

Diss. ETH No. 14356

Interactions of Greenland-scale orography and extra-tropical synoptic-scale flow

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
CORNELIA BETTINA SCHWIERZ
Dipl. Phys. TU München
born July 19, 1970
citizen of Aichach, Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Huw C. Davies, ETH Zürich, examiner
Prof. Dr. Sigbjørn Grønås, University of Bergen, co-examiner
Dr. Heini Wernli, ETH Zürich, co-examiner

September 2001

Contents

Abstract	v
Zusammenfassung	vii
1 Introduction	1
1.1 Large-Scale Waves in the Atmosphere	1
1.2 Dynamical Framework	5
1.2.1 PV- Θ Thinking	5
1.2.2 Rossby Waves	7
1.2.3 The PV Waveguide	8
1.3 Greenland	9
1.4 Aims of this Study	12
2 Data and Tools	13
2.1 Data Sources	13
2.2 Analysis Tools	14
2.3 Numerical Model	16
3 Some Remarks on Blocking	19
3.1 Temporal and Spatial Dependence	20
3.2 Blocking Criteria	22

3.3	On the Dynamics of Blocking	24
3.3.1	Multiple Equilibria and Resonance	24
3.3.2	Wave–Mean Flow Interaction	24
3.3.3	Modons	26
3.3.4	Planetary-scale Waves	27
3.3.5	Onset and Breakdown of Blocking	27
3.3.6	The Diabatic Contribution	28
3.3.7	Relation to Teleconnection Patterns	29
3.4	Numerical Modeling of Blocking	30
3.5	Remarks	32
4	Synoptic Scale Interactions – a Case Study	33
4.1	Overview of Time-Mean Patterns	33
4.2	Streamer Evolution and Stagnation	37
4.2.1	Flow splitting coherency	39
4.2.2	Deformation of the Intrusion	40
4.3	Quasi-stationary intrusion	44
4.4	Summary	48
5	Greenland and Atlantic blocking events	49
5.1	Dynamical Considerations	49
5.2	Climatology and Blocking Indices	56
5.3	Conclusions and Further Remarks	63
6	Response to Greenland-scale orography for an idealised ambient flow setting	65
6.1	Introduction	66
6.2	Numerical Experiments	67

6.2.1	Basic State	67
6.2.2	Model and Configuration of the Domain	68
6.2.3	Topographic forcing	69
6.3	Results	69
6.3.1	Greenland experiment	69
6.3.2	Comparison to Ellipsoid mountains	71
6.3.3	Ray-Paths and Linear Regime	75
6.4	Summary and Future Work	77
7	Generation of Trapped Rossby Waves	79
7.1	Introduction	79
7.2	Linear Barotropic Model	79
7.2.1	Basic State	80
7.2.2	Perturbed Flow State	81
7.2.3	Governing Equations	83
7.2.4	Solution	85
7.2.5	Discussion	86
7.2.6	Extensions of the theory	88
7.2.7	Validity, Limitations	89
7.3	Model Results – Wave Generation	90
7.3.1	Model Setup, Basic State	91
7.3.2	Fixed wave source	91
7.3.3	Moving wave source	95
7.4	Summary and Discussion	95
8	Vortex–Mountain Interaction	99
8.1	Introduction	99

8.2	The Physical Setting	100
8.3	Simulated Flow Evolution	103
8.3.1	Description and Diagnosis	103
8.3.2	Additional Theoretical Considerations	109
8.4	Further Remarks	112
9	Final Remarks	117
A	Flow Phenomena over Orography	125
B	Time Evolutions for January 1987	131
C	Negative Cut-Off Climatology	137
D	January 1987 Streamers and Cut-Offs	139
	Bibliography	141
	Acknowledgements	159
	Curriculum Vitae	161

Abstract

Greenland constitutes the third-largest obstacle for Northern Hemispheric flow, after the Rocky Mountains and the Himalayas. Mountains of that scale, together with surface heat anomalies, exert a major impact on the stationary wave structure of the atmosphere. The nature of the interaction of mountains with the flow is governed by both the orographic parameters and the properties of the ambient wind field. Greenland takes up a unique position in that: (i) it resides in the quasi-geostrophic, but nonlinear part of parameter space; (ii) its polar location implies an enhanced potential for interaction of the induced flow response with structures of the climatologically low polar tropopause; and (iii) its position is in proximity to the North Atlantic storm track.

The focus of the present thesis is on the interaction processes between Greenland and the atmosphere from the synoptic to the planetary scale. The following series of themes will be addressed: -local mountain flow features; -influence of Greenland on aspects of European weather; -the role of polar orography in generating planetary-scale waves; -its potential and way of interaction with an atmospheric jet; -aspects of vortex-mountain interaction.

The study employs a combination of diagnostic methodologies (Eulerian and Lagrangian data analysis), analytical calculations and idealised numerical model simulations. The latter are performed with a version of the operational weather prediction model of the German Weather Service (DWD). The utilised data sources comprise the ECMWF (Re-)analysis data (T106) and the precipitation data set CMAP.

In a first step, aspects of the ambient Greenland flow are identified in a real case study. Special emphasis is on the interaction of the local wind field with synoptic-scale stratospheric intrusions. In combination, they form a vertically coherent flow structure throughout the depth of the tropospheric layer.

Additionally, a relation is found between orographically induced cloud-diabatic processes at steep slopes of the South-East coast of Greenland and the

occurrence of a persistent blocking episode in the North-Atlantic region. Its physical interpretation prompts the definition of a novel blocking indicator. The latter is used to evince the importance of this interaction mechanism for the time period 1979-1995.

In the second part, the rich ambient flow structures are interpreted by means of highly idealised simulations and evidence is presented for the hemispheric impact of the perturbation. Greenland's polar location represents a significant factor for the propagation of the waves.

The impact of large-scale mountains on an idealised barotropic atmosphere with a jet can be treated analytically in the framework of quasi-geostrophic theory. Propagating waves exist and are conveyed along the line of discontinuity. The solution also sheds light on the conditions necessary for resonance. Idealised numerical simulations confirm the validity of the analytic results for the primitive equations on the sphere.

The processes that are relevant for the interaction with the storm track, specifically with individual cyclones, are also determined with idealised simulations. In harmony with observations the significance of large mountains as "topographic waveguides" for vortices becomes clear and is explained dynamically.

The results of this palette of studies confirm the large variety of ways in that Greenland-scale orography impacts on the atmosphere. In particular, the interaction of the processes on different scales seems to be most essential. The local flow response takes places within and is governed by the large-scale circulation. In turn, the generated perturbations re-affect the hemispheric flow: the cyclones of the storm track can experience large deflections; orographically induced diabatic processes modify the dynamic composition of the air parcels that contribute to the sustenance of persistent blocking patterns; and finally, the interaction with a jet illustrates a mechanism that can be relevant for the propagation of planetary waves.

Despite the high degree of complexity exhibited by the orographic perturbations of the atmosphere, fundamental physical processes were determined and interpreted. Their understanding has consequences for medium-range forecasting and, in conjunction with the establishment of modes of atmospheric variability, also for seasonal prediction.

Zusammenfassung

Grönland stellt nach den Rocky Mountains und dem Himalaya das drittgrößte Hindernis für den atmosphärischen Fluß auf der Nordhemisphäre dar. Gebirge dieser Skala üben, neben Wärmeanomalien der Erd-/Meeresoberfläche, einen wesentlichen Einfluß auf die stationäre Wellenstruktur des Strömungsfeldes aus. Grundsätzlich ist die Natur der Interaktion von Bergen mit der Strömung bestimmt durch die orographischen Parameter, sowie die Eigenschaften des umgebenden Windfeldes. Grönland nimmt diesbezüglich eine einzigartige Stellung ein: (i) es befindet sich im quasi-geostrophem, aber nichtlinearen Bereich des Parameterraums; (ii) die polare Position impliziert erhöhtes Potential für eine Interaktion des berginduzierten Strömungsfeldes mit Strukturen der, klimatologisch gesehen, niedrigen polaren Tropopause; und (iii) es befindet sich in der Nähe der nordatlantischen Zyklonenzugbahn (“storm track”).

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Studium einiger Wechselwirkungsprozesse (WW) zwischen Grönland und der Atmosphäre von der synoptischen bis zur planetaren Skala. Folgende Themenkomplexe werden dabei behandelt: -Untersuchung der lokalen Strömungsmuster; -die Bedeutung Grönlands für bestimmte Wetterlagen Europas; -die Rolle polarer Orographie bei der Generation planetarer Wellen; -die Interaktion Grönlands mit dem atmosphärischen Jet und -Aspekte der WW von Zyklonen mit dem Gebirge.

Die Untersuchung erfolgt unter Zuhilfenahme einer Kombination diagnostischer Methoden (Eulersche und Lagrangesche Datenanalyse), analytischer Rechnungen und einer Reihe idealisierter numerischer Modellsimulationen, die mit einer Forschungsversion des operationellen Wettervorhersagemodells des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durchgeführt wurden. Die verwendeten Datensätze umfassen die (Re-)analysedaten des ECMWF (T106) und den Niederschlagsdatensatz CMAP.

Zunächst werden im Rahmen einer Fallstudie Aspekte der tatsächlichen Strömung im Umfeld von Grönland identifiziert. Besonderes Augenmerk richtet sich auf die Interaktion des lokalen Windfeldes mit synoptisch-skaligen

stratosphärischen Intrusionen, die in Kombination zu vertikal kohärenten Strömungsmustern durch die gesamte troposphärische Schicht führt.

Des Weiteren wird in der Fallstudie ein Zusammenhang gefunden zwischen orographisch induzierten wolken-diabatischen Prozessen an der Steilküste Südost-Grönlands und dem Auftreten einer langanhaltenden Hochdrucklage über dem Nordatlantik. Die physikalische Interpretation führt zur Definition eines neuartigen Blocking-Indikators. Mit dessen Hilfe kann die Wichtigkeit dieses Wechselwirkungsmechanismus für die Zeitperiode 1979-1995 nachgewiesen werden.

In einem zweiten Teil werden die reichhaltige lokale Dynamik um das Gebirge mit Hilfe hoch idealisierter Simulationen interpretiert und Evidenz für die weitreichende Auswirkung der Störung auf der Nordhemisphäre präsentiert. Dabei erweist sich die polare Lage Grönlands von besonderer Bedeutung für die Ausbreitung der Wellenzüge.

Der Einfluß großskaliger Gebirge auf eine idealisierte barotrope Atmosphäre mit einem Jet kann analytisch im Rahmen der quasi-geostrophischen Theorie behandelt werden. Propagierende Wellen existieren und breiten sich entlang der Diskontinuität aus. Die Lösung gibt außerdem Aufschluß über die Bedingung, unter welcher Resonanz zu erwarten ist. Numerische idealisierte Simulationen bestätigen die volle Gültigkeit der analytischen Ergebnisse auch für die primitiven Gleichungen auf der Sphäre.

Ebenfalls idealisiert werden die Prozesse studiert, die bei der WW mit dem "storm track", spezifischer mit einzelnen Zyklonen, ins Spiel kommen. In Übereinstimmung mit Beobachtungen wird die Bedeutung des Gebirges als "topographischer Wellenleiter" für Vortizes deutlich und physikalisch begründet.

Die Resultate dieser ganzen Palette von Studien bestätigen den vielfältigen Einfluß Grönlands (bzw. von Gebirgen ähnlicher Skala) auf die Atmosphäre. Wesentlich scheint dabei die Interaktion der Prozesse auf den unterschiedlichsten Skalen. Die lokale Strömungsantwort auf das Massiv entsteht vor dem großräumigen Strömungshintergrund, die generierten Störungen wirken aber ihrerseits auf die hemisphärische Atmosphäre zurück: So können beispielsweise die Zyklonen des "storm tracks" in ihrer Bewegung weiträumig abgelenkt werden; orographisch induzierte diabatische Prozesse modifizieren die dynamische Zusammensetzung der Luft in einer Art, die zur Erhaltung persistenter Hochdrucklagen beiträgt; und schließlich zeigt die Wechselwirkung mit einem Jet einen Mechanismus auf, der für die Ausbreitung planetarer Wellen von Relevanz sein kann.

Trotz des hohen Grads an Komplexität, den die orographischen Störungen der Erdatmosphäre aufweisen, konnten grundlegende physikalische Prozesse auf-

gezeigt und interpretiert werden. Deren Verständnis hat Konsequenzen für die mittelfristige und, in Zusammenhang mit der Entstehung der atmosphärischen Variationsmoden, für die saisonale Vorhersage.