

Dynamics of Seminal PV Elements

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ETH)
ZÜRICH

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCE

presented by
RENÉ FEHLMANN
Dipl. Phys. ETH
born 23 April 1966
citizen of Buchs (SG)



CatE

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H. C. Davies, examiner
Dr. A. J. Simmons, co-examiner
Prof. Dr. C. Schär, co-examiner

Abstract

Cyclones and anticyclones are the dominant synoptic scale meteorological weather systems in midlatitudes. An attractive way to study dynamical aspects of these structures is provided by the PV framework. From this perspective an atmospheric *state* can be viewed as an assemblage of distinct PV anomalies, and the associated *dynamics* can be interpreted in terms of the self-development and interaction of seminal PV elements. In this thesis several aspects of midlatitude cyclogenesis are investigated within this PV framework using idealised and NWP models and case study analyses.

In the first part of the thesis aspects of the dynamics of idealised PV structures that are considered to be pivotal for the genesis of extratropical cyclones are studied within idealised dynamical frameworks – quasi-geostrophic and PE dynamics on an f -plane – and with simple ambient flow settings. Classical normal mode analysis is performed for a basic state comprising localised interior PV/surface warm bands with the ambient flow structure prescribed by a uniform barotropic and/or baroclinic shear. Aspects of the nonlinear development of the most unstable modes are also investigated as well as the dynamics of bands of finite length. It is demonstrated that different ambient flow characteristics as well as the structure of the shear line itself generate a palette of unstable modes with a wide range of different wave lengths and growth rates. In the nonlinear phase these anomalies are strongly influenced by the ambient flow structure. The results corroborate and extend the findings from earlier studies, e.g. the stabilisation due to adverse shear, and secondary instabilities or stabilisation of strong PV (or θ) gradients at the edges of the bands for certain ambient flow settings.

In the second part a case study of one particular frontal wave development is undertaken. The analysis of this event is based on the initialised analysis fields of the ECMWF and on simulations with a limited area model. Simulations for different initial configurations, characterised by modified upper-level PV structures, and with and without parametrised physical subgrid-scale processes, suggest that at least for this particular case the development of the secondary cyclone depends crucially on the structure and the evolution of a low-level prefrontal PV band induced by condensational heating. Simulations where condensational subgrid-scale processes are replaced by diagnostically deduced PV rates lend credence to this interpretation of frontal waves.

The remainder of the thesis is devoted to problems concerning misforecasts of numerical weather prediction (NWP) models. The uncertainty of forecasts made with such NWP models arises from uncertainty caused by two distinct error sources: (i) imperfections in

the model formulations, and (ii) errors in the specification of the initial model state. Here a diagnostic tool is developed to analyse the contribution of the latter source to misforecasts. It makes use of the time history of the dynamical fields and fundamental physical conservation properties and is based on the PV perspective. The tool is applied to one misforecast of a rapidly developing Atlantic cyclone. Thereby insight is gained on the localised geographical distribution of the inaccuracy in the initial analysis fields – expressed in terms of PV errors. Moreover, this diagnostic method provides some insights to the dynamics of the misforecast and in particular points to the importance, at least for this particular frontal wave cyclone, of tropopause level structures for the development.

As a rider to this study a first step is made to derive a statistical climatology of the distribution of initial state PV errors. This can help to indicate where there is need for an improved observational data set by either routine observations or adaptive strategies. The analysis is performed for the northern Atlantic sector for the year of 1993. It is found that errors in the initial fields occur dominantly at the entrance to the Atlantic storm track. The climatology of PV errors can also point on the geographical location where strong diabatic processes at tropopause levels occur, and thereby provides some indication of the distribution of local irreversible mixing of stratospheric and tropospheric air by diabatical decay of PV streamers at the end of the Atlantic storm track.

Taken together the foregoing studies serve to illustrate the intrinsic usefulness of the PV perspective as a framework for prompting theoretical and observational studies that both shed light upon the dynamics and prediction of synoptic-scale atmospheric flow.

Zusammenfassung

Die dominanten synoptisch skaligen Wettersysteme in mittleren Breiten sind Tief- und Hochdruckgebiete. Das Konzept der potentiellen Wirbelstärke (PV) liefert einen interessanten Ansatz, um Aspekte dieser dynamischen Strukturen zu studieren. Innerhalb dieses Konzepts kann ein atmosphärischer *Zustand* als eine Verteilung von verschiedenen PV-Anomalien betrachtet werden. Die zugehörige *Dynamik* wird dann durch die Selbstentwicklung und Wechselwirkung dieser erzeugenden PV-Elemente beschrieben. In der vorliegenden Arbeit werden innerhalb dieses Konzepts mehrere Aspekte der Zyklogenese in mittleren Breiten mittels idealisierter und numerischer Wettervorhersagemodelle untersucht.

Im ersten Teil der Arbeit werden mittels idealisierter dynamischer Werkzeuge – Dynamik, basierend auf den quasi-geostrophischen und primitiven Gleichungen auf einer f -Ebene – dynamische Aspekte idealisierter PV-Strukturen mit einfachen umgebenden Strömungsstrukturen untersucht, welche man als zentral bezüglich der Entstehung außertropischer Tiefdruckgebiete betrachtet. Für Grundzustände, welche lokale innere PV- oder warme Bodenbänder darstellen und welchen barotrope und/oder barokline Scherungen überlagert sind, wird eine klassische Normalmoden Analyse durchgeführt. Ebenso werden Aspekte der nicht linearen Entwicklung der instabilsten Normalmoden und die Dynamik von Bändern endlicher Länge untersucht. Es wird gezeigt, dass verschiedene Charakteristika der umgebenden Strömung sowie die Struktur der Scherungslinie selbst eine Palette von instabilen Moden mit einem weiten Spektrum von verschiedenen Wellenlängen und Wachstumsraten erzeugen. In der nicht linearen Phase werden diese Anomalien wesentlich durch die umgebende Strömung beeinflusst. Die Resultate bestätigen und erweitern Erkenntnisse früherer Arbeiten, z.B. die Stabilisierung durch entgegenwirkende Scherung und sekundäre Instabilitäten oder Stabilisierung von starken PV (oder θ) Gradienten an den Kanten der Bänder für gewisse Spezifikationen der umgebenden Strömung.

Im zweiten Teil wird eine Fallstudie einer speziellen frontalen Wellenentwicklung unternommen. Die Analyse dieses Ereignisses basiert auf initialisierten Analysefeldern des EZMWs und auf Simulationen mit einem Modell, welches auf einem endlichen Gebiet operiert. Simulationen für verschiedene Anfangskonfigurationen, welche durch verschiedene Strukturen der oberen PV-Verteilung charakterisiert sind und solche mit und ohne parametrisierten physikalischen Prozessen, welche auf einer kleineren Skala als der des Modells stattfinden, legen nahe, dass, zumindest in dem vorliegenden Fall, die Entwicklung der sekundären Zyklone wesentlich von der Struktur und der Entwicklung eines präfrontalen troposphärischen PV-Bandes, welches durch diabatisches Heizen induziert wird, abhängt. Simulationen, bei welchen die parametrisierten Kondensationsprozesse durch diagnostisch ermit-

telte PV-Raten ersetzt werden, lassen diese Interpretation von frontalen Wellen glaubwürdig erscheinen.

Der restliche Teil dieser Arbeit ist Problemen gewidmet, welche die Fehlvorhersage von numerischen Wettervorhersagemodellen betreffen. Die Unsicherheit der Wettervorhersage mit solch numerischen Modellen entsteht durch Unsicherheiten, deren Ursache zwei verschiedene Quellen haben: (i) Ungenauigkeiten in der Formulierung des Modells und (ii) Fehler in der Spezifizierung des Anfangszustandes. Hier wird ein diagnostisches Hilfsmittel entwickelt, um den Beitrag zu Fehlvorhersagen der letzteren obengenannten Quelle zu analysieren. Dieses Hilfsmittel benützt die Zeitentwicklung der dynamischen Felder zusammen mit fundamentalen physikalischen Erhaltungssätzen und ist auf dem PV-Konzept begründet. Es wird auf eine Fehlvorhersage einer sich schnell entwickelnden atlantischen Zyklone angewendet. Dadurch werden Einsichten bezüglich der lokalisierten geographischen Verteilung von Ungenauigkeiten in den Anfangsdaten gewonnen – ausgedrückt durch PV-Fehler. Überdies liefert diese diagnostische Methode Einblicke in die Dynamik von Fehlvorhersagen und im speziellen weist sie, zumindest in der vorliegenden frontalen Wellenzyklone, auf die Wichtigkeit für die Entwicklung von Strukturen auf der Tropopausenhöhe hin.

Zusätzlich zu dieser Studie wird ein erster Schritt gemacht, um eine statistische Klimatologie der Verteilung von PV-Fehlern in den Anfangsdaten zu gewinnen. Solch eine Analyse kann einen Hinweis liefern, wo Bedarf für eine Verbesserung entweder durch routinemässige oder adaptive Messmethoden im Beobachtungsnetz besteht. Die Analyse wird für den nördlichen atlantischen Sektor für das Jahr 1993 durchgeführt. Es stellt sich heraus, dass PV-Fehler in den Startfeldern vorwiegend beim Eingang der atlantischen Sturmbahn auftreten. Die Klimatologie der PV-Fehler kann ebenso auf die geographische Lage von starken diabatischen Prozessen, welche auf Tropopausenhöhe stattfinden, hinweisen und liefert dadurch einige Anhaltspunkte betreffend der Verteilung von lokalen, irreversiblen Mischprozessen von stratosphärischer und troposphärischer Luft durch diabatischen Zerfall von PV-Bändern am Ende der atlantischen Sturmbahn.