



Niels Bohr Institutet



LUNDS UNIVERSITET

# Prognos av clear air turbulence i DMI-HIRLAM: Situationsstudier

Kandidatarbete i meteorologi

*Christina Mannerberg*

Köpenhamns universitet, Niels Bohr Institutet  
Lunds universitet, Fysiska institutionen

15 juni 2012

Intern handledare: Aksel Walløe Hansen, NBI  
Extern handledare: Niels Woetmann Nielsen, DMI



## Abstract

Two indices, TI3 and TI4, have been presented at the Danish Meteorological Institute with the purpose to indicate clear air turbulence (CAT). The indices are not yet in operative use. The correlation between the indices and other parameters in DMI-HIRLAM is not known and is investigated in three case studies. CAT is a hazard to aviation and accurate prediction of CAT is important. The use of two indices is motivated by the fact that they indicate CAT developed from different mechanisms. CAT occurs mainly in association with the jet stream, where strong wind shears give rise to turbulence through Kelvin-Helmholtz and inflection point instability. TI3 is a further development of an other CAT-index, the Turbulence Index, which is the product of vertical wind shear and horizontal deformation. In TI3 a dependence on the static stability is included. TI4 is made to indicate areas with risk of CAT where the deformation is small, where TI3 has a low value. This happens mainly on the anticyclonic shear side of the jet, where the flow can be unbalanced and CAT can develop from direct or indirect shear instability. Three cases in February 2012 have been selected and analyzed. The indices are compared to the model output of turbulent kinetic energy (TKE), a parameter describing the intensity of the turbulence. Also the structure of the indices in the two numerical models, T15 and SKA, with different resolution is compared for the same cases. The case studies show that a clear systematic correlation between the indices and TKE is not to be seen, but some correlation is observed between TI3 and TKE. This probably has its reason in the parametrization of TKE in DMI-HIRLAM. The result of the investigation of the dependence on model resolution is rather expected, the details in SKA were greater. The difference of TI4 in the two numerical models give rise to questions. Before the indices can be taken into operational use verification is needed, a process that is constrained by the lack of observations and of accuracy in the observations available.

## Sammanfattning

På Danmarks Meteorologiska Institut har två index, TI3 och TI4, utvecklats i syfte att lokalisera riskområden för clear air turbulence (CAT). Indexen är ännu inte i operationellt bruk. Deras samband med andra parametrar i DMI-HIRLAM är inte känt och studeras här genom tre situationsstudier. CAT utgör en fara för flygtrafiken och bra prognoser av detta fenomen är nödvändigt. Att två olika index används motiveras av att de indikerar CAT som har utlösts av olika mekanismer. CAT förekommer framför allt i samband med jetströmmen, där starka vindshear genom Kelvin-Helmholtz-instabilitet och inflexionspunktsinstabilitet ger upphov till turbulens. TI3 är en vidareutveckling av ett annat CAT-index, Turbulence index, vilket bygger på produkten mellan vertikalt vindshear och horisontell deformation. I TI3 har ett beroende på den statiska stabiliteten lagts till. TI4 ska indikera riskområden för CAT då deformationen är liten, där värdet för TI3 blir litet. Detta kan ske främst på den anticyklonala sidan av jetströmmen, där det finns risk för att flödet blir obalanserat och CAT kan utvecklas från direkt eller indirekt shear instabilitet. Tre tillfällen i februari 2012 har valts ut och studerats. Modellens beräkning av indexen har jämförts med dess beräkning av turbulent kinetisk energi (TKE), en parameter som beskriver turbulensens intensitet. För samma situationer har också indexens utseende i två modeller, T15 och SKA, med olika upplösning jämförts. Studien visar att det inte går att se ett klart systematiskt samband mellan indexen och TKE, men ett visst samband ses mellan TI3 och TKE. Detta beror troligtvis på parametreringen av TKE i DMI-HIRLAM. Undersökningen av hur indexen beror på modellupplösning ger ett ganska väntat resultat med fler detaljer för indexen i SKA. Dock finns tveksamheter kring den stora skillnaden för TI4s utseende i de två modellerna. Innan indexen kan tas i bruk behövs verifiering, vilket försvåras av att observationerna är få och kan vara oprecisa.

# Innehållsförteckning

Abstract.....	3
Sammanfattning.....	3
1 Introduktion.....	5
2 Teori.....	7
2.1 Turbulens.....	7
2.1.1 Egenskaper hos turbulens.....	7
2.1.2 Olika typer av instabilitet.....	7
2.1.3 Reynolds genomsnittsmetod.....	9
2.1.4 Turbulent kinetisk energi.....	10
2.2 Clear Air Turbulence .....	11
2.2.1 Tidigare CAT-index.....	12
2.2.2 CAT-index i DMI-HIRLAM.....	14
2.2.2.1 TI3.....	14
2.2.2.2 TI4.....	14
2.3 HIRLAM.....	16
2.3.1 TKE i DMI-HIRLAM.....	17
3 Metod.....	19
4 Resultat.....	21
4.1 Samband mellan CAT-index och TKE.....	21
4.1.1 14 februari 2012 12UTC+06H.....	21
4.1.2 23 februari 2012 00UTC+06H.....	26
4.1.3 24 februari 2012 12UTC+06H.....	31
4.2 Betydelse av modellupplösning för CAT-index .....	36
5 Diskussion .....	37
6 Slutsatser.....	41
Referenser.....	42
Tack till .....	43
Bilagor.....	44
Bilaga 1 – Figurer.....	44
Bilaga 2 – Mailkorrespondens med MetOffice UK.....	48

# 1 Introduktion

Turbulens är något som främst förknippas med det planetära gränsskiktet, den nedre delen av troposfären. Här uppkommer turbulensen på grund av kontakten med jordytan. Men även på höjder opåverkade av jordytan kan turbulens förekomma.

Clear air turbulence, CAT, är turbulens i molnfria områden i troposfären utanför gränsskiktet. CAT skapas framför allt genom shear instabilitet i områden med starka vindshear, dvs där vindens styrka ändras markant över en sträcka. CAT förekommer ofta i samband med jetströmmen då de starka shear som finns här utgör gynnsamma förhållanden för utvecklande av CAT från shear instabilitet. Fenomenet har varit känt sedan andra världskriget, då stridsflygplan flög i områden med CAT. Alltsedan den kommersiella flygtrafiken har utökats har också behovet för att kunna förutsäga områden med CAT ökat. CAT kan vara förödande för flygtrafiken och att förbättra prognoser är relevant för att kunna undvika både personskador och skador på flygplan samt för att minimera bränsleförbrukningen. CAT innebär inte bara materiella skador och kostnader utan kan också i fall med kraftigare turbulens utgöra en verklig fara för passagerare och personal.<sup>1</sup>

Att förbättra metoder för att upptäcka riskområden är därför viktigt för flygsäkerheten, men det är inte enkelt att göra bra prognoser på CAT. Fortfarande är ämnet inte helt utrett och mekanismerna som styr turbulensen studeras fortfarande. Många studier har gjorts med syfte att finna de parametrar som bäst indikerar områden med förekomst av CAT. Det har också gjorts flera försök att utforma index som kan peka ut regioner med CAT, där ofta parametrar som horisontellt och vertikalt vindshear ingår.

Observationer av CAT rapporteras av piloter genom så kallade PIREPs (efter eng. pilot report). Här anges turbulensens intensitet, flygnivå och position. Intensiteten delas in i nivåerna lätt, moderat, allvarlig och extrem (eng. light, moderate, severe, extreme). Intensitetsnivån som inrapporteras beror på hur mycket flygplanets höjd, position och fart förändras på grund av turbulensen. Vid lätt turbulens ändras detta bara något medan vid extrem turbulens ändras planets läge kraftigt och planet kan tidvis inte styras. Flygplan av olika storlekar kommer inte uppleva samma intensitetsnivå och därför måste även typ av plan rapporteras i en PIREP som gäller turbulens. Varningar för områden med CAT förmedlas till piloter genom till exempel SIGMETs (Significant Meteorological Information). Det görs också Significant Weather Charts, SIGWX, där markeras till exempel jetaxeln, områden med konvektion och områden med CAT med angiven flygnivå.

Olika meteorologiska institut använder olika metoder och index för att göra prognoser för CAT. World Area Forecast Center (WAFC) London, som under ledning av International Civil Aviation Organisation (ICAO) gör globala prognoser till flygtrafiken, använder sig av Dutton index, som presenteras kort i avsnitt 3, kombinerat med meteorologens egen erfarenhet för att identifiera CAT-områden. Ett annat index som är välkänt är Turbulence index, TI, som används bland annat av National Oceanic and Atmospheric Administration's Aviation Weather Center (NOAA/AWC) och Air Force Weather Agency i USA och snart också av WAFC London. Detta index beskrivs närmare i avsnitt 2.2.1.<sup>2</sup> Dessa två index är relativt enkla, med kinematiska termer som beräknas utifrån den numeriska modellens

1 Ellrod et al. 1992:150, Dutton et al. 1970:937, Wallace et al. 2006:18-19

2 Ellrod et al. 2010:790, Macgregor 2012

prognos. En metod, Graphical Turbulence Guidance (GTG), som presenteras av Sharman et al. (2006) innebär att flera olika index och parametrar för att indikera CAT beräknas och sedan jämförs med PIREPs. Beroende på hur bra en parameter/index är på att förutse turbulensen vid det aktuella observerade tillfället tilldelas parametern en statistisk vikt och får motsvarande inflytande på den prognos av CAT som till slut presenteras. GTG beräknas på NOAA/AWC.<sup>3</sup>

På Danmarks Meteorologiska Institut (DMI) har det inte tidigare gjorts försök att prognostisera CAT. Istället har man främst använt sig av SIGWX utfärdade av WAFC London. På DMI har nyligen utvecklats nya index, TI3 och TI4, för att göra det möjligt att identifiera riskområden för CAT. Detta är något helt nytt på DMI och något index för CAT har inte beräknats tidigare i DMI-HIRLAM. Indexen är ännu inte i operationellt bruk, utan måste testas ytterligare och kan inte börja användas förrän detta är gjort.

När jag fick höra om de framtagna indexen ville jag gärna arbeta vidare med dessa. CAT är ett viktigt fenomen att kunna förutsäga för att kunna säkerställa säkerheten för flygtrafiken. Eftersom detta inte låter sig göras så enkelt är det en meteorologisk utmaning att kunna göra bra prognoser på CAT.

De två framtagna indexen är nya och deras samband med andra parametrar som beräknas i den numeriska prognosmodellen är inte fastställt. Detta undersöks i rapporten. Intuitivt tänker man att CAT och turbulent kinetisk energi (TKE) återfinns på samma ställe i modellen. Det vore en fördel att kunna komplettera CAT-indexen med prognosen för TKE när prognoser för CAT ska göras. I rapporten presenteras en undersökning av hur prognostiserad CAT hänger samman med prognostiserad TKE och om det finns ett systematiskt samband. Här jämförs prognoser för de båda vid tre olika tillfällen. En situation då TI3 visar kraftig turbulens och en då den inte är lika kraftig samt ett tillfälle då TI4 har höga värden.

Indexen beräknas i två olika DMI-HIRLAM-modeller, T15 och SKA, vilka har olika upplösning och täckningsområde. Det undersöks också hur indexet beror på den horisontella och vertikala upplösningen i den numeriska modellen. Här jämförs prognoserna för CAT i de modellerna vid samma tillfällen. Som en jämförelse till beräkningen av CAT i HIRLAM används NSWC (Nordic Significant Weather Chart) för de aktuella tillfällena.

I rapporten genomgås först relevant teori; egenskaper hos turbulens, budgetekvationen för TKE, CAT och genomgång av ett tidigare CAT-index, de nyframtagna indexen och hur de beräknas samt kort om HIRLAM och beräkning av TKE i HIRLAM. Under Resultat presenteras modellernas prognos för de valda tillfällena, både i horisontella kartor och tvärsnitt. I Diskussion framförs olika orsaker till resultatet av de båda undersökningarna. Här diskuteras också möjliga förbättringar och det problem som verifieringssvårigheter utgör.

---

3 Sharman et al 2006: 268-273

## 2 Teori

### 2.1 Turbulens

Uppkomsten av turbulens är ett försök att minska instabilitet i flödet. När det till exempel existerar ett vindshear, ska turbulens som uppstår blanda luftmassorna med olika hastighet och på så sätt utjämna skillnader i vind. Turbulens förekommer på en längdskala från km till mm. Ju mindre virvlarna är desto svårare blir de att prognostisera. De allra minsta virvlarna kan endast förutses några sekunder. Att turbulens är ett icke-linjärt fenomen gör att det inte kan prognostiseras på en längre, användbar tidsskala, så som några dagar. Istället har metoder utarbetats för att kunna beskriva medeleffekten av turbulens. Beteendet hos en enskild virvel är då inte längre viktigt, utan turbulensen beskrivs med statistiska metoder.<sup>4</sup>

#### 2.1.1 Egenskaper hos turbulens

Turbulens är oregelbundna, slumpmässiga rörelser och sker på en varierande skala, både i tid och rum.<sup>5</sup> För turbulens är den horisontella och vertikala skalan jämförbar, vilket den inte är för storskaliga atmosfäriska strömningar.<sup>6</sup> Även andra vågrörelser kan vara slumpmässiga, men de skiljer sig från turbulens på tre punkter. En viktig egenskap hos turbulens är att den ger upphov till diffusion, vilket gör att tex. föroreningar och andra partiklar sprids i atmosfären. Ett turbulent flöde är också tredimensionellt och rotationellt. Dissipation av turbulent kinetisk energi (TKE), dvs omvandling av kinetisk energi till inre energi hos molekyler, sker i de allra minsta virvlarna på grund av molekylär friktion. Tillförsel av energi måste därför ske kontinuerligt för att turbulensen ska kunna upprätthållas.<sup>7</sup>

#### 2.1.2 Olika typer av instabilitet

I ett instabilt flöde kommer perturbationer som introduceras att öka i styrka och flödet blir turbulent. Turbulens uppstår som ett försök att minska instabilitet, som kan ha olika ursprung.

*Statisk instabilitet:* Om atmosfären är statisk stabil eller instabil beror på den vertikala temperaturprofilen. Om ett luftpaket flyttas från sitt jämviktsläge, sägs atmosfärens tillstånd vara statistiskt stabilt då ett luftpaket utsätts för en negativ flytkraft som får luftpaketet att återvända till jämviktsläget. Då tillståndet istället är instabilt, upplever ett luftpaket istället en positiv flytkraft.<sup>8</sup> Ett sätt att uttrycka den statistiska stabiliteten för ett luftlager är Brunt-Väisälä frekvensen  $N$ ,

$$N^2 = \frac{g}{\theta_v} \frac{\partial \theta_v}{\partial z}$$

där  $\theta_v$  är den virtuella potentiella temperaturen. Då  $N^2 > 0$  uttrycks med vilken frekvens ett luftpaket som flyttas från sitt jämviktsläge oscillerar kring detta jämviktsläge. En stabil omgivande atmosfär resulterar i en högre oscillationsfrekvens. Då  $N^2 = 0$  är luftlagret

4 Wallace et al. 2006:378

5 Pal Ayra 2001:148

6 Holton 2004:116

7 Pal Ayra 2001:148

8 Pal Ayra 2001:142

neutralt stratifierat och då  $N^2 < 0$  är negativ är situationen instabil.<sup>9</sup>

*Dynamisk instabilitet/Inertial instabilitet:* Om perturbationer som uppstår i ett flöde förstärks istället för att förminska, sägs strömningen vara dynamisk instabil. Ett flöde kan vara dynamisk stabil gentemot små perturbationer, men dynamiskt instabil för perturbationer med större amplitud.<sup>10</sup> Vanligen stabiliserar rotation ett luftpaket från horisontella förflyttningar, i likhet med statisk stabil atmosfär med hänsyn till vertikala förflyttningar. Normalt är strömningar på synoptisk skala inertialt stabila.<sup>11</sup>

*Shear instabilitet:* Denna typ av instabilitet uppstår när angränsande luftlager rör sig med olika hastigheter. Shear instabilitet kan ges av shear i både horisontell och vertikal riktning.

Shear instabilitet i horisontell riktning kallas även för inflexionspunktsinstabilitet. Ett villkor för instabiliteten är att det finns ett lokalt maximum i shear vorticitetens vertikala komponent. Detta maximum är också en inflexionspunkt i den horisontella vindprofilen, eftersom den horisontella andraderivatan här växlar tecken. Detta sker främst på den cyklonala shearsidan av jetströmmen. På den anticyklonala shearsidan kan inte värdet för shear vorticiteten bli så högt innan flödet blir obalanserat. Ett exempel på en horisontell vindprofil med en inflexionspunkt och motsvarande vorticitetsprofil ses i figur 1. För att förklara mekanismen bakom inflexionspunktsinstabilitet används en variant av partikelmetoden. I en vindprofil utan inflexionspunkt, om en partikel med en viss vorticitet flyttas från sitt jämviktsläge kommer det att uppleva en återförande kraft och återgå till utgångsläget. Däremot om profilen ser ut som den gör i figur 1, när en luftpartikel med en viss vorticitet flyttas till andra sidan av inflexionspunkten kommer den istället känna en kraft riktad från inflexionspunkten tills den kommer till punkten med motsvarande vorticitet på andra sidan.<sup>12</sup>

Shear instabilitet i vertikal riktning kallas också Kelvin-Helmholtz(KH)-instabilitet. KH är en typ av shear instabilitet som kan uppstå vid skiljeytan mellan två lager av en fluid i en strömning, där lagren har olika densitet och hastighet, men är stabilt skiktade. Ett villkor för KH-instabilitet är att gradient Richardson-talet<sup>13</sup>,  $Ri$ , är mindre än det kritiska värdet  $Ri_c = 0.25$ . Gradient Richardson-talet är

$$Ri = \frac{g}{\theta_v} \frac{\frac{\partial \theta_v}{\partial z}}{\left| \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right|^2} = \frac{N^2}{S^2}$$

där  $S = \left| \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right|$  är det vertikala vindshearet. Då  $Ri$  når det kritiska värdet uppstår små vågor på skiljeytan som sedan växer i storlek, slår över och utvecklas till turbulens. KH instabilitet kan ibland ses som moln, som liknar brytande havsvågor eller, om de ses uppifrån, som tätliggande band, sk billow clouds. KH instabilitet är en mekanism för utveckling av CAT och  $Ri$  används för att lokalisera områden med CAT. Men detta innebär

9 Holton 2004:52-53, Wallace et al. 2006:89, Woetmann Nielsen et al. 2012:4

10 Pal Ayra 2001:142

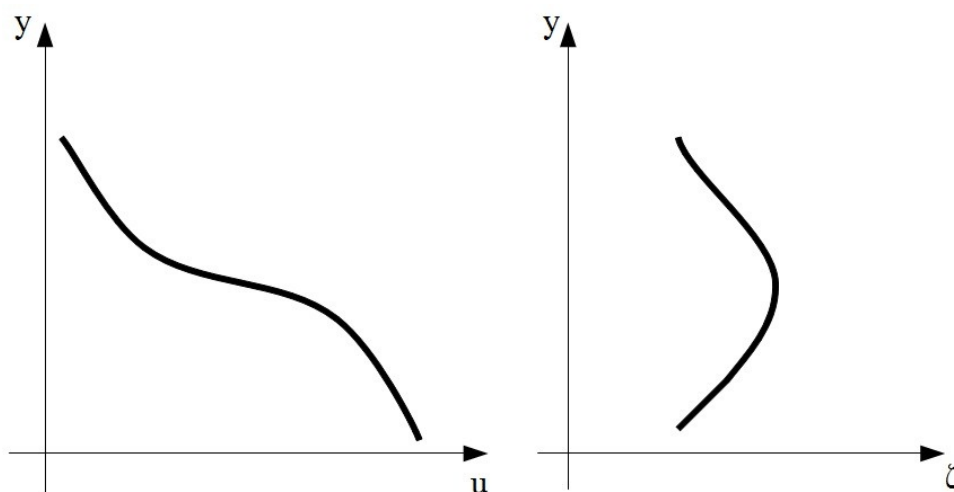
11 Holton 2004:205-206, 279

12 Brown 1972:985, Woetmann Nielsen et al. 2012:6

13 Efter *Lewis Fry Richardson* (1881-1953)



vissa problem, främst för att ett lågt värde på  $Ri$  kan hittas i både laminära (välordnade) och turbulenta områden och det har visat sig att ett lågt  $Ri$  inte automatiskt innebär CAT i regionen. Detta kan också bero på osäkerhet i beräkningen av  $Ri$ .<sup>14</sup>



**Figur 1** Vindprofil med en inflexionspunkt och motsvarande vorticitetsprofil (schematisk).

Instabilitet som uppstår i en strömning kan resultera i ett icke-laminärt flöde, dvs turbulens, men en perturbation i strömningen behöver inte nödvändigtvis leda till turbulens. Själva övergången från en laminär strömning till en turbulent sådan, och även turbulens i sig, är ännu inte fullständigt utredd ur en matematisk synvinkel. Principen är sådan att en instabilitet i flödet orsakar ytterligare rörelser, som i sin tur kan bli instabila och förstärkas. Detta tillsammans med fluktuationer och ökat shear gör att turbulens skapas, först på slumpartat sätt och sedan som turbulens i hela flödet. Det är mycket troligt att just CAT uppstår enligt beskrivningen ovan, att en instabilitet i en stabil atmosfär utvecklas till turbulens, medan i andra fall är flödet från början turbulent. Transport av turbulens, som liksom andra egenskaper advektas med strömningen, gör att lokalt måste instabilitet resultera i turbulens kontinuerligt för att turbulensen ska kunna upprätthållas, detta tills att ett steady state har uppnåtts och den initiära instabiliteten är inte längre nödvändig. För en strömning med shear, vilket ofta är fallet vid CAT, ger vind shearet en process som överför energi från den laminära strömningen till den turbulenta, dvs till turbulent kinetisk energi (TKE).<sup>15</sup>

### 2.1.3 Reynolds genomsnittsmetod

Turbulens är som tidigare nämnt slumpmässigt och de enskilda virvlarna kan inte förutsägas. Reynolds genomsnittsmetod är ett sätt att beskriva turbulensen med statistiska beräkningar och som gör det möjligt att modellera turbulens. Reynolds metod innebär att varje variabel, tex. potentiell temperatur  $\theta$  och vindkomponenter  $u, v, w$ , kan beskrivas som en summa av ett medelvärde och en perturbation. Detta skrivs enligt

$$\theta = \bar{\theta} + \theta'$$

där  $\theta$  är det momentana värdet,  $\bar{\theta}$  är medelvärdet och  $\theta'$  är perturbationen och den potentiella temperaturen har använts som exempel. Medelvärdet för en variabel förändras

14 Ellrod et al. 1992:150, Pal Ayrá 2001:142-143, Wallace et al. 2006:380, Woetmann Nielsen et al. 2012:6,9

15 Pal Ayrá 2001:144-146

långsamt medan perturbationen förändras snabbt. Per definition är

$$\bar{\theta}' = 0$$

Kovariansen mellan två variabler är medelvärdet av produkten för deras perturbationer, enligt

$$\overline{w'\theta'}$$

och denna är inte nödvändigtvis lika med noll. Kovariansen mellan olika variabler beskriver turbulent flux. Exemplet ovan, kovariansen mellan vertikalhastighet och potentiell temperatur beskriver vertikalt turbulent värmefflux.<sup>16</sup>

## 2.1.4 Turbulent kinetisk energi

Ett sätt att mäta turbulensens intensitet är att använda turbulent kinetisk energi, TKE. Ju högre värden som fås för denna desto kraftigare är turbulensen. Analogt med uttrycket för kinetisk energi i klassisk fysik uttrycks turbulent kinetisk energi på följande sätt

$$\overline{\text{TKE}} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

där TKE är turbulent kinetisk energi per massenhet. För en strömning utan turbulenta rörelser är värdet för TKE noll.<sup>17</sup> Produktion och förlust av TKE kan beskrivas med budgetekvationen<sup>18</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t} \overline{\text{TKE}} = -\bar{\vec{v}} \cdot \nabla \overline{\text{TKE}} - \overline{\vec{v}' \cdot \vec{v}' \cdot \nabla \vec{v}} + \frac{g}{\theta_v} \overline{\vec{v}' \theta'_v \cdot \vec{k}} - \nabla \cdot \left( \overline{\text{TKE}' + \frac{p'}{\rho}} \right) \bar{\vec{v}}' + \nu \bar{\vec{v}}' \cdot \nabla \bar{\vec{v}}' \quad (1)$$

där  $\bar{\vec{v}}' = \vec{v} - \bar{\vec{v}}$  och  $\nu$  är luftens kinematiska viskositet. (1) kan förenklat skrivas

$$\frac{\partial}{\partial t} \overline{\text{TKE}} = Ad + M + B + Tr - D$$

Termen på vänster sida beskriver förändringen av TKE lokalt. Den första termen till höger,  $Ad$ , beskriver advektionen av TKE med medelströmningen. Den andra termen  $M$  beskriver mekanisk produktion av TKE. Instabilitet i medelströmningen på grund av att det existerar ett vindshear överför energi från medelströmningen till turbulent energi. Termen är proportionell mot vindshear och är noll om inget vindshear finns.<sup>19</sup> I atmosfären utanför gränsskiktet är det denna mekanism som genererar turbulens.<sup>20</sup> Den tredje termen  $B$  är produktion eller förlust av TKE genom flytkraft. Denna kan vara både en källa eller en sänka för turbulent kinetisk energi beroende på de förhållande som råder. I en statisk instabil omgivning är kovariansen mellan vertikalhastighet och potentiell temperatur, dvs turbulent värmefflux, positiv och TKE genereras. Detta är en typisk situation som förekommer i det planetära gränsskiktet, då solinstrålning gör att undre luftlagret värms upp. Där CAT förekommer, dvs utanför det planetära gränsskiktet, är atmosfären oftast statisk stabil och termen blir negativ och minskar TKE<sup>21</sup> och omvandlas istället till potentiell energi.<sup>22</sup> Den fjärde termen  $Tr$  är transport av TKE av själva turbulensen. Denna

16 Holton 2004:118-119

17 Wallace et al. 2006:379

18 Woetmann Nielsen et al. 2012:5

19 Wallace et al. 2006:380, Holton 2004:120

20 Pal Ayra 2001:147

21 Holton 2004:120-121

22 Woetmann Nielsen et al. 2012:5

term och advektionstermen varken genererar eller ger upphov till förlust av TKE, utan dessa beskriver omfördelning av TKE. Den sista termen  $D$  beskriver dissipation av TKE och ger alltid en förlust av TKE. TKE omvandlas till inre energi hos molekyler och dissipationen sker för de allra minsta virvlarna. Dissipationen kan approximativt uttryckas som

$$\epsilon = \frac{TKE^{3/2}}{l_\epsilon}$$

där  $l_\epsilon$  är längdskalan för dissipation.<sup>23</sup>

Vid utvärdering av (1) ses att, då ett luftlager är statistiskt stabilt kan turbulens upprätthållas om den mekaniska produktionen av TKE är större än förlusterna från flytkraftstermen, och även dissipationen. De relativa betydelsen av dessa uttrycks med flux Richardson-talet,  $Ri_f$ , som är ration mellan  $-B$  och  $M$ . Vid instabila förhållanden är  $Ri$  negativt, dvs att  $B$  är positiv och turbulens förekommer på grund av konvektion. Vid statistiskt stabila förhållanden är  $B$  negativ; negativ flytkraft dämpar turbulens och denna genereras istället endast av vindshear.<sup>24</sup>

## 2.2 Clear Air Turbulence

Clear air turbulence (CAT) förekommer utanför gränsskiktet på mellan 3000 meters höjd och tropopausen. Precis som namnet antyder är det turbulens i områden som är molnfria eller möjligen med tunna cirrusmoln. Det finns ofta inget synligt tecken på turbulens, vilket gör fenomenet farligt för flygtrafiken. CAT kan utlösas av flera mekanismer. Den främsta orsaken är instabilitet på grund av vindshear, men också gravitationsvågor i samband med inertial instabilitet eller kraftig konvektion har utretts som orsaker till CAT.<sup>25</sup> CAT sker på sub-synoptisk skala, horisontellt från ca 100 km ner till 1 km.

CAT förekommer ofta i samband med jetströmmen, där starka vindshear utgör gynnsamma förhållanden för utvecklande av CAT från shear instabilitet.<sup>26</sup> Jetströmmar är smala band med starka västliga vindar i övre troposfären på ca 8-10 km höjd som uppkommer på grund av de temperaturskillnader som finns mellan ekvatorn och polerna. Smal betyder här att utbredningen på bredden är en storleksordning mindre än på längden. Strömmen är några hundra kilometer bred och sträcker sig runt jorden i stråk med meanderliknande mönster. Vindhastigheten är över  $30 \text{ m s}^{-1}$  och kan bli så kraftig som uppemot  $200 \text{ m s}^{-1}$ . På varje halvklot finns framför allt två jetströmmar, den subtropiska jetströmmen och polarfronstsjeten. I rapporten är det CAT i samband med polarfronstsjeten som studeras.<sup>27</sup>

Ett problem med turbulens och även CAT är att det sker ofta på en mindre skala än vad de numeriska modellerna kan upplösa, framför allt var det så i det betydligt grövre äldre numeriska modellerna. De första försöken att prognostisera CAT bestod i försök att hitta mönster i strömningar på synoptisk och mesoskalig nivå och identifiera i vilka regioner

---

23 Wallace et al. 2006:380

24 Holton 2004:121-122

25 Woetmann Nielsen et al. 2012:3

26 Ellrod et al. 1992:150-151

27 Bluestein 1993:238-240, 378

det kan utvecklas turbulens. I tidigare försök att prognostisera CAT numeriskt har bland annat horisontellt och vertikalt vindshear och tendensen för Richardson-talet använts. Fenomen som förekommer i samband med en övre frontzon, såsom horisontellt och vertikalt vindshear, deformationszoner och stor temperaturgradient, har visat sig vara gynnsamma för utvecklandet av CAT. Däremot är inte vindstyrkan i sig inte är betydande för förekomst av CAT, men turbulens förekommer ofta i samband med jeten, eftersom flera av de faktorer som nämndes ovan är närvarande i jetzonen. Även satellitbilder har använts för att identifiera områden med turbulens. Molnformationer eller skillnader i fuktighet kan indikera deformationszoner.<sup>28</sup>

## 2.2.1 Tidigare CAT-index

Flera försök att ta fram index för att lokalisera områden med risk för CAT har gjorts. Ett av de mest etablerade<sup>29</sup> är det som presenteras av Ellrod och Knapp (1992). De presenterar en metod för att prognostisera CAT som bygger på produkten av två kinematiska termer, vertikalt vindshear  $S$ , vilket definierades ovan, och horisontell deformation  $DEF$ , där  $DEF$  är en summa av sträckningsdeformationen  $DST$  och sheardeformationen  $DSH$ , enligt

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

där

$$DST = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{och} \quad DSH = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} .$$

$S$  och  $DEF$  har också tidigare har föreslagits vara indikatorer för CAT. Anledningen till att det är dessa parametrar som används är att det i tidigare studier som gjorts visat att överensstämmelsen mellan  $S \cdot DEF$  och CAT visat sig vara högre än för till exempel  $S$  ensamt.

Ellrod och Knapp introducerar ett index Turbulence index,  $TI$ ,

$$TI1 = S \cdot DEF$$

och

$$TI2 = S \cdot (DEF - DIV)$$

där skillnaden dem emellan är att divergensen  $DIV = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$  finns med i  $TI2$ . Båda indexen har dimensionen  $s^{-2}$ . Indexet innehåller termer för både vertikalt och horisontell vindshear.

Bakgrunden till indexet är frontogenesfunktionen<sup>30</sup>

$$F = \frac{D}{Dt} |\nabla_p \theta_v| \quad (2)$$

där  $\nabla_p \theta_v$  är gradienten av den virtuella potentiella temperaturen längs en tryckyta. (2) beskriver förändringen av temperaturgradienten längs en tryckyta för en luftpartikel. Då temperaturgradienten blir starkare, ger detta ett positivt värde för  $F$  och indikerar

28 Ellrod et al. 1992:150-151

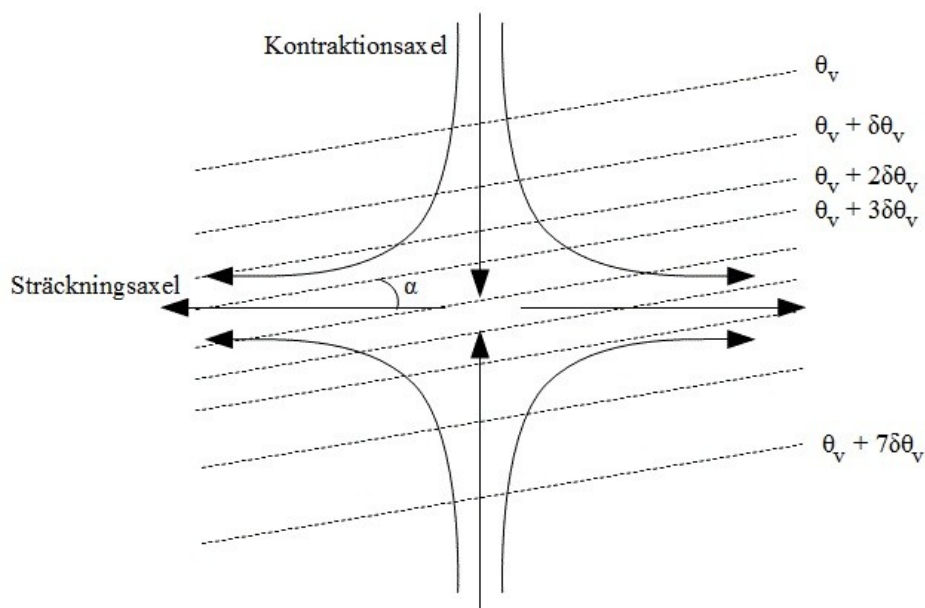
29 Woetmann Nielsen et al. 2012:7

30 Ellrod et al. 1992 151-152

frontogenes; den motsatta situationen indikerar frontolys.<sup>31</sup> (2) kan sedan skrivas om genom att koordinatsystemet roteras så att DSH=0 och  $x$ -axeln sammanfaller med sträcknings- eller kontraktionsaxeln. Då är  $DST > 0$  respektive  $DST < 0$ . Detta ger

$$F = \frac{1}{2} |\nabla_p \theta_v| (DEF \cdot \cos 2\alpha - DIV)$$

där  $\alpha$  är vinkeln mellan isothermerna för virtuell potentiell temperatur och  $x$ -axeln, se figur 2. Detta uttryck för  $F$  kan ytterligare skrivas om. Genom att använda termalvindsekvationen, som uttrycker skillnaden i vind för mellan två tryckkytor, vilket kan relateras till temperaturen, och anta optimala förhållanden för frontogenes, dvs.  $\cos 2\alpha = |1|$ , fås uttrycket för TI2. Antagandet att divergensen är mycket mindre än deformationen leder till uttrycket för TI1.<sup>32</sup>



**Figur 2** Situation då  $F > 0$  (frontogenes); temperaturgradienten förstärks på grund av deformationen.

Kopplingen mellan CAT och starkt vertikalt vindshear gör att ett CAT-index måste kunna identifiera sådana regioner. Detta förekommer i övre troposfären i samband med jetströmmen. I zoner med frontogenes kan också ett starkt vindshear skapas.<sup>33</sup> Deformationens förbindelse med CAT är att då temperaturgradienten blir större förstärks det vertikala vindshearet genom termalvindsekvationen. Detta leder till ett lägre  $Ri$  och sannolikheten för KH instabilitet ökar.<sup>34</sup> Ett problem med TI-indexet som föreslås av Ellrod och Knapp, är att det inte gör någon skillnad på om vindshearet ökar eller minskar med tiden, vilket kan leda till att för stora riskområden indikeras.<sup>35</sup>

31 Bluestein 1993:248, Woetmann Nielsen et al. 2012:7

32 Ellrod et al. 1992:152, Woetmann Nielsen et al. 2012:7, Bluestein 1993:248-253

33 Woetmann Nielsen et al. 2012:7

34 Knox 1997:1252

35 Woetmann Nielsen et al. 2012:7

## 2.2.2 CAT-index i DMI-HIRLAM

På DMI har nyligen framlagts en rapport<sup>36</sup> där två index, TI3 och TI4, föreslås i försök att förbättra prognostiseringen av CAT. Att två olika index används beror på att de indikerar förhöjd risk för utveckling av CAT utifrån olika instabilitetsmekanismer. Regioner som pekats ut av respektive index som riskområden sammanfaller därför sällan. TI3 är en vidareutveckling av det index, TI, som genomgicks ovan och TI4 indikerar områden med risk för CAT där deformationen är liten och det finns risk för att flödet är obalanserat. CAT förekommer på en mindre skala än synoptiska strömningar, vilket gör att indexen pekar ut områden inom vilka det finns en förhöjd risk för CAT och CAT behöver inte förekomma inom hela det område som indexet markerar. Båda indexen är diagnostiska och beräknas utifrån de parametrar som prognostiseras av modellen. Indexen är utformade för att indikera risk för CAT i samband med jetströmmen och inte den turbulens som kan förekomma i samband med kraftig konvektion eller gravitationsvågor som kan uppstå på grund av orografi.<sup>37</sup>

### 2.2.2.1 TI3

Ett av de nya index som föreslås är TI3, som är en vidareutveckling av TI2. Då  $N^2 \geq 0$ :

$$TI3 = \frac{TI2}{N_0^2} \left( 1 - \left( 1 + \frac{N_*^2}{N^2} \right)^{-\beta} \right) = \frac{TI2}{N_0^2} \left( \frac{\chi}{1 + \chi} \right)^\beta$$

där  $\chi = Ri_c/Ri$ ,  $Ri_c = 0.25$ ,  $N_*^2 = Ri_c \cdot S^2$ ,  $N_0^2 = 10^{-7} \text{ s}^{-2}$  och  $\beta$  är en konstant.

Användningen av  $N_0^2$  gör att indexet blir dimensionslöst. Det innebär vidare att  $TI3 = 1$  för ett luftlager som är neutralt stratifierat då S och DEF antar typiska värden för flöde på synoptisk skala på mellanbreddgrader,  $S = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  och  $DEF = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Konstanten väljs till  $\beta = 1$ , eftersom det ger samma stabilitetsberoende som i en studie nyligen uppmätts för den turbulenta utbyteskoefficienten i övre troposfären.

TI3 pekar i likhet med TI2 på regioner där CAT härstammar från shear instabilitet. Till TI2 har Brunt-Väisälä-frekvensen införts som parameter och därmed ett beroende av den statiska stabiliteten. Som exempel ges; ett flöde med konstant shear, för vilket stabiliteten ökar med tiden, kommer  $Ri$  också att öka. Om  $Ri$  ökar, minskar vertikalt flux av rörelsemängd,  $\overline{u'w'}$  och  $\overline{v'w'}$ . Dessa termer ingår i budgetekvationen för TKE, (1), i den tredje termen, och produktionen av TKE minskar. I förbindelse med jetströmmen, där CAT ofta förekommer, är luften i regel stabilt stratifierad och här är vindshear stort, både horisontellt och vertikalt. TI3 kan indikera dessa regioner, var det är troligt att CAT utvecklas på grund av shear instabilitet.<sup>38</sup>

### 2.2.2.2 TI4

Vid tillfällen då deformationen är liten blir värdet på TI3 litet. Men vid dessa tillfällen kan det också förekomma vindshear och CAT kan utvecklas. Det behövs därför ett index som kan diagnostisera CAT vid dessa speciella tillfällen. TI4 indikerar områden där turbulens kan förekomma på grund av direkt shear instabilitet vid starkt vertikalt vindshear eller

36 Woetmann Nielsen et al. 2012

37 Woetmann Nielsen et al. 2012:3-4

38 Woetmann Nielsen et al. 2012:8-9

indirekt shear instabilitet då vindshearet förändras av gravitationsvågor från inertial instabilitet. Detta sker främst på den anticyklonala shearsidan av jetströmmen. Turbulensen här kan förekomma tillsammans med molntäcke och kallas istället för cloudy air turbulence (CAT).

Deformationen kan uttryckas som

$$DEF^2 = \zeta^2 + DIV^2 - 4J(u, v)$$

där  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  är den relativa vorticiteten och  $J(u, v) = \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial y} \cdot \frac{\partial u}{\partial x}$  är jacobianen.

I en strömning som uppfyller gradientvindbalans, dvs balans mellan tryckgradientkraften, Corioliskraften och centrifugalkraften, gäller

$$\zeta = \zeta_c + \zeta_s = \frac{V}{R} - \frac{\partial V}{\partial n}$$

där  $\zeta_c$  är krökningsvorticitet,  $\zeta_s$  är vorticitet på grund av shear, vilka kan uttryckas i naturliga koordinater enligt ovan, där  $R$  är radien för stömlinjernas krökning och  $n$  är en normalvektor riktad till vänster om flödet och  $V$  är vindfarten. Deformationen kan nu uttryckas som

$$DEF^2 = (\zeta_s - \zeta_c)^2 + DIV^2$$

där jacobianen är  $J(u, v) = \zeta_s \zeta_c$ .<sup>39</sup> För strömning på synoptisk skala är DIV i regel mycket mindre än DEF och följande approximation kan göras

$$DEF \approx |\zeta_s - \zeta_c|$$

När  $\zeta_s \approx \zeta_c$  resulterar det i att DEF blir liten. Vid sådana tillfällen kommer värdet på TI3 också att bli litet, även om vindshearet är stort. Det behövs därför ett index för tillfällen då deformationen är liten.

Woetmann Nielsen och Petersen (2012) visar genom att utvärdera vertikalt vindshear då  $\zeta_s \approx \zeta_c$  att, för en anticyklonal krökt strömning blir det vertikala vindshearet för gradientvinden som störst då den absoluta vorticiteten,  $\eta = \zeta + f$ , närmar sig noll. Ett starkt vertikalt shear kan genom shear instabilitet ge upphov till CAT, då i en region med liten deformation.

Det index som föreslås är

$$TI4 = \frac{\zeta^2}{\epsilon^2} \left( 1 - \left( 1 + \frac{N_*^2}{N^2} \right)^{-\beta} \right) = \frac{\zeta^2}{\epsilon^2} \left( \frac{\chi}{1 + \chi} \right)^\beta$$

där  $\zeta$  är den relativa vorticiteten och  $\epsilon = \eta + |\zeta_c - \zeta_s|$ . Detta gäller då  $N^2 \geq 0$  och när  $N^2 \leq 0$  är  $TI4 = 0$ . Att stabilitetsparametern antas vara densamma för TI4 som för TI3 är inte vetenskapligt belagt. Men en lägre stabilitet innebär att till exempel större amplitud för gravitationsvågor och därför också högre värden för TI4.

Det visas vidare att den faktor som skiljer TI4 från TI3,  $\zeta^2/\epsilon^2$ , alltid är större på den

<sup>39</sup> Woetmann Nielsen et al. 2012:9, Knox 1997:1252

anticyklonala shearsidan av jetströmmen än på den cyklonala shearsidan och att det blir stor när  $\eta \approx 0$ . Då  $\eta$  är kring noll och positiv kan CAT utvecklas på grund av vindshear i både horisontell och vertikal riktning. Då  $\eta$  är nära noll och negativ är strömningen inertialt instabil och gravitationsvågor kan framkallas av det obalanserade flödet. Dessa vågor kan förändra vindshearet och utlösa KH instabilitet, vilket i sin tur kan utlösa CAT.<sup>40</sup>

Indexet modifieras något, eftersom TI4 annars blir oändligt stort då  $\epsilon = 0$  och för att förändra när indexet når sitt maximala värde. Det förändrade indexet blir då

$$TI4_m = \frac{\zeta^2}{(\zeta_0 - \zeta)^2 + \zeta_*^2} \left( \frac{\chi}{1 + \chi} \right)^\beta$$

där  $\zeta_* = cf$ ,  $c$  väljs till 0,1 så att  $\zeta_*$  motsvarar ett typiskt värde för relativ vorticitet på synoptisk skala, och  $\zeta_0 = -f - \sqrt{DEF^2 - DIV^2} \leq -f$  är värdet för den relativa vorticiteten då  $\epsilon = 0$ . Det är den modifierade versionen av TI4 som beräknas. I fortsättningen i rapporten kommer denna att benämnas TI4.

## 2.3 HIRLAM

På DMI används den numeriska modellen HIRLAM (High Resolution Limited Area Model), som är en modell av rutnätstyp. Precis som för andra numeriska prognosmodeller används de primitiva ekvationerna, dvs rörelseekvationerna, kontinuitetsekvationen, termodynamikens första huvudsats och ideala gaslagen, för att beräkna atmosfärens tillstånd framåt i tiden. I HIRLAM antas hydrostatisk balans. Modellen använder en semi-Lagrangsk integreringsmetod; varje punkt i rutnätet blir slutpunkten för ett luftpaket och dess bana kan följas bakåt i tiden. Systemet av ekvationer löses numeriskt och för att behålla stabiliteten i beräkningarna kan inte för stora tidssteg användas. Beräkningar av numeriska prognosmodeller kräver därför mycket datorkapacitet. En viktig aspekt för en korrekt prognos är korrekta initial- och randvärden. DMI-HIRLAM får sina randvärden från ECMWFs modell. För att ge modellen så bra initialvärden som möjligt används dataassimilering, där både observationer och värden från den tidigare prognosen vägs in för att få den bästa beskrivningen av verkligheten. Avståndet mellan varje beräkningspunkt i rutnätet i modellen bestämmer modellens upplösning. En högre upplösning kräver fler beräkningar och täcker därför oftast ett mindre område än en modell med grövre upplösning. Fysiska processer som sker på en mindre skala än modellen kan upplösa parametreras. Dessa processer förenklas och representeras i en gridruta av parametrar. Detta gäller till exempel konvektion, molnbildning och även turbulens.<sup>41</sup>

De två CAT-indexen ska undersökas i de två DMI-HIRLAM-modellerna T15 och SKA. Figur 3 visar de områdena som de olika modellerna täcker. K05 är DMIs modell över Grönland, vilken inte kommer att användas i denna studie. De två modellerna som TI3 och TI4 testas i är T15 och SKA. T15 täcker ett större område än SKA och har grövre upplösning. T15 har en horisontell upplösning på 16 km mellan gridpunkterna, vilket motsvarar 0,15°. T15 har 40 vertikala nivåer. SKA har en horisontell upplösning på 3 km (0,03°) och 65 vertikala nivåer. För båda modellerna gäller att de vertikala nivåerna inte är jämt fördelade genom atmosfären, utan antal nivåer är flest närmst jordytan. Nivåerna följer topografien. Tidssteget mellan varje beräkning är 90 s för SKA och 400s för T15.<sup>42</sup>

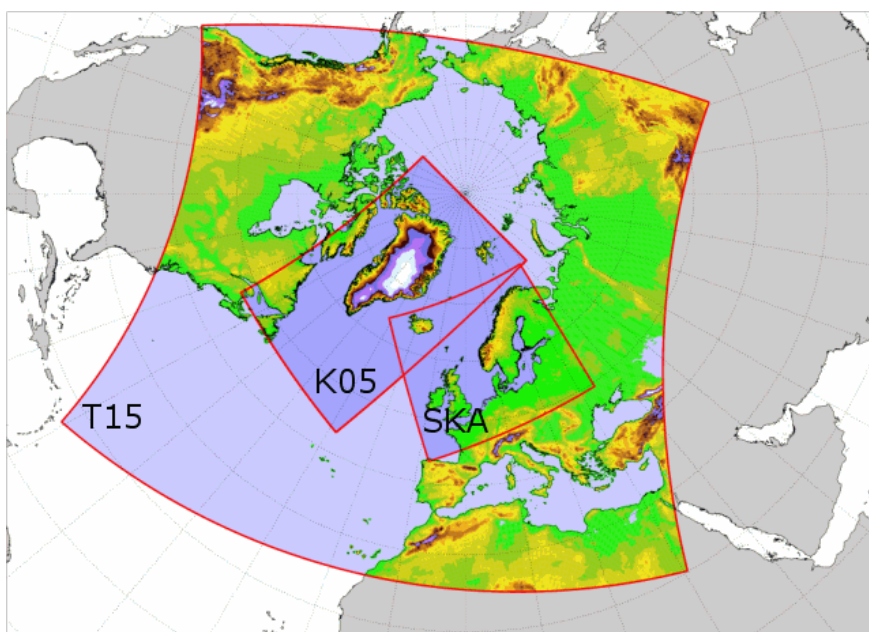
40 Woetmann Nielsen et al. 2012:9-13,16

41 Holton 2004:459-460, <http://www.dmi.dk/dmi/index/viden/dmi-hirlam.htm>, [http://hirlam.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=64&Itemid=101](http://hirlam.org/index.php?option=com_content&view=article&id=64&Itemid=101)

42 <http://www.dmi.dk/dmi/index/viden/dmi-hirlam.htm>



CAT-index har inte tidigare beräknats i DMI-HIRLAM. Just nu beräknas de i modellerna i syfte att testa indexen. Indexen är diagnostiska och beräknas med de variabler som modellen har prognostiserat.



Figur 3<sup>43</sup> Områden som de olika modellerna täcker.

### 2.3.1 TKE i DMI-HIRLAM

T13 och T14 kommer att jämföras med HIRLAMs prognos av TKE. Det är då av betydelse att förstå hur TKE beräknas i modellen. TKE är en parameter som inte observeras, utan beräknas endast i modellen. För det används budgetekvationen men vissa antaganden och förenklingar görs. Turbulent kinetisk energi parametreras i HIRLAM. Turbulensen antas vara homogen horisontellt för en gridvolym. Det gör att (1) reduceras till (jämför avsnitt 2.1.4)

$$\frac{\partial}{\partial t} TKE = - \left( \overline{u'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \overline{v'w'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) + \frac{g}{\theta_v} \overline{\bar{v}'\theta_v'} \cdot \vec{k} - \left( \frac{\partial}{\partial z} TKE \overline{w'} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} \overline{p'w'} \right) + \nu \left( \overline{u' \frac{\partial^2 u'}{\partial z^2}} + \overline{v' \frac{\partial^2 v'}{\partial z^2}} + \overline{w' \frac{\partial^2 w'}{\partial z^2}} \right) \quad (3)$$

där alla termer med horisontella gradienter har antagits vara noll. Även termen  $-\overline{w'w'} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}$  antas vara liten och stryks. Termerna parametreras sedan enligt

$$- \left( \overline{u'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \overline{v'w'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \approx K_m \left( \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (4)$$

$$\frac{g}{\theta_v} \overline{\bar{v}'\theta_v'} \cdot \vec{k} = \frac{g}{\theta_v} \overline{w'\theta_v'} \approx - \frac{g}{\theta_v} K_h \frac{\partial \theta_v}{\partial z} \quad (5)$$

43 <http://www.dmi.dk/dmi/index/viden/dmi-hirlam.htm>

$$-\left(\frac{\partial}{\partial z} \overline{TKE w'} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} \overline{p' w'}\right) \approx \frac{\partial}{\partial z} \left(2 K_m \frac{\partial \overline{TKE}}{\partial z}\right) \quad (6)$$

$$v \left( \overline{u' \frac{\partial^2 u'}{\partial z^2}} + \overline{v' \frac{\partial^2 v'}{\partial z^2}} + \overline{w' \frac{\partial^2 w'}{\partial z^2}} \right) \approx -K_\epsilon \frac{\overline{TKE}}{l_\epsilon^2} \quad (7)$$

där  $K_m = l_m \sqrt{\overline{TKE}}$ ,  $K_h = l_h \sqrt{\overline{TKE}}$  och  $K_\epsilon = l_\epsilon \sqrt{\overline{TKE}}$ .  $l_{m,n,\epsilon}$  är den diagnostiska längdskalan för turbulensen och dessa beror på TKE och stabiliteten. Då  $K_\epsilon$  insätts i uttrycket för dissipationen, fås det uttryck som angavs i avsnitt 2.1.4.

Vid parametreringen används den så kallade K-teorin, där det antas att beteendet hos turbulenta virvlar kan jämföras med molekylär diffusion och kovariansen (fluxet) kan uttryckas som produkten mellan en koefficient  $K$  och gradienten av medelströmningen.  $K$  bestäms inte som den molekylära viskositetskoefficienten av fluidens egenskaper, utan av strömningens egenskaper, vilket gör att  $K$  måste bestämmas för varje enskilt flöde.<sup>44</sup>

Då en modellkörning startar är alltid  $TKE=0$ . Spin-up-tekniken används, vilket innebär att de parametrar som ingår i den parametriserade budgetekvationen kommer att prognostiseras av modellen och från dessa beräknas TKE. Eftersom det inte finns några observationer för TKE är det inte möjligt att hitta ett bra initialvärde.

---

44 Holton 2004:125, Woetmann Nielsen 2005

### 3 Metod

I denna studie undersöks sambandet mellan turbulent kinetisk energi och indexen för CAT, TI3 och TI4. För detta väljs tre tillfällen ut och studeras. För dessa tre tillfällen undersöks också hur indexen beror på vertikal och horisontell upplösning i prognosmodellen. På DMI har TI3 och TI4 beräknats och sparats för februari 2012 i de två modellerna HIRLAM-T15 och HIRLAM-SKA. Från dessa tillfällen väljs tre tillfällen ut för att studeras närmare. För att kunna jämföra de två modellerna begränsas urvalet till det område som täcks av SKA, se figur 2.

Materialet som presenteras har gjorts i Metgraf, en program utvecklat innanför HIRLAM-projektet för att kunna presentera meteorologiska data visuellt. Både horisontella kartor och tvärsnitt över atmosfären har använts för att få en helhetsbild över situationen. Med avseende på jämförelsen är tvärsnitten placerade längs med samma längd-/breddgrad för respektive situation där utgångspunkten som används är placeringen av maximala värdet för indexen i T15.

Av de tre tillfällen som väljs för studien är ett av de tre fallen som studeras ett tillfälle då TI3 menar att det är kraftig turbulens. Som jämförelse till detta väljs ett tillfälle med moderat turbulens för att kunna jämföra fördelningen av TKE i de olika fallen. TI3 har generellt en större utbredning än TI4, då TI4 främst reglerar på obalanserade strömningar, vilket är ovanligare. Ett tillfälle med höga värden för TI4 har valts ut och undersöks, vilket också är ett tillfälle med höga värden för TI3.

Vid urvalet av tillfällen med höga värden av TI3 tas utgångspunkt i dess värden i modellnivå 15 i T15. Modellnivå 15 motsvarar en höjd på ca 7,5 km. Nivån är vald för att vara representativ för var CAT brukar förekomma och vara som kraftigast. Då indexet studeras i SKA görs det med modellnivå 20 som utgångspunkt, detta eftersom modellerna har olika vertikal upplösning. Vid urvalet av tillfälle med höga värden av TI4 är utgångspunkten istället modellnivå 12 i T15, vilket motsvarar en höjd på ca 9,5 km motsvarande ungefär nivå 14 i SKA. Då höga värden av TI4 generellt är placerat högre<sup>45</sup>.

Då TKE vid modellkörningens start är lika med noll, används 6 h-prognoser i studien, annars kan inte jämförelsen mellan TI3/TI4 och TKE göras. Modellens placering av TI3/TI4 studeras och jämförs med modellens placering av TKE.

För undersökningen av CAT-indexen i modeller med olika upplösning väljs samma tillfällen som för jämförelsen med TKE. Här fokuseras det på hur indexet ser ut och deras placering i de olika modellerna.

För en ytterligare jämförelse, och som ett försök att verifiera indexen, används Nordic Significant Weather Chart (NSWC), utfärdat av SMHI-Arlanda. De områden där CAT indikeras på NSWC-kartorna baseras på information från WAFC London. På SIGWX-kartor från WAFC London ritas CAT-områden in för hand av meteorologen, som använder både egen erfarenhet och modelldata. Vid WAFC används just nu Dutton index, även kallat Empirical index:

$$E = 1,25 S_H + 0,25 S^2 + 10,5$$

---

45 Se Woetmann Nielsen et al 2012:Fig. 4

där  $S$  ( $\text{m s}^{-1}$  per km) som tidigare är vertikalt vindshear och  $S_H$  ( $\text{m s}^{-1}$  per 100 km) är horisontellt vindshear enligt

$$S_H = \frac{1}{(u^2 + v^2)^{1/2}} \left( uv \frac{\partial u}{\partial x} - u^2 \frac{\partial u}{\partial y} + v^2 \frac{\partial v}{\partial x} - uv \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

Indexet är som namnet antyder empiriskt framtaget genom att göra bästa anpassningen till ett stort antal pilotrapporter om CAT. Snart kommer istället TI2 att börja användas på WAFC London.<sup>46</sup> Jämförelsen med NSWC kan tyvärr inte göras tillfredsställande för situationen den 23 februari, då NSWC-kartans område inte är tillräckligt långt västerut. Istället används ett utsnitt av SIGWX för Europa, utfärdat av WAFC London.

---

46 Sharman et al. 2006:284, Macgregor 2012

## 4 Resultat

I flera av figurerna som visas här under Resultat ses höga värden av CAT-indexen och TKE i det planetära gränsskiktet. Detta är inte alls oväntat, då turbulenta processer alltid är närvarande i gränsskiktet. Dessa värden kommer att bortses ifrån, då de inte är relevanta för denna undersökning.

Flera av figurerna redovisas inte här nedan, utan återfinns i Bilaga. De har ansetts vara mindre relevanta. Detta kan bero på att det inte finns några höga värden av till exempel TKE vid den valda tidpunkten.

I några tvärsnitt står det något annat än SKA ovanför bilden, detta stämmer inte utan det är informationen i figurtexten som är korrekt.

### 4.1 Samband mellan CAT-index och TKE

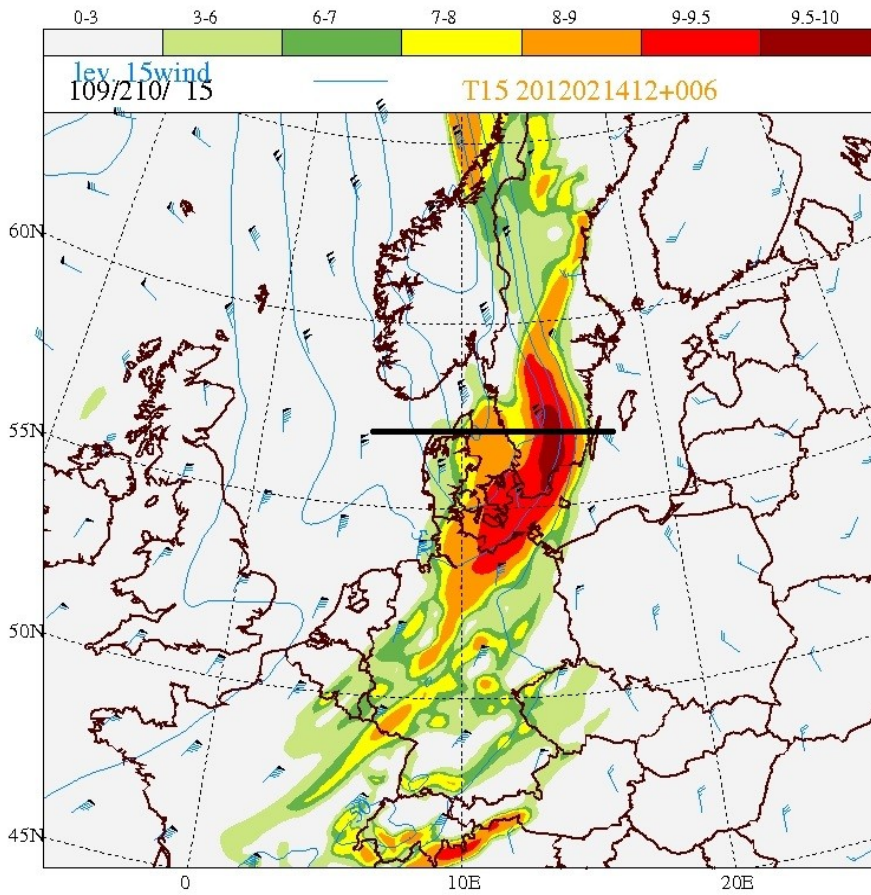
#### 4.1.1 14 februari 2012 12UTC+06H

Vid denna tidpunkt blåser en mycket kraftig, meridionalt orienterad jetström och jetaxeln är placerad över Norge och Danmark, se figur 10. Skandinavien befinner sig mellan en kraftig rygg och ett tråg i höjden och väst om brittiska öarna finns en sluten högtryckscirkulation.

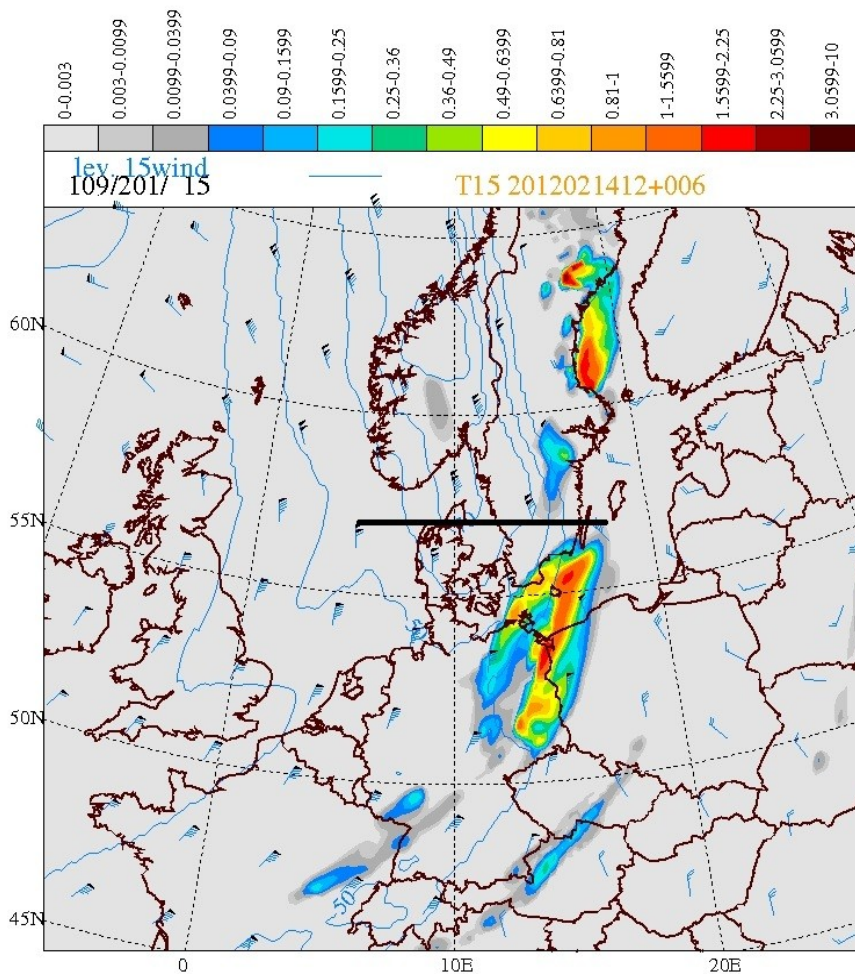
Figur 4 visar beräkningen av TI3 i T15 och figur 6 visar tillhörande tvärsnitt. Figur 5 visar beräkningen av TKE och i figur 7 ses tvärsnitt för TKE, med samma placering som i figur 6. TI3 i SKA och tillhörande tvärsnitt ses i figur 8 och 9.

Vid en närmare granskning av kartorna görs följande observationer: Modellens placering av TI3, dvs CAT, och TKE skiljer sig åt. CAT markeras över ett större sammanhängande område än TKE. Placeringen av TKE och CAT är båda på den cyklonala shearsidan av jetströmmen men de högsta värdena för respektive parameter återfinns inte på samma ställe. Området med TKE ligger söder om CAT. För området med intensivast CAT ses inte några höga värden av TKE i motsvarande område. När tvärsnitten granskas ses att CAT och TKE ligger på olika höjd, både generellt och när det gäller maximala värden. Vid detta tillfälle finns få områden med förhöjda värden för TI4. Kartan för TI4 kan ses i Bilaga. För de områden med högre värden av TI4 syns inga högre värden för TKE.

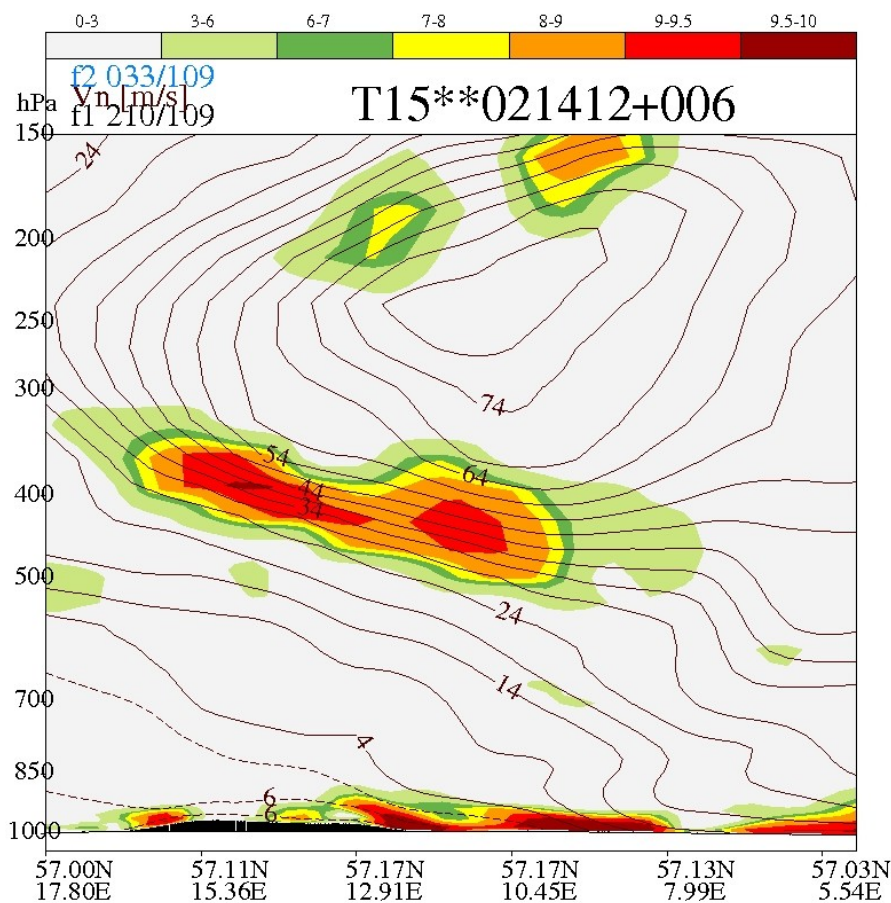
Vid jämförelse med NSWC (figur 10), giltig för det aktuella tillfället, konstateras att riskområde för CAT markerat på NSWC är samma område där TI3 återfinns. Området på NSWC är större än det som TI3 indikerar. Detta kan bero på att TI3 innehåller till skillnad från Dutton index en stabilitetsterm. Denna gör riskområdena mindre eftersom det tas hänsyn till om stabiliteten ökar eller minskar. Markeringen på NSWC varnar för moderat-allvarlig CAT, vilken överensstämmer med TI3:s höga värden. Höjdangivelsen för CAT-området som anges på NSWC är uppskattningsvis vid samma höjd som TI3 varnar för CAT. Då tvärsnittet i figur 6 (även figur 9) har tryck som höjdskala och det på NSWC anges i fot är det svårt att göra en exakt jämförelse.



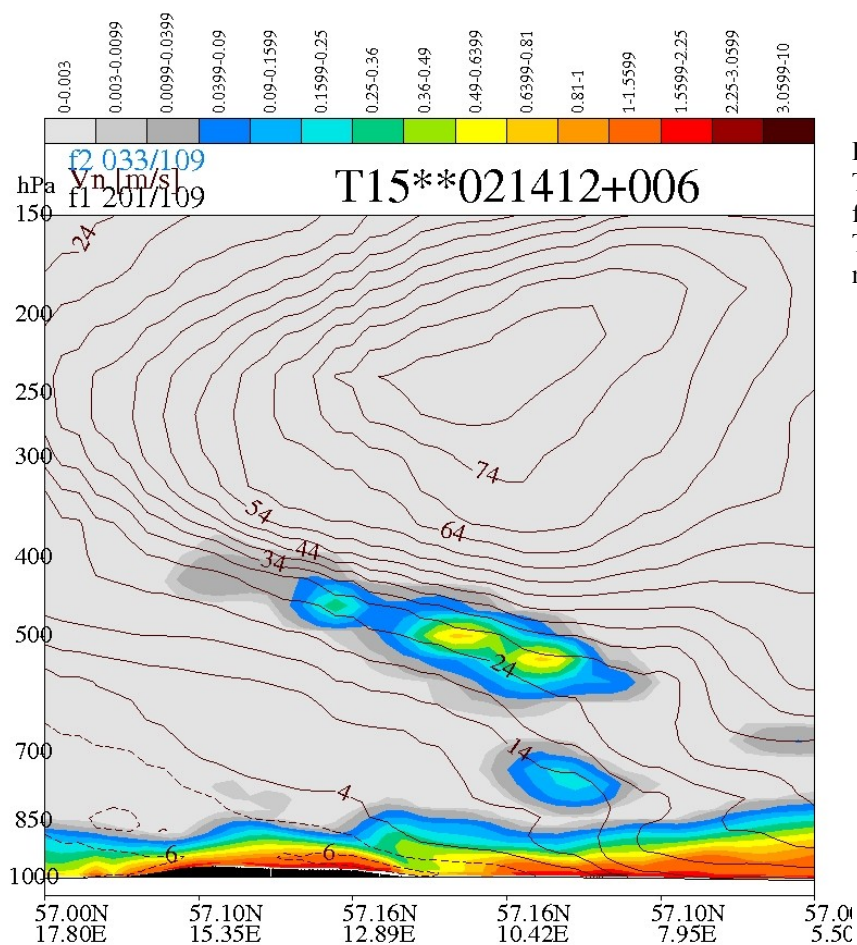
**Figur 4**  
T13 i T15 modellnivå  
15, 14 februari 2012  
12UTC+06H.



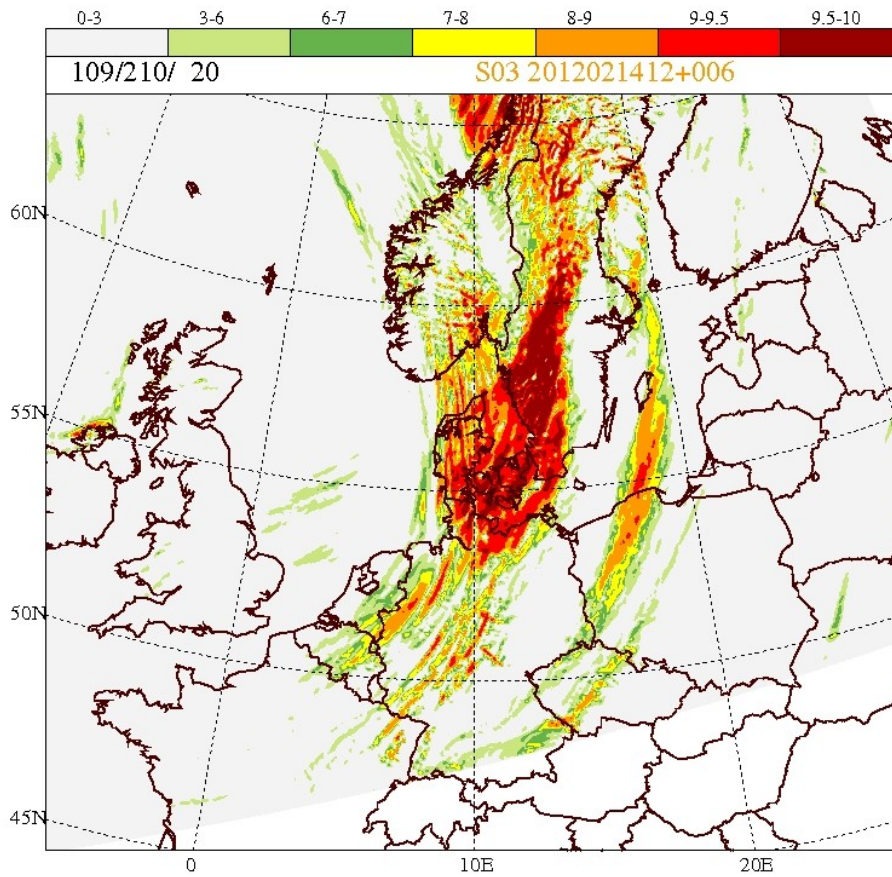
**Figur 5**  
TKE i T15 modellnivå  
15, 14 februari 2012  
12UTC+06H.



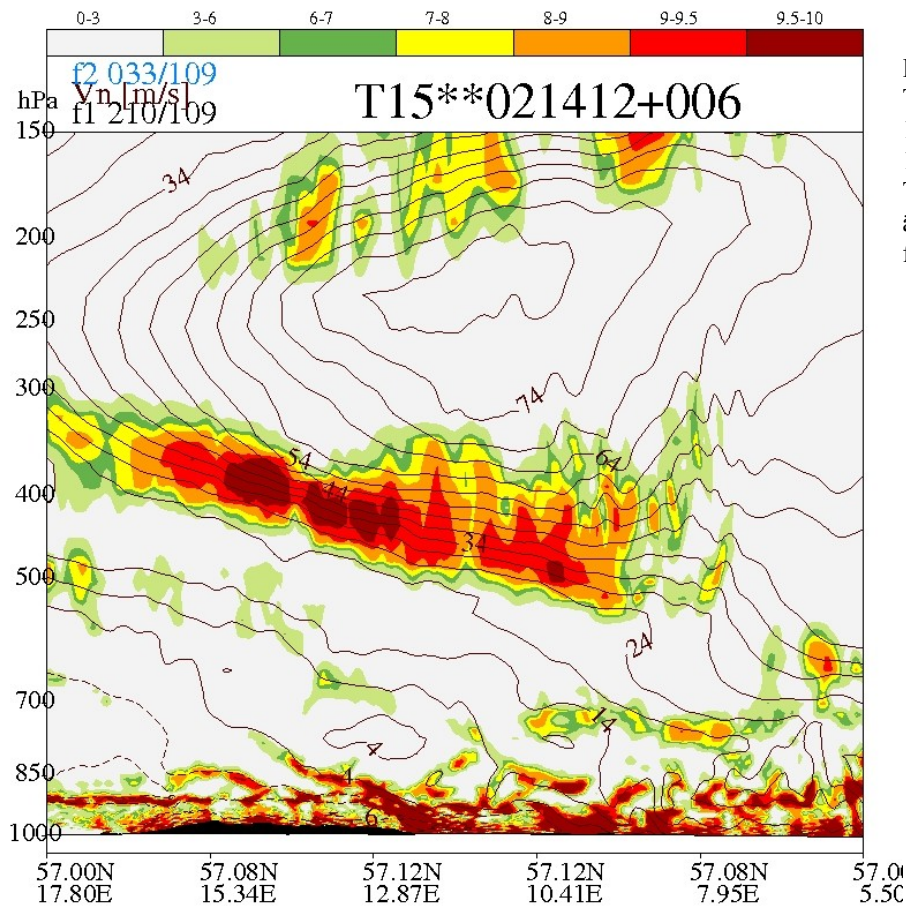
**Figur 6**  
Tvärsnitt TI3 i T15, 14 februari 2012 12UTC+06H. Tvärsnittets placering är markerat i figur 4.



**Figur 7**  
Tvärsnitt TKE i T15, 14 februari 2012 12UTC+06H. Tvärsnittets placering är markerat i figur 5.



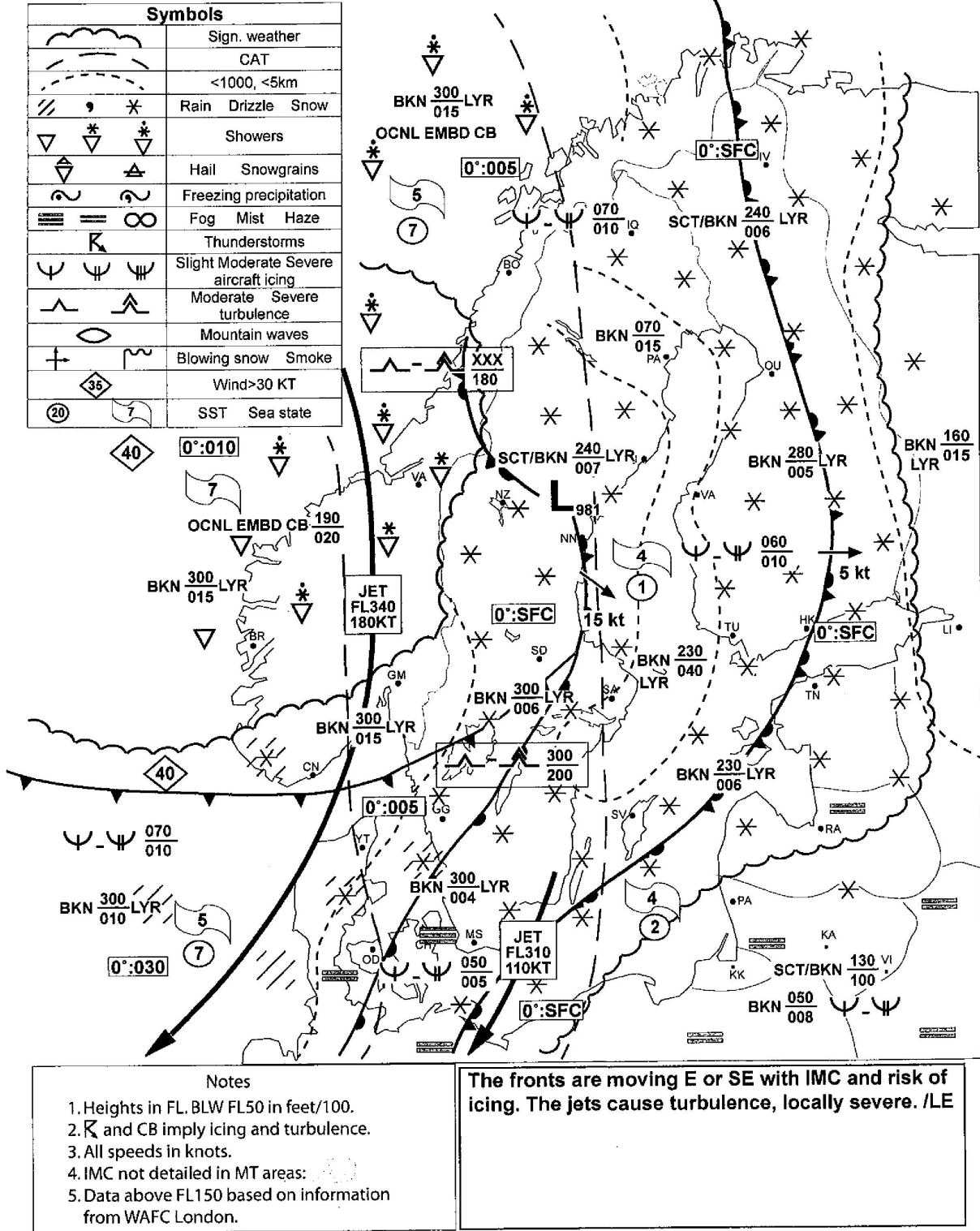
**Figur 8**  
 TI3 i SKA  
 modellnivå 20, 14  
 februari 2012 12  
 UTC+06H.



**Figur 9**  
 Tvärsnitt TI3 i SKA,  
 14 februari 2012  
 12UTC+06H.  
 Tvärsnittets placering  
 är detsamma som för  
 figur 6 och 7.



# SMHI SIGWX CHART VALID 18 UTC 2012-02-14 SFC-FL400 ISSUED BY MET OFFICE ESSA



Figur 10 NSWC utfärdad av SMHI-Arlanda, giltig 14 februari 2012 18UTC.

© SMHI

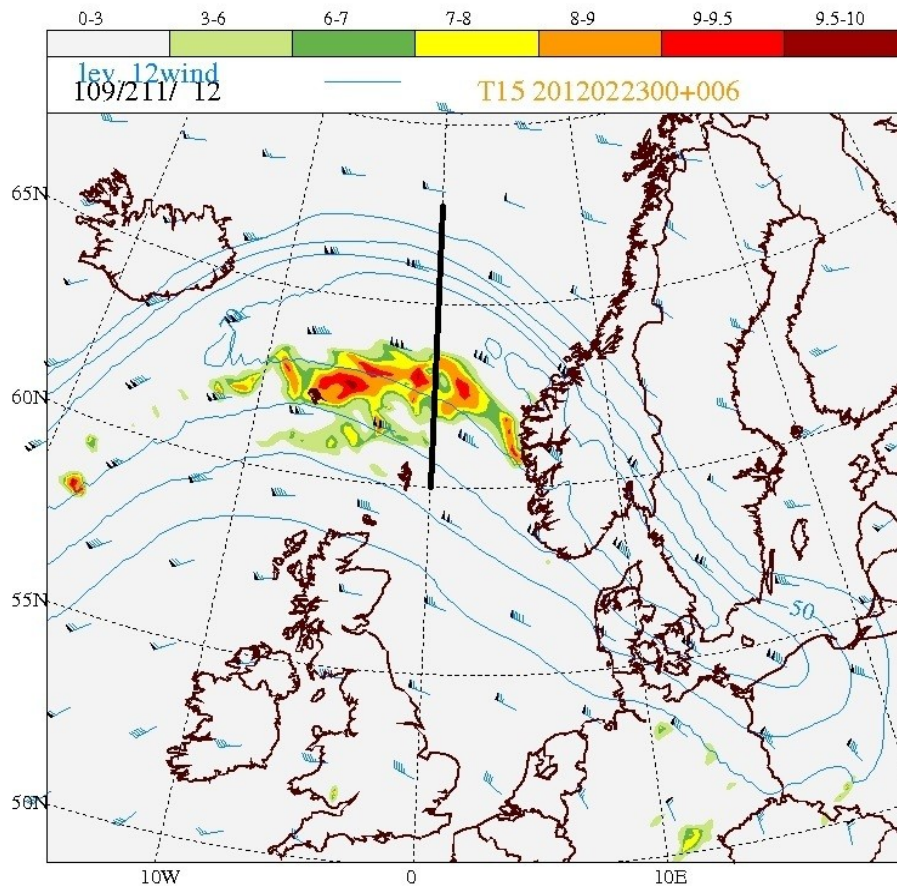
#### 4.1.2 23 februari 2012 00UTC+06H

Vid denna tidpunkt finns en rygg i höjden över Atlanten norr om Brittiska öarna. Det ger jetströmmen en anticyklonal krökning vid samma ställe.

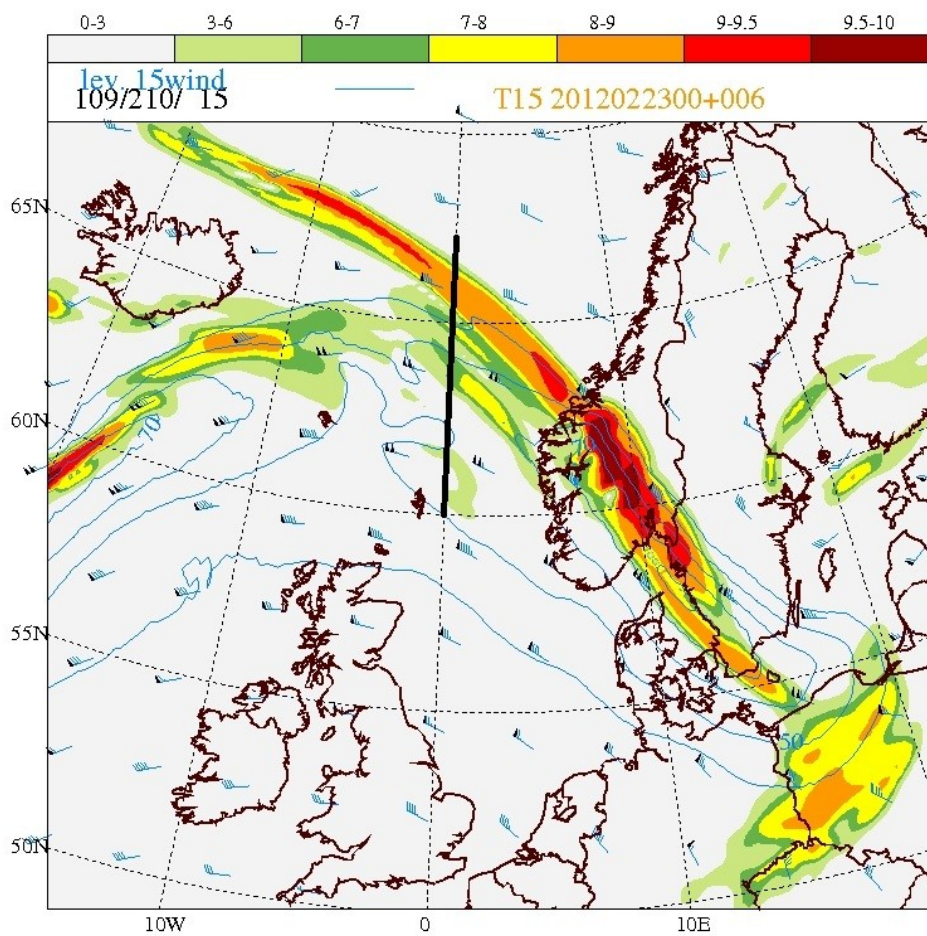
Figur 11 och 12 visar beräkningen av TI4 respektive TI3 i T15 och figur 14 och 15 visar tillhörande tvärsnitt. Figur 13 visar beräkningen av TKE och i figur 16 ses tvärsnitt för TKE, med samma placering som i figur 14 och 15. TI4 i SKA och tillhörande tvärsnitt ses i figur 17 och 18. TI3 och tvärsnitt i SKA hittas i Bilaga. Även TKE i modellnivå 12 kan hittas i Bilaga.

Detta är ett tillfälle då TI4 visar högre värden i ett område och det finns risk för CAT som utvecklats när deformationen är liten. Även TI3 visar höga värden vid detta tillfälle, men placeringen är lägre än för TI4 och längre norrut. Situationen visar tydligt att överlappet mellan TI4 och TI3 är litet, vilket kan ses genom att jämföra dels figur 11 och 12, men även genom att se på de kartor som visar TI3 i modellnivå 12 och TI4 i modellnivå 15, vilka hittas i Bilaga. Vid detta tillfälle verkar sambandet mellan CAT och TKE mindre än i det förra fallet. Framför allt mellan TI4 och TKE verkar det inte finnas något samband. TKE i den nivå där TI4 har sitt maximala utbredningsområde är nästan obefintlig. Gällande TKE och TI3 kan vissa likheter i placering och intensitet ses, men fortfarande inget tydligt samband. Jämfört med fallet den 14 februari är likheterna mellan placering av TKE och CAT mindre. Vid granskning av tvärsnitten ses inget samband mellan TI4 och TKE, däremot liknar tvärsnitten för TKE och TI3 varandra. Dock ses ingen TKE där TI3 har sina högsta värden.

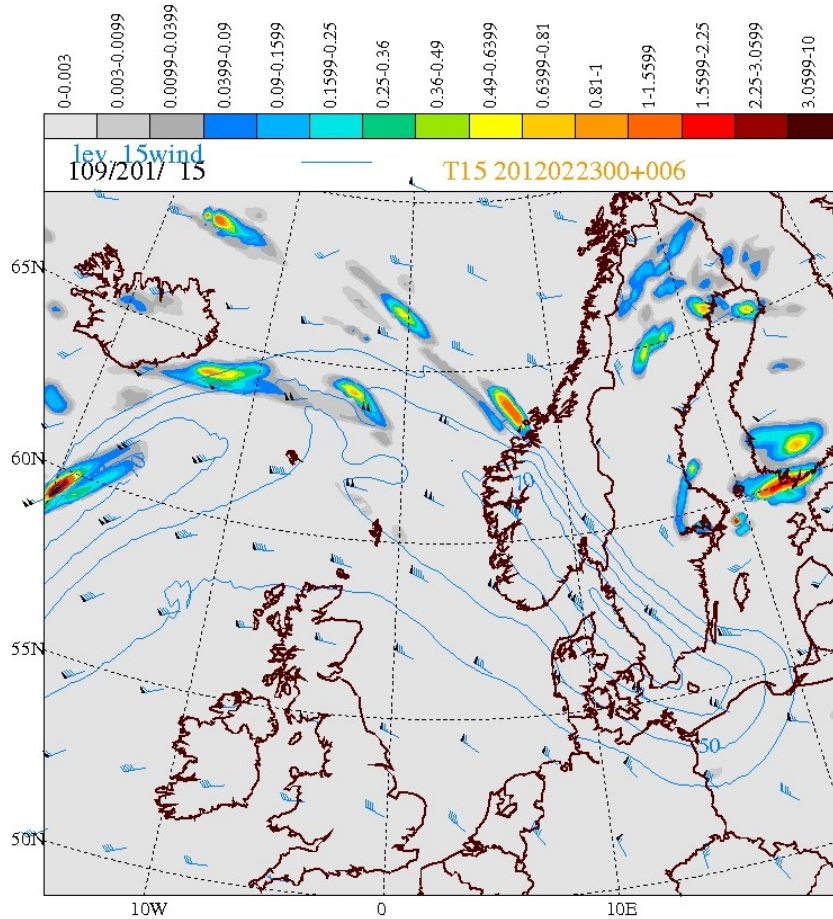
En jämförelse med NSWC kan inte riktigt göras för detta fall. NSWC täcker inte det område där TI4 visar risk för CAT. Istället kan i figur 18 ses ett utsnitt ur SIGWX för Europa utfärdad av WAFC London för den aktuella tidpunkten. Det markerade CAT-området på denna liknar det som TI3 indikerar och visar intensiteten moderat till tidvis allvarlig. Däremot visar inte SIGWX på CAT på den anticyklonala shearsidan av jetströmmen, vilket är det område där TI4 har markerat ett riskområde. WAFC London använder sig för tillfället av Dutton index för att prognostisera CAT och detta reagerar inte på de mekanismer som kan ge upphov till turbulens i ett starkt anticyklonalt flöde.



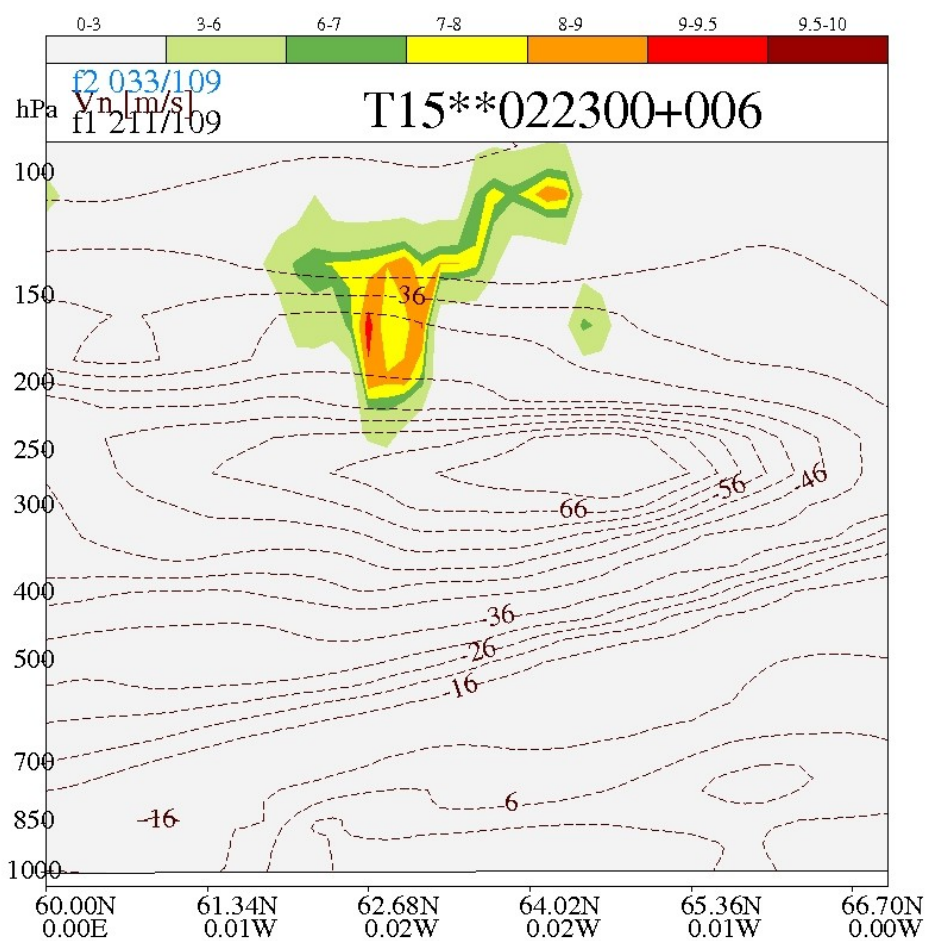
**Figur 11**  
 T14 i T15  
 modellnivå 12, 23  
 februari 2012  
 00UTC+06H.



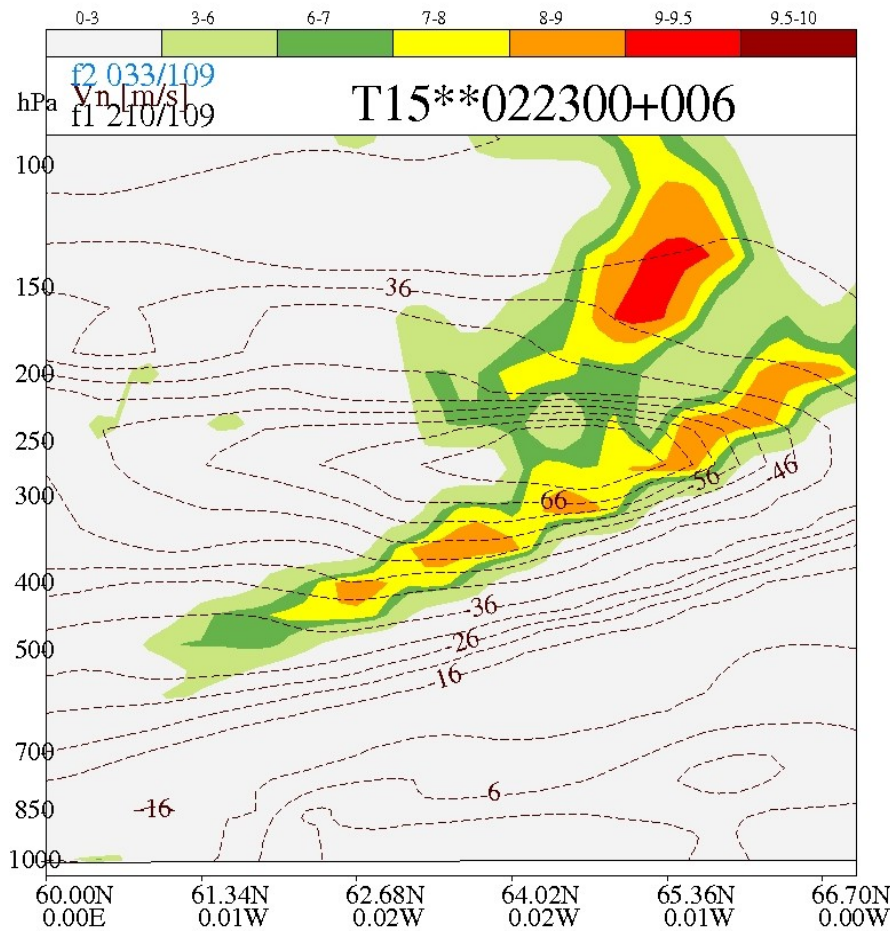
**Figur 12**  
 T13 i T15  
 modellnivå 15, 23  
 februari 2012  
 00UTC+06H.



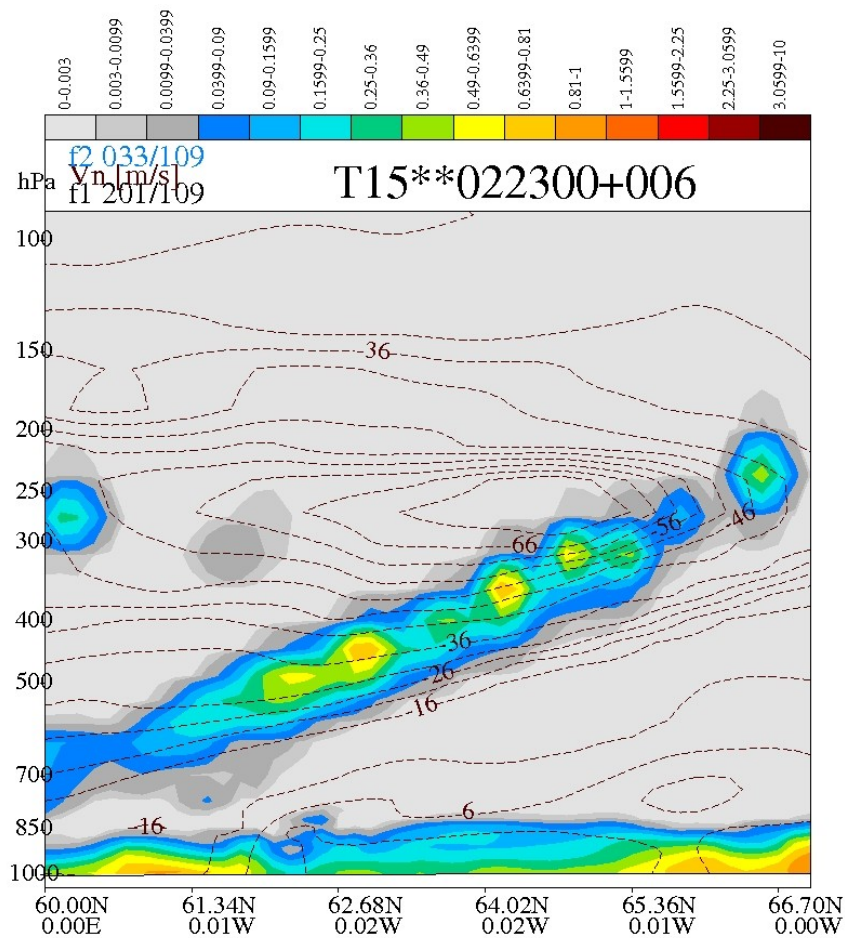
**Figur 13**  
TKE i T15 modellnivå 15,  
23 februari 2012  
00UTC+06H.



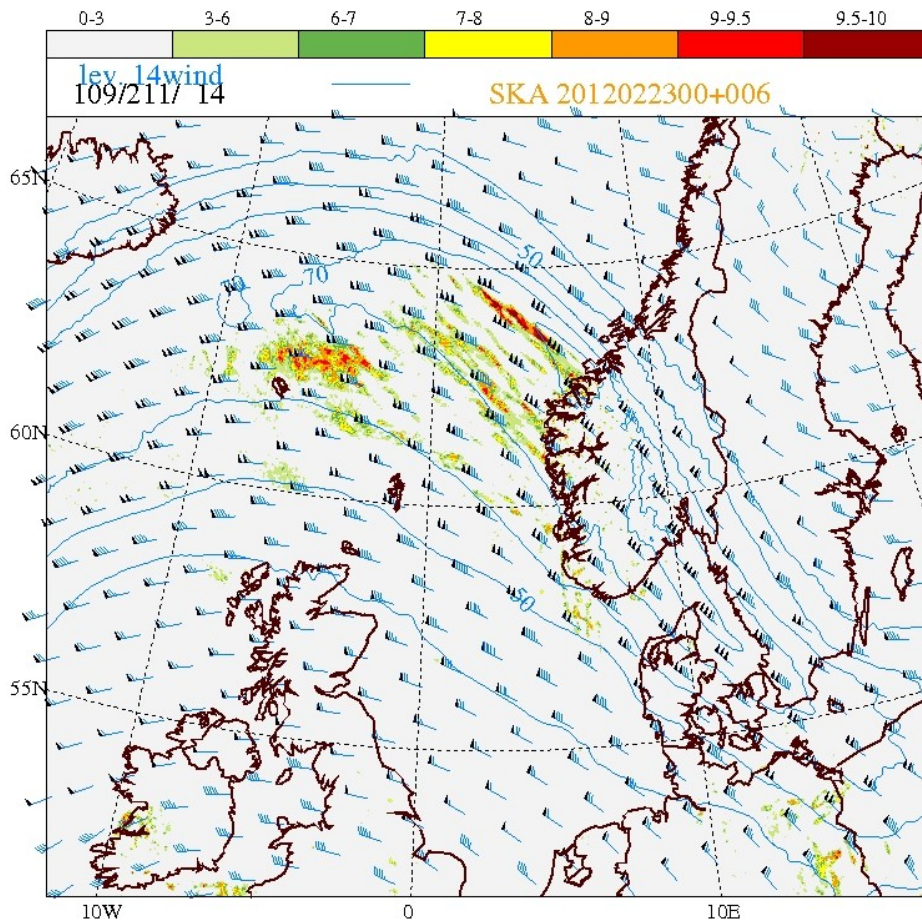
**Figur 14**  
Tvärsnitt T14 i T15,  
23 februari 2012  
00UTC+06H.  
Tvärsnittets  
placering är markerat  
i figur 11.



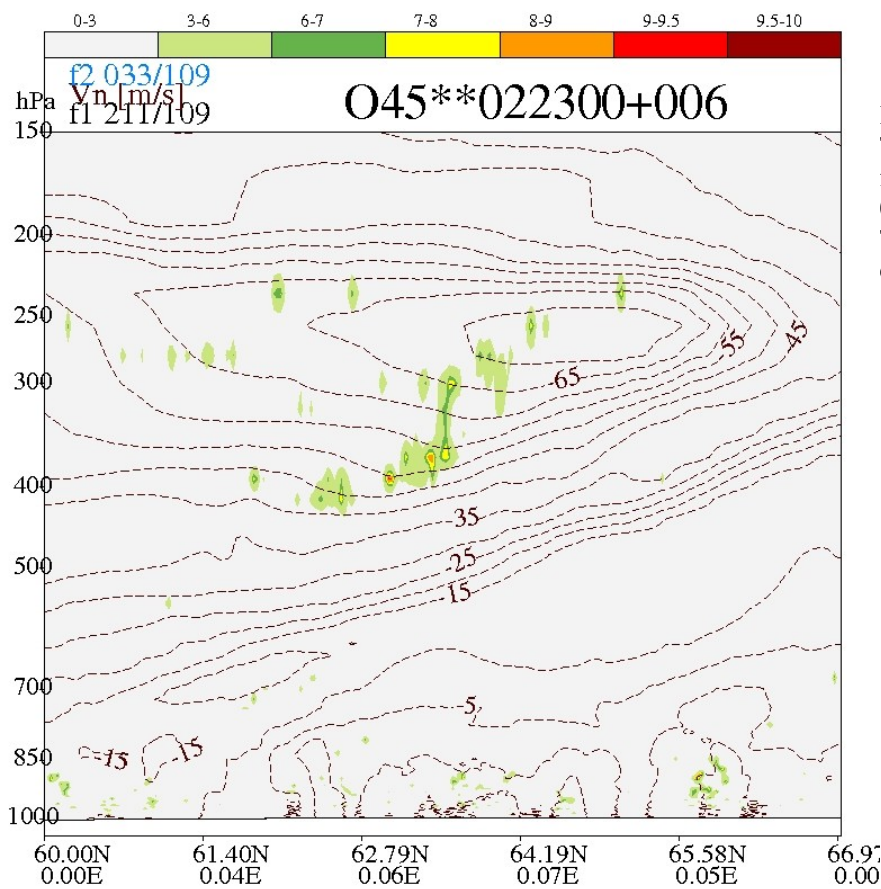
**Figur 15**  
 Tvärsnitt T13 i T15, 23 februari 2012 00UTC+06H.  
 Tvärsnittets placering är markerat i figur 11.



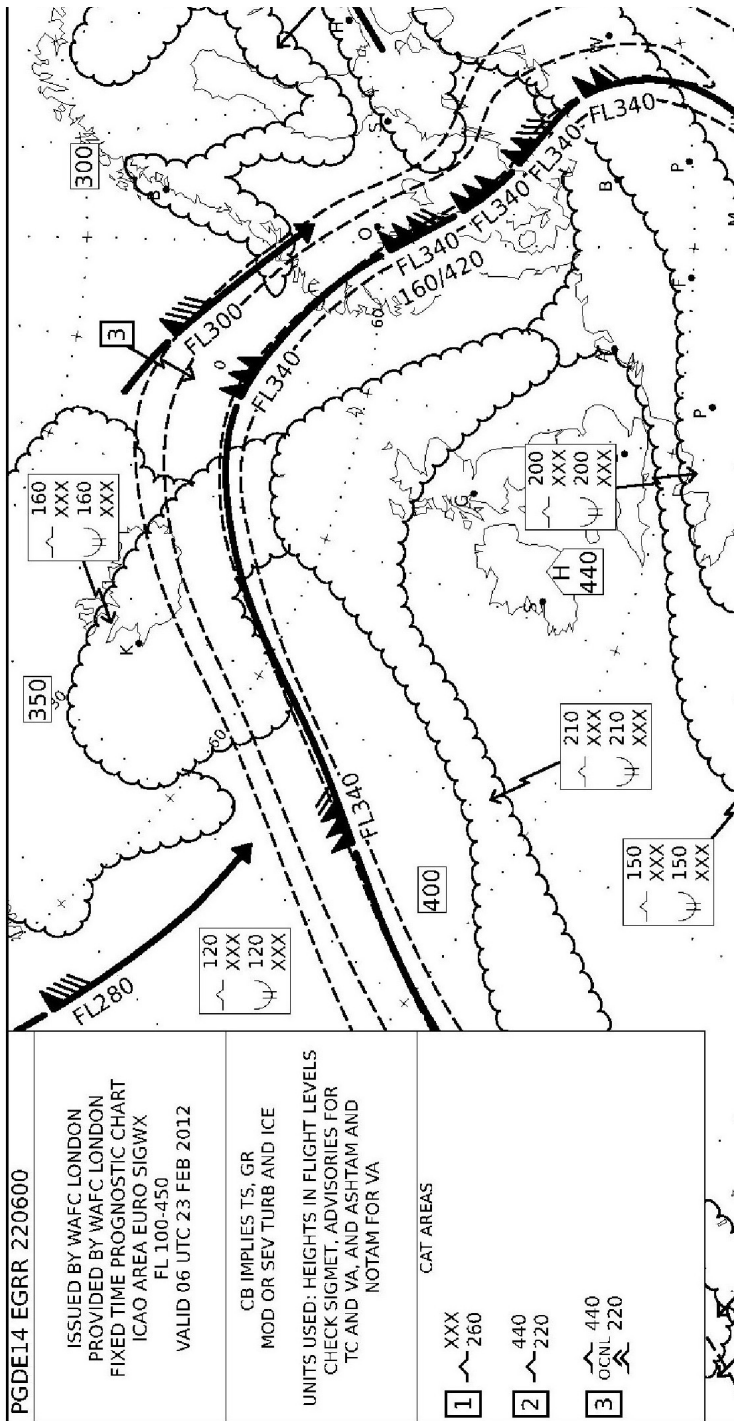
**Figur 16**  
 Tvärsnitt TKE i T15, 23 februari 2012 00UTC+06H.  
 Tvärsnittets placering är detsamma som för figur 14 och 15.



**Figur 17**  
 TI4 i SKA  
 modellnivå 14, 23  
 februari 2012  
 00UTC+06H.



**Figur 18**  
 Tvärsnitt TI4 i SKA, 23  
 februari 2012  
 00UTC+06H.  
 Tvärsnittets placering  
 detsamma som i figur 14.



**Figur 19**  
 Del av SIGWX utfärdad av WAFc  
 London, giltig 23 februari 2012  
 06UTC<sup>47</sup>.

### 4.1.3 24 februari 2012 12UTC+06H

Vid denna tidpunkt är jetströmmen mer zonalt orienterad och är inte lika kraftig som vid 14 februari. Det fokuseras främst på området över Danmark och södra Sverige där TI3 har medelhöga värden, för att studera sambandet då det inte är kraftig CAT.

Figur 20 visar beräkningen av TI3 i T15 och figur 22 motsvarande tvärsnitt. Figur 21 visar beräkningen av TKE. Tvärsnitt för TKE hittas i Bilaga. TI3, både horisontell karta och

47 Från [http://www.aviationwxchartsarchive.com/index.php?mod=03\\_Sigwx](http://www.aviationwxchartsarchive.com/index.php?mod=03_Sigwx)

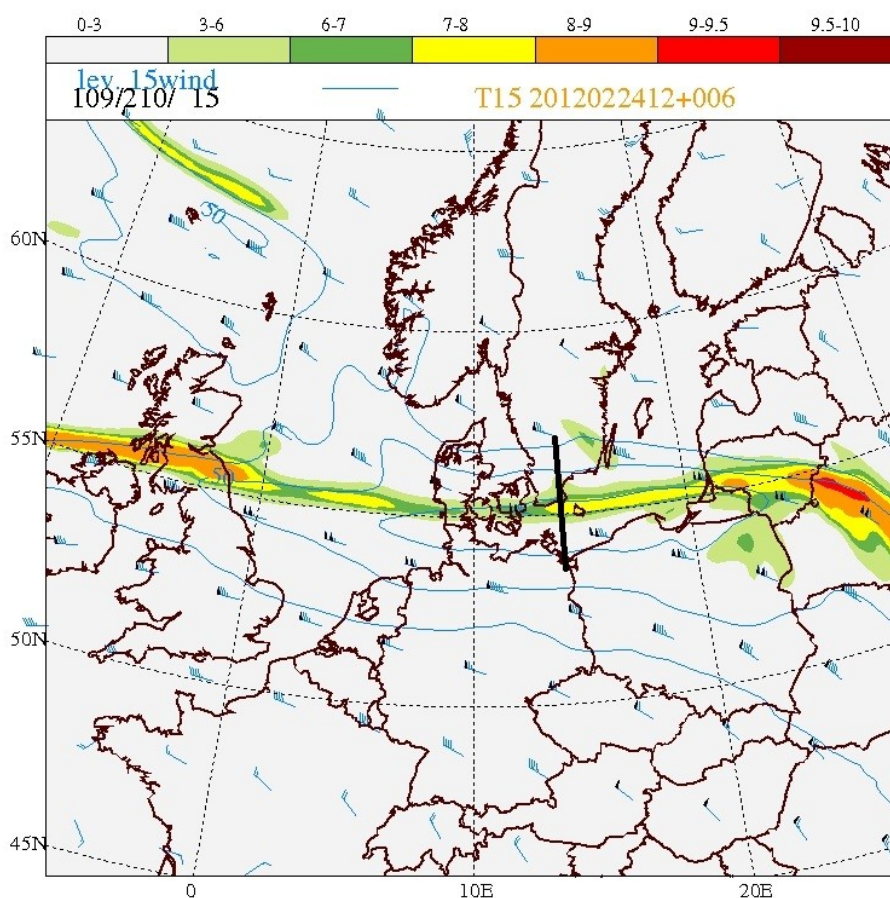
tvärsnitt, i SKA ses i figur 23 och 24. Liksom för 14 februari ger detta tillfälle inte några höga värden för TI4 och kartan med TI4 kan ses i Bilaga.

TI3 har förhöjda värden på den cyklonala shearsidan av jetströmmen. Enligt indexet är inte intensiteten på turbulensen lika kraftig som vid den 14 februari. Figur 21 visar turbulent kinetisk energi på få platser. Det syns visserligen högre värden med TKE kring det område (över Lettland/Vitryssland) då TI3 har sitt högsta värde, men i övrigt ses ingen TKE. Även på tvärsnittet av TKE (se Bilaga), vilket är placerat på samma plats som i figur 22, är det likadant. Ingen TKE har genererats i modellen på det ställe då TI3 indikerar risk för CAT.

NSWC (figur 25) indikerar CAT i ett större område än vad TI3 gör. Jetaxelns placering på NSWC visar att vid detta tillfälle indikerar TI3 CAT också på den anticyklonala sidan, men även på NSWC är det markerat CAT på båda sidor av jetaxeln. Troligen är det starka vindshear som gör att både TI3 och Dutton index indikerar CAT på denna sida.

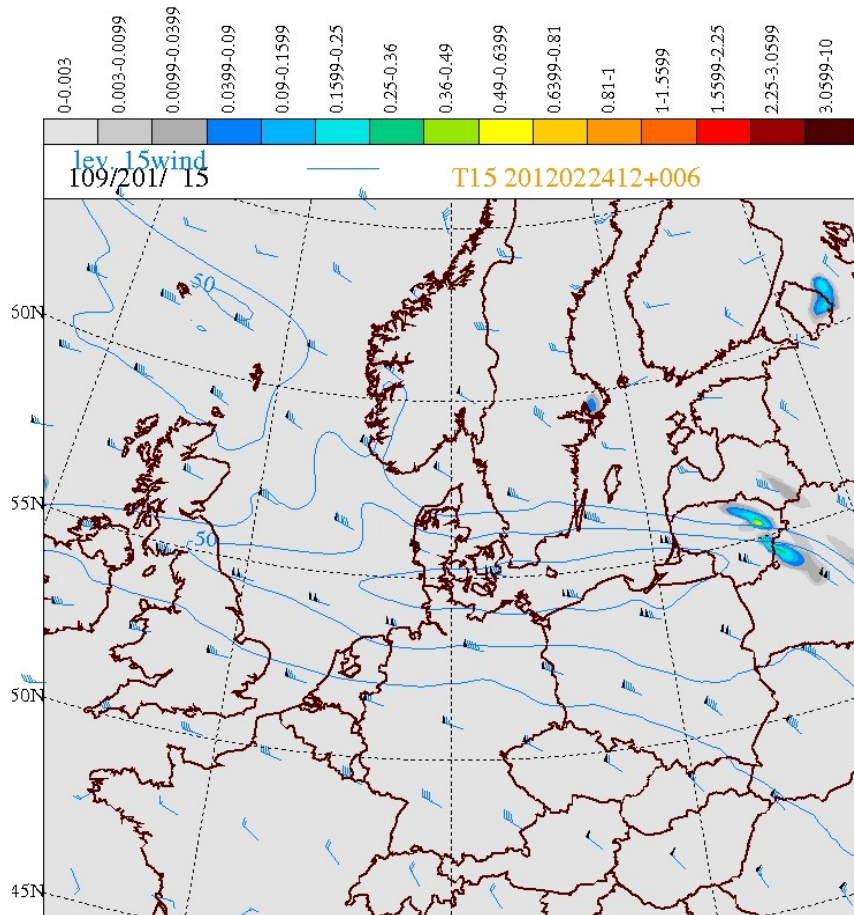
#### Sammanfattningsvis

- Det finns ett visst samband mellan TI3 och TKE då turbulensen är kraftig.
- Det verkar inte finnas något samband mellan TI4 och TKE.

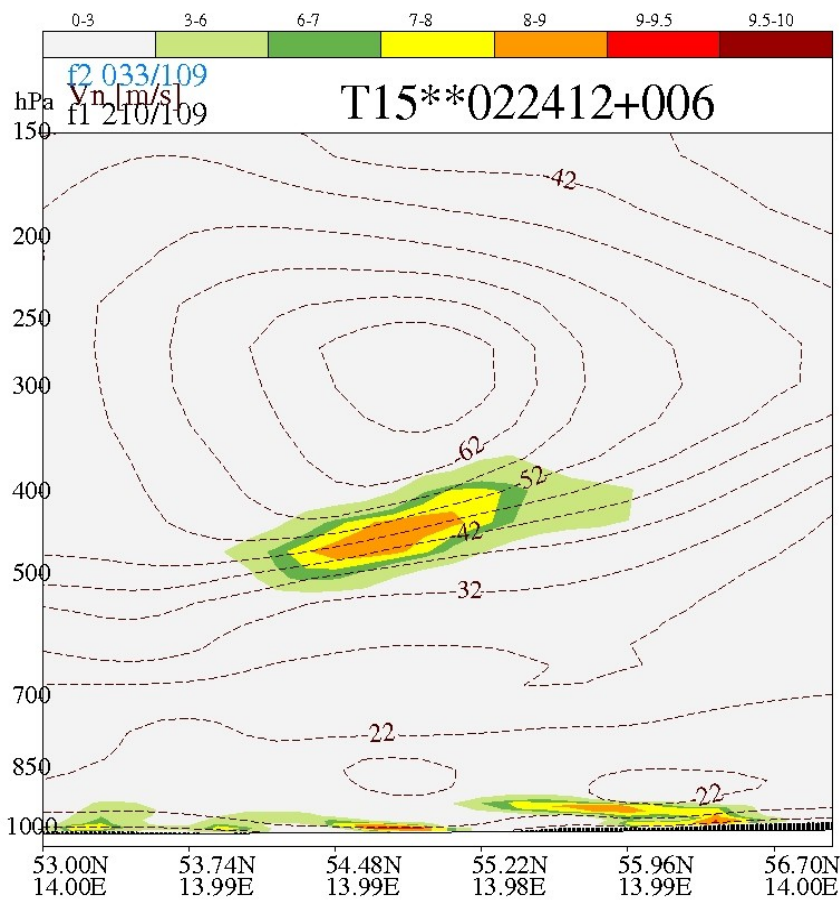


**Figur 20**  
TI3 i T15 modellnivå  
15, 24 februari 2012  
12UTC+06H.

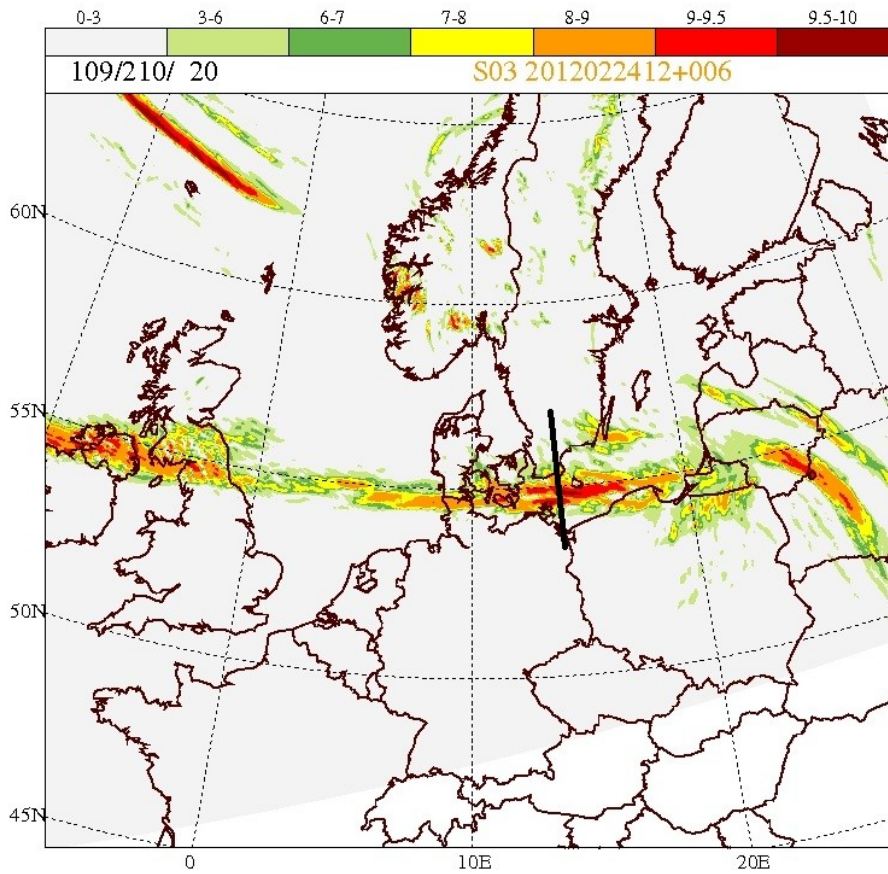




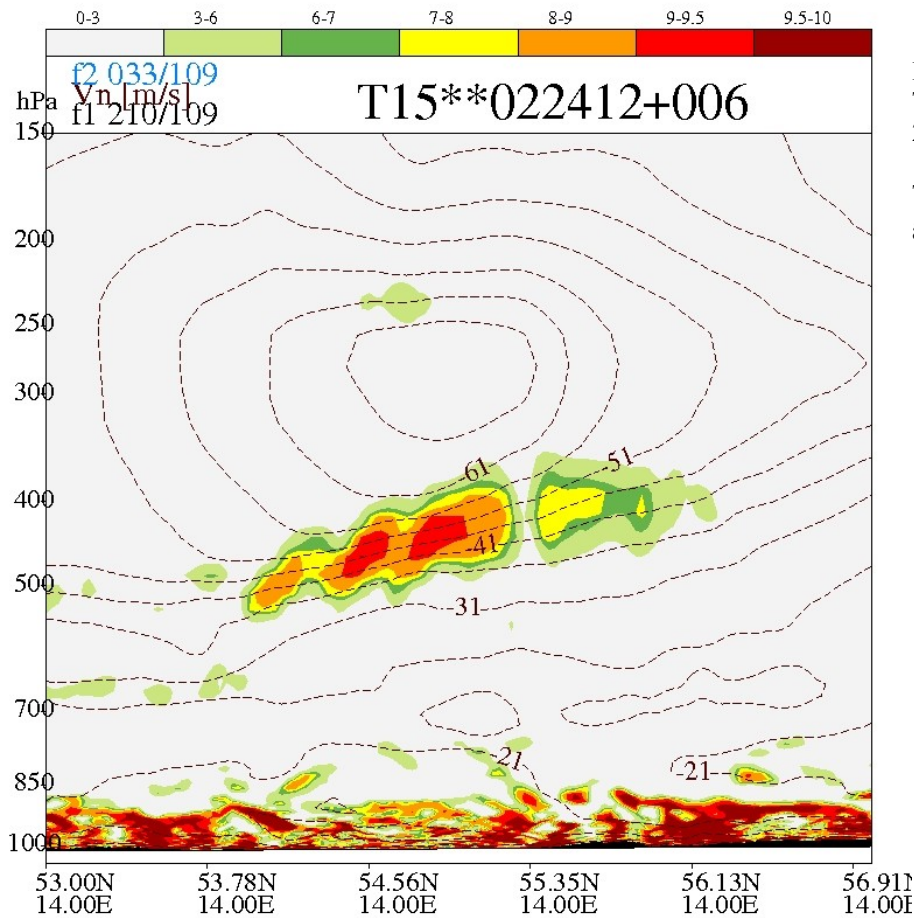
**Figur 21**  
TKE i T15 modellnivå 15,  
24 februari 2012  
12UTC+06H.



**Figur 22**  
Tvärsnitt T13 i T15, 24  
februari 2012  
12UTC+06H. Tvärsnittets  
placering är markerat i  
figur 20.

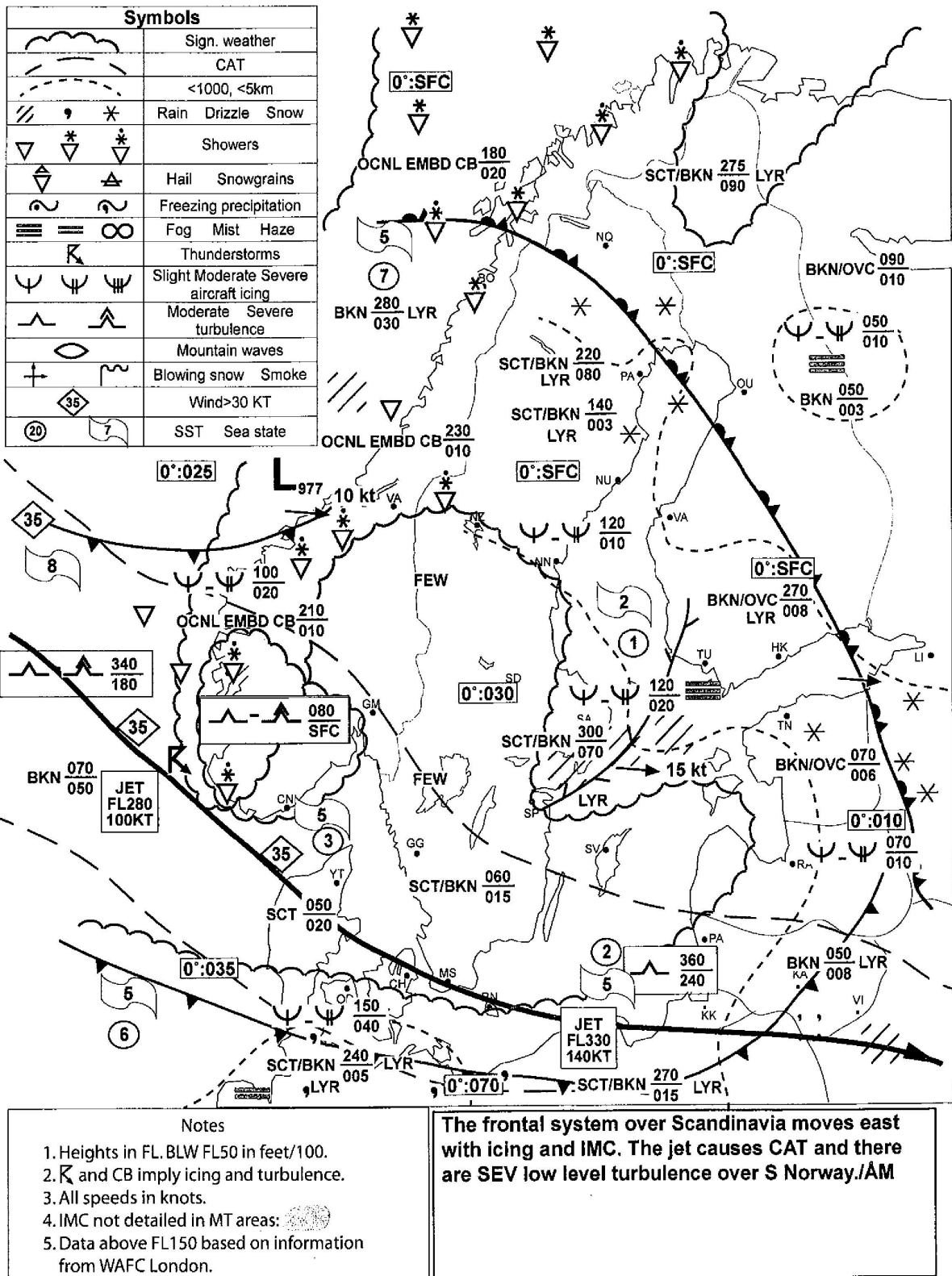


**Figur 23**  
 T13 i SKA  
 modellnivå 20, 24  
 februari 2012  
 12UTC+06H.



**Figur 24**  
 Tvärsnitt T13 i SKA,  
 24 februari 2012  
 12UTC+06H.  
 Tvärsnittets placering  
 är markerat i figur 23.

# SMHI SIGWX CHART VALID 18 UTC 2012-02-24 SFC-FL400 ISSUED BY MET OFFICE ESSA



Figur 25 NSWC utfärdad av SMHI-Arlanda, giltig 24 februari 2012 18UTC.

## 4.2 Betydelse av modellupplösning för CAT-index

Här jämförs utseendet av indexen för de tre tillfällena som togs upp i föregående avsnitt.

En modell med högre upplösning ger en mer detaljrik prognos, men det innebär också att det blir mer störningar. Det förväntas därför att när indexen har beräknats i SKA är de mer detaljrika och har ett mer fläckigt utseende än i T15, där fälten ser mer homogena ut. Indexen bygger på olika sätt på gradienter av vindkomponenterna. En högre upplösning ger mer detaljer i vinden och skiftningarna blir större. Gradienterna kommer därför också att vara större, till exempel ger en ändring i vinden med  $1\text{ms}^{-1}$  över en gridruta, ett 5 gånger så högt värde på gradienten i SKA jämfört med T15. Detta gör att värdet för indexen generellt kommer att vara högre i SKA än i T15. Det är också det generella intrycket då kartorna och tvärsnitten studeras.

Beräkningen av CAT-indexen i respektive modell bygger naturligtvis på modellens prognos av vinden. Även om vind är något som numeriska modeller generellt är bra på att prognostisera, skiljer sig vindprognosen något åt för T15 och SKA och därför kommer det också ge en viss skillnad för CAT-indexen.

Den 14 februari 2012 är utbredningen av TI3 är större i SKA-modellen, vilket väl hänger ihop med att den ger högre värden. Även i tvärsnitten ses att utbredningen i SKA är större och värdena är också högre. Placering av maximum skiljer sig åt för indexet i de olika modellerna. Riskområdena är också lite olika placerade. Området i T15 är placerat något längre västerut. Något värt att märka är att i SKA är en zon över Sveriges Östersjökust inte markerat som ett riskområde, medan indexet i T15 här har sitt maximala värde.

Den 23 februari är liknande det föregående fallet när TI3 studeras i T15 och SKA. Riskområdena är något större i SKA och värdena för indexet också högre. Tvärsnitt för TI3 också likt. Däremot är det stor skillnad på TI4 mellan de två modellerna. Här ses i T15 ett sammanhängande område medan i SKA är det mycket mindre. I figur 11 ses TI4 i SKA i den nivå där indexet hade de högsta värdena, modellnivå 14. Placeringen är inom samma område, men utbredningen i SKA är mycket mindre. Tvärsnitten mycket olika.

För de andra tillfällena finns inte något utbrett område med TI4 och det är därför svårt att jämföra detta med något annat tillfälle.

För situationen den 24 februari 2012, vilket är tillfället då turbulensen inte är lika kraftig, är placeringen och utbredningen av TI3 lika i T15 och SKA. Även vid detta tillfälle är som tidigare värdet för TI3 högre i SKA. Tvärsnitten är också liknande.

### *Sammanfattningsvis*

- TI3 har generellt högre värden och större utbredningsområde i SKA jämfört med T15, både horisontellt och vertikalt.
- Det går inte att säga något säkert om TI4 då den situation som studeras med höga värden av TI4 visar på en stor skillnad mellan de två modellerna.

## 5 Diskussion

Som det nämntes i inledningen borde det kunna ses ett samband mellan TKE och CAT och en viss förhoppning hade varit att dessa två parametrar då skulle kunna komplettera varandra i arbetet med att prognostisera CAT. Där det finns turbulens förväntas att det också finns turbulent kinetisk energi. I verkligheten är detta fallet, men numeriska prognosmodeller är just modeller av verkligheten och överensstämmandet är naturligtvis inte alltid perfekt.

Ett resultat som förväntades och har bekräftats i de situationsstudier som gjorts, är att det inte ses något överlapp mellan de båda indexen. Det bekräftar att de två indexen reagerar på olika turbulensskapande mekanismer som inte förekommer på samma ställe och motiverar också användandet av två olika index.

Studien har visat att modellens placering och utbredning av TKE inte alltid är detsamma som placeringen av riskområden för CAT. Anledningen till detta är troligen att de två parametrarna beräknas i HIRLAM. TKE parametreras och förenklingar av den ursprungliga budgetekvationen (1) görs. Antagandet att TKE är homogent i en gridruta leder till att i (3) finns endast den vertikala gradienten av de horisontella vindkomponenterna med i termen för mekanisk produktion av TKE. I (1) tas gradienterna i alla tre riktningar med i den mekaniska produktionstermen. CAT kan utvecklas från shear instabilitet i både vertikal och horisontell riktning genom KH-instabilitet respektive inflexionspunktsinstabilitet, dvs både vertikalt och horisontellt shear har betydelse. Turbulens är tredimensionellt och utvecklande av turbulens från inflexionspunktinstabilitet utbreder sig i alla riktningar och förändring av vertikalt shear kan utlösa även KH-instabilitet. I uttrycket för TI2, vilket ingår i TI3, finns termer som beror på både vertikalt och horisontellt shear och båda dessa har betydelse för var indexet indikerar riskområden för CAT. Horisontellt shear är vanligen inte betydande i atmosfären, men kring jetströmmen kan även detta vara stort. Därför kan prognosen av TKE vara för liten eftersom det i (3), och därför inte heller i parametreringen (4), inte ingår termer som beskriver mekanisk produktion från horisontellt shear. Produktionen av TKE kan därför i prognosen vara för liten. En annan generell iakttagelse är att TI3 är placerat något högre än TKE, jämför till exempel figur 6 och 7. Detta skulle också kunna vara en följd av att TKE endast beror på vertikalt shear och inte det horisontella.

Woetmann Nielsen och Petersen (2012) visar exempel på att då TI3 har sitt maximala värde är  $Ri \approx 1$ . Detta tyder också på att instabilitet på grund av horisontellt shear är betydande för CAT, eftersom  $Ri$  är över  $Ri_c$  och uppfyller inte villkoret för att KH-instabilitet ska utvecklas. Generellt är områden med TKE mindre än de som indexen indikerar som riskområden. Produktion av TKE i HIRLAM sker genom vertikal shear instabilitet, dvs KH-instabilitet. Värden för  $Ri$  under  $Ri_c$  förekommer inte i så hög grad och produktionen av TKE i modellen blir för liten.

Om prognosen ger för låg produktion av TKE i områden med CAT skulle dissipationen kunna ytterligare sänka värdena. Det ska också nämnas att prognosen av de turbulenta längdskalorna  $l_{m,n,\epsilon}$  är något som är osäkert.<sup>48</sup> Eftersom parametreringarna (4)-(7) bygger på dessa är detta något som också påverkar TKE. Att prognosen av TKE är för låg kan vara en förklaring till varför det ser ut som det gör 24 februari 2012 12UTC+06. Här visar

48 Woetmann Nielsen 2005

TI3 på turbulens över ett större sammanhängande område medan det inte har prognostiserats TKE i den utsträckningen, se figur 20 och 21.

Inget tydligt samband mellan TKE och TI4 har observerats. Speciellt tydligt blir detta då en jämförelse görs av TI4 och TKE för den 23 februari 2012 00UTC+06H, se figur 11 och 13. I ett område med höga värden av TI4 finns ingen TKE prognostiserad. Detta kan möjligen skyllas på den mekanism för CAT som TI4 ska indikera. TI4 pekar på områden där flödet kan vara obalanserat och att det kan utvecklas gravitationsvågor som i sin tur kan förändra det vertikala vindshearet. Denna mekanism finns inte integrerad i budgetekvationen för TKE i modellen.

Något som inte riktigt kan förklaras är tillfällena då modellen visar högre värden för TKE i områden då det inte indikeras någon CAT, se till exempel figur 5. Möjligen skulle det kunna bero på statisk instabilitet.

Det har alltså inte kunnat observerats ett klart samband mellan CAT-indexen och TKE. Problemet med verifiering av CAT-indexen blir tydliga här. Det skulle kunna vara så att i samband med jetströmmen har modellen en tendens att underprognostisera förekomsten av TKE och att indexet ger en bättre uppskattning av var det finns turbulens i troposfären, ovanför gränsskiktet. Verifikation genom observationer av CAT hade kunnat ge en verklig placering av turbulensen och en jämförelse med modellens prognos, både för CAT och TKE.

De två CAT-indexen är nyframtagna och deras utseende i de olika HIRLAM-modellerna har inte studerats innan. Resultaten av denna undersökning var i stort som förväntat. Det nämndes i avsnitt 4.2 och ses även i figurerna att indexen i SKA är mer detaljrika. Detta är väntat då SKA har en högre upplösning än T15. TI3 har högre värden och större utbredningsområde i den högupplösta modellen medan en tendens av det omvända ses för TI4. Det går inte riktigt att lita på de detaljer som ses i SKA verkligen stämmer. En möjlig åtgärd för att förbättra indexet i SKA är att använda sig av någon form av medelvärde i rummet eller tiden för att få bort störningar.

En stor skillnad mellan modellerna är deras respektive prognoser av TI4 den 23 februari 2012 00UTC+06H. Utseendet för riskområdet är olika i T15 och SKA, se figur 11 och 17. I T15 är det ett mer sammanhängande område medan SKA visar ett mer ojämnt område. Dock är förhöjda värden av de två indexen lokaliserade på samma plats. Skillnaderna blir speciellt tydliga i tvärsnitten, se figur 14 och 18. Av indexen är behovet att verifiera störst för TI4, vilket denna situation styrker. En närmare undersökning av TI4 behövs för att se om skillnaden mellan indexet i T15 och SKA alltid är så stor och vilka förbättringar av TI4 kan göras.

Ett viktigt problem som redan har omtalats är avsaknaden av verifiering. Utan observationer av verkligheten kan inte sägas om modellernas prognos stämmer. I denna undersökning har nästa uteslutande modelldata använts. Detta ger en bild av hur det kan vara men naturligtvis går det aldrig att veta säkert. Ett försök att göra en form av verifiering har varit att jämföra med WAFC Londons prognos av CAT. Då de inte använder precis samma metod för sina prognoser ger jämförelsen en viss indikation på hur troligt det är att indexen, främst TI3, har markerat rätt riskområde. Verifikationsproblemet påverkar också hur man ska hantera indexets olika utseende i modellen. För att kunna

förbättra indexen i modellerna och möjligtvis genomföra någon av de åtgärder som föreslogs ovan, behöver man jämföra modellernas prognoser av CAT med observationer för att veta vad som framför allt behöver förbättras.

Speciellt CAT är svårt att verifiera. Rapporter från piloter (PIREP) kan ofta vara oprecisa. Vid en turbulensvarning anges en flyghöjd och sedan en ungefärlig position. Dessutom, eftersom flygning genom CAT innebär skaderisk för människor och plan, flyger man inte gärna genom områden som har utpekats som riskområden för CAT och inga observationer görs. På DMI samlas just nu de pilotrapporter som gäller CAT in för att kunna jämföra dessa med indexen. Att samla in ett underlag tillräckligt för verifiering kommer dock att ta relativt lång tid då rapporterna inte är många. Men innan indexet tas i bruk måste det verifieras och ännu går det inte att säga något datum då detta kommer att ske. Framför allt TI4 är i behov av verifiering innan det kan användas operativt. Skillnaderna mellan TI4s utseende i TI5 och SKA ökar osäkerheten för att prognosen för denna stämmer. TI3 däremot bygger på ett index, TI2, som är en metod som används länge och som också snart kommer att användas av WAFC London, vilka är specialiserade på just prognoser för luftfarten, där CAT är en viktig del. Stabilitetstermen kan här tillföra en bättre lokalisering av riskområden.

Förslag till förbättringar av indexen TI3 och TI4 har delvis nämnts ovan. Även om PIREPs inte är så många till antalet och inte alltid precisa, så är det ändå de observationer av CAT som finns tillgängliga. Det hade varit en fördel om dessa hade kunnat integreras i prognosen.

Den nyare metoden GTG, där många olika parametrar, till exempel  $R_i$ , frontogenesfunktionen och TI, som enskilt kan användas för att göra prognoser på CAT, beräknas och kombineras för att ge ett statistiskt viktat resultat för att utpeka riskområden, är en intressant utveckling. Sharman et al. (2006) menar att andra index har för låg träffsäkerhet för CAT och att man vill automatisera de verktyg som finns tillgängliga vid CAT-prognoser till ett lättöverskådligt verktyg. Metoden visas ge bra resultat. Denna metod är förmodligen relativt kapacitetskrävande jämför med ett enklare index som TI3 och TI4. Frågan som i så fall måste ställas är hur mycket datorkapacitet, tid och pengar som kan användas till att förbättra prognoserna av CAT på möjlig bekostnad av någonting annat. Värt att notera är att om de statistiska vikterna i GTG studeras, är den enskilda parameter som får störst vikt frontogenesfunktionen.<sup>49</sup> Detta tyder på att om inte möjligheten finns att använda sig av metoden GTG bygger på och endast ett index kan användas, kan det vara ett bra val att välja ett index som bygger på just frontogenesfunktionen, vilket TI3 gör.

I en senare rapport<sup>50</sup> föreslås också en förbättring av TI-indexet. Till det ursprungliga indexet adderas en förenklad term för trenden av divergensen, vilken i studier har visat sig vara en parameter som kan indikera turbulens vid obalanserat flöde. Divergenstrenden ges av skillnaden i divergens vid två varandra påföljande prognostider. Detta värde skalas med en konstant för att minska inflytandet av divergenstrenden i indexet, eftersom den lokalt kan vara stor. Detta tillägg till det ursprungliga CAT-indexet rapporteras ha en positiv inverkan på korrelationen mellan prognostiserad CAT och PIREPs. Då flödet inte är

---

49 Sharman et al. 2006:280

50 Ellrod Knox 2005

obalanserat har termen inte heller setts ha någon negativ inverkan.<sup>51</sup> Detta är något som skulle kunna has i åtanke om det visar sig att TI4 inte fungerar tillfredsställande. Dock kan divergenstrenden vara mycket fluktuerande, vilket innebär osäkerheter i beräkningen.

Något förvånande är WAFC Londons användning av endast Dutton index för prognos av CAT. Detta ska snart ersättas med TI2. Dessa båda index är förvisso väl beprövade och ger en bild över var CAT kan finnas på den cyklonala sidan av jetströmmen. Men de är inte alls utformade för att också kunna utpeka riskområden där flödet kan vara obalanserat och CAT kan utvecklas på grund av att utsända gravitationsvågor kan förändra strömningen. Detta är visserligen ovanligare än tillfällen då CAT utvecklas från direkt shear instabilitet, men kan i vissa fall vara kraftig och en metod för att lokalisera även dessa riskområden kan behövas.

CAT utgör en fara för flygtrafiken och bra prognostisering av CAT är viktigt. Men det låter sig inte göras så lätt och det är dessutom svårt att verkligen få reda på om de prognoser som görs är korrekta. Förhoppningsvis kan de två indexen snart tas i bruk på DMI och riskområden för CAT lokaliseras bättre än vid användning av endast SIGWX. Att komplettera lokaliseringen av CAT med TKE-prognoser verkar inte kunna göras enligt vad denna studie har visat.

---

51 Ellrod Knox 2005 s 1-3



## 6 Slutsatser

- Ett tydligt systematiskt samband mellan TKE och de två indexen, TI3 och TI4, i DMI-HIRLAM har inte kunnat ses och anledningen till detta är troligen parametreringen av TKE i den numeriska modellen. Ett visst samband mellan TI3 och TKE har observerats.
- En tänkbar förbättring rörande indexen i modeller med olika upplösning, är att i den mer högupplösta modellen SKA använda sig av rums- eller tidsmedelvärden av indexen för att minska störningar. TI4s utseende i T15 och SKA skiljer sig åt och skulle behöva undersökas ytterligare.
- Det står klart att verifiering av både TI3 och framför allt TI4 måste göras innan indexen kan börja användas operationellt. Utan en grundlig verifiering är det svårt att veta vilka förbättringar som behöver och kan göras.

# Referenser

## Litteraturförteckning

- Bluestein, H.B. (1993) *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes – Volume II Observations and Theory of Weather Systems*. New York: Oxford University Press
- Brown, R.A. (1972) *On the Physical Mechanism of the Inflection Point Instability*. Journal of the Atmospheric Sciences, 29, s. 984-986
- Dutton, J.A.; Panofsky, H.A. (1970) *Clear Air Turbulence: A Mystery May Be Unfolding*. Science, 167(3920), s. 937-944
- Ellrod, G.P., Knapp, D.I. (1992) *An Objective Clear-Air Turbulence Forecasting Technique: Verification and Operational Use*. Weather and Forecasting, 7, s. 150-165
- Ellrod, G.P.; Knox, J.A. (2005) *An improved clear air turbulence diagnostic index to account for unbalanced flow in anticyclonically curved jet streams*. 21<sup>st</sup> Conference on Weather Analysis and Forecasting/17<sup>th</sup> Conference on Numerical Weather Prediction (8 s)
- Ellrod, G.P.; Knox, J.A. (2010) *Improvements to an Operational Clear-Air Turbulence Diagnostic Index by Addition of a Divergence Trend Term*. Weather and Forecasting, 25, s. 789-798
- Holton, J.R. (2004) *An introduction to dynamic meteorology* (4<sup>th</sup> edition). International Geophysics Series Volume 88. Burlington: Academic Press
- Knox, J.A. (1997) *Possible Mechanisms of Clear-Air Turbulence in Strongly Anticyclonic Flows*. Monthly Weather Review, 125(6), s. 1251-1259
- Pal Ayra, S. (2001) *Introduction to micrometeorology*. International Geophysics Series Volume 79. Burlington: Academic Press
- Sharman, R.; Tebaldi, C.; Wiener, G.; Wolff, J. (2006) *An Integrated Approach to id- and Upper-Level Turbulence Forecasting*. Weather and Forecasting, 21, s. 268-287
- Wallace, J.M.; Hobbes P.V. (2006) *Atmospheric Science An introductory survey* (2<sup>nd</sup> edition). International Geophysics Series Volume 92. Burlington: Academic Press
- Woetmann Nielsen, N. (2005) *The momentum equation in HIRLAM – NetFam lecture 13 June 2005 in Sodankylae, Finland*. Köpenhamn: Danmarks Meteorologiska Institut
- Woetmann Nielsen, N.; Petersen, C. (2012) *An upper-tropospheric clear and cloudy air turbulence index in DMI-HIRLAM*. Scientific Report 12-01. Köpenhamn: Danmarks Meteorologiska Institut

## Övriga källor

Jenna Macgregor, MetOffice UK via mail [30.05.2012] – Se Bilaga 2

DMI-HIRLAM <http://www.dmi.dk/dmi/index/viden/dmi-hirlam.htm> [16.05.2012]

General description of the HIRLAM model

[http://hirlam.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=64&Itemid=101](http://hirlam.org/index.php?option=com_content&view=article&id=64&Itemid=101)  
[16.05.2012]

SIGWX [http://www.aviationwxchartsarchive.com/index.php?mod=03\\_Sigwx](http://www.aviationwxchartsarchive.com/index.php?mod=03_Sigwx)  
[31.05.2012]

## **Tack till**

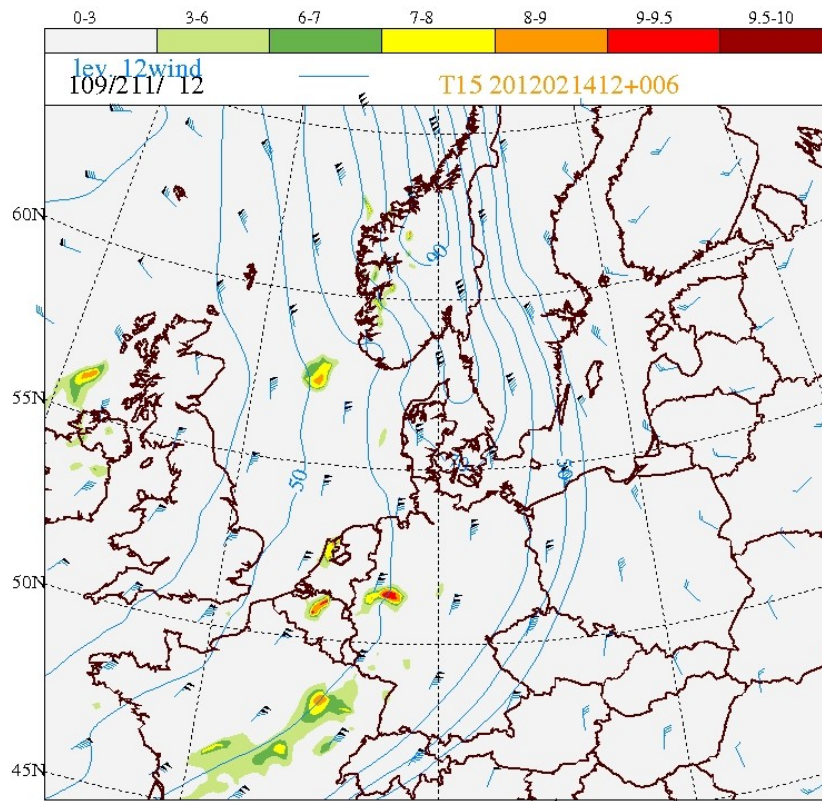
Niels Woetmann Nielsen, DMI

Aksel Walløe Hansen, NBI

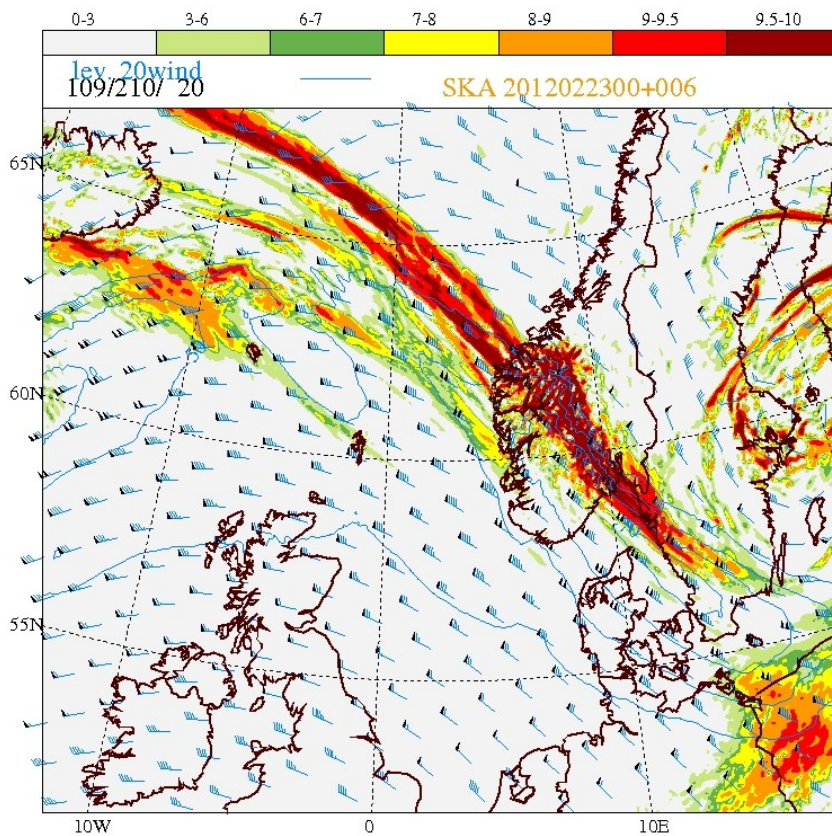
Mats Persson och Anders Wennerblom, SMHI-Arlanda

# Bilagor

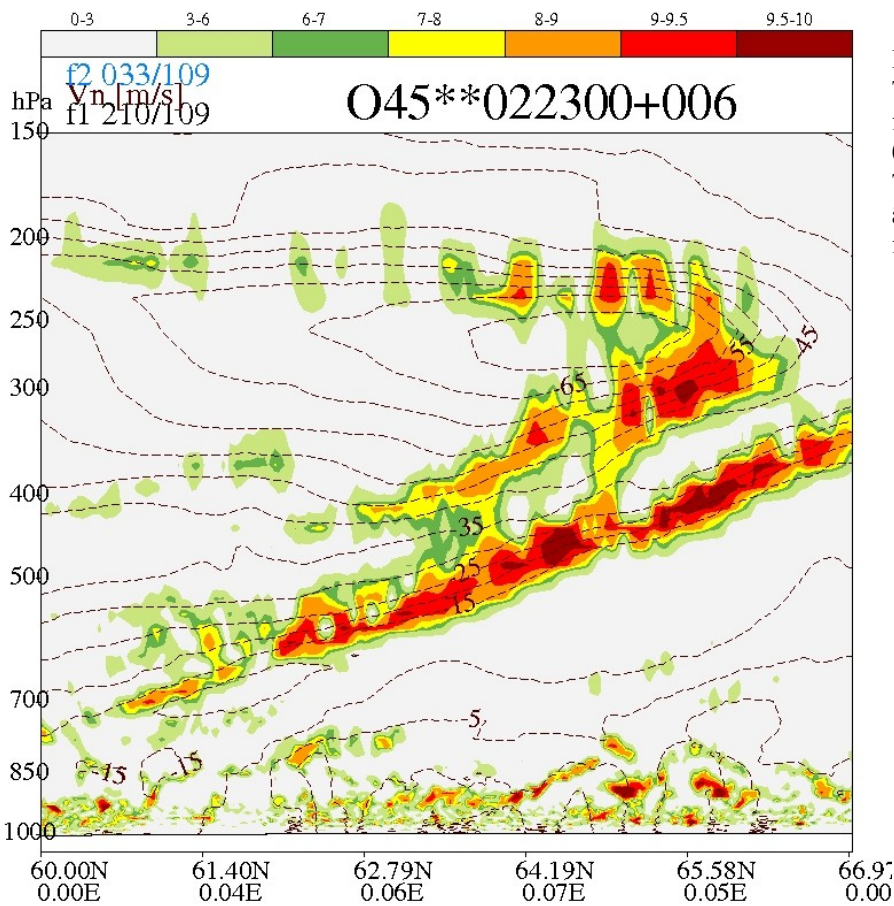
## Bilaga 1 – Figurer



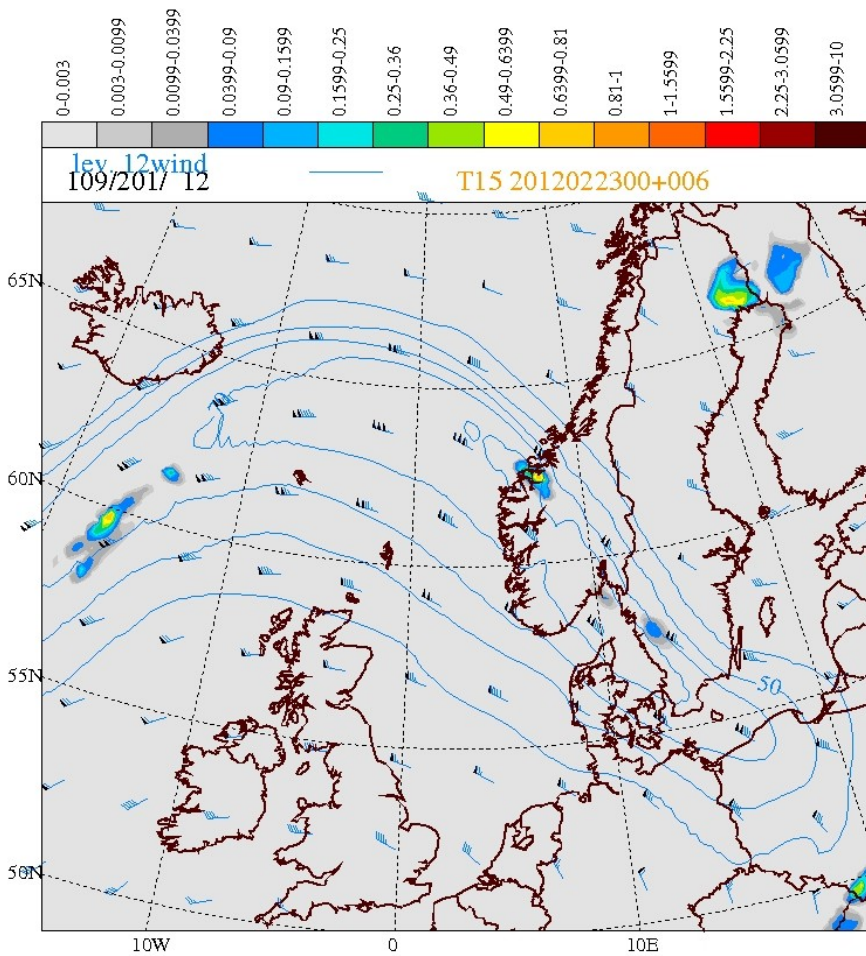
**Figur B1**  
T14 i T15 modellnivå 12, 14  
februari 2012 12UTC+06H.



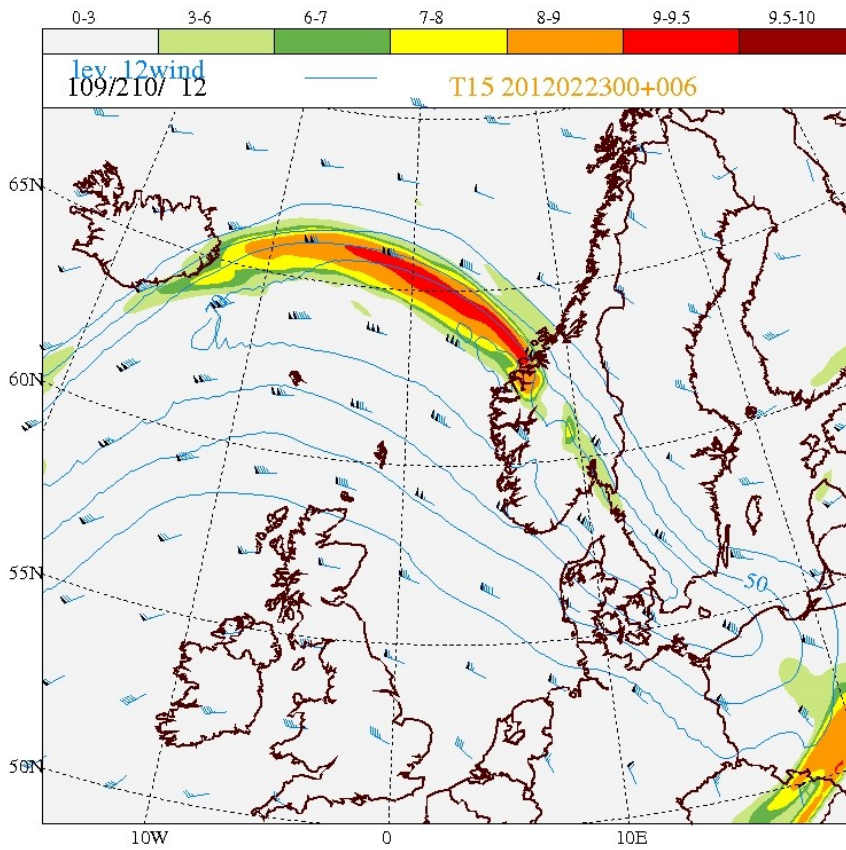
**Figur B2**  
T13 i SKA modellnivå 20,  
23 februari 2012  
00UTC+06H.



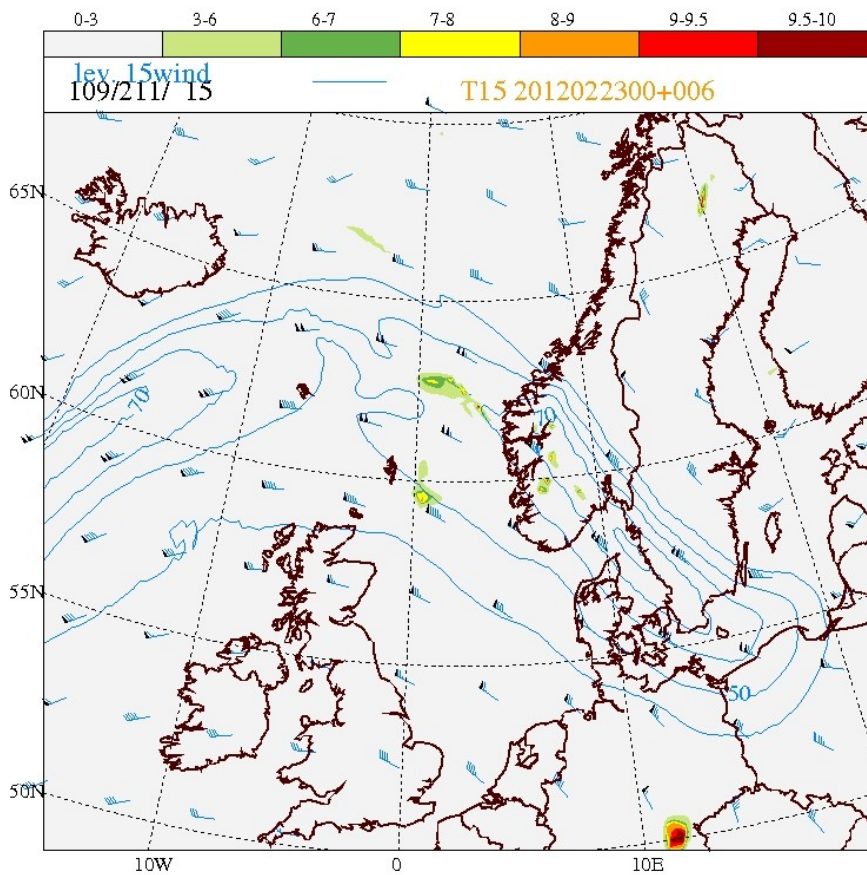
**Figur B3**  
 Tvärsnitt TI3 i SKA, 23 februari 2012 00UTC+06H.  
 Tvärsnittets placering är detsamma som för figur 14.



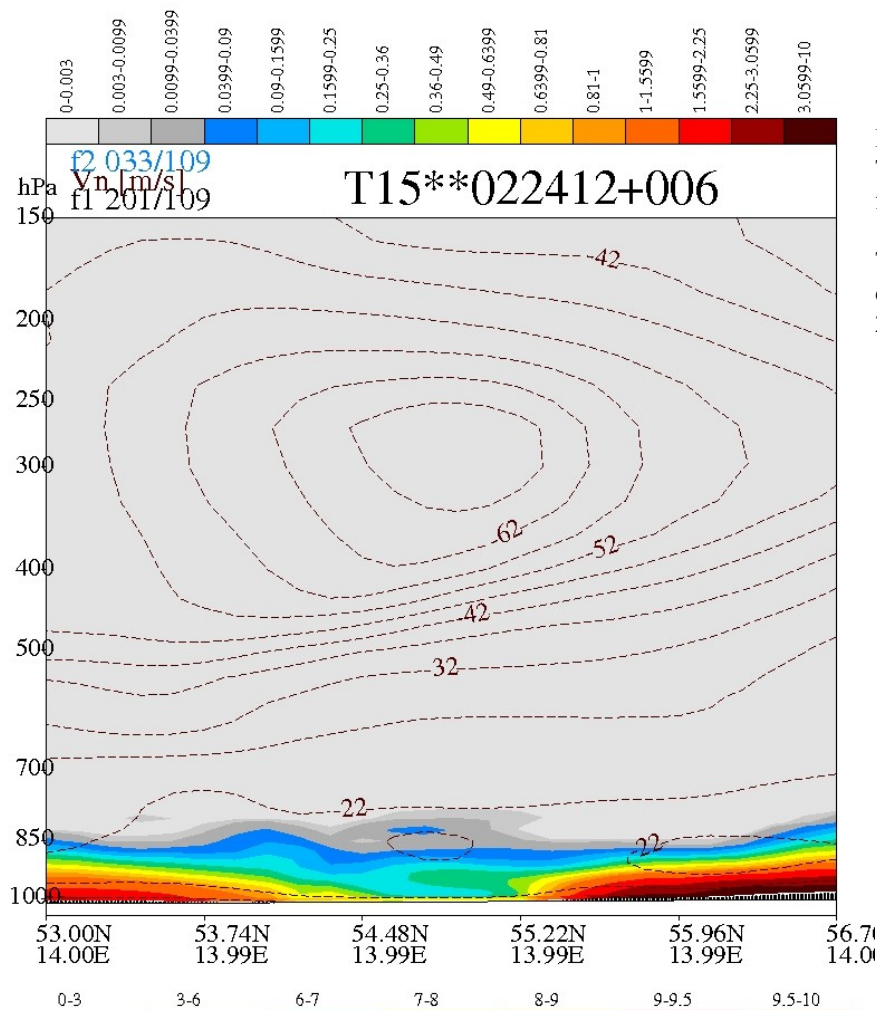
**Figur B4**  
 TKE i T15 modellnivå 12, 23 februari 2012 00UTC+06H



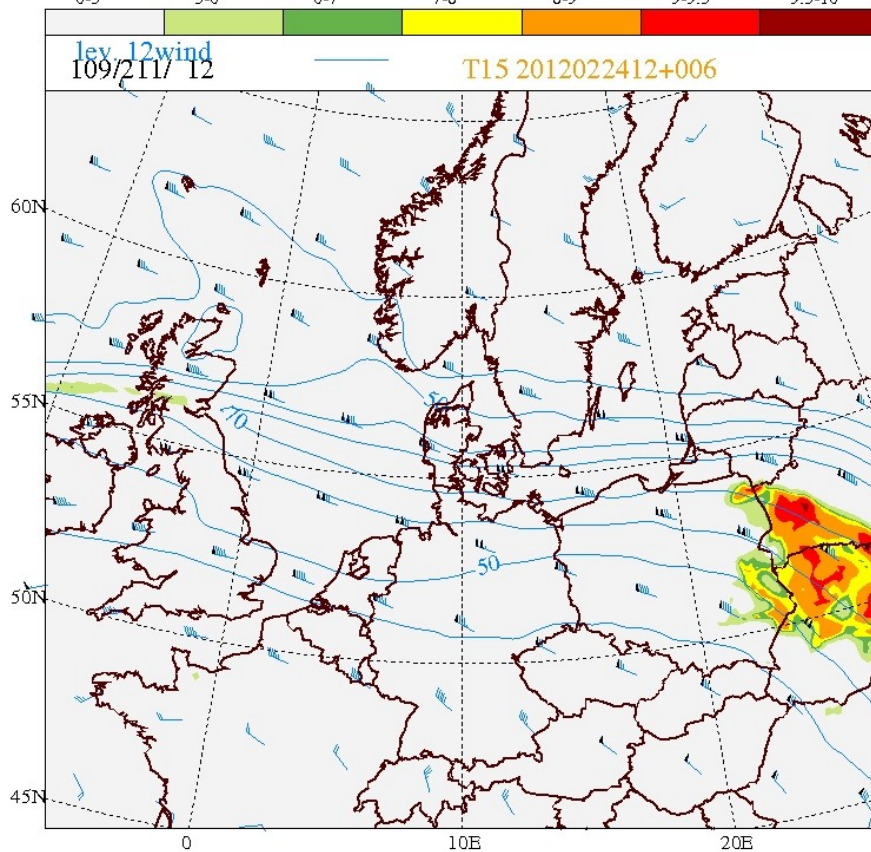
**Figur B5**  
T13 i T15 modellnivå 12,  
23 februari 2012  
00UTC+06H.



**Figur B6**  
T14 i T15 modellnivå 15,  
23 februari 2012  
00UTC+06H.



**Figur B7**  
 Tvärsnitt TKE i T15, 24 februari 2012 12UTC+06H.  
 Tvärsnittets placering är detsamma som för figur 22.



**Figur B8**  
 T14 i T15 modellnivå 12, 24 februari 2012 12UTC+06H.

## **Bilaga 2 – Mailkorrespondens med MetOffice UK**

**Datum: 30 maj 2012 11:07**

Från: Christina Mannerberg  
Till: [enquiries@metoffice.gov.uk](mailto:enquiries@metoffice.gov.uk)  
Ämne: Inquiry about clear-air turbulence prediction

*Dear Sir or Madam,*

My name is Christina Mannerberg and I'm a meteorology student from Sweden, currently doing my bachelor thesis about clear-air turbulence (CAT). I have a question concerning the Significant weather charts issued by WAFC London; how is the CAT-areas indicated on these charts predicted? A kind of turbulence index, or something else?

*Thank you for any help you can provide!*

*Best regards*

*Christina Mannerberg*

**Datum: 30 maj 2012 12:14**

Från: Jenna Macgregor [enquiries@metoffice.gov.uk](mailto:enquiries@metoffice.gov.uk)  
Till: Christina Mannerberg  
Ämne: Re: Inquiry about clear-air turbulence prediction

Dear Christina,

The CAT predicted in the WAFC SIGWX charts is drawn by hand by a forecaster. They use a mixture of model data and their knowledge of wind shear and curvature at upper levels (250hPa) to draw these CAT regions.

Of the model fields available, currently they only have Dutton index when forecasting, but soon they will be using the Ellrod II index. This is because Ellrod II is available externally as a GRIB2 field as part of the Met Offices WAFC commitments to provide Gridded data as well as the SIGWX charts.

References below:

Dutton M.J.O (1980), Probability forecasts of clear-air turbulence based on numerical model output. *Meteorological Magazine* 109, 293–319

Ellrod G.P., and Knapp D.I., (1992), An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. *Weather and Forecasting*, 7, 150-165

I hope this helps you,

Kind regards,

Jenna



Weather Desk Advisor

Met Office, FitzRoy Road, Exeter, Devon, EX1 3PB, United Kingdom.

Tel: 0870 900 0100 or [+44 \(0\)1392 88 5680](tel:+44(0)1392885680)

Fax: 0870 900 5050

Twitter: [@metoffice](https://twitter.com/metoffice)

Email [enquiries@metoffice.gov.uk](mailto:enquiries@metoffice.gov.uk)

<http://www.metoffice.gov.uk>