

Low-level Potential Vorticity and Cyclogenesis to the Lee of the Alps

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

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by
URS AEBISCHER
Dipl. Phys. University of Basle
born 30 September 1961
citizen of St. Antoni and Heitenried (FR)



accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Ch. Schär, examiner
Prof. Dr. H. C. Davies, co-examiner
Dr. D. Heimann, co-examiner

Zürich, 1996

Abstract

Weather and climate of the northern hemisphere mid-latitudes are strongly influenced by the passage of cyclones and their embedded frontal systems which develop within the Atlantic and Pacific storm tracks. Besides their development along the storm tracks strong cyclogenetic activity can also be observed near high topographic obstacles such as the Rocky Mountains, the Alps and Pyrenees. One attractive way to examine the interaction of mountains with the synoptic-scale environment is to explore the mechanisms for development of balanced flow anomalies of potential vorticity (PV) by topographic processes.

In this study the generation of PV anomalies near the Alps and Pyrenees was investigated performing high-resolution hydrostatic numerical simulations. It is found that when a strong low-level wind field impinges upon the Alps or Pyrenees, elongated potential vorticity banners develop downstream of high topography. Individual pairs of banners can be attributed to flow splitting (and to some lesser extent to gravity wave breaking), either on the scale of the whole Alpine topography, or on that of individual massifs and peaks of the model topography. The banners are associated with significant positive and negative PV anomalies with values between -2.5 and +5 pvu, on occasions extend deep into the free troposphere, have a width of 50 to 100 km and frequently attain a length of 400 km. Unlike pure gravity-wave features, PV anomalies can be advected off the topography and thereby affect the flow downstream. Simulated PV banners to the lee of the Alps or the Pyrenees are a frequent feature, and occur whenever there is appreciable flow past the topography. This is demonstrated by the analysis of selected episodes as forecasted by the operational NWP model of the Swiss Meteorological Institute (SMI) during the year 1995.

Frequently within such a low-level PV banner a shallow depression forms to the lee of the mountain, but without the enhancement by an upper-level PV anomaly these depression are not able to grow to a deep cyclone. However, if an upper-level PV trough or streamer moves over the Alps and/or Pyrenees lee cyclogenesis can occur originating from the interaction with the low-level PV banner. Thus, the PV banners may interact with the larger-scale flow, and thereby represent an intermediary between the (unbalanced) formation of an orographic vortex, and its (approximately

balanced) interaction with the synoptic-scale environment. Simulations show that PV banners may wrap-up and subsequently constitute the low-level PV anomaly within the developing cyclone. It is suggested that the two phases of Alpine lee cyclogenesis can be interpreted in this way, i.e. as the rapid formation of a low-level orographic vortex followed by its interaction with an approaching upper-level trough. In order to test this interpretation, sensitivity studies with dry dynamics, reduced surface friction and idealized terrain (but unchanged synoptic forcing) were conducted.

Additional effects which strengthen the low-level vortex are the pool of warm air in the wake region to the lee of the topography, and low and intermediate level diabatic PV anomalies resulting from condensation of water vapor.

Zusammenfassung

Wetter und Klima in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre werden geprägt durch vorbeiziehende Zyklonen und deren Frontensysteme. Solche Frontensysteme entstehen vorzugsweise entlang den atlantischen und pazifischen Zugbahnen von Tiefdruckgebieten. Andererseits findet man Zyklonogenese häufig in der Nähe von Gebirgen wie den Rocky Mountains oder den Alpen und Pyrenäen. Ein attraktiver Weg, um die Wechselwirkung zwischen Gebirgen und dem synoptisch-skaligen Umfeld zu studieren, ist die Untersuchung der Entwicklungsmechanismen von orographisch erzeugten balancierten Anomalien der potentiellen Vorticity (PV).

In dieser Arbeit wurde die Bildung von PV-Anomalien in der Nähe der Alpen und Pyrenäen mit Hilfe von hochaufgelösten hydrostatischen numerischen Simulationen untersucht. Es kann gezeigt werden, dass sich im Lee der Gebirge fahnenartige ausgedehnte Bänder von potentieller Vorticity (PV) bilden, sobald eine starke Strömung auf die Alpen oder Pyrenäen trifft. Diese PV-Fahnen lassen sich paarweise auf die Umströmung von einzelnen Bergspitzen sowie auf die Umströmung des ganzen Alpengebirges der Modell-Orographie (und teilweise auf das Brechen von Schwerewellen) zurückführen. Die PV-Fahnen zeichnen sich aus durch hohe positive und negative PV-Werte zwischen -2.5 und $+5$ pvu, sie erstrecken sich tief in die freie Troposphäre hinein, weisen eine Breite von 50 - 100 km auf und erreichen häufig eine Länge von über 400 km. Im Gegensatz zu Schwerewellen können PV-Anomalien vom Gebirge wegadvergiert werden und dabei die Strömung im Lee beeinflussen. Simulierte PV-Fahnen im Lee der Alpen und Pyrenäen treten häufig auf sobald sich eine nennenswerte Strömung auf ein Gebirge einstellt. Dies wird anhand der Analyse von ausgewählten Situationen gezeigt, die mit dem operationellen Wettervorhersagemodell der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) im Jahre 1995 simuliert wurden.

In vielen Situationen kommt es innerhalb der bodennahen PV-Fahnen im Lee des Gebirges zur Bildung eines flachen Tiefs. Ohne Unterstützung durch eine PV-Anomalie der oberen Troposphäre kann sich aber ein solches schwaches Tief nicht zu einer starken Zyklone entwickeln. Hingegen kann Lee-Zyklonogenese erfolgen, wenn sich ein PV-Trog oder -Streamer über die Alpen und/oder Pyrenäen verschiebt und

mit den tiefer liegenden PV-Fahnen wechselwirkt. Die PV-Fahnen können auf diese Art mit der grösser-skaligen Strömung wechselwirken und so ein Bindeglied zwischen der (unbalancierten) Bildung eines orographischen Wirbels und dessen (nahezu balancierter) Wechselwirkung mit dem synoptisch-skaligen Umfeld darstellen. Die Simulationen zeigen, dass sich PV-Fahnen aufwickeln können und in der Folge zur bodennahen PV-Anomalie im Zentrum der sich entwickelnden Zyklone beitragen. Es wird vorgeschlagen, dass die zwei Phasen der alpinen Lee-Zyklogenese folgendermassen interpretiert werden können: als eine schnelle Entwicklung eines orographischen Wirbels in der unteren Troposphäre gefolgt von einer Wechselwirkung mit einem sich nähernden Trog der oberen Troposphäre. Um diese Interpretation zu testen, wurden Sensitivitätsstudien mit trockener Dynamik, reduzierter Bodenreibung und idealisiertem Gebirge (aber unverändertem synoptischen Umfeld) durchgeführt.

Zusätzlich wird die Stärke des Wirbels in der unteren Troposphäre von einem Gebiet warmer Luft im Lee des Gebirges beeinflusst, sowie von diabatisch erzeugten PV-Anomalien (durch Kondensation von Wasserdampf) der unteren und mittleren Troposphäre.