

Wave developments on surface fronts and stratospheric intrusions

Doctoral Thesis

Author(s):

Appenzeller, Christof

Publication date:

1994

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000934368>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 10471

Wave developments on surface fronts and stratospheric intrusions

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology (ETH)
Zürich

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
Christof Appenzeller
Dipl. Natw. ETH
born 9 January 1962
citizen of Zürich and Küsnacht

Accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H. C. Davies, ETH Zürich-CH, examiner
Prof. Dr. A. J. Thorpe, University of Reading-UK, co-examiner

Zürich, 1994

Summary:

Fronts and cyclones are a key component of mid-latitude weather systems and their development is governed by highly complex dynamical processes. Here the potential vorticity perspective is applied to explore the development of their sub-synoptic scale (~1000 km) structure by investigating frontal waves and intrusions of stratospheric air into the troposphere.

In the first part use is made of the analysis and forecast data derived from two operational weather prediction models, the ECMWF global and the UK fine mesh model, to study a surface frontal wave event over the Atlantic in the second half of October 1989. It is shown, that the ambient atmosphere contained three distinct PV features: at the surface a frontal baroclinic zone; in the lower troposphere a co-aligned, moisture laden, elongated band (~2000 km long and ~400 km wide) of enhanced PV; and at upper-levels a richly structured, southward extending PV pool. The frontal wave event developed in two stages. In a first phase the appearance of a large-scale surface frontal undulation was accompanied by an in-phase movement of the upper-level anomaly. In the second phase two low-level wave features developed around 1000 km apart. The resulting wave depressions were accompanied by a distortion of the baroclinic zone and the break-up of the PV-band. In the subsequent mature phase the dominant secondary cyclone attained ~500 km scale in the horizontal and acquired a coherent PV structure in the vertical.

The nature of the development is compared with the traditional and recent hypothesis for frontal waves. Diagnosis based on PV hypothesis shows evidence of both the self development of the PV features and their synergetic interplay.

It is further proposed, that the relationship between the segmented tropospheric PV-band and the surface frontal wave cusps provides a useful tool for monitoring and forecasting secondary developments. Forecasts made for this frontal-wave event by different models/initial fields are compared. The results shed light on the sensitivity to resolution and to errors in the initialised analysis fields.

In the second part the three dimensional sub-synoptic to mesoscale structure of stratospheric intrusions into the upper troposphere is examined. Linking the stratosphere and troposphere such flow phenomena can influence substantially the distribution of atmospheric gases and aerosols. To provide a detailed three dimensional insight into their development high resolution (~8 km) satellite measurements from the water vapour absorption band are combined with the coarser grained (~60 km) potential vorticity data calculated from the analysis cycle of the ECMWF model.

It is shown, that an intrusion in form of a tongue of stratospheric air can develop into an elongated (~2000 to 3000 km) and slender (~200 km) streamer. This streamer is marked by high potential vorticity and breaks up into a train of vortex-like disturbances and/or its tip rolls up to form a cut-off system. The observed flow patterns suggest two prototype streamer evolutions: type I with a dominant tip vortex development and type II with strong anticyclonic turning and breaking-up into sub-vortices. The break-up process of the PV streamer is related to an instability process and time and length scales are shown to correspond to the theoretically expected ones.

The streamers occur with a frequency of typically one per week over central and southern Europe (winter 91/92). Their break-up and/or roll-up is shown to potentially modify daily weather developments or to initiate new ones. Their fine-scale structure indicates the occurrence of local irreversible mixing of stratospheric and tropospheric air.

Zusammenfassung:

Das Wetter in mittleren Breiten ist stark von Fronten und Tiefdruckgebieten bestimmt, deren Entwicklung eine hochkomplexe Dynamik aufweist. Hier wird das Konzept der potentiellen Vorticity (PV) verwendet, um die subsynoptischen (~1000 km) Strukturen von Wellenentwicklungen sowohl auf Bodenfronten wie auf Intrusionen von stratosphärischer Luft in die Troposphäre zu untersuchen.

Im ersten Teil werden Analyse- und Vorhersagedaten von zwei operationellen Wettermodellen, dem globalen ECMWF und dem hochaufgelösten UK Modell verwendet, um eine Wellenentwicklung auf einer Bodenfront zu untersuchen, welche in der zweiten Oktoberhälfte 1989 über dem Atlantik stattfand. Es wird gezeigt, dass die umgebende Atmosphäre drei unterschiedliche PV-Elemente enthielt: eine lokalisierte barokline Zone am Boden; ein parallel dazu liegendes feuchtes Band (~2000 km lang und ~400 km breit) mit erhöhter PV in der unteren Troposphäre; und einen reich strukturierten nach Süden reichenden PV-Körper in den höheren Schichten. Die Wellen auf der Front entwickelten sich in zwei Phasen. Zunächst war das Auftreten einer grösserskaligen Welle auf der Bodenfront von einer gleichzeitigen Verschiebung der Anomalie in den höheren Schichten begleitet. In der zweiten Phase entwickelten sich zwei ca. 1000 km voneinander entfernte Wellenbuckel. Die Entwicklung der daraus entstehenden Tiefdrucksysteme war von einer Verformung der baroklinen Zone und dem Aufbrechen des PV-Bandes begleitet. In der nachfolgenden ausgereiften Phase nahm das dominierende sekundäre Tiefdruckgebiet in der Horizontalen eine Ausdehnung von ~500 km an und in der Vertikalen stellte sich eine kohärente PV-Struktur ein.

Diese Entwicklung wird mit traditionellen und neueren Hypothesen für frontale Wellen verglichen. Eine auf PV basierende Diagnose deutet sowohl auf eine Eigenentwicklung der verschiedenen PV-Elemente als auch auf ein synergetisches Zusammenspiel hin.

Es wird ausserdem vorgeschlagen, dass die Beziehung zwischen dem aufgebrochenen PV-Band in der Troposphäre und den Wellenkämmen auf der Bodenfront ein sinnvolles Mittel darstellt, um die Entwicklung sekundärer Systeme zu beobachten und vorherzusagen.

Im zweiten Teil wird die dreidimensionale, subsynoptische bis mesoskalige Struktur von Intrusionen stratosphärischer Luft in die Troposphäre untersucht. Solche Strömungsphänomene welche die Stratosphäre mit der Troposphäre verbinden, können die Verteilung der Gase und Aerosole in der Atmosphäre substantiell beeinflussen. Um eine 3-dimensionale, detaillierte Einsicht in ihre Entwicklung zu erhalten, werden hochaufgelöste (~8 km) Satellitenmessungen in der Wasserdampfabsorptionsbande mit gröbermaschigen (~60 km) PV-Daten aus dem Analysezyklus des ECMWF Modells miteinander kombiniert.

Es wird gezeigt, dass sich eine Intrusion in der Form einer Zunge von stratosphärischer Luft in ein ausgedehntes (~2000 bis 3000 km) und schlankes (~200 km) Band entwickeln kann. Dieses Band zeichnet sich durch hohe potentielle Vorticity aus und bricht in eine Reihe von wirbelartigen Störungen auf und/oder seine Spitze rollt sich auf und bildet ein 'cut-off' System. Die beobachteten Strömungsvorgänge suggerieren zwei prototypische Entwicklungen: Typ I mit einer dominierenden Entwicklung des Vortex an der Bandspitze und Typ II mit einem starken Drehen des Bandes in antizyklonaler Richtung und einem Aufbrechen in Subvortizes. Das Aufbrechen wird mit einer Instabilitätsentwicklung in Zusammenhang gebracht und es wird gezeigt, dass die beobachteten Zeit- und Längenskalen den theoretisch vorhergesagten entsprechen.

Die beschriebenen Bänder tauchen mit einer Frequenz von etwa 1 mal pro Woche über Zentral und Südeuropa auf (Winter 91/92). Ihr Aufbrechen und/oder Aufrollen kann, wie gezeigt wird die tägliche Wetterentwicklung beeinflussen oder neue Entwicklungen initiieren. Ihre feinskalige Struktur deutet auf das Auftreten von lokalen irreversiblen Mischprozessen von stratosphärischer und troposphärischer Luft hin.