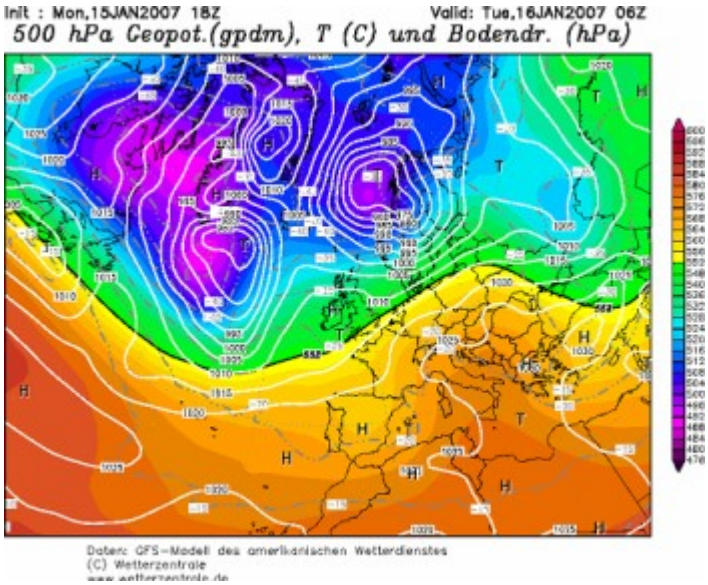
Orkantief Kyrill am 18./19. Januar 2007

A.) Prognose

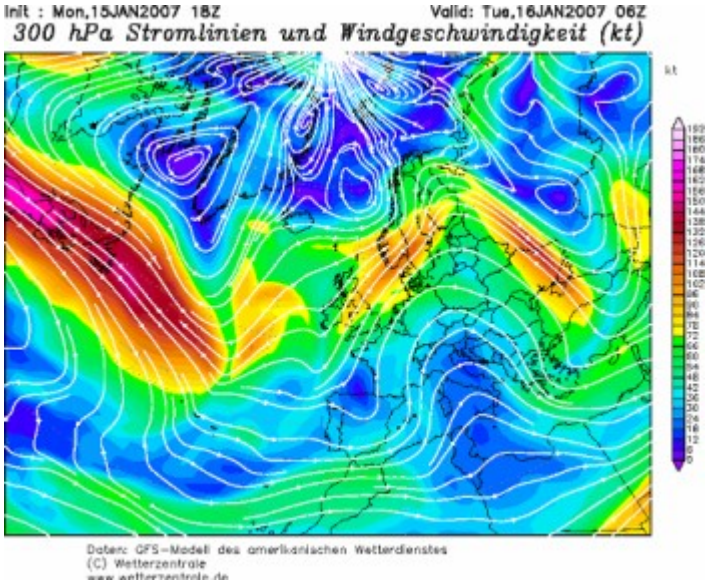
Zum Glück waren sich bereits eine Woche zuvor, alle Modellcomputer einig, das die Lage orkanpotential hat und auch danach gab es wenig widersprüchliche Prognosekarten, bereits 3 Tage vor dem Orkan wurde der genaue Ablauf sehr gut erfasst. Daher konnte rechtzeitig gewarnt werden und geringe Opferzahlen von – in diesem Fall deutlich: “nur” knapp über 40 Toten europaweit sprechen in diesem Fall für sich, die Menschen waren gut auf das extreme Ereignis vorbereitet, welches auch folgen sollte.

Am 15.01.07, Montagabend, immerhin 3 Tage vor dem Ereignis, war die Dramatik im Wesentlichen gut erfasst, die damaligen Prognosekarten zeigen gut, den realen Ablauf der Bildung des drohenden Extremwetters:

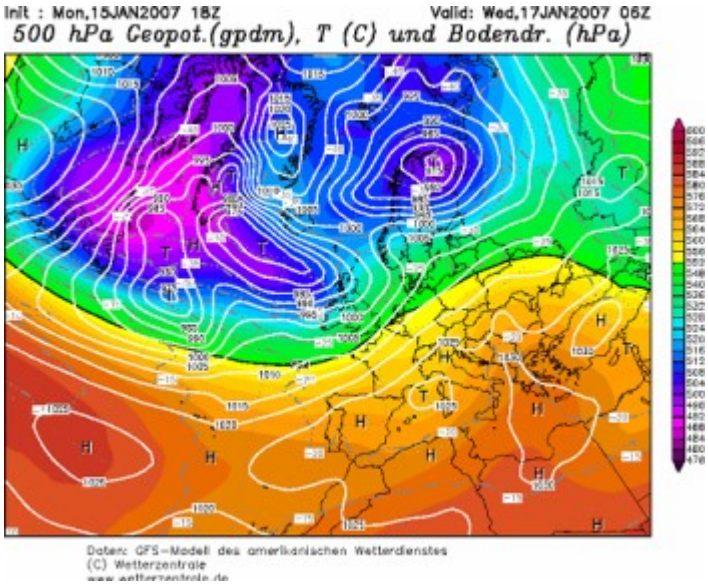


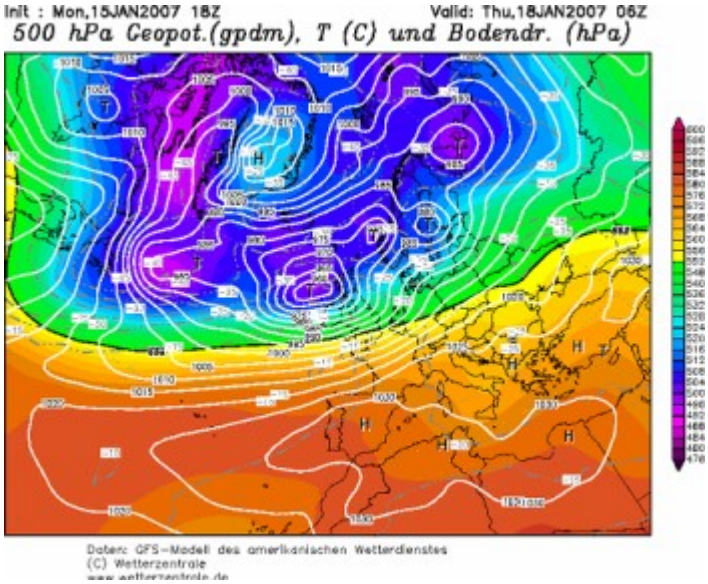
Ein kleines Wellentief hatte sich bereits über Neufundland gebildet, vor dem Tief lag nun eine ausgeprägte Wonne, dicht gedrängten Temperaturgefälles von arktischer Polarluft bis hin zu beinahe tropischer Warmluft, sprich eine intensive Polarfront lag zwischen dem Subtropenhoch und dem polaren Kaltlufttrog über dem Nordatlantik. Dabei trägt die rückseitige Kaltluftrutsche des zentralatlantischen Tiefs zusammen mit der vorderseitigen Warmluftpumpe vor dem Wellentief wesentlich zur Verstärkung der ohnehin heftig intensiven Polarfront bei.

Diese intensive Polarfront, bewirkte vorerst einen intensiven Höhenjet und das kleine Wellentief lag hinten rechts, dort wo (siehe Windpfeile) Divergenz und damit Hebung herrscht.

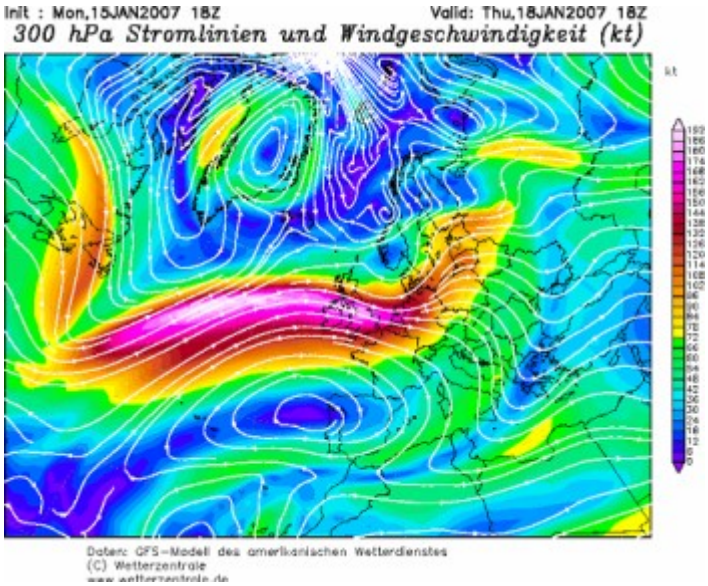


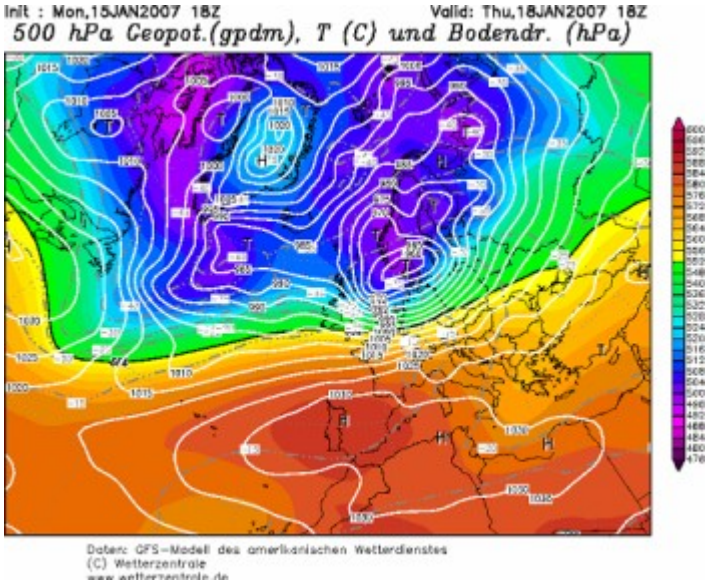
Die Folge aus der Entwicklung war der Ablauf einer selbst verstärkenden Rückkoppelung: Verschärfung der Polarfront – Verschärfung des Jets, Intensivierung der durch Hebung der warmen Luftmassen freisetzbaren Energien, daher Verstärkung des Tiefs…





Am Morgen des 18.01. war in England bereits die Hölle los und in den NL drohte sie sogleich loszubrechen. Das große Tief intensivierte sich kontinuierlich, lokale Teiltiefentwicklungen, abhängig von der Lage des Jets, sorgten für regional besonders heftige Winde, insbesondere die tiefdruckrückseitige Teiltiefentwicklung im Verlauf des Donnerstages verschärfe die Lage in vielen Regionen gegen Abend dramatisch. Man sieht deutlich an der Jetkarte, dass vorne links, in der Region starker Divergenz, Luft nach oben abgesogen wird, der Druck fallen muss – und auch fiel. Hier wurde eine sehr komplexe Entwicklung bereits 3 Tage zuvor äußerst gut erfasst.

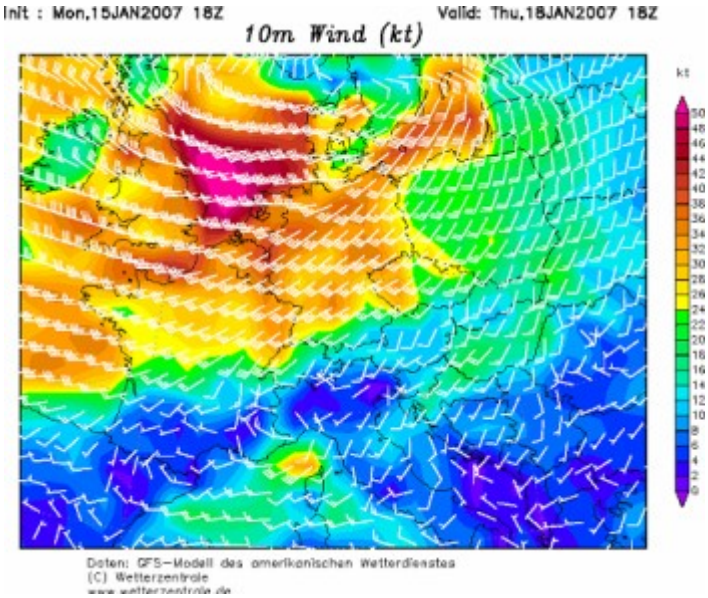




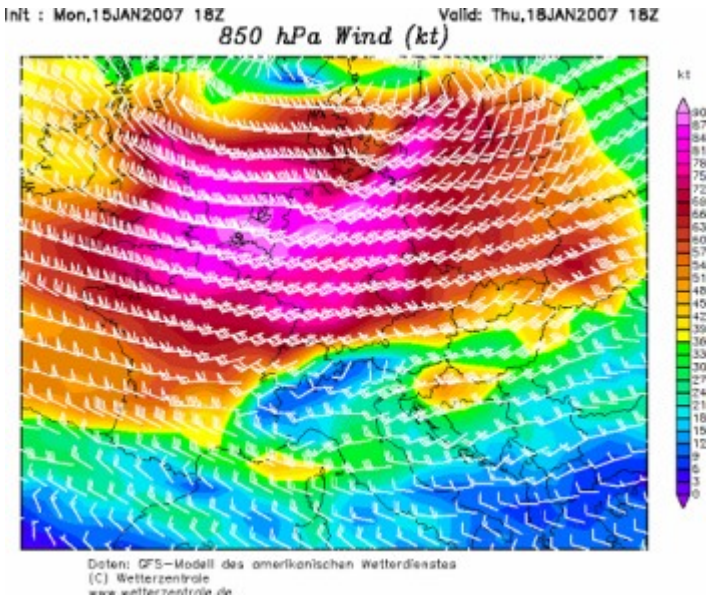
Durch diese Entwicklung wurde die Dauer des Sturmes deutlich in die Länge gezogen. So traten in Amsterdam über gut 14h Orkanböen auf und knapp vor Abziehen des Systems entstanden, durch konvektive Umlagerungen, in der kalten Rückseite noch einmal so richtig heftige Böen, die vielen, bereits geschwächten Dingen den Rest gaben.

Außerdem waren diese Kaltluftgewitterböen in einigen Regionen Norddeutschlands die Stärksten des Systems überhaupt. In den höheren Lagen des Sauerlandes und des Erzgebirges traten flächige Totalschäden auf.

Ausführliche Bildberichte verlinkt unter:
http://www.saevert.de/kyrill.htm



Bei küstennahen Windgeschwindigkeiten von 50kn Mittelwind (in Amsterdam auch gemessen)…



…und über 90kn 850ger Wind (ob des niedrigen Luftdrucks nur in 1000m Höhe gelegen), bei bereits beginnender Konvektion, darf man sich über die entsprechenden Schäden, insbesondere in erhöht - exponierten Lagen nicht Wundern.

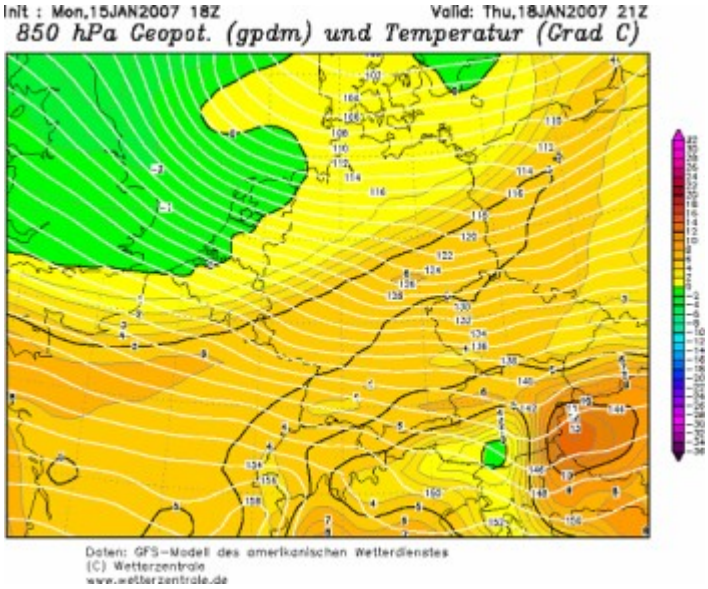
Die Waldschäden, aber auch einzelne Messwerte (Brocken, z.B. 198 km/h, Fichtelberg Erzgebirge 183 km/h) bestätigen flächige F2/T4 Schäden, lokal ggf. T5-Spitzenwerte und Maxböen von deutlich über 200 km/h.

Die sehenswerte Verifikation der Unwetterzentrale Deutschland zeigt sogar, dass diese extremen GFS – Werte noch untertrieben waren, praktisch alle betroffenen Bereiche erfuhren 850ger Winde von über 100kn, vielerorts als Böen zu Boden gemischt.

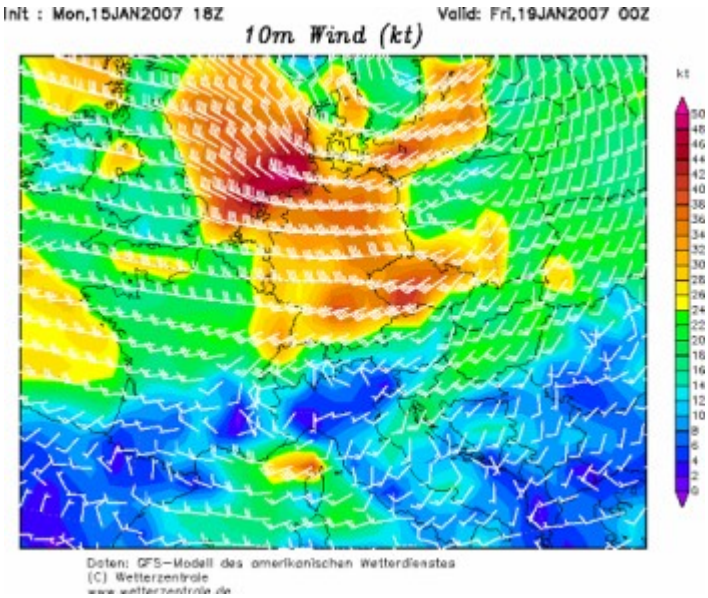
http://www.unwetterzentrale.de/uwz/spezial/sturm06/kyrill.html

In Österreich war zu dieser Prognose, 3 Tage vor Eintreffen der Situation noch Ruhe zu erwarten und auch dieses Detail stimmte äußerst gut mit der Realität überein, wie die genaue Analyse von Felix weiter unten zeigen wird.

Dafür ließen jedoch äußerst warme 850ger Werte und beginnender stürmischer Föhn sehr hohe Temperaturen erwarten und tatsächlich, es fielen Rekorde. Mitten in der Nacht erwärmte sich der Osten auf bis knapp über 20°C, knapp bevor der Sturm den Höhepunkt erreichte.



Bei Mittelwinden von bis zu 40kn in exponierten Lagen des Mühl- und Waldviertels, sowie später entlang der Donau und im Alpenvorland, war mit Ärger zu rechnen. Trotz der vorerst recht stabilen Warmsektorlage war mit Orkanböen ob der gerechneten 80kn (tatsächlich 90) in der 850ger Schicht zu rechnen, zu sehr verwirbelt die Topographie die Luftströmungen.



Und wieder wurden entsprechende Böen bis über 150 km/h in den Tälern und bis über 200 km/h auf den Bergen gemessen, fernab des Tiefdruckzentrums, fernab der größten Isobarendrängung. Ein Lehrbuchbeispiel für den Einfluss der Topographie auf das Wetter. Durch die Windkanalisierung bekam Österreich Sturmböen und Schäden ab, die ansonsten in dieser Form nur im Norden Deutschlands zu finden waren.

Wer nun diesen Prognosebereicht, mit eingestreuten Verifikationen, mit dem exakten Bericht der Abläufe vergleicht, den Felix präsentiert, der wird erkennen, dass GFS, genauso wie die Mehrheit der anderen Modelle, dieses herausragende Ereignis bereits viele Tage zuvor, in fast allen Details hochgradig exakt, vorhergesagt hat.
Ein seltener Glücksfall, der wesentlich zu den rechtzeitigen und dramatischen Warnungen beigetragen hat.
Aber auch das Beispiel, für eine so lehrbuchhafte Zyklogenese, dass einfach jedes Modell, jeder Meteorologe Tage zuvor absehen konnte, was geschehen würde.

Herfried

B.) Synoptik

Vorwort: Dies ist ein langer Artikel, ein unendlich langer, doch er ist hoch spannend und zeigt die Dramatik, der oben in ihrer Prognose vorgestellten Ereignisse in ihrem realen Auftreten. Ich will dieses Meisterwerk von Felix' nicht kürzen und bitte den Leser daher einfach um Ausdauer, sie lohnt sich.

gesamte Synoptik Felix

18. Januar 2007 -- Superzyklone Kyrill - Synoptik eines zerstörerischen Orkans

Am Donnerstag, 18. Januar 2007 zog vom Nordatlantik kommend ein kräftiges Orkantief über West- und Mitteleuropa hinweg und richtete dabei verbreitet schwere Schäden an. Der Orkan forderte 34 Todesopfer, davon 13 in Deutschland. Erstmals in der Geschichte der Deutschen Bahn wurde dessen Betrieb in ganz Deutschland eingestellt. Dank der ausgezeichneten Modellrechnungen, die den Orkan beinahe einhellig bereits sieben Tage vor dem Eintreffen in unvermindert hoher Stärke prognostiziert hatten, konnten frühzeitige Unwetterwarnungen von Deutschem Wetterdienst und Meteomedia herausgegeben werden, sodass sich die Opferzahlen noch in Grenzen hielten. Dennoch kam es zu erheblichen Schäden auch in den Großstädten, besonders im Ruhrgebiet, aber auch in Berlin, wo die Glasfassade des neu errichteten Berliner Hauptbahnhofs einzustürzen drohte.
Verheerende Folgen hatte der Orkan für die Forstbestände, wo alleine in Deutschland über 20 Millionen Kubikmeter Holz dem Sturm zum Opfer fielen, die größten Schäden entstanden in Nordrhein-Westfalen und in Sachsen. Die Windgeschwindigkeiten erreichten auch im Flachland verbreitet Orkanstärke, in Berlin wurden 146km/h gemessen, in Düsseldorf 144km/h. Die Bergstationen überwanden die 200er-Marke: Wendelstein (1832m) 202km/h, Feuerkogel (1592m) 207km/h und 224km/h am Schweizer Aletschgletscher (Konkordiahütte).
Es war der erste Orkan seit dem 28. Oktober 2002 (Orkantief "Jeanett"), welches ganz Deutschland mit Orkanböen beeinflusste. Im Gegensatz zu Orkan "Lothar" an Weihnachten 1999 waren die verbreiteten Spitzenböen zwar niedriger, aber die Dauer des Sturms bei Kyrill viel länger.
In diesem Artikel möchte ich ausführlich auf die synoptische Entwicklung des Orkans von Neufundland kommend bis zur Auflösung über Osteuropa eingehen. Dabei werden überwiegend Reanalysiskarten von wetter3.de verwendet. Im Anschluss soll die visuelle Entwicklung von Kyrill anhand von Satellitenbildern erläutert werden. Zusätzliches Material in Form von Vertikalsondierungen, Blitzraten und spezielle Vorhersagekarten betreffend konvektiver Unwetter werden ebenfalls verwendet. Schließlich sollen hoch auflösende Radarbilder die Entwicklung an der Kaltfront verdeutlichen.

Gliederung

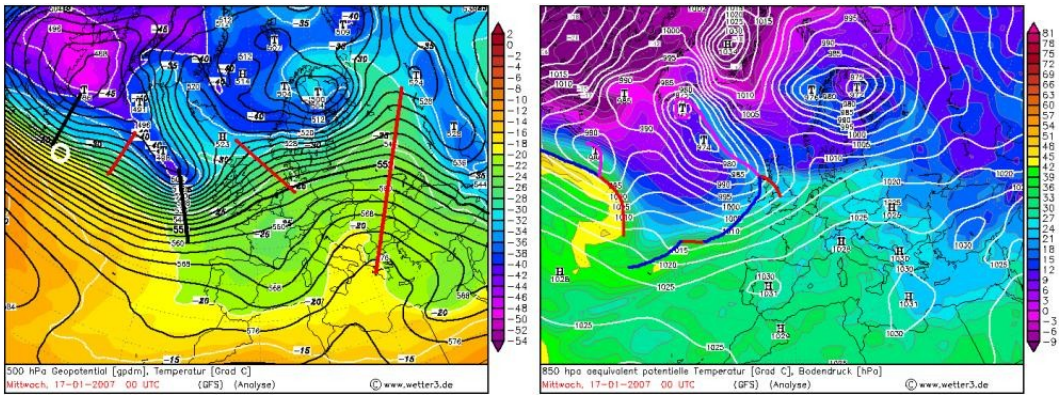
Synoptische Entwicklung von Kyrill (05. Februar 2007)
Kyrill in Satellitenbildern (06. Februar 2007)
Eine sommerliche Kaltfront (07. Februar 2007)
Radaranalyse der Kaltfront (in Arbeit)
War Kyrill vorhersehbar?

1. Synoptische Entwicklung von "Kyrill" - Reanalysis mit Modellkarten

Bei der Kartenauswahl beschränke ich mich auf 850hPa äquivalentpotentielle Temperatur + Bodendruck, sowie 500hPa Temperatur + Geopotential. Quelle für die Karten : Wetter3

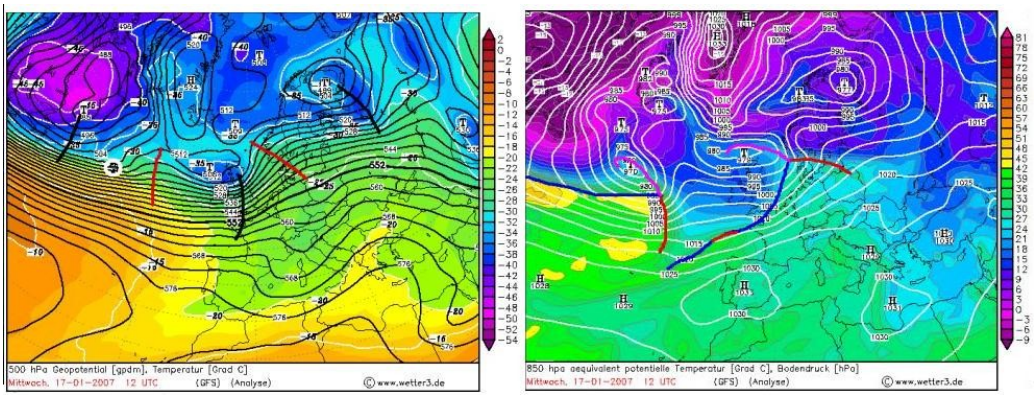
Mittwoch, 17.Januar 2007 - 00 UTC

Die Höhenwetterkarte zeigt eine stark verwellte Höhenströmung über dem Nordatlantik bis nach Nordeuropa, die über Osteuropa von einem langwelligen Keil nach Norden abgelenkt wird. Das Frontensystem über den Britischen Inseln befindet sich klar vorderseitig der Trogachse, was dessen Wetteraktivität erheblich verstärkt. Es gehört zu einem Tiefdrucksystem über dem Nordatlantik südlich von Grönland. Die Kaltfront geht in eine Welle über, die anhand der ausgebuchteten 1015hPa-Isobare gut erkennbar ist. Mitteleuropa befindet sich zu diesem Zeitpunkt in einer schwachen Südweststrømung - über der südlichen Nordsee bis zur Ostsee schleift eine wellende Kaltfront des Finnlandtiefs.
Das "Kyrill" getaufte, ausgedehnte und sehr energiereiche Bodentief mit 986hPa östlich von Neufundland liegt knapp vor der Trogachse und damit unter schwacher zyklonaler Vorticityadvektion, was eine Vertiefung am Boden zur Folge hat. Darüber hinaus verlagert es sich rasch südostwärts, da nahe der Jetachse in einer intensiven Strömung eingebettet. Das Tief ist bereits schwach okkludiert.



Mittwoch, 17.Januar 2007 - 12 UTC

Zwölf Stunden später hat sich das Bodentief deutlich auf 970hPa vertieft und weist nun eine eingeringelte Okklusionsfront auf. Am Okklusionspunkt sind die Linien gleicher äquivalentpotentieller Temperatur deutlich weniger gedrängt als an der Kaltfront weiter stromaufwärts bzw. an der Warmfront. Des Weiteren befindet sich das Bodentief (siehe weißer Kreis) recht weit von der Trogachse östlich von Neufundland entfernt und bereits recht nahe am Höhentrog mit hoch reichender Kaltluft. Eine derartige Position lässt aus quasigeostrophischer Sicht vermuten, dass in Kürze der Höhepunkt der Tiefdruckentwicklung erreicht ist.
Weiterhin wetteraktiv mit kräftigen Regenfällen ist die Kaltfront des Tiefs bei Schottland, die in einem Bereich starker zyklonaler Vorticityadvektion trogachsenvorderseitig liegt. Die Südwestströmung nimmt nun besonders über Westdeutschland und Benelux allmählich zu. Am Nachmittag werden in Böen verbreitet Bft 6-8 erreicht, teilweise treten mit Kaltfrontdurchgang schwere Sturmböen auf.



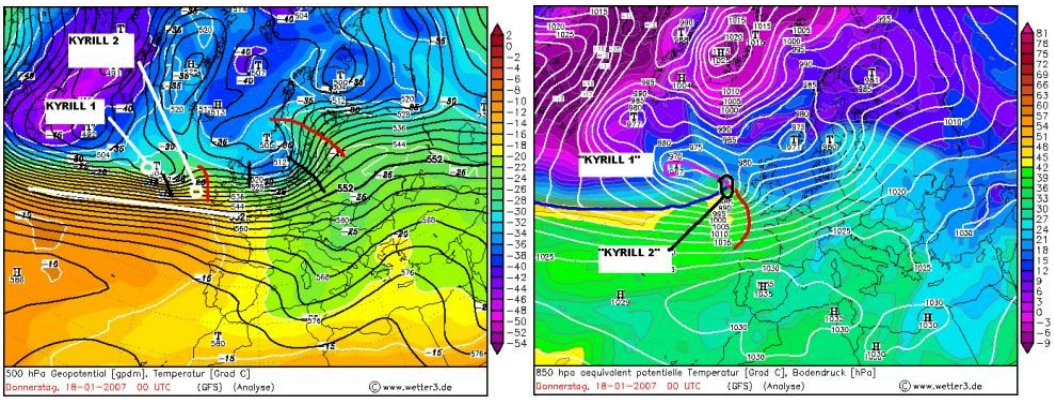
Donnerstag, 18.Januar 2007 - 00 UTC

In der Nacht zu Donnerstag vollzieht sich eine entscheidende Entwicklung am Okklusionspunkt von Bodentief "Kyrill":
Das bisher betrachtete Bodentief **Kyrill 1** okkludiert weiter und bildet einen separaten Höhentiefkern aus. Wie aus der 500hPa-Karte ersichtlich liegt das Bodentief nun bereits **rückseitig** der Trogachse. Daraus lassen sich zwei Auswirkungen schlussfolgern:

1. Das Bodentief füllt sich auf
2. Das Bodentief bleibt stationär

Rückseitig der Trogachse erfährt das Bodentief antizyklonale Vorticityadvektion und damit einen Druckanstieg am Boden. Durch die Lage nahe des Höhentiefkerns verlagert es sich nicht mehr ostwärts, sondern wird zunehmend stationär. Sein tiefster Druck wurde folglich mit etwa 967hPa erreicht. Der Okklusionspunkt jedoch befindet sich klar **vor** der Trogachse und zudem im linken Auszug des Jetstreams, daraus resultiert starke zyklonale Vorticityadvektion bzw. die stärksten Aufwärtsbewegungen. Infolge der Position näher an der Jetachse verlagert sich das am Okklusionspunkt entstandene **Rand- oder Teiltief** rasch ostwärts. Dieses Randtief, **Kyrill 2**, ist der eigentliche Orkan Kyrill, der Mitteleuropa heimsuchte.

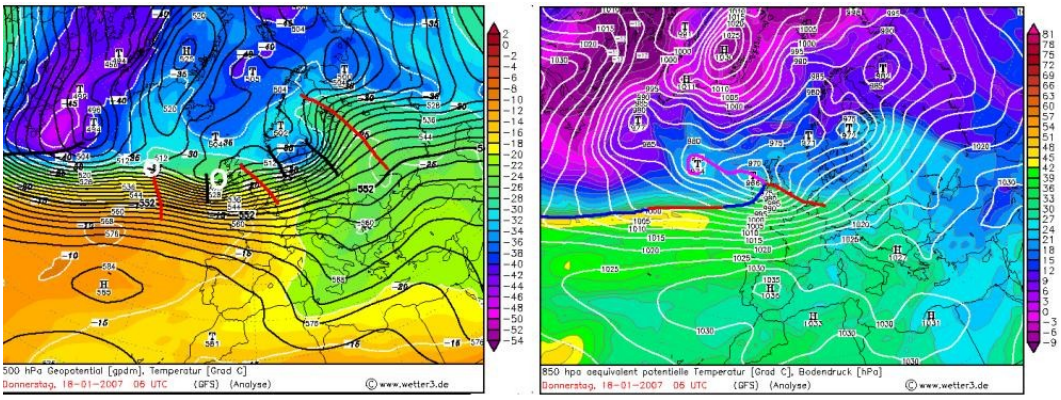
Im zweiten Teil der Analyse werde ich die Faktoren der Teiltiefbildung anhand der zugehörigen Satellitenbilder noch näher erläutern.



Donnerstag, 18.Januar 2007 - 06 UTC

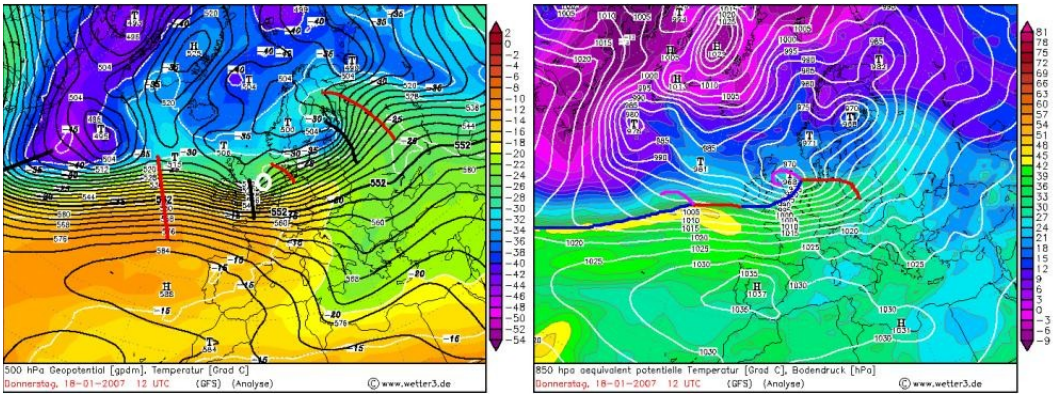
Sechs Stunden später hat Kyrill Irland erreicht. Der Kerndruck ist von etwa 970hPa am Okklusionspunkt auf 966hPa gefallen. Die Okklusionsfront des "alten" Kyrills löst sich langsam von der neuen Okklusionsfront ab. Der Kerndruck von Kyrill 1 ist von 967hPa auf 974hPa gestiegen, als Resultat der vorher erwähnten antizyklonalen Vorticityadvektion. Das ehemals zugehörige Höhentief ist ostwärts weiter gezogen. Kyrill liegt weiterhin vor einer markanten Trogachse mit intensiven Hebungsvorgängen. Die westsüdwestliche Strömung

nimmt mit Annäherung des Orkantiefs in allen Höhenschichten zu. Das Maximum der Strömung wird bis zu diesem Zeitpunkt zunächst im Warmsektor über Südengland erreicht. Dort erreicht Kyrill auch im Tiefland Orkanstärke.
Die in der Poebene lagernde Kaltluft begünstigt bei gleichzeitig einsetzender Warmluftadvektion nördlich der Alpen sowie starkem Druckfall dort eine zunächst hoch reichende, später seichte Südföhnströmung über die Alpen. Welche Auswirkungen dies für besonders für Innsbruck hatte, habe ich in einer separaten Fallstudie erläutert.



Donnerstag, 18.Januar 2007 - 12 UTC

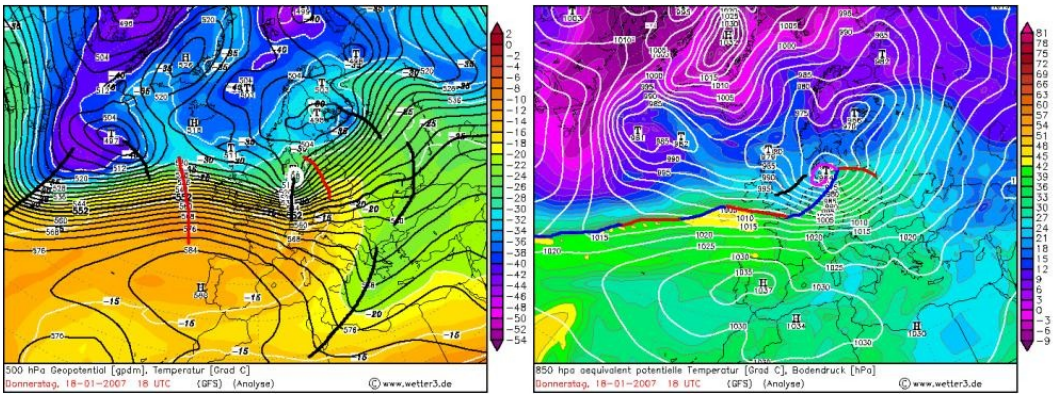
Weitere sechs Stunden später hat sich das Orkantief bereits zur Doggerbank verlagert. Der Kerndruck ist dabei nur um wenige Hektopascal gefallen. Dies ist einer der Besonderheiten dieser Orkanlage, da das Tiefdruckgebiet bereits weit vor Eintreffen in Mitteleuropa voll entwickelt war. Im Gegensatz dazu erfuhr etwa Orkan Lothar 1999 seine rasante Vertiefung erst über Westeuropa (200er Falltendenzen).
An der Kaltfront bildet sich ein starker Luftmassengradient aus - zusätzlich ist sie in die stärkste und hoch reichende Strömung eingebettet. Drittens liegt sie knapp vor der Trogachse, ebenso wie das Bodentief, mit einem Jetstreak in 500hPa, der über 100Kn erreichte. Bessere Voraussetzungen für heftige, vertikale Umlagerungen und konvektive Unwetter konnte es nicht geben. Bereits im Warmsektor sind die Isobaren sehr dicht gedrängt - im Erzgebirge sowie im angrenzenden Flachland Sachsens wurden trotz vermeintlich stabiler Warmluftschichtung Orkanböen erreicht. Ursache hierfür waren hydraulische Effekte, die leeseitig des Erzgebirgskamms die immensen Höhenwinde von 70-80Kn in 850hPa bis zum Boden herabtransportierten. Sonst wurden im Flachland verbreitet Bft 9-10, im äußersten Südwesten einzelne 11er registriert. Über Benelux und Südengland tobte der Orkan bereits im Warmsektor, und dann mit der durchgehenden Kaltfront am Heftigsten, um nachmittags im Trogsektor erneut aufzuleben. Amsterdam meldete um 12 UTC im Warmsektor eine 130km/h-Böe, während des Kaltfrontgewitters traten mehrere 120+ km/h Böen auf, Abends und in der ersten Nachthälfte traten während des Durchzuges von Kaltluftschauern erneut 120+ Böen auf.
An der Kaltfront selbst bildete sich westlich von Irland eine lang gestreckte Welle aus, die Tendenzen zu einer Okklusion (angedeutet) zeigte. Auch weiter stromaufwärts verwellte die Kaltfront weiter, zunächst noch ohne markantere Vertiefungstendenzen.



Donnerstag, 18.Januar 2007 - 18 UTC

Um 18 UTC erreicht der Orkan seinen Höhepunkt über der westlichen Ostsee. Die Kaltfront erstreckt sich quer über Deutschland von Nordost nach Südwest. Die zugehörige Trogachse liegt über Westdeutschland - die Kaltfront somit vorderseitig unter stärkstem Hebungsantrieb. Der wetteraktivste Teil mit den Gewittern und schweren Orkanböen lag jedoch über dem Norden und Osten Deutschlands, wo sich die Höhenkaltluft befand. Dem ist es zu verdanken, dass die Kaltfront nicht ganz Deutschland überquerte bzw. im äußersten Südwesten zumindest im tiefen Flachland keine extremen Orkanböen erreicht wurden. Dennoch lassen die Böen-Meldungen für 18 UTC aufhorchen. 144km/h in Düsseldorf, 133km/h in Chemnitz sowie ein starker Tornado in Wittenberg kurz zuvor. Auch sonst wurden verbreitet schwere bis orkanartige Sturmböen gemeldet, z.T. Orkanstärke, besonders im Nordwesten, wo die Schäden so riesig waren, dass in einzelnen Landkreisen Katastrophenalarm ausgerufen wurde und einzelne Dörfer von der Außenwelt abgeschnitten waren. In Teilen Ostdeutschlands fiel mit Durchgang der Kaltfront teilweise stundenlang der Strom aus. Mehr zur Kaltfront dann im dritten Teil dieser Analyse.

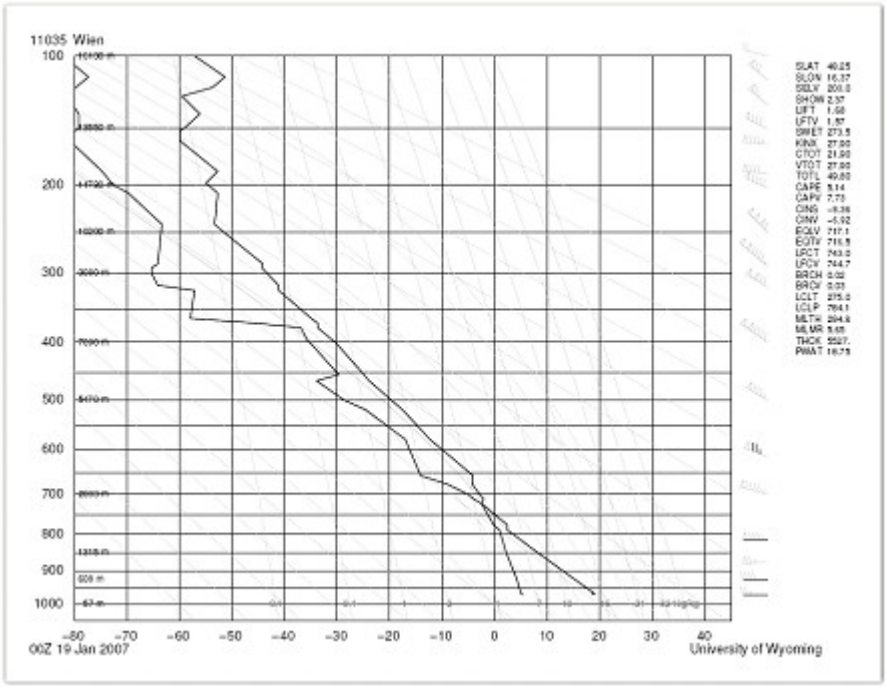
Rückseitig der Kaltfront nähert sich eine Troglinie, die nochmals Orkanböen und kräftige Schauer, jedoch keine Gewitter mehr hervorbrachte. Die Wellenbildung südwestlich von Irland schwächte sich wieder ab, stromaufwärts folgt aber eine weitere Welle nach, die im Bereich starker Luftmassengegensätze liegt - zudem vorderseitig eines langwelligen Troges südlich von Neufundland günstig für weitere Druckvertiefung gelegen.



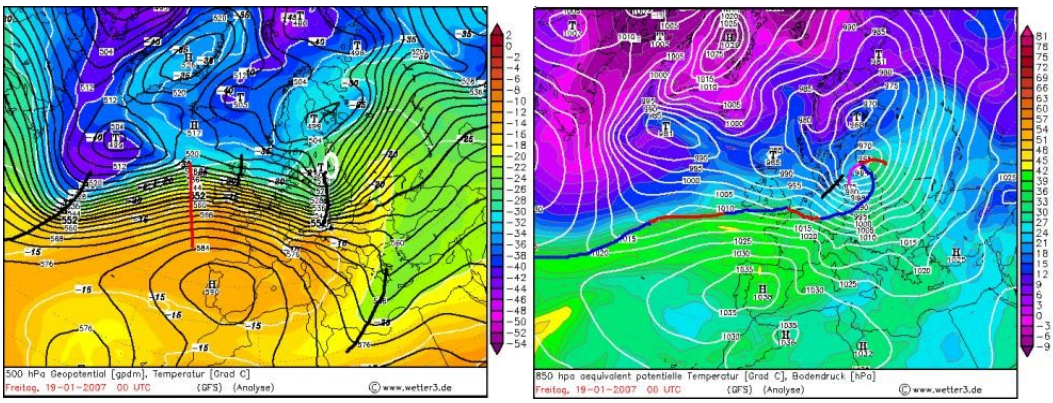
Freitag, 19.Januar 2007 - 00 UTC

Orkantief Kyrill liegt mit nahezu unverändertem Kerndruck (tiefster Kerndruck war 964,8hPa) über der Danziger Bucht. Die Kaltfront zieht unter ganz allmählicher Abschwächung weiter südostwärts. Auch Tschechien, Nord- und Ostösterreich werden mit Orkanböen beeinflusst, die teilweise, durch die Kanalisierung der Luftströmungen an den Alpen, sowie durch Leeeffekte Norddeutsches Ausmaß erreichen, die Gewitteraktivität lässt dabei langsam nach. In

der Höhenwetterkarte ist die Ursache für die nur langsame Auffüllung des Bodentiefs ersichtlich - denn der Kern liegt noch vor der Trogachse, wenn auch nahe am Kern. Die Strömung dreht trogrückseitig auf nordwestliche Richtungen. Eingelagert ist eine schwache Welle, die besonders über Südwest- und Süddeutschland ergiebige Regenfälle verursacht. Die intensive Nordwestströmung mit 60Kn in 700hPa führt zu einer massiven Nordföhnlage in Norditalien und Ostösterreich, die 850hPa-Temperaturen steigen dabei auf über 15°C an, bodennah wurden in Ostösterreich in der Nacht auf Freitag 20°C, in Italien am Freitag bis über 25°C erreicht. Weiter stromaufwärts vertieft sich die zweite Welle weiter - aus der später Sturmtief "Lancelot" hervor wuchs.



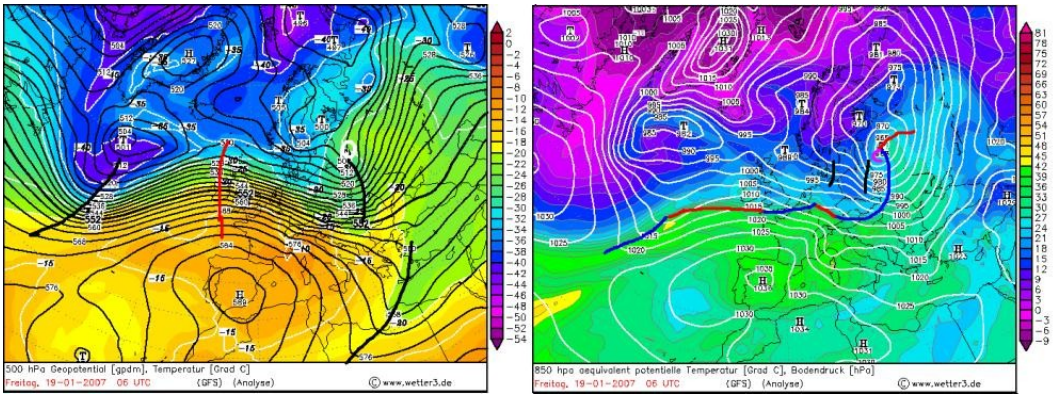
Der Radiosondenaufstieg von Wien zeigt deutlich das nahezu labile Heruntermischen der warmen Höhenluft, sowie die jet-bedingte dramatische Windzuname nach oben hin, die dann bei Durchzug der Front auch die heftigsten Böen bewirkte.



Freitag, 19.Januar 2007 - 06 UTC

Am Freitagmorgen hat sich Orkan Kyrill weiter nach Westrussland verlagert. Über weiten Teilen West- und Mitteleuropas tritt vorübergehend eine Wetterberuhigung ein. Die Kaltfront ist nun deutlich aus dem Höhentrog herausgelaufen, die nachfolgende Welle dämmt die kon-

vektive Aktivität zunehmend ein. Da die südlich der Alpen durch Nord bzw. Westföhn erwärmte Luftmasse viel wärmer als jene im Warmsektor der Welle ist, kommt es zu starkem Nordföhn in Innsbruck - mit bis zu 101km/h Spitzenböen allerdings schwächer als noch am Vortag erwartet (siehe Fallstudie).
Kyrill zieht im weiteren Verlauf langsam zur Karasee nördlich von Russland und füllt sich dort bis zu seinem Tode auf.



2. Kyrill in Satellitenbildern

Zunächst erfolgt eine chronologische Rückschau mit den IR-Satellitenbildern der FU-Berlin, im Anschluss exemplarisch verschiedene Satellitenbilder zu verschiedenen Stadien des Orkantiefs.
Die Entwicklung des Orkantiefs fußt auf einer **Teil- oder Randtiefbildung am Okklusionspunkt**, engl. **secondary cyclogenesis at the triple point**.
Diese Randtiefentwicklungen lassen sich anhand der folgenden Faktoren recht gut in den Modellkarten sowie im Satellitenbild nachweisen:

die Okklusionsfront ist bereits deutlich **eingeringelt**
der Tiefdruckkern liegt auf der **kalten Seite** des Jetstreams im Trogsektor
die Wolkenobergrenzen der Okklusionsfront sind dadurch **abgesunken**, das barokline Blatt hingegen weist hingegen noch hoch reichende Bewölkung auf
der linke Jetauszug und Okklusionspunkt **fallen zusammen**
der Okklusionspunkt liegt dadurch **vor der Trogachse** unter starker (differentieller) zyklonaler Vorticityadvektion

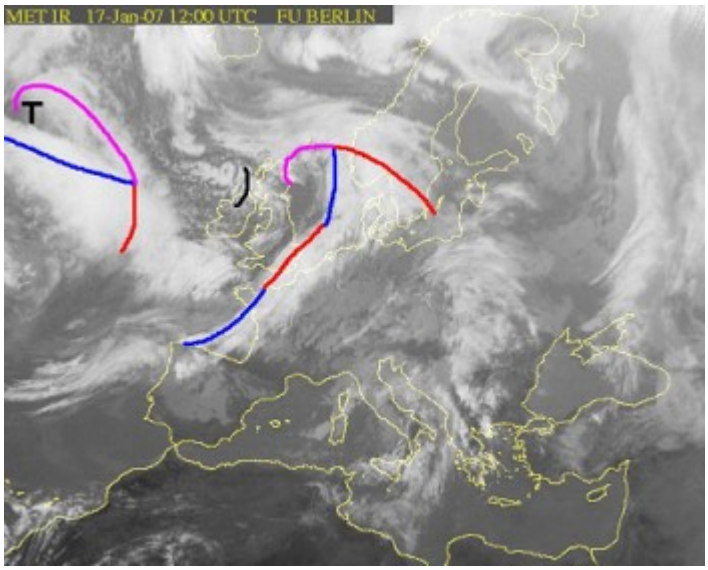
Aus der vorherigen synoptischen Analyse war die Position des Bodentiefs achsensenkrecht zum Höhentief ersichtlich, welche die stationäre Lage von **Kyrill 1** bestimmte. Der Okklusionspunkt, an dem **Kyrill 2** entstand, lag hingegen klar vorderseitig des Höhentiefs unter PVA sowie näher an der Jetachse, was eine rasche Ostwärtsverlagerung unter Vertiefung des Kerndrucks begünstigte.

IR-Satellitenbilder der Freien Universität Berlin - Chronologie der Entwicklung von "Kyrill [2]"

17. Januar 2007 - 12 UTC

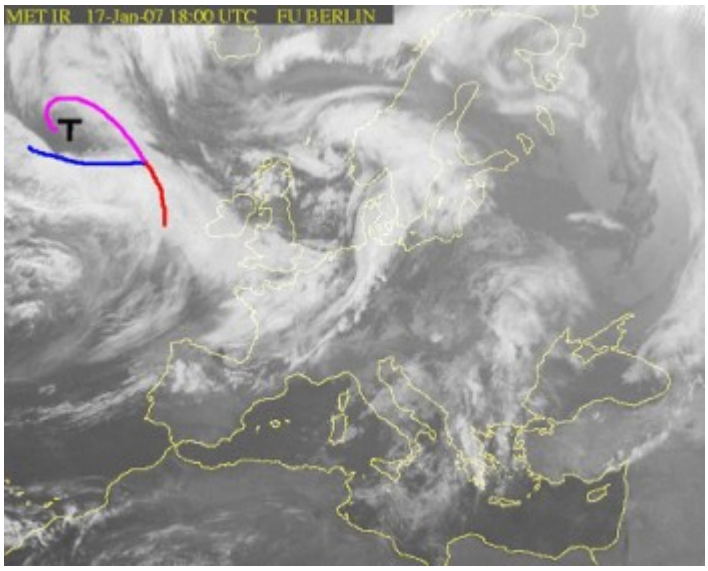
Zum Mittag des 17. Januars dominierte zunächst der Tiefdruckwirbel über der Nordsee das Wettergeschehen in Westeuropa. Stromaufwärts von Irland liegt Kyrill mit einem scharfkantigem **baroclinic leaf**, das an der Nordseite die typische Wolkengrenze aufweist und nach Süden ausgefranst ist. Das baroclinic leaf manifestiert sich als ein **warmes Förderband** (*warm conveyor belt*), das in der mittleren und oberen Troposphäre (600-300hPa) aufsteigt und breitflächig kondensiert. Die Wolkenobergrenzen liegen dadurch recht weit oben - im Gegen-

satz zur Okklusionsfront, die hier etwas niedrigere Wolkenobergrenzen aufweist. Sie entstand durch ein zweites, warmes Förderband, das bereits in der unteren und mittleren Troposphäre (900-700hPa) nach oben steigt und durch seine Lage kaltseitig der Frontalzone als **kaltes Förderband** (*cold conveyor belt*) bezeichnet wird.
Die Okklusionsfront liegt parallel zum frontalen Wolkenband, ist aber nach Westen zurück gebogen (*back-bent-occlusion*) und leicht eingeringelt. Der Tiefdruckkern befindet sich damit deutlich westlich vom Okklusionspunkt entfernt in einem fast wolkenfreien Bereich des **Dryslots**, wo stratosphärische Luft stromaufwärts der Trogachse bis in die mittlere und untere Troposphäre absinkt.
Im Vergleich dazu liegt etwa der Kern des Nordseetiefs unmittelbar südwestlich des Okklusionspunktes, die zugehörige **Dry Intrusion (DI)** erstreckt sich vom Eingang des Ärmelkanals über England bis zur Nordsee.



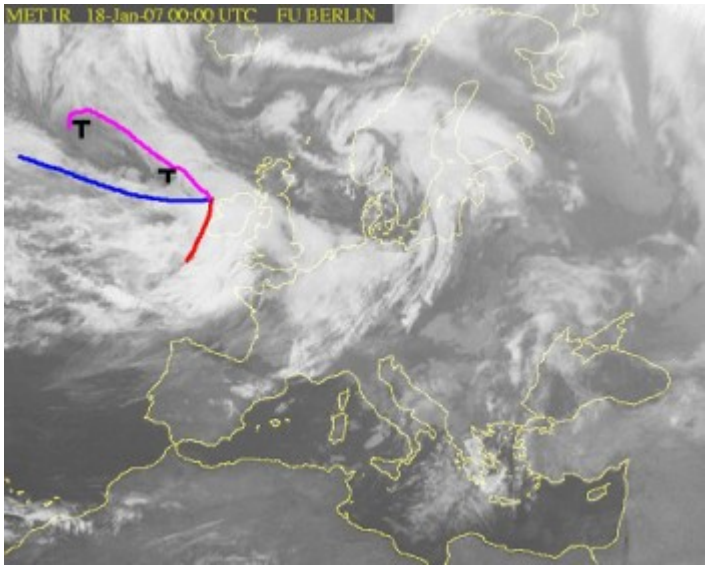
17. Januar 2007 - 18 UTC

Sechs Stunden später hat sich die DI deutlich intensiviert und einen recht dunklen, wolkenfreien Tiefdruckkern von Kyrill 1 erzeugt. Die Vorderkante der DI reicht bis zum Okklusionspunkt und verläuft rückseitig der Kaltfront. Die Position von Warm- und Kaltfront zueinander zeigt eine typische **Warmsektorzyklone** mit breitem Warmsektor, der hier durch das warme Förderband hoch reichend mit regenschwangeren Wolken bedeckt ist. Bemerkenswert in diesem Stadium der Zyklogenese sind die quer zur Höhenströmung verlaufenden Cirren südlich des baroclinic leaf, die von einer außerordentlich hohen vertikalen Windscherung künden. Die Höhenwinde erreichten hier bereits in 500hPa über 150Kn Mittelwind - ein seltener Wert für diese Region.



18. Januar 2007, 00 UTC

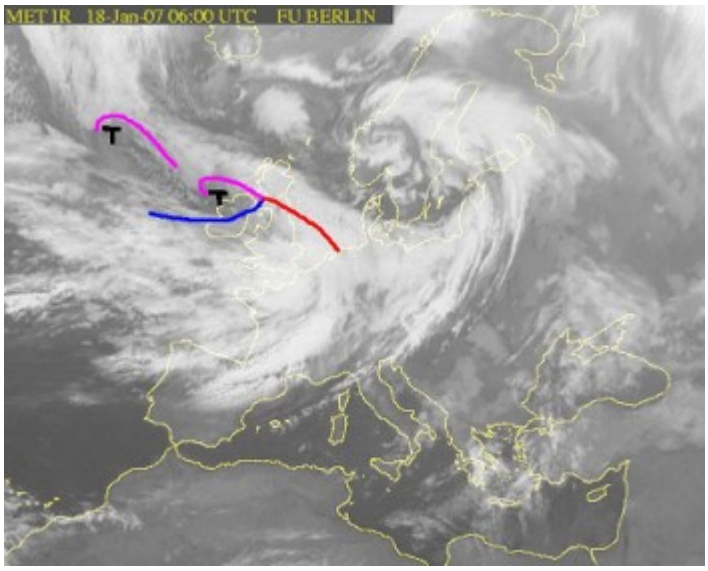
Nach Mitternacht findet der Abspaltungsprozess von Kyrill 2 von Kyrill 1 statt. Die Kaltfront zeichnet sich durch ein schmales, hoch reichendes, aber unterbrochenes Wolkenband ab, während die Warmfront weiterhin an einen hoch reichend kompakten Wolkenschirm gebunden ist. Der Dryslot reicht von Tiefdruckkern von Kyrill 1 bis kurz vor den Okklusionspunkt. Kyrill 1 ist bereits deutlich eingeringelt, jedoch schon in der Abschwächungsphase, was mit der Reanalysis durch die Modellkarten übereinstimmt (Position knapp rückseitig der Trogachse).
Die Okklusionsfront weist westlich des Okklusionspunkt eine weitere, schwach zyklonale Krümmung auf, sodass hierdurch die Position des zweiten Tiefdruckkerns analysiert werden kann. Die 10min-Windkarten untermauern diese Analyse.



18. Januar 2007, 06 UTC

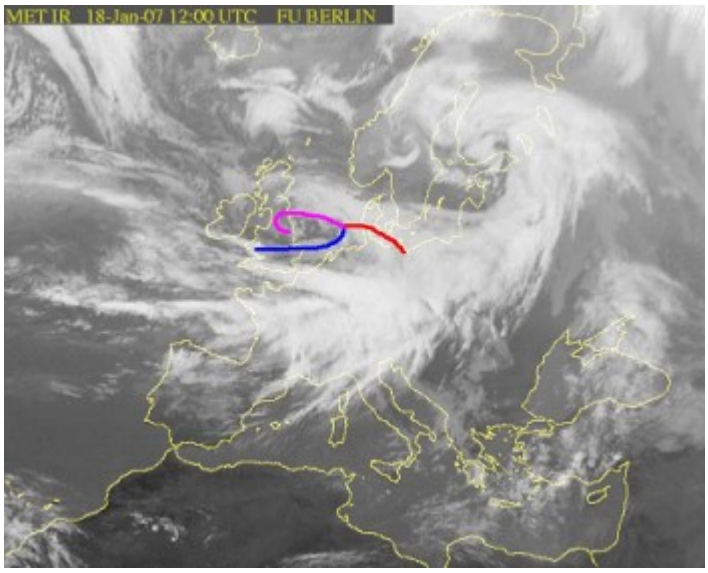
Zwischen Mitternacht und frühem Morgen vollzieht sich eine entscheidende Entwicklung hinsichtlich der weiteren Verlagerung des Systems, der Kaltfrontaktivität und der Spitzenböen im Warmsektor des Orkans. Der Reihe nach....
...das alte Bodentief trennt sich mit seiner Okklusionsfront immer mehr vom neuen Bodentief über der irischen See ab. Der Vergleich mit der Position vor sechs Stunden lässt

keine Zweifel zu, dass es sich jetzt um zwei Tiefdruckwirbel handelt. Wenn man die Ausdehnung von Kyrill 2 betrachtet, dann mag man sich über dessen Größe im Verhältnis zur gesamten Wolkenmasse wundern. Weite Teile des Warmsektors und südlich davon sind Ergebnis eines massiven warmen Förderbandes, das auch für die kräftigen und ergiebigen Regenfälle mit bis zu über 50mm in 24h verantwortlich war.
Das eigentliche Orkantief nimmt nur verhältnismäßig wenig Platz ein und die neue Okklusionsfront ist schmaler, kürzer und rascher eingeringelt als die erste Okklusionsfront. Daraus folgt beinharte Physik - das Trägheitsmoment eines kleineren Wirbels ist geringer als das eines größeren Wirbels. Dementsprechend verlagert es sich auch rascher stromabwärts als ein großer Wirbel. Dies ist der Grund für die rasche Ostwärtsverlagerung von Orkan Kyrill.
Die Verringerung des Trägheitsmoment hat aber zur Folge, dass die Winkelgeschwindigkeit zunimmt - infolge der kräftigen Relativströmung (Höhenströmung) und der Addition der Winkelgeschwindigkeit resultiert das Starkwindfeld südseitig des Tiefdruckkerns im Warmsektor, wo die 850hPa-Winde verbreitet bei 70-80Kn, teilweise bei 90Kn lagen. Das Starkwindfeld war aber zugleich an die Kaltfront gekoppelt, sodass bei konvektiven Niederschlägen mit Orkanböen über 130km/h selbst im Flachland gerechnet werden konnte.
In der zweiten Nachthälfte überströmte die trockene Stratosphärenluft des Dryslots die feuchtwärmeren Luftmassen in der unteren und mittleren Troposphäre an der Kaltfront. Deren Wolkenobergrenzen (cloud tops) sanken dadurch deutlich ab. Resultat dieser Entwicklung war erhebliche **potentielle Instabilität**, die durch die Hebung auf der Trogvorderseite freigesetzt wurde und entlang der Kaltfront kräftige Schauer und Gewitter erzeugte. Zu dieser Entwicklung später mehr im dritten Teil der Analyse.



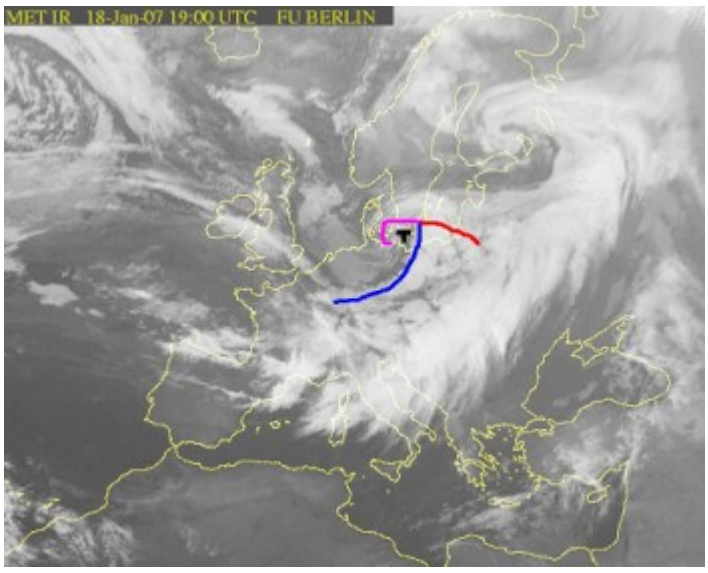
18. Januar 2007, 12 UTC

Zum Mittag des 18. Januars 2007 wirkt die Ausdehnung des Orkanstiefs winzig im Vergleich zum mächtigen Wolkenschild des warmen Förderbandes. Die Kaltfront überquert nun Südengland und London mit Orkanböen, kurze Zeit später treten über der südlichen Nordsee die ersten Gewitter an der Kaltfront auf. Das Überströmen der Kaltfront reicht bis weit in den Warmsektor des Orkans. Auffällig hier auch die schmale wolkenfreie Zone vor der Kaltfront entlang der Küsten.



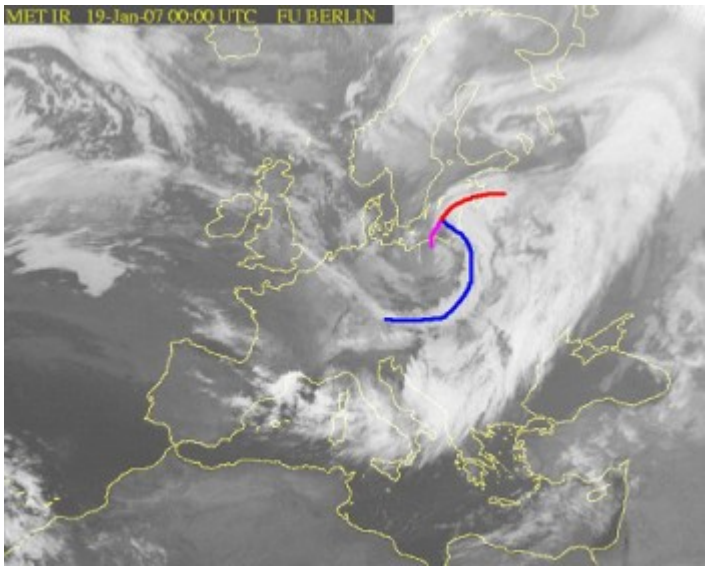
18. Januar 2007, 19 UTC

Zum frühen Abend hin erreicht der Orkan seinen Höhepunkt, was die Kaltfrontaktivität über Mitteleuropa betrifft. Der Kern des Tiefs liegt nun über der westlichen Ostsee. Entlang der Kaltfront bilden sich konvexe Strukturen an der Vorderkante, aber auch an der Rückseite aus, die in Zusammenhang mit einem **Linienechowellenmuster** (*Line Echo Wave Pattern*) stehen. Rückseitig der Kaltfront folgt eine kurze postfrontale Subsidenzzone nach, ehe von der Nordsee eine Troglinie mit kräftigen Schauern und erneuten Orkanböen nachfolgte.
An der Südwestkante der Kaltfront nahm dessen Intensität ab und ging z.T. in skalige Regenfälle in Verbindung mit einer einsetzenden Wellenbildung über, die von der Warmluftadvektion stromaufwärts verursacht wurde. Der Verlauf des stark gekrümmten Jetstreams zeichnet sich gut durch die schmalen Cirrenbänder ("Jetfibres") ab. Bei gekrümmten Jets sind die linken Jetauszüge mitunter verschoben bzw. liegt der gesamte Auszugsbereich dann unter Diffluenz mit Aufwärtsbewegungen. hebungsfördernd war hier jedoch nicht vorrangig die Jetkonfiguration, sondern die starke Krümmung vor der Trogachse, sodass die Kaltfront auch im Satellitenbild über Ostdeutschland seine stärkste Ausprägung erfuhr.



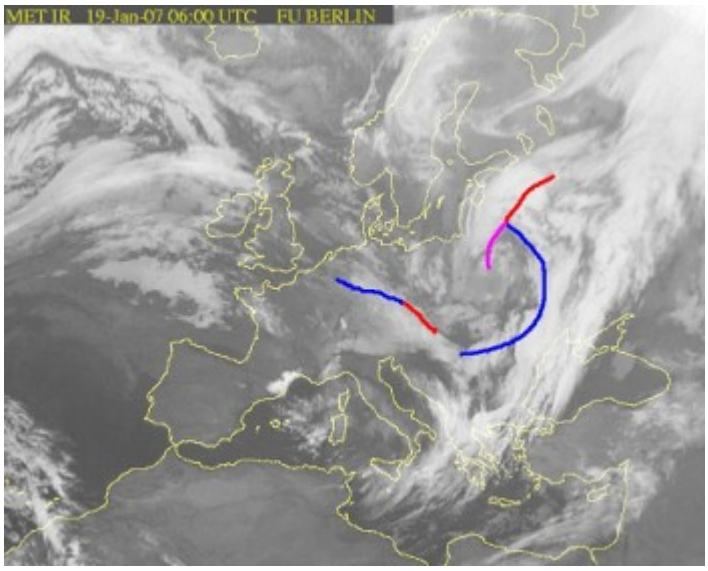
19. Januar 2007, 00 UTC

Gegen Mitternacht hat die Kaltfront Deutschland fast vollständig überquert und nun Nord- und Ostösterreich erreicht. Auch dort treten mit Kaltfrontdurchgang besonders im Waldviertel Orkanböen auf. Dahinter beruhigt sich die Atmosphäre vorübergehend, weitere Schauer gekoppelt an die Troglinie folgen über Norddeutschland nach. Weite Teile Südwest- und Süddeutschlands liegen im Einflussbereich einer schwachen Welle, die von Nordwesten hereinschwenkt. Die starke nordwestliche Anströmung verursacht Staubewölkung entlang der Alpennordseite - im Inntal westlich von Innsbruck bricht kurze Zeit später der Nordföhn durch, südlich des Alpenhauptkamms ist er bereits voll durchgebrochen und hat besonders über der Poebene zur Wolkenauflösung geführt.



19. Januar 2007, 06 UTC

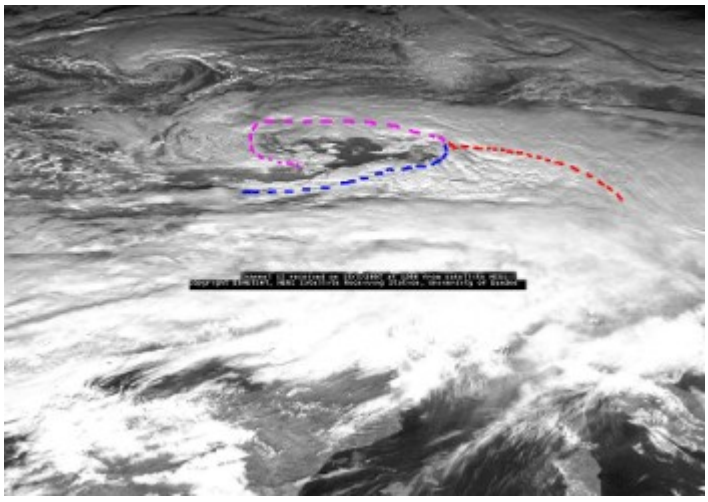
Am Freitagvormittag, den 19. Januar, liegt die Kaltfront über Südosteuropa. Der Orkan schwächt sich nur langsam ab und dreht allmählich nach Nordosten ab. Die nachfolgende Welle führt über West- und Süddeutschland zu teils ergiebigen Regenfällen, der Nordföhn in Norditalien treibt die Höchstwerte dort auf sommerliche 25-27°C. In Innsbruck bricht der Nordföhn drei Stunden später durch und lässt Höchstwerte von über 16°C erreichen, die jene während der vorherigen Südföhnperiode noch überbieten. Die gefürchteten Orkanböen im Inntal bleiben jedoch aus.
Stromaufwärts westlich von Irland deutet sich eine weitere Sturmtiefentwicklung an der ehemaligen Kaltfront von Kyrill 1 an, die später zu Sturmtief Lancelot und erneuten schweren bis orkanartigen Sturmböen besonders nördlich einer Linie Hunsrück-Erzgebirge führt.



Zum Abschluss noch zwei Satellitenbilder von Dundee bzw. NOAA, die das Orkantief in einer höheren Auflösung zeigen:

18. Januar 2007 - 12 UTC - DUNDEE

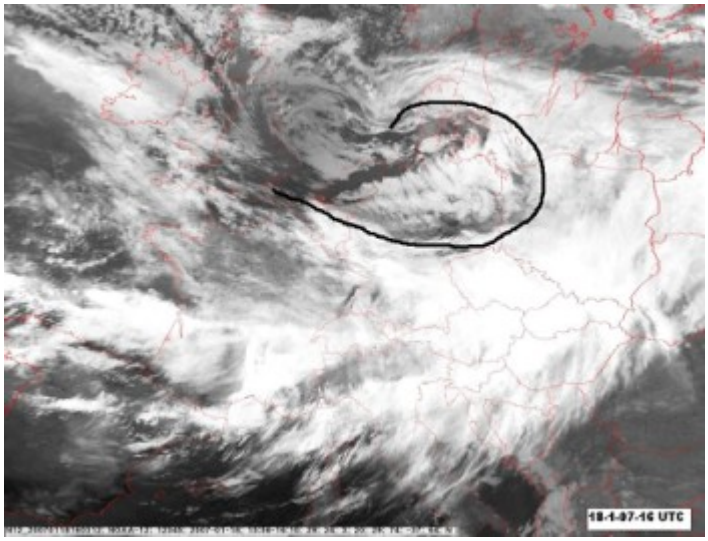
Das visuelle Satellitenbild von EUMETSAT zeigt das Orkantief mit Kern über der Nordsee. Die Okklusionsfront ist an der Ostküste Englands eingeringelt. Die Warmfront verläuft über Dänemark und die Ostsee stromabwärts. Die Kaltfront geht von der südlichen Nordsee bis nach Südengland. Sie ist hoch reichend konvektiv geprägt, ein exemplarischer Ausdruck der großen Mengen latenter Wärme, die durch die Hebung freigesetzt wurden. Weiter südlich sind die Wolkenobergrenzen deutlich höher - hier regnet es im Bereich des warmen Förderbandes kräftig. Die Kaltfront hingegen wurde bereits vollständig von der DI überströmt - wie bereits erwähnt reichte dieses Überströmen bis weit in den Warmsektor hinein. Rückseitig der Kaltfront löste die Stratosphärenluft die Wolken vollständig auf.



18. Januar 2007 - 16 UTC - NOAA

Das IR-Satellitenbild von NOAA wurde am Nachmittag in viertelstündigem Überflug aufgenommen. Der eingerahmte Bereich ist vollständig von der DI geflutet. Die Kaltfront zeigt markante, aneinander gereihte Wabenstrukturen, die eine Nordwest-Südostachse aufweisen, was koinzident zur Höhenströmung ist. Jede dieser "Wabenzellen" brachte Starkniederschläge, Hagel und Microbursts hervor.

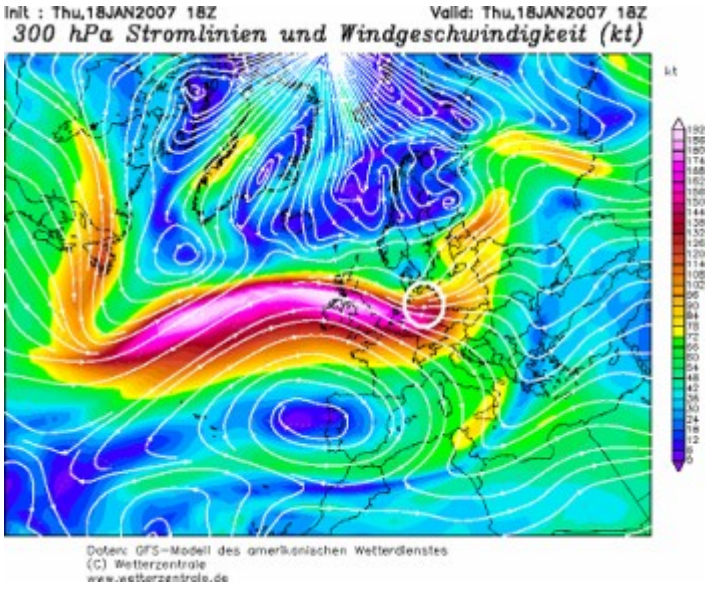
Weiter südlich ging es wesentlich ruhiger zu, auch wenn es dennoch verbreitet schwere bis orkanartige Sturmböen und einzelne Orkanböen gab. Sie erreichten jedoch die flächige Intensität der Kaltfront niemals und die Waldschäden hielten sich somit vor allem in Süddeutschland weitgehend in Grenzen.



3. Eine sommerliche Kaltfront

Orkan Kyrill wies eine Eigenschaft auf, die ihn von vielen Orkantiefs in der Vergangenheit unterscheidet: eine außergewöhnlich wetterintensive Kaltfront mit kräftigen Schauern und verbreiteten Gewittern, die mit Bogenechos, Tornados, bemerkenswert hohen Wolkenobergrenzen und extremer vertikaler Windscherung einherging.
Warum gerade bei dieser Orkanzyklone schwere konvektive Unwetter mit immensen Waldschäden auftraten, soll in diesem dritten Teil über Orkan Kyrill näher untersucht werden.

Hochreichende Feuchtkonvektion ist Folge der drei gleichzeitig vorhandenen Zutaten **Feuchte, Labilität und Hebung**. Feuchteadvektion war durch die nordwestliche Anströmung über den Atlantik und später die Nordsee reichlich gegeben. Hebung ergab sich aus der Lage der Kaltfront vor der Trogachse und im linken Jetauszug:



Die 300hPa-Analysekarte zeigt für Donnerstag, 18. Januar 18z, einen stark gekrümmten, extremen Jetstreak mit bis zu 190Kn Mittelwind in der Spitze. Der stark diffluente Jetausgang liegt dabei über Deutschland, mit dem linken Auszug über Nord- und Ostdeutschland, wo die Kaltfront die größte konvektive Aktivität gezeigt hat. Anmerkung: Man beachte die Detailgenaue Übereinstimmung der Analyse mit der Prognosekarte (siehe oben)

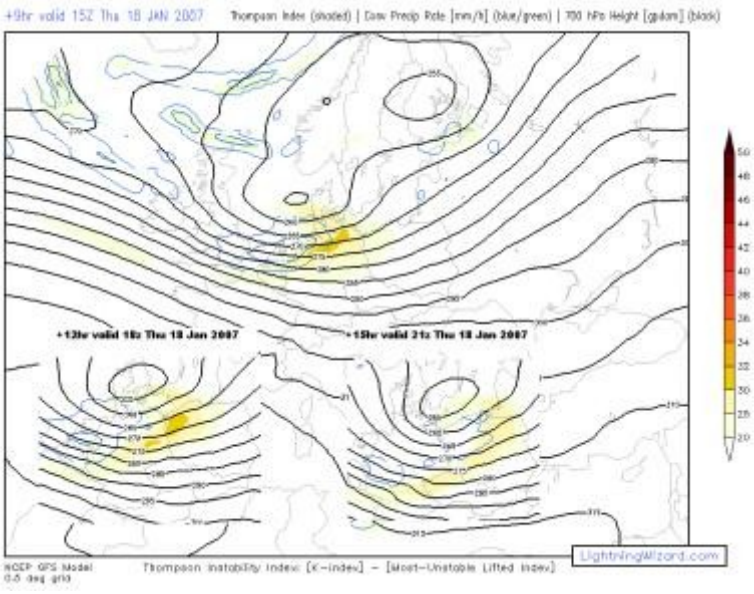
Die Dry Intrusion (DI) brachte zusätzlich hohe Werte isentroper **potentieller Vorticity** in die Zyklogenese ein, die bei Verringerung der Schichtstabilität durch die Hebung zu einer Zunahme der absoluten Vorticity führte. Die fehlende Labilität wurde durch die DI erzeugt, dessen trockene Stratosphärenluft die feuchtwarmen Luftmassen am Boden überlagerte und **potentielle Instabilität** hervorbrachte.

Als erstes Fazit waren alle Voraussetzungen für hoch reichende Feuchtkonvektion gegeben. Jedoch kam noch ein vierter Faktor hinzu - die Windscherung. Sie bewirkte, dass die Gewitter stark in Zugrichtung geschert waren, vorwiegend in der unteren Troposphäre, und dass die hohen Mittelwinde in 850hPa (70-90Kn) bis zum Boden herabtransportiert wurden. Zudem entwickelten sich als Folge der starken Windscherung auch Tornados, wobei derzeit noch ungeklärt ist, ob es sich dabei um klassische mesozyklonale Tornados oder um nichtmesozyklonale Tornados als Folge von **Scherungsinstabilitäten** an der Vorderkante der **Böenfrontlinie** (engl. *Squall line*) handelte.

Die Rückschau der Kaltfront soll in zwei Teile gegliedert werden - zunächst beschreibe ich mit Hilfe der **Lightningwizardcharts von Oscar van der Velde**, welche ich vom Donnerstag, 18. Januar 2007, 6z-Lauf abgespeichert habe, die mögliche Unwetterprognose, die sich auf der Basis dieses Modelllaufes für die Kaltfront abschätzen ließ. Dann gehe ich mit Composit-Satellitenbildern von EUMETSAT sowie IR-Satellitenbildern von der FU Berlin auf den Ablauf der Kaltfront ein. Weiterführend sollen Blitzkarten und auch Radarbilder den genauen Ablauf der Kaltfrontentwicklung verdeutlichen.

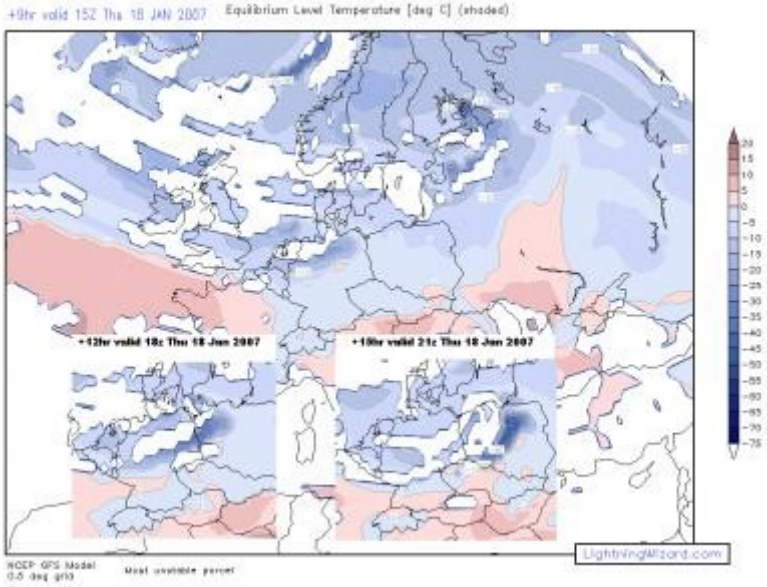
Vorab - Erklärungen zu den Karten 2, 4-8, sind hier auf Deutsch verfügbar. Grundsätzlich gibt es bei der Prognose von Gewittern zwei Verfahren. Einmal über die Verwendung von **Indizes**, das andere Mal über die Betrachtung der oben genannten **Zutaten**. Das zweite Verfahren ist allgemein das vernünftigere, da man die Wetterlage synoptisch und mesoskalig erfassen muss, während man sich bei Indizes allzu schnell auf bloße Zahlenwerte verlässt, die mitunter noch aus mehreren Variablen bestehen, die sich bei (überraschender) Änderung der Wetterlage ebenfalls verändern können.

Karte 1 - Thompson-Index



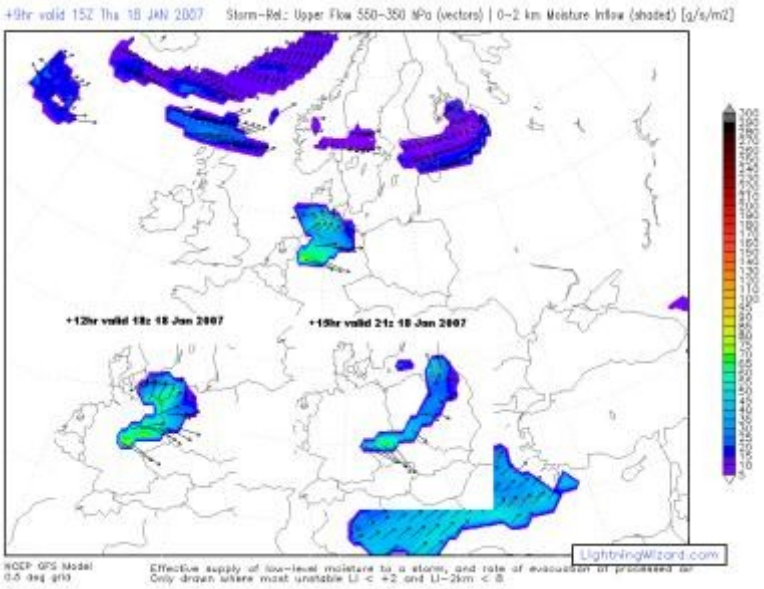
Der Thompson-Index errechnete sich aus der Differenz des K-Index und des Lifted-Index. Er beschreibt grob die vertikale Schichtungsstabilität durch das Verhältnis von Feuchte und Temperaturabnahme in der mittleren Troposphäre und unteren Troposphäre. Gemeinsam (!) mit den folgenden Karten handelt es sich um einen guten Index, um die Wahrscheinlichkeit von Gewittern vorherzusagen.
In der oben stehenden Karte ist der Thompson-Index für die drei Termine Donnerstag, 18. Januar, 15z, 18z und 21z geplottet. Sie zeigen mit Durchgang der Kaltfront ein starkes Signal besonders über Nord- und Ostdeutschland sowie eine starke Abschwächung mit Südostwärtsverlagerung der Kaltfront nach 18z. Gewitter waren also nach dieser Karte im genannten Gebiet sehr wahrscheinlich.

Karte 2 - Equilibrium Temperaturen



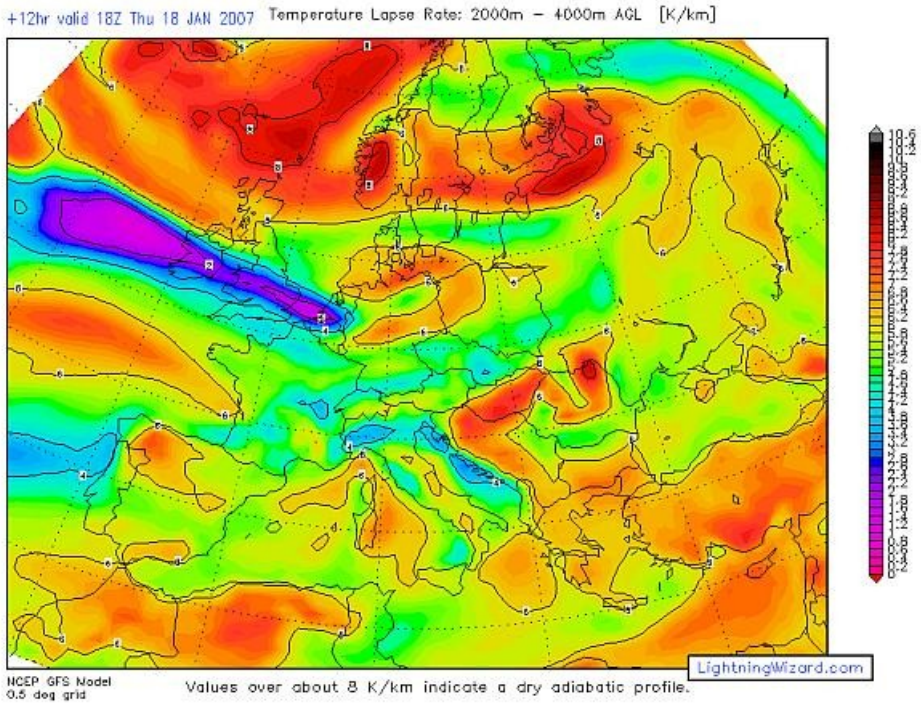
Voraussetzungen für das Plotten der EL-Temperaturen ist die Existenz von CAPE, also potentieller Labilität. Ab unter -10°C sind allgemein Schauer und Gewitter möglich.
Die gerechneten EL-Temperaturen sinken mit Fortschreiten der Kaltfront weiter ab und erreichen -30°C zum 18z-Termin und bis zu -40°C über Polen. Die damit verbundene sukzessive Abkühlung der Wolkenobergrenzen lässt auf weit hoch reichende Feuchtkonvektion mit größeren Labilitätsflächen schließen. Würde es sich dabei um sehr tief reichende Höhenkaltluft handeln, wie sie beim Vorstoß arktischer Kaltluft mit -40°C in 500hPa auftritt, so wäre die CAPE-Fläche eher breit.
Wie man aber anhand der Reanalysiskarten im ersten Teil der Analyse sehen konnte, handelte es sich in der Höhenkaltluft im Bereich von -25 bis -30°C und einem verhältnismäßig hohen Geopotential. Die EL-Temperaturen sind folglich eher in der oberen Troposphäre angesiedelt und die CAPE-Fläche schmal, aber hoch reichend.
Als Schlussfolgerung kann man aufgrund der EL-Temperaturen von sehr hoch reichender Feuchtkonvektion ausgehen, die damit einen sommerlichen Charakter annehmen.

Karte 3 - 0-2km Feuchteeinfluss



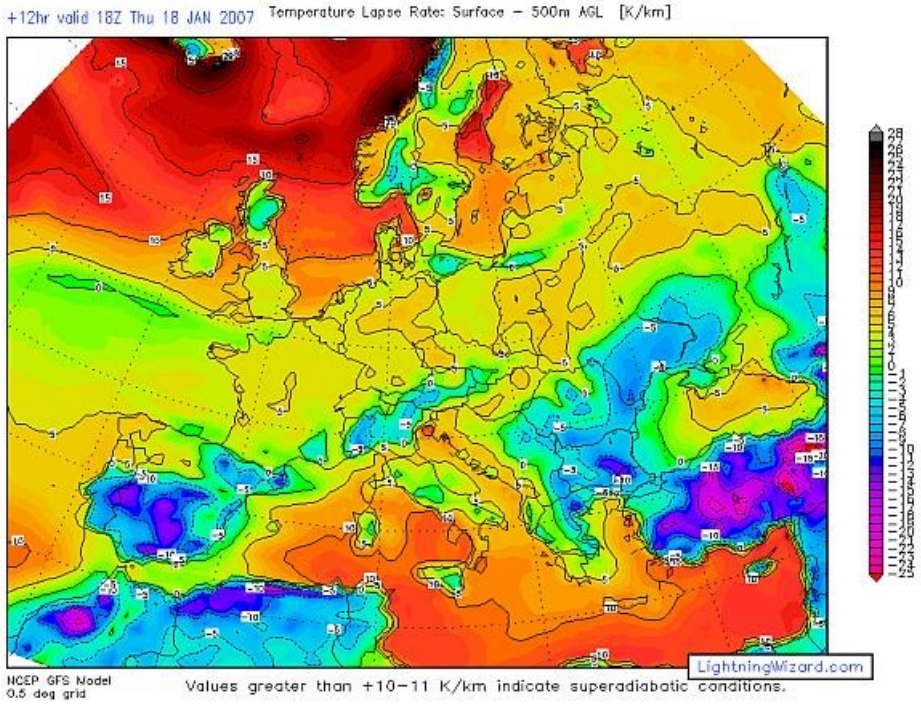
Die 0-2km Moisture Influx-Karten, hier farblich geplottet, zeigen grob die Menge der Feuchte an, welche den untersten 2km (ca. die Obergrenze der konvektiven Grenzschicht) der Feuchtkonvektion zur Verfügung steht. Sie wird nur dargestellt, wenn eine bestimmte Labilität der vertikalen Schichtung gegeben ist. Je höher die Werte, umso besser das Angebot an Feuchte für ein Gewitter.
Die Karten zeigen über weiten Teilen Norddeutschlands mit südostwärts fortschreitender Kaltfront günstige Werte bis zu 80g/s/m². Die Werte sind geschlossen erhöht, also entlang der Kaltfront bis mindestens Thüringer Wald. Dies deckt sich auch mit den Beobachtungen von Gewittern in der Verifikation.

Karte 4 - 2-4km Temperaturabnahmen



Je stärker die Temperaturabnahme zwischen 2 und 4km, umso trockener ist diese Schicht. Ist die darunter liegende Schicht gleichzeitig feuchter, so kann potentielle Instabilität aufgebaut werden und bei synoptischskaliger Hebung freigesetzt werden.
Die Karte zeigt für den Abendtermin einen hufeisenartigen Schwaden etwas trockenerer Luft über Nord- und Ostdeutschland bis nach Westpolen. Die Region deckt sich in etwa mit dem Verlauf von Okklusions- und Kaltfront.

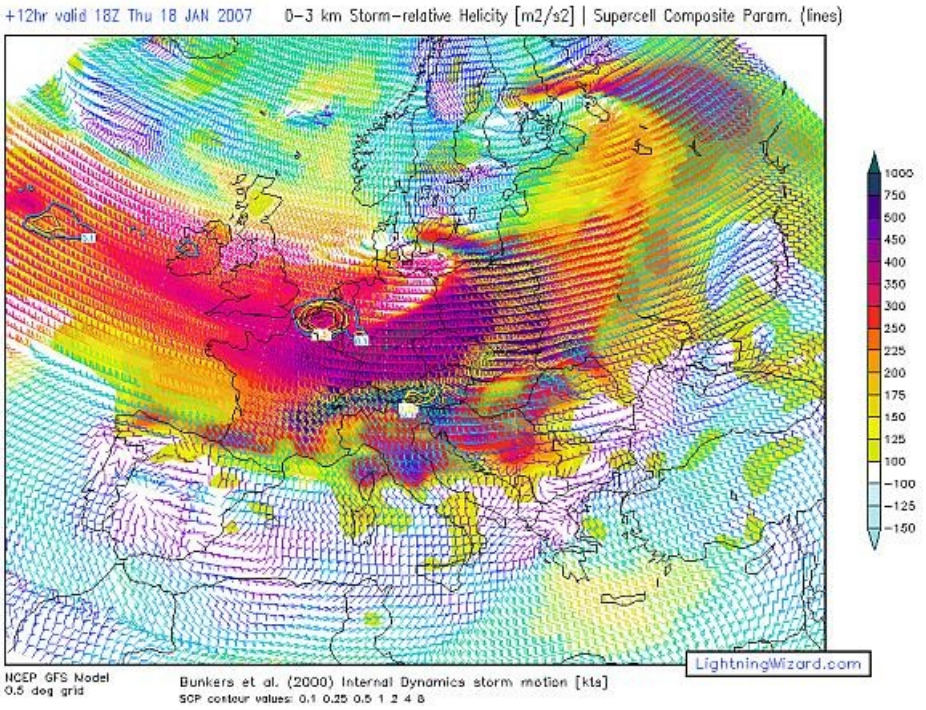
Karte 5 - Temperaturabnahme zwischen Boden und 500m AGL



Die zugehörige Temperaturabnahme für die unterste Schicht über dem Boden zeigt eher schwache Abnahmen im Bereich von 4-5K, was auf eine verhältnismäßig feuchte Schichtung hinweist. Gemeinsam mit den Moisture-Influx-Karten kann man also von einer recht feuchten

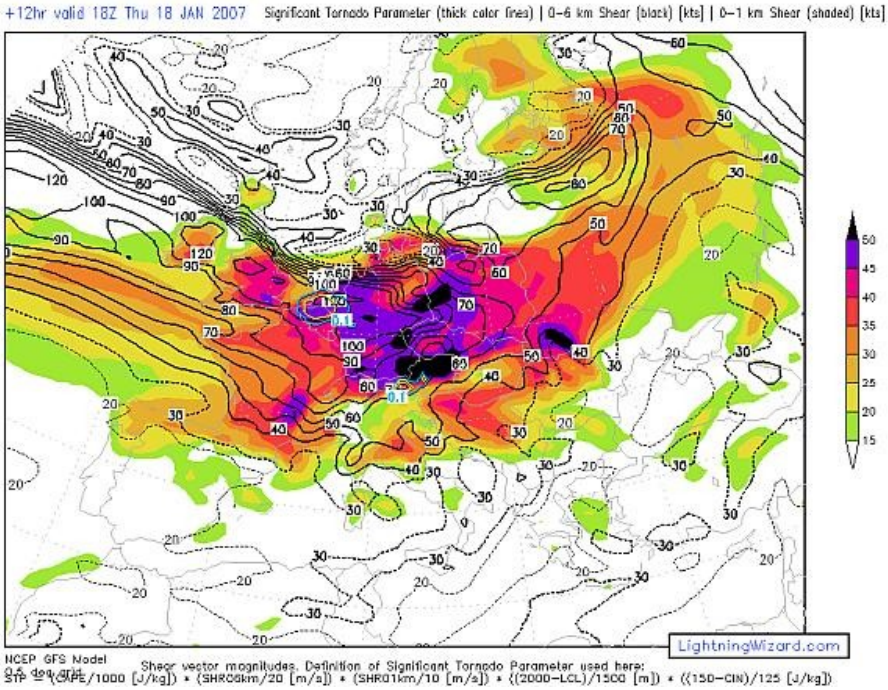
unteren Schicht ausgehen, die von einer etwas trockeneren Schicht in der Höhe überlagert wird. Die Voraussetzungen für **potentielle Instabilität** waren demnach gegeben.
Karten 1 bis 4 unterstreichen damit die Existenz der notwendigen Zutaten von Labilität und Feuchte bei ohnehin gegebenen intensiven Hebungsvorgängen in Zusammenhang mit der durchgehenden Trogachse, dem linken Jetauszug und dem frontogenetischen Antrieb der Kaltfront selbst, die sich als **thermisch direkte Zirkulation** (aufsteigende Warmluft vor der Kaltfront, Bildung eines Kälteteichs im Niederschlagsbereich) manifestierte.
Die weiteren Karten befassen sich mit der vertikalen Windscherung und der potentiellen Gefährdung durch Downbursts und Tornados:

Karte 6 - 0-3km Storm-relative Helicity



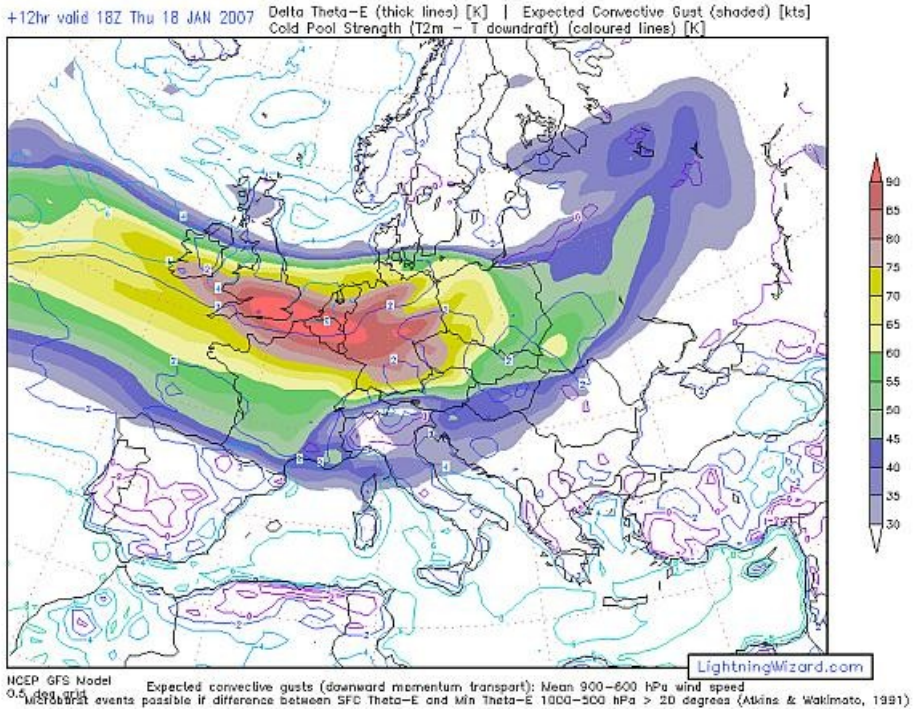
Die Helizität ist ein Maß für das Potential von Superzellen und trägt die Einheit [m²/s²]. Sie beschreibt das Verhältnis der in ein Gewitter einströmenden Luft zu dessen Verlagerungsrichtung, ab etwa 150m²/s² ist die Gefahr von Mesozyklonen gegeben, ab 300 m²/s² können starke Tornados auftreten. Diese Werte sind allerdings jedoch bloße Richtwerte - eine entsprechende Bandbreite ist vorhanden und zu berücksichtigen. Bei rein vorhandener Geschwindigkeitsscherung kann Helizität von der Mesozyklone "gesammelt" werden, wenn sie von der mittleren Führungsrichtung ausschert.
Zum 18z-Termin zeigt die Karte extreme Helizität im Bereich von verbreitet über 400m²/s², in der Spitze bis zu 700m²/s². Wichtig ist die Lage der stärksten Helizität im Verhältnis zur Position der Kaltfront in der Modellprognose für 18z. Anhand der obigen Karten erkennt man, dass die Kaltfront bzw. die Bereiche erhöhter potentieller Instabilität und Feuchtezufluss vor der rückseitigen Kante des Helizitätsfeldes liegen, d.h. Scherfelder und Front zusammenfallen. Hinter der Front geht die Scherung vorübergehend zurück, ehe sie mit der Troglinie über den Niederlanden und Niedersachsen erneut zunimmt.

Karte 7 - 0-6km Scherung (schwarz), 0-1km Scherung (farbig)



Die vertikale Windscherung für 18z ist am oberen Anschlag der Skala. Die 0-1km Scherung ("*Low-Level-Shear, LLS*") erreicht verbreitet 40-50Kn über ganz Deutschland, besonders markant im Bereich der Kaltfront (schwarze Fläche) sowie entlang der Alpen im Warmsektor ("*barrier jet*"). Die 0-6km Scherung ("*Deep-layer shear, DLS*") erreicht über Norddeutschland nur 20-40Kn, da nahe am Kernbereich der Zyklone gelegen. Weiter südwärts steigt sie rasch auf bis zu 70Kn, im Westen bis auf über 100Kn an. Im Bereich der Kaltfront liegen sie bei 30-70Kn (15-35m/s).
Das Verhältnis von LLS und DLS lässt folgende Aussage zu: Besonders in den unteren Schichten herrschte allgemein ein sehr starker Höhenwind, als **Low-Level-Jet**, während die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe verhältnismäßig gering war - nur ganz im Westen wurden extreme 100Kn hoch reichender Scherung erreicht. Eine starke, nieder troposphärische Strömung begünstigt allgemein die Entstehung von Bogenechos mit erhöhtem Potential für kräftige, geradlinige Winde (*"Downbursts"*).

Karte 8 - Downburstpotential

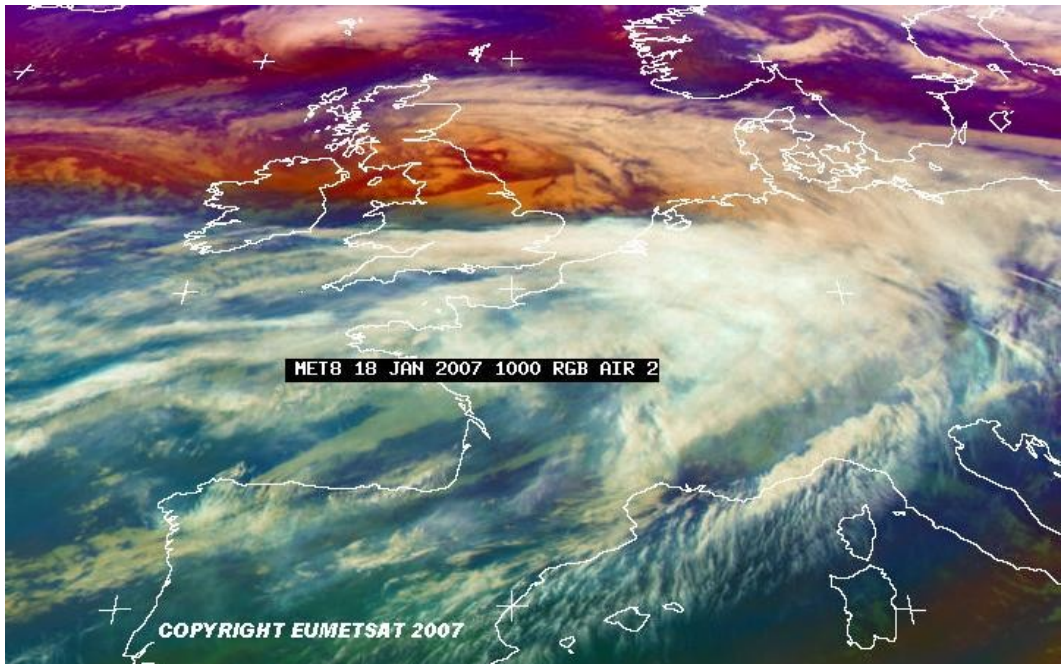


Die Karte zeigt farbig die zu erwartenden, konvektiven Böen bei vertikalem Impulsfluss. Sie liegen verbreitet bei 70Kn Minimum bis zu über 90Kn Maximum, auch im Bereich der Kaltfront. Dies deckt sich gut mit den beobachteten Böen von 80Kn in Düsseldorf und Berlin, 75Kn in Magdeburg, Braunschweig und den schweren Waldschäden bis hin zu T4 (um 200km/h, ca. 110Kn), die etwa im Erzgebirge registriert wurden.

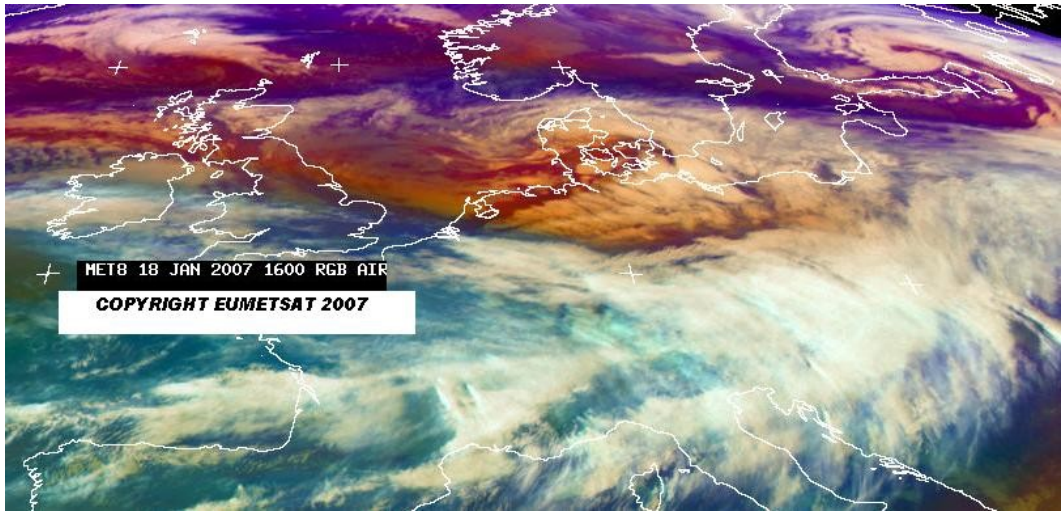
Fazit:
Die Hauptgefährdung mit Durchzug der Kaltfront bestand in schweren Gewittern mit vorwiegend geradlinigen Windereignissen, deren Spitzenböen bis zu 170km/h, teilweise auch über 200km/h erreichen konnten. Ein gewisses Tornadorisiko konnte wegen der extremen vertikalen Windscherung nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund der raschen Südostwärtsverlagerung der Kaltfront war eine lokale Vorhersage kurzlebiger Mesozyklonen aber beinahe unmöglich.
Die Estofex - Prognose für jenen Tag lautete letztendlich so.

Im zweiten Teil soll die tatsächliche Entwicklung durch Satellitenbilder von EUMETSAT und der FU Berlin beschrieben werden.

Verwendet wird hier ein farbiges RGB-Composit von EUMETSAT, welches die Luftmassen verschiedener Höhe anzeigt. Pinke Farben bedeuten dabei Luft aus der Stratosphäre bzw. oberen Troposphäre, bräunliche Farben der mittleren Troposphäre. Je heller die Bewölkung, desto hoch reichender ist sie.

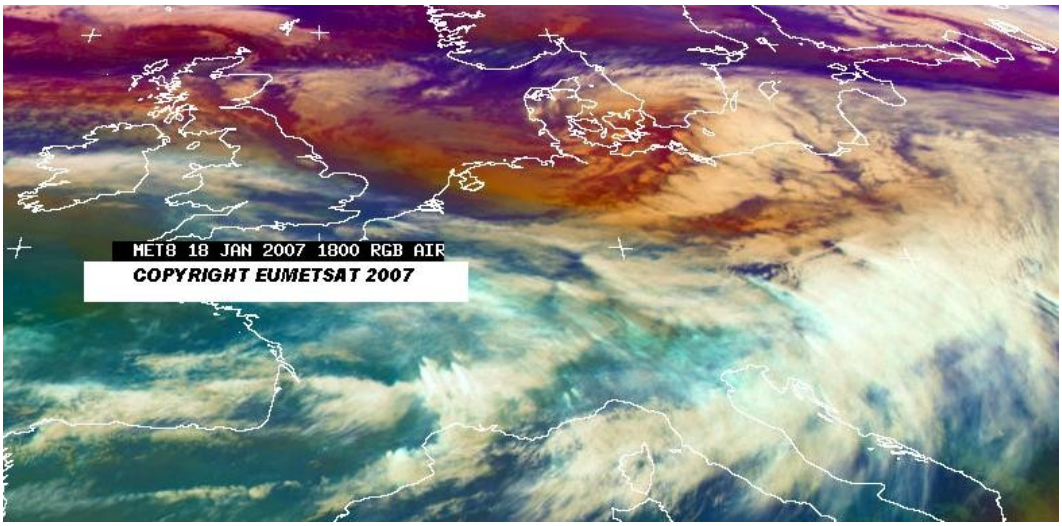


Das Satellitenbild am 18. Januar 2007, 10 UTC, zeigt den Kern der Zyklone über Ostengland. Die Okklusionsfront liegt bereits kaltseitig der Jetachse, sodass deren Wolkenobergrenzen im Vergleich zum Warmsektor bzw. dem warmen Förderband deutlich abgesunken sind. Quer über England schließt die Kaltfront als seichte, relativ kompakte Linie an. Sie wird vollständig von trockener Stratosphärenluft überlagert, die bis in die mittlere Troposphäre absinkt und dadurch die Wolkenobergrenzentemperaturen erwärmt. Gleichzeitig aber führt diese Dry Intrusion zur Bildung potentieller Instabilität, da die untere Troposphäre mit Feuchte angereichert ist. Noch überwiegt die Erwärmung der Wolkentops - Gewitter treten bis dahin noch keine auf - stattdessen bilden sich seichte Schauer, die aber dennoch schwere Windböen in Orkanstärke über England hervorrufen.

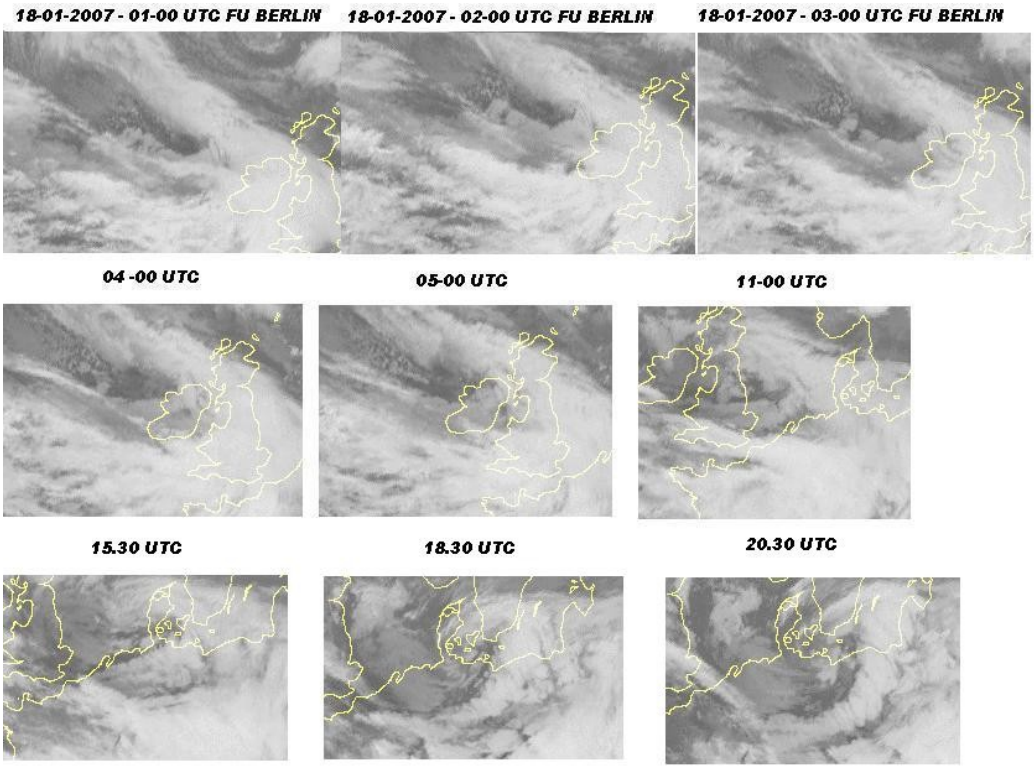


Am Nachmittag um 16 UTC liegt der Kern über dem Kattegat, mit deutlich einspiralisierter Okklusionsfront. Das warme Förderband hat sich von der Kaltfront entfernt, welche deutlich an Intensität zugenommen hat. Die Wolkenobergrenzen sind angestiegen, da sich die Dry Intrusion auf höhere Troposphärenschichten beschränkt. Da sie die Kaltfront weiterhin überrennt, bleibt es bei hoher potentieller Instabilität, die durch den Hebungsantrieb auch freigesetzt wurde. Die Kaltfront selbst weist zunehmend ein "Wabenmuster" auf, deren einzelne Wabenzellen nach der Höhenströmung orientiert sind. Rückseitig der Kaltfront setzt die typi-

sche postfrontale Subsidenz ein, nachfolgend bildet sich bereits eine Troglinie an der Nordseeküste.

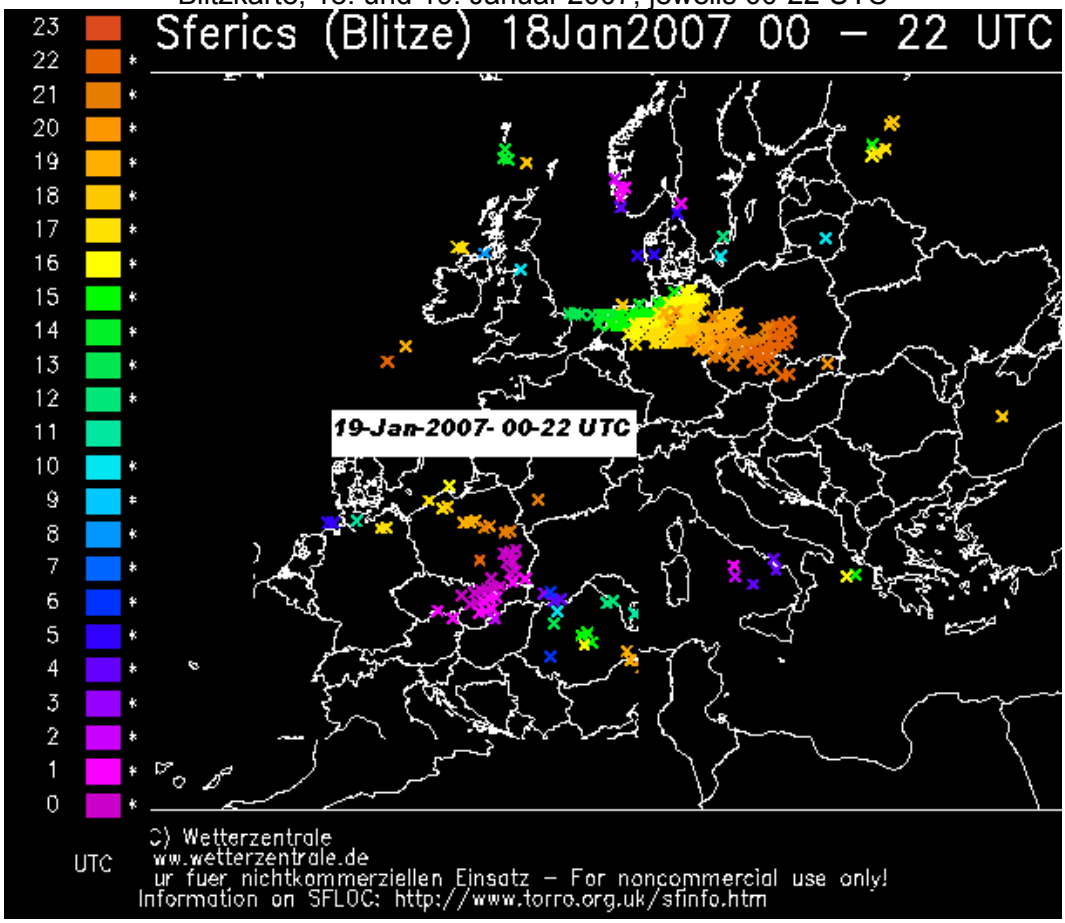


Das wohl spektakulärste Satellitenbild um 18 UTC zeigt eine massive Kaltfront von Südschweden bis in die Mitte Deutschlands reichend. Ihre Ausdehnung nimmt wie ein Keil von Südwest nach Nordost zu, was sowohl mit dem stärksten Hebungsantrieb im Nordosten als auch dem zugehörigen Höhentrog zusammenhängt, der hier die kälteste Höhenkaltluft durchschwenken lässt. Sowohl an Vorder- als auch Rückkante der Kaltfronten zeigen sich konvexe Ausstülpungen, die von dem starken LLJ herrühren. Die Absinkzone rückseitig der Kaltfront kristallisiert sich hier ebenfalls gut heraus, ebenso wie die nachfolgende Troglinie mit verstreuten, breitflächigen Multizellen.
Als maßgeblichen Grund für die drastische Verstärkung der Kaltfront mit ab 14 UTC eingebetteten Gewittern kann die vertikale Lage der Dry Intrusion herangezogen werden. Zunächst reicht das Absinken stratosphärischer Luft bis in mittlere Höhen und verhindert durch das entsprechende Absinken der Tropopausenhöhe hoch reichender Feuchtkonvektion über etwa 500hPa hinaus. Im weiteren Verlauf aber zieht sich die Stratosphärenluft in höhere Troposphärenschichten (ca. 350hPa) zurück, sodass die Wolkenobergrenzen ansteigen können.
Folgende IR-Einzelbilder der FU Berlin zeigen die chronologische Entwicklung der Kaltfront im Seegebiet vor Irland bis zum Höhepunkt am Abend über dem östlichen Mitteleuropa:



Am 18. Januar 2007 um 1 UTC kristallisiert sich erstmals das Unwetterpotential der Kaltfront heraus, da zu diesem Zeitpunkt die rückseitige Dry Intrusion die Kaltfront überrennt und deren Obergrenzen absenkt. Im weiteren Verlauf wird die Diskrepanz der Wolkenobergrenzen von der Kaltfront zum warmen Förderband und der Okklusionsfront mit der herumgeführten Warmluftzunge immer deutlicher. In den frühen Morgenstunden wird das Bild undeutlicher. Zwar ist die Kaltfront weiterhin vorhanden, aber kaum organisiert. Erst gegen 11 UTC beginnt sich die Kaltfront erneut als scharfkantige Linie zu formieren. Am Nachmittag wird der Liniencharakter immer deutlicher, ebenso die postfrontale Subsidenzzone. Am frühen Abend erreicht die Kaltfront ihre beeindruckendste Ausprägung mit den erwähnten wabenförmigen Zellkomplexen, die wie an einer Perlenkette aneinandergereiht sind.

Blitzkarte, 18. und 19. Januar 2007, jeweils 00-22 UTC



Die Südostwärtsverlagerung der Gewitter in Zusammenhang mit den Gewittern ist sehr schön anhand der registrierten Blitze der beiden Tage erkennbar. Die Gewittertätigkeit begann zwischen 13 und 14 UTC am Ausgang des Ärmelkanals und verstärkte sich rasch auf dem Festland. Der Faktor der diabatischen Erwärmung durch Einstrahlung ist hier allerdings nahezu zu vernachlässigen, da die gewittrige Böenfrontlinie in ein skaliges Regengebiet an der Kaltfront eingebettet war. Am späten Abend griffen die Gewitter auf Polen, Tschechien und Slowakei über. Bis 2 UTC erreichten die Gewitter noch den äußersten Norden Österreichs, wo im Waldviertel ebenfalls schwere Waldschäden entstanden. Danach hörte die Gewittertätigkeit auf - der Höhentrog verlagerte sich rasch ostwärts, während die Kaltfront aus dem Bereich des Hebungsantriebes herauslief.

C. Zusammenfassend aus Synoptik und Prognose

Definitiv handelte es sich um eine der best erfassten Winterorkanlagen, die seit Beginn der numerischen Modelle prognostiziert wurden. Bereits eine Woche vor dem 18. Januar 2007, am 11. Januar 2007 zeigte das deutsche GME-Modell erstmals ein Orkantief über Mitteleuropa, am folgenden Wochenende schlossen sich alle anderen Modelle, z.B. EZMWF,UKMO, GFS, NOGAPS, GEM, dem deutschen Modell an und rechneten mit geringen Variationen in der Zugbahn und der Intensität ein schweres Orkantief über Norddeutschland bzw. über der Nordsee zur Ostsee ziehend.

Da von GFS das meiste öffentlich verfügbare Datenmaterial vorhanden ist, konnte man gut und frühzeitig das Unwetterpotential von "Kyrill" nachvollziehen. Die 850hPa-Winde lagen über Tage hinweg bei 70-80Kn, in der Spitze auch bei 90Kn. Die Kaltfront wurde von Tag zu Tag niederschlagsintensiver gerechnet und wies jeweils starke konvektive Signale auf. Be-

merkenswert war auch der Zusammenfall von Starkwindfeld mit den konvektiven Niederschlägen. Zwar fehlte im GFS-Modell die Labilität, was aber gerade im Winter nichts ungewöhnliches ist, wo die Mehrheit von konvektiven und gewittrigen Niederschlägen in Zusammenhang mit Winterstürmen an die Freisetzung potentieller Instabilität gekoppelt ist (vgl. z.B. 23.11.1981 über England).

Bis zum Termin änderte sich an der Modellprognose nur wenig. Das Starkwindfeld wurde geringfügig schwächer gerechnet, war jedoch zum Zeitpunkt des Kaltfrontdurchgangs immer noch sehr intensiv mit 70-80Kn in 850hPa. Ich persönlich rechnete jedoch erst an der Troglinie mit den schwersten Unwettern, nicht an der Kaltfront, die sich für mich viel intensiver als gedacht herausstellte. Aufgrund des breitflächigen Niederschlagssignals rechnete ich eher mit einem skaligen Regengebiet, was zwar auch vorhanden war, aber eben mit einer eingebetteten und gewittrigen Böenfrontlinie. Die sechsstündig gerechneten Niederschläge von 20-40mm fielen dadurch innerhalb von zwanzig bis sechzig Minuten.

Ebenfalls für mich überraschend war der sommerliche Charakter der Gewitterlinie mit Wolkenobergrenzentemperaturen unter -35°C, entsprechend hoch reichenden Labilitätsflächen und in die Gewitterlinie eingebettete Bogenechos. Selbst im Sommer sind derartig "perfekte" Ausprägungen zumindest in unseren Breiten eher eine Seltenheit. Wenig überraschend waren die tatsächlich gemessenen Spitzenböen bei "Kyrill", siehe hierzu diese Tabellen
http://www.inntranetz.at/foehn/windspitzen-kyrill.html
(mit freundlicher Genehmigung von Meteomedia), sie bewegten sich im Rahmen der zu erwarteten Spitzenböen.

Erstaunlich waren vor allem die Orkanböen im Warmsektorbereich im Flachland des Erzgebirges und im Elbtal, die man aufgrund der an sich stabil geschichteten Warmluft so nicht vorhergesagt hätte. Jedoch wies bereits Tage vor Eintreffen des Orkans Jens Tischer aus Kamenz im Wetterzentrale-Forum auf die Gefahr von Orkanböen im Warmsektor hin, die ursächlich durch das hydraulische Absinken im Lee des Erzgebirges entstehen würden.
Im Warmsektor von Kyrill gab es auch im Donautal bereits erste orkanartige Sturmböen bis Orkanböen - hier war es neben lokalen hydraulischen Effekten vor allem die Kanalisierung im Donautal, die hohe Windgeschwindigkeiten im Flachland hervorrief. Der Schwerpunkt der Windböen lag hier im Raum St.Pölten, Krems, Tulln bis nach Wien, wo das Donautal eine enge Kurve beschreibt und sich dabei öffnet. Die Talverbreiterung führt zur Umwandlung potentieller in kinetischer Energie und damit einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit.
Insgesamt muss man sagen, dass die Wetterdienste allgemein ausgezeichnete Arbeit geleistet haben. Durch frühzeitige Unwetterwarnungen wurden landesweit in den besonders betroffenen Gebieten die Schulen und Kindergärten geschlossen, Arbeitgeber gaben frei, die Bahn legte den öffentlichen Verkehr deutschlandweit still. Die Menschen blieben glücklicherweise vielfach Zuhause, sodass "nur" 13 Menschenleben in Deutschland insgesamt zu beklagen waren.
Zwar blieb die zunächst befürchtete Sturmflut an der Nordseeküste weitgehend aus, dennoch kann man nicht - wie in Medienberichten teilweise zu hören - von einer Überwarnerei seitens des staatlichen Wetterdienstes sprechen. Sowohl Deutscher Wetterdienst als auch Meteomedia leisteten beide hervorragende Arbeit, nicht zuletzt dank der bei dieser Orkanlage überaus verlässlichen und souveränen Modellleistung.

Quellen (Beide Artikel)

Wetter3
Wind Met FU Berlin
Dundee University
NOAA Uni Bern
Wetterzentrale - Topkarten
Lightningwizardmaps
EUMETSAT - RGB-Composit
Wyoming Soundings

Abschließendes Wort zu den Folgen: Die Bilder der Schäden sind bekannt, ob in Österreich, in Deutschland, Polen, Tschechien, usw.… durch Höhenlage exponierte Wälder sehen nun so aus:

Copyright: **www.mittelbayerische.de**

Man darf froh sein, dass in Europa nicht nach dem Muster der USA Häuser gebaut werden, sonst wäre dies wohl eine unfassbare Katastrophe geworden.

Analyse © Februar 2007 Herfried Eisler & Felix Welzenbach / unwetterstatistik.at