

Diss. ETH No. 14685

# Dynamics of jet-like flow patterns in the neighbourhood of storms, the tropopause and orography

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by  
MATTHIAS ZILLIG

born 24 February, 1972  
citizen of Muolen SG, Switzerland

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Huw C. Davies, examiner  
Dr. Hans Volkert, co-examiner  
Dr. Heini Wernli, co-examiner

2002

## Abstract

State-of-the-art research in atmospheric science makes use of various methods and strategies. New insight is gained by developing field basic theoretical principles and concepts, by performing model simulations and by deploying field measurements. In this thesis these approaches are harnessed to analyse some atmospheric flow phenomena featuring remarkable wind fields.

Three types of flow settings are considered. First the mesoscale atmospheric response to orographic (sic. mountain-) induced perturbations. A broad spectrum of phenomena and flow regimes has been explored and discussed extensively in previous studies. However little or no attention has been given to situations with a horizontal (sic. lateral) shear in the incident ambient flow field. Such a background shear can modify the character of the phenomena or generate new effects. Here a series of idealised experiments with lateral shear has been performed with the high-resolution, non-hydrostatic, compressible numerical model MC2 (mesoscale compressible community) in order to examine the influence of lateral shear. In particular consideration is given to the modification of the propagation properties of gravity waves and the influence of the shear upon the general character of the flow regime. It is shown that the presence of horizontal shear in the ambient flow influences significantly the flow regime over the orography (e.g. wave or balanced regime or both at the same time at different locations). For instance, the shear can reduce or even inhibit the vertical propagation of atmospheric waves and has – depending upon the Rossby Number – substantial upstream effects. Gravity waves, generated by a flow over an obstacle and propagating laterally, do not penetrate the shear zone, but are reflected and interfere with the incident wave. Depending on the location of the shear zone substantial interference effects can occur. An analytical description of the flow in the quasi-geostrophic limit is derived to complement the results of the nonlinear MC2 flow simulations.

Second consideration is given to the 1999 Christmas storm ‘Lothar’. It was unusual with respect to its evolution over the Atlantic and to its extreme wind speeds. Full physics high resolution NWP model simulations and analyses based on the *PV* perspective and Lagrangian trajectory calculations revealed the distinctiveness of the event. Key factors for Lothar’s development were its translation over the Atlantic as a “diabatic Rossby wave” and its mutual interaction with a deep tropopause fold off the European continent to eventually form a narrow *PV* tower throughout the whole troposphere and generate severe winds. A key question was: “How unusual was this event?” The synoptic setting that preceded the storm was essential for its development and was characterized by a long, rectilinear zonally-aligned jet stream over the North Atlantic. A systematic climatology of such jets aligned along the 2-pvu contour on isentropic surfaces has been computed for the northern hemisphere on the basis of the ECMWF (re)-analysis data sets for Januaries from 1986 to 99 and for December 1999. This climatology serves to establish the geographical distribution and the frequency

## *Abstract*

of the jets. It is shown that at low levels (potential temperature  $\theta \approx 310$  K) the “jet frequency” has two distinctive maxima, over the western Pacific and the western Atlantic. At higher elevations ( $\theta > \approx 330$  K) the high frequency region almost girdles the atmosphere at about  $35^\circ\text{N}$  and is dissected only in the regions of high inter-annual variability in the eastern Pacific and the Atlantic Ocean. The distinctiveness of the ‘Lothar’ episode was confirmed and no constellation similar to the ‘Lothar’-jet has been found. Finally an examination is undertaken of the link of the inter-annual variability of the “jet frequency” to the NAO teleconnection pattern.

Third attention is focussed on the issue that numerical models often overestimate the gravity wave activity over mountains. Evidence is given that a diurnally evolving boundary layer defines an “effective mountain height”, and that the lower boundary for an overflow is therefore time-dependent and no longer stationary. Here a theoretical study based on linear wave theory is undertaken of such an unsteady configuration: an air-stream of uniform flow and stratification over two-dimensional diurnally-oscillating sinusoidal and bell-shaped terrain  $h(x, t) = h_0(x)(1 - \alpha \sin \omega_0 t)$ . The linear wave solutions for the perturbed flow comprise three parts: the corresponding steady state solution and up- and down-stream travelling waves. It is shown that vertical wave energy transport is possible for a wider range of Rossby Numbers than without oscillation and that the vertical energy flux is increased by the factor  $1 + \alpha^2/2$ .

## Zusammenfassung

Moderne Forschung im Bereich der Atmosphärenphysik bedient sich verschiedener Strategien und Werkzeuge. Neue Erkenntnisse werden durch die Entwicklung theoretischer Grundlagen und Konzepte, die Anwendung von numerischen Modellen sowie die Durchführung von Messkampagnen gewonnen. Die vorliegende Arbeit benutzt diese Ansätze, um einige atmosphärische Strömungs-Phänomene, die sich durch aussergewöhnliche Windfelder auszeichnen, zu analysieren.

Drei Strömungstypen werden betrachtet. Zuerst wird die mesoskalige Antwort der Atmosphäre auf orographische Störungen (Gebirgsüberströmungen) untersucht. In zahlreichen Studien und Experimenten wurde eine breite Palette von Phänomenen und Strömungs-Regimes entdeckt und ausführlich diskutiert. Dabei wurden aber praktisch nie Versuchsanordnungen mit einer horizontalen Scherung in der einfallenden Strömung betrachtet. Eine horizontale Scherung in der Hintergrundströmung kann den Charakter der in früheren Studien und Simulationen schon beobachteten Phänomene modifizieren und auch neue Effekte hervorrufen. Eine Reihe von idealisierten Experimenten mit horizontaler Scherung mit dem hochauflösenden, nicht-hydrostatischen, kompressiblen numerischen Modell MC2 (mesoscale compressible community) wurde durchgeführt, um diese Effekte aufzuzeigen. Von besonderem Interesse ist dabei der Einfluss der Scherung auf den generellen Charakter des resultierenden Strömungsbildes (Regime) und die Modifizierung der Fortpflanzungseigenschaften von Schwerewellen. Es wird gezeigt, dass die horizontale Scherung den Strömungscharakter über der Orographie (balanciert oder wellendominiert oder beides gleichzeitig an verschiedenen Orten) entscheidend beeinflusst. So kann z.B. die Anwesenheit einer Scherungszone die vertikale Ausbreitung der Schwerewellen beeinträchtigen oder sogar verhindern und hat – abhängig von der Rossby Zahl – teils beträchtliche Auswirkungen weit stromaufwärts. Schwerewellen, die durch die Überströmung eines isolierten Hügels erzeugt werden und sich auch seitlich fortpflanzen, vermögen die Scherungszone nicht zu durchdringen sondern werden an bzw. in der Scherungszone reflektiert und interferieren mit der ursprünglichen Welle. Je nach Lage und Stärke der Scherung können die auftretenden Interferenzeffekte ein beträchtliches Mass erreichen. Eine analytische Beschreibung der Strömung im quasi-geostrophem Grenzfall ergänzt die MC2 Simulationen.

Einen zweiten Schwerpunkt setzt der Weihnachtsorkan ‘Lothar’ vom Dezember 1999. Er war aussergewöhnlich in Bezug auf seine Entstehung über dem Atlantik und seine Auswirkungen (extrem starke Winde). Hochaufgelöste numerische Simulationen wurden durchgeführt und *PV* Verteilungen und Trajektorien von Luftpaketen analysiert. Dadurch entstand ein Eindruck von der Einzigartigkeit dieses Ereignisses. Hauptverantwortlich für die fatale Entwicklung von ‘Lothar’ war, dass der Sturm als “diabatische Rossby-Welle” den Atlantik überquerte und schliesslich kurz vor dem Europäischen Festland mit einer tiefen Tropopausenfalte wechselwirkte, so dass sich eine schmale “*PV*-Säule” bildete, welche die extremen Winde erzeugte. In der Folge wird

## Zusammenfassung

die drängende Frage, wie ungewöhnlich dieses Ereignis denn gewesen sei, diskutiert. Die synoptische Lage, die vor dem Sturm über dem Nordatlantik vorherrschte, war mitentscheidend für dessen Entwicklung. Sie war durch einen langen, geraden und zonal ausgerichteten Jetstream ausgezeichnet. Auf der Grundlage von EZMW (Re-)Analysen der Januar-Monate von 1986 bis 99 und Dezember 1999 wurde eine systematische Klimatologie von solch langen zonalen Jets entlang der 2-pvu Kontur auf Isentropenflächen erstellt. Die geographische Verteilung der 'Jet Häufigkeit' zeigt auf tiefen Isentropen (potentielle Temperatur  $\theta \approx 310$  K) zwei ausgeprägte Maxima über dem West-Pazifik und dem West-Atlantik. In grösseren Höhen ( $\theta > \approx 330$  K) erstreckt sich das Gebiet mit hoher 'Jet Häufigkeit' auf ungefähr  $35^\circ$ N fast um die ganze Erde und wird nur dort unterbrochen, wo die grössten Schwankungen von Jahr zu Jahr zu beobachten sind, nämlich im östlichen Pazifik und im östlichen Atlantik. Die Einzigartigkeit des 'Lothar'-Falles hat sich bestätigt: es wurde keine Konstellation gefunden, die jener von 'Lothar' ähnlich war. Schliesslich wurde die Häufigkeitsverteilung der langen geraden Jets mit der NAO in Beziehung gesetzt.

Die dritte Studie geht von der Beobachtung aus, dass numerische Modelle die Wellenaktivität über Gebirgen oft überschätzen. Es hat sich gezeigt, dass durch die täglichen Schwankungen der Grenzschicht eine "effektive Gebirgshöhe" definiert wird, und dass damit die Untergrenze für Luftpakete bei einer Überströmung nicht mehr stationär sondern zeitabhängig ist. Hier wurde mit linearer Wellentheorie eine Studie einer solchen zeitabhängigen unteren Randbedingung durchgeführt. Luft strömt mit uniformer Geschwindigkeit und Stabilität über eine zweidimensionale Orographie (die einmal sinusförmig ist und einmal einen isolierten Hügel darstellt), welche im Tagesrhythmus oszilliert  $h(x, t) = h_0(x)(1 - \alpha \sin \omega_0 t)$ . Die lineare Wellenlösung besteht aus drei Teilen: aus der Lösung des entsprechenden stationären Problems und je einer stromauf- und -abwärts wandernden Welle. Es wird gezeigt, dass der vertikale Energietransport dadurch für einen grösseren Bereich der Rossby Zahl möglich ist und quantitativ um den Faktor  $1 + \alpha^2/2$  vergrössert wird.