

# Rotational aspects of atmospheric flow past alpine-scale orography

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Sprenger, Michael

**Publication date:**

1999

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-003833763>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 13250

# Rotational Aspects of Atmospheric Flow past Alpine-scale Orography

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

for the degree of  
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by  
MICHAEL SPRENGER  
Dipl. Phys. ETH  
born 16 April 1970  
citizen of Triesen, Liechtenstein

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. C. Schär, ETH Zürich, coexaminer  
Prof. Dr. H. C. Davies, ETH Zürich, co-examiner  
Dr. G. Mayr, University of Innsbruck, co-examiner

1999

## Abstract

Mountains exert a pronounced influence on weather and climate. At the heart of the underlying processes is the orographically induced dynamical modification of atmospheric flow past topography. The present thesis focus on a particular theme in this context, namely on *three-dimensional* aspects of stratified rotating flows past topography, with particular consideration of the influence of the Earth's rotation.

In a first part shallow foehn flows in the Alps are studied. They are often affected by gap-like features in elongated ridge-like topography. To assess the dynamics of these flows, idealized numerical experiments are conducted. The topography is taken to be a two-dimensional ridge oriented in the west/east direction with a valley transect across it and the upstream flow is assigned a westerly direction, constant wind speed, and constant Brunt-Väisällä frequency. It is shown that southerly across gap winds are possible and that the dynamics of this flow problem includes many linear and nonlinear phenomena, such as flow splitting, flow separation, hydraulic jumps, hydrostatic gravity waves and vertically trapped surface waves. Most interesting is the existence of multiple stationary solutions for the nonrotating case (two with northerly and southerly flow across the gap, respectively, and one with north/south symmetry). The relationship of the idealized setting to Alpine shallow Foehn is discussed, and additional experiments are conducted to assess the effects of surface friction and of an inversion present to the south of the ridge.

The second part considers the atmospheric flow past idealized isolated mountains on an  $f$ -plane in the framework of linear theory. The mountain shape is described by its horizontal extensions in streamwise and spanwise directions and by its height, the upstream flow is assumed to be of uniform velocity and uniform stratification. The critical mountain heights for near-surface stagnation on the windward side and in the lee of the mountain, for stagnation aloft and for intersection of streamlines with the lower boundary are determined. This results in a regime diagram which separates the regions where linear theory applies from the regions where nonlinear phenomena certainly dominate the flow. The curves separating the different regimes show a complex behaviour with respect to the horizontal extensions and the shape of the mountain, as well as to the angle of attack of the impinging flow. The most restrictive phenomenon for the applicability of the linear theory is the intersection of the streamlines with the ground. With the exception of the quasigeostrophic limit, the dimensionless critical mountain heights remain smaller than 1. Some nonlinear simulations are conducted to examine the validity of the estimates of the linear theory.

Finally, a real-case numerical simulation of the interaction of a cold front with the Alps is conducted, where the ALPEX-IIIb reanalysis data set of the German Weather Service (DWD) is used as initial and lateral boundary fields. After showing the superiority of this reanalysis data set over the corresponding ECMWF reanalysis data set for the studied case, the temporal development of the Mediterranean weather is discussed. This development includes flow splitting to the north of the Alps, a cold-air outbreak and Mistral between the Alps and the Pyrenees, lee cyclogenesis in the Gulf of Genoa, north Foehn and Bora. Special focus is given to the low-level tropospheric flow, which is studied by means of trajectory calculations, timeseries analysis and within the framework of potential vorticity (PV). Elongated banners of PV are observed south of the Gotthard pass during the north foehn. Furthermore, a PV anomaly at the western edge of the Alps separates and finally matures into a

lee cyclone. In a sensitivity study it is, finally, examined why the flow does not separate from the topography at the eastern edge of the Alps. It is shown that neither increased orography, nor increased surface friction, nor the neglect of all moisture processes considerably enhances the tendency for separation.

## Zusammenfassung

Gebirge beeinflussen das Wetter und Klima massgeblich. Verantwortlich hierfür ist deren Einfluss auf die Bewegung der Luftmassen. Die vorliegende Arbeit diskutiert einen Teilbereich dieser Dynamik. Es wird die geschichtete Strömung über Gebirge betrachtet, wobei insbesondere auf Einflüsse der dreidimensionalen Struktur der Gebirge und der Erdrotation eingegangen wird.

Der erste Teil der Arbeit hat seichte Föhnströmungen im Alpenraum zum Inhalt. Oft werden die Föhnwinde massgeblich durch die Anwesenheit von tiefen Einschnitten in Bergrücken mitbestimmt. Die Dynamik solcher Strömungen soll mittels stark idealisierter numerischer Simulationen betrachtet werden. Dazu wird die Topographie als ein Bergrücken angenommen, der in West/Ost-Richtung orientiert ist, und durch den ein in Nord/Süd-Richtung orientierter Einschnitt verläuft. Die Strömung sei weit stromaufwärts vom Einschnitt entlang dem Rücken mit konstanter Geschwindigkeit und mit höhenunabhängiger Schichtung. Die numerischen Simulationen zeigen, dass unter dieser Strömungssituation südliche Winde durch den Einschnitt auftreten können, und dass sie mit vielen dynamischen Besonderheiten ausgezeichnet sind. Lineare und nichtlineare Phänomene treten auf: Aufspaltung von Stromlinien, Ablösen der Strömung von der Topographie, hydraulische Sprünge, hydrostatische Schwerewellen und Oberflächenwellen. Von ganz besonderem Interesse ist die Tatsache, dass das geschilderte Strömungsproblem mehrere voneinander verschiedene Strömungsantworten zulässt, wenn man die Erdrotation ausschaltet. Neben einem symmetrischen Zustand, gibt es zwei weitere asymmetrische, wobei der eine einen Südwind, der andere einen Nordwind durch den Einschnitt aufweist. Schlussendlich wird auch die Beziehung des idealisierten Problems zum seichten Südföhn in den Alpen diskutiert. Dazu werden realistischere Prozesse, wie Bodenreibung und Inversionen, betrachtet.

Im zweiten Teil wird wiederum ein stark idealisiertes Problem untersucht, nämlich die linearisierte Anströmung auf einen isolierten Berg. Dabei wird zudem die  $f$ -Ebenen Approximation gemacht. Der Berg selbst wird durch drei Parameter beschrieben: durch seine horizontalen Ausdehnungen in Strömungsrichtung und senkrecht dazu und durch seine Höhe. Die Anströmung ist wiederum mit konstanter Geschwindigkeit und mit konstanter Schichtung. Mehrere Prozesse werden untersucht: Stagnation der Strömung auf der Oberfläche im Luv und im Lee des Berges, Stagnation in der freien Atmosphäre über dem Berg und das Eintauchen der Stromlinien in den Boden. Für all diese Prozesse liefert die lineare Theorie kritische Gebirgshöhen, oberhalb derer die Prozesse auftreten. Insgesamt resultiert damit ein Regimediagramm, das die Bereiche, in denen die lineare Theorie gültig ist, von den Bereichen abtrennt, in denen sich die Strömung massgeblich nichtlinear verhält. Die kritischen Gebirgshöhen in diesem Diagramm, die die einzelnen Prozesse abgrenzen, zeigen hierbei eine komplizierte Abhängigkeit von der horizontalen Ausdehnung des Gebirges, von dessen Form und auch von der Anströmungsrichtung. Insgesamt beschränkt das Eintauchen der Isentropen in den Boden die Anwendbarkeit der linearen Theorie am meisten. Mit Ausnahme des quasigeostrophischen Falles überschreiten die dazugehörigen kritischen dimensionlosen Gebirgshöhen den Wert 1 nicht. Um diese Resultate der linearen Theorie mit der Wirklichkeit zu vergleichen, werden ebenfalls einige nichtlineare numerische Simulationen durchgeführt.

Schlussendlich wird im dritten Teil ein realer Fall diskutiert, bei dem sich eine Kaltfront auf die Alpen zubewegt und modifiziert wird. Dazu werden numerische Simula-

tionen durchgeführt. Die benötigten Anfangs- und seitlichen Randfelder entstammen der ALPEX-IIIb Reanalyse des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Diese Reanalyse erweist sich für den betrachteten Fall den entsprechenden ECMWF Reanalysen überlegen. Die Wechselwirkung der Front mit den Alpen führt zu vielen atmosphärendynamische Phänomene: eine Aufspaltung der Strömung im Norden der Alpen, ein Kaltluftausbruch zwischen den Alpen und den Pyrenäen, Mistral, Lee-Zyklogenese im Golf von Genua, Nordföhn und Bora. Besonderes Gewicht wird bei der Auswertung auf Strömungsphänomene in der unteren Troposphäre gelegt. Dazu werden Trajektorienrechnungen und Zeitreihen betrachtet. Ausserdem wird die Strömung im Hinblick auf die potentielle Wirbelstärke (PV) untersucht. Es zeigt sich unter anderem, dass lange PV Bänder südlich des Gotthard Pass' während Nordföhn auftreten. Zudem löst sich eine weitere PV-Anomalie vom Westrand der Alpen und entwickelt sich schlussendlich in eine Lee-Zyklone.