonken aan het verticale verloop van de index. Is er een onder- en/of bovengrens aan te geven van het CAT-gebied? Ook verdient de "vals alarm"-verhouding verdere aandacht. Met andere woorden: geeft de

index niet te vaak hoge waarden terwijl in de praktijk geen enkele bemanning turbulentie meldt.

Het belangrijkste is echter: er bestaat een verwachtingsmethodiek die de luchtvaartmeteorologen in Nederland kan ondersteunen bij het verwachten van CAT. Het blijft een hulpmiddel, maar het kan de meteoroloog attent maken op de gebieden waarin hij, op grond van zijn ervaring, normaliter geen CAT zou verwachten. Alleen daarom al is toepassing in VIM zinvol.

Met dank aan...

*Ik wil **Sylvia Barlag** bedanken voor haar hulp tijdens de startfase en voor het geregeld afstaan van haar werkplek. Ook dank aan **Gertie Geertsema**, en wel voor haar opbouwende kritiek op dit rapport.*

*Speciale dank gaat uit naar **Dirk van der Duijn Schouten**, majoor bij de Koninklijke Luchtmacht. Zijn ondersteuning en flexibele wijze van samenwerken zijn van groot belang geweest.*

LITERATUUR

- Côté, C., Webber, M. and Brown, D., 1990.
Verification of the experimental aviation package 1989/1990.
Workshop on operational meteorology, Montreal, Atmospheric Environment Service, 280-283.
- Duton, M.J.O., 1980.
Probability forecasts of clear-air turbulence based on numerical model output.
Meteorological Magazine, **109**, 293-310.
- Ellrod, G.P., and Knapp, D.I., 1991.
An objective clear-air turbulence forecasting technique: verification and operational use.
Weather and Forecasting, **7**, 150-165.
- Forrester, D.A., 1986.
Automated clear-air turbulence forecasting.
Meteorological Magazine, **115**, 269-277.
- Holton, J.R., 1979.
An introduction to Dynamic Meteorology.
2nd edition, Academic Press, 391 p.
- Hopkins, R.H., 1977.
Forecasting techniques of clear-air turbulence including that associated with mountain waves.
WMO **Technical Note no. 155**, Geneva, WMO, 31 p.
- Kao, S.K. and Sizoo, A.H., 1966.
Analysis of clear-air turbulence near the jet stream.
J. Geophys. Res., **71**, 3799-3805.
- Mancuso, R.L. and Endlich, R.M., 1966.
Clear-air turbulence frequency as a function of wind shear and deformation.
Monthly Weather Review, **94**, 581-585.
- Oard, M.J., 1974.
Application of a Diagnostic Richardson number Tendency to a case study of clear-air turbulence.
Journal of Applied Meteorology, **13**, 771-777.
- Pettersen, S., 1956.
Weather analysis and forecasting, **1**, McGraw-Hill Book Co., 428 pp.
2nd edition.

Pocock, C.L., 1980.
Proceedings 4th annual workshop on meteorological and environmental inputs
to aviation systems.
NASA CP-2139.

Roach, W.T., 1970.
On the influence of synoptic development on the production of high level
turbulence.
Quart.J.R.Met.Soc., **96**, 413-429.

Saucier, W.J., 1955.
Principles of meteorological analysis, University of Chicago Press, 438 pp.

Stankovic, K., 1986.
The Diagnostic Richardson number Tendency as an indicator of clear-air
turbulence.
Rasprave papers, **21**, 3-11.

Stull, R.B., 1991.
An introduction to Boundary Layer Meteorology.
Kluwer Academic Publishers, 666 p.