

Influence of the ambient flow upon Rossby wave propagation between the tropics and extra-tropics

A dissertation submitted to the

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Science

presented by

THOMAS SPENGLER

Dipl. Met. Ludwig Maximilian University of Munich, Munich, Germany

born 4 September 1978

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Huw C. Davies, examiner
em. Prof. Dr. Joseph Egger, co-examiner

2008

Abstract

Global teleconnection patterns identified by principal component analysis pinpoint leading patterns of atmospheric variability. In addition they also indicate a possible dynamical linkage between distant regions on the globe. The physical mechanisms involved in the initiation of these patterns has been intensively investigated for the last decades. However, there are still controversial views on the mechanisms involved in the generation of teleconnection patterns. There are e.g. three proposed mechanisms for the Pacific/North America teleconnection pattern (PNA): Stationary Rossby wave propagation along great circles, unstable modal barotropic growth on the climatological mean winter state or interactions between the transient and mean atmospheric flow. In this study the focus is on the plausibility of the proposed mechanisms and will be elaborated by means of theoretical deductions and model simulations.

Non-divergent barotropic stationary Rossby waves on the sphere transmit energy along ray path resembling great circles, where the stationary wave number is the key parameter determining the lateral reach of the perturbations. The obtained patterns of wave propagation on a climatological winter mean basic state bear great similarities with the PNA encouraging the interpretation of this teleconnection pattern by means of stationary Rossby wave propagation. However, the choice of a climatological mean state is somewhat equivocal, especially since recent studies pinpointed the sub-monthly time-scale of the PNA rendering stationary Rossby wave propagation on a multi-year seasonal time mean questionable. Thus it is desirable to study the impact of a more day-to-day weather situation on the propagability of stationary Rossby waves in the atmosphere shedding light on the fact if the argumentation based on a climatological mean state still holds.

In the study presented here the propagability of stationary Rossby waves is first investigated by means of a theoretical deduction utilizing different dynamical frameworks with idealized meridionally varying basic states. It is shown that lateral propagation is strongly reduced for increasing environmental shear and in fact propagation is even prohibited if a certain threshold of the shear parameter is exceeded.

The second part of the study comprises global model simulations on the sphere with a zonally symmetric barotropic jet. A circular mountain serves as a wave maker in the tropical and subtropical latitudes. Strong sensitivities are found with respect to the strength of the jet as well as to the relative position of the mountain. For reduced maximum jet speeds it is shown that stationary Rossby wave propagation along great circles is still feasible for higher zonal wave numbers. However for maximum zonal jet speeds in excess of a certain threshold value no evidence is found for wave trains along a great circle resembling similarity to the PNA. Instead the response pole-ward of the jet is characterized by a zonal wave number one pattern. The results are shown to be in general agreement with linear barotropic and quasigeostrophic theory.

In the last part of the thesis non-linear global model simulations are presented initialized with a baroclinic and meandering jet. The setup is designed to mimic a more day-to-day like weather situation compared to the idealized settings in the first part of the thesis. Furthermore the strongly varying structures contrast the background states of earlier studies using linearizations about a climatological mean state. The response to a tropical heating is investigated pinpointing dependencies of its amplitude and downstream extent on distinct features along the mid-latitude wave guide. It is shown that a tropical heating always triggers a downstream development along the mid-latitude wave guide (jet stream) resembling the characteristics of a growing baroclinic disturbance. The leading edge of the response along the wave guide progresses with a speed comparable to the mean zonal jet speed at upper levels. Within the first 15 days of time integration some experiments feature an appreciable response pole-ward of the jet. However, the pole-ward response is generally not attributable to linear stationary Rossby wave propagation and is in fact due to a pole-ward shift of preexisting troughs and ridges or in fact to wave breaking

events. The latter findings disclose the highly non-linear character of the dynamics involved in producing the response to the north of the wave guide.

Zusammenfassung

Globale Telekonnektionsmuster, welche durch Hauptkomponentenanalyse bestimmt wurden, zeigen die maßgebenden Strukturen von atmosphärischer Variabilität. Zusätzlich verweisen sie auch auf mögliche dynamische Interaktionen zwischen entfernten Regionen auf dem Erdball. Die physikalischen Mechanismen welche zur Initiierung diese Muster beitragen wurden in den letzten Dekaden intensiv untersucht. Allerdings gibt es nach wie vor kontroverse Sichtweisen über die verschiedenen Mechanismen die mit der Erzeugung dieser Telekonnektionsmuster verbunden sind. So werden z.B. im wesentlichen drei verschiedene Mechanismen für die Entstehung des Pacific/North America Telekonnektionsmusters (PNA) vorgeschlagen: Ausbreitung von stationären Rossbywellen entlang von Grosskreisen, instabiles modales barotropes Wachstum von Störungen auf dem mittleren klimatologischen Zustand der nördlichen Winteratmosphäre oder die Interaktion zwischen transienten und mittleren atmosphärischen Zustandsgrößen. Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Studie zielt auf die Plausibilität der vorgeschlagenen Mechanismen. Die Untersuchungen basieren auf theoretischen Herleitungen und numerischen Modellsimulationen.

Die Energie divergenzfreier barotroper Rossbywellen auf einer Kugel breitet sich entlang von Grosskreisen aus, wobei die stationäre Wellenzahl den Schlüsselparameter darstellt welcher die laterale Reichweite der Störung determiniert. Die erhaltenen Muster von Wellenausbreitung auf einem mittleren klimatologischen Winterzustand der Atmosphäre weisen große Ähnlichkeit zum PNA auf. Dieser Fakt bestärkt die Interpretation dieses Telekonnektionsmusters durch Ausbreitung von stationären Rossbywellen. Allerdings ist die Wahl eines klimatologischen Hintergrundzustandes fragwürdig, vor allem da jüngere Veröffentlichungen auf die sub-monatige Zeitskala des PNA verwiesen und somit die Ausbreitung stationärer Rossbywellen auf einem mehrjährigen Mittel zweifelhaft erscheint. Folglich ist es wünschenswert den Einfluss eines Hintergrundzustandes auf die Ausbreitungsmöglichkeiten von stationären Rossbywellen zu untersuchen um somit Aufschluss über die Gültigkeit der Argumentation basierend auf einem klimatologischen Hintergrund zu geben.

In der vorliegenden Studie wird die Ausbreitung von stationären Rossbywellen zuerst unter Zuhilfenahme theoretischer Herleitungen in verschiedenen dynamischen Bezugssystemen mit idealisierten meridional variierenden Hintergrundzuständen untersucht. Es zeigt sich, dass die laterale Ausbreitung stark reduziert ist für eine Zunahme der Scherung des Hintergrundzustandes. In der Tat ist die Wellenausbreitung nicht möglich sobald der Scherungsparameter einen bestimmten Wert überschreitet.

Der zweite Teil der Studie beinhaltet globale Modellsimulationen auf der Erdkugel mit einem zonal-symmetrischen Strahlstrom. Ein runder Berg dient als Wellenerzeuger in den tropischen und subtropischen Breitengraden. In den Resultaten wurden Starke Sensitivitäten gegenüber der Geschwindigkeit des Strahlstroms sowie gegenüber der relativen Position des Berges gefunden. Für geringere maximale Geschwindigkeiten des Strahlstroms ist eine Ausbreitung von stationären Rossbywellen entlang von Grosskreisen noch möglich. Für maximale Windgeschwindigkeiten oberhalb eines Schwellwertes gibt es allerdings keine Anzeichen mehr für Wellenausbreitung entlang von Grosskreisen welche mit dem PNA in Übereinklang gebracht werden können. Stattdessen sind die Störungen polwärts des Strahlstroms charakterisiert durch ein Muster mit einer zonalen Wellenzahl von eins. Es wird gezeigt, dass die präsentierten Resultate in Vereinbarung mit linearer barotroper und quasigeostrophischer Theorie sind.

Im letzten Teil der Dissertation werden nicht-lineare globale Modellsimulationen präsentiert welche mit einem baroklinen und meandrierender Strahlstrom initialisiert wurden. Diese Konfiguration wurde erstellt um das tägliche Wettergeschehen zu imitieren im Kontrast zu den ersten beiden Studien welche sich auf sehr idealisierte Hintergrundzustände beschränken. Des Weiteren sind die hier gewählten Strukturen in Kontrast zu Hintergrundzuständen früherer linearer Studien welche auf einem klimatologis-

chen Mittel als Hintergrundzustand basieren. Die Reaktionen auf eine diabatische Wärme-quelle in den Tropen zeigt die Sensitivitäten der Amplitude und der Reichweite der generierten Störung in Bezug auf verschiedene Strukturen des Wellenleiters in den mittleren Breiten. Es zeigt sich, dass ein diabatischer Antrieb in den Tropen immer eine Entwicklung stromabwärts entlang des Wellenleiters (Strahlstroms) auslöst welche die Eigenschaften einer wachsenden baroklinen Störung hat. Die vordere Flanke der Störung breitet sich mit einer Geschwindigkeit entlang des Wellenleiters aus welche vergleichbar zur mittleren zonalen Geschwindigkeit des Strahlstroms ist. Einige Experimente enthalten eine nennenswerte Störung polwärts des Strahlstroms innerhalb der ersten 15 Tage der Modellintegration. Allerdings ist diese Störung in der Regel nicht einer linearen stationären Ausbreitung einer Rossbywellen zuzuschreiben. Die Ursache liegt vielmehr in der Vertiefung von schon existierenden Trögen oder Rücken oder ist sogar durch Wellenbrechen hervorgerufen. Die zuletzt genannten Befunde verweisen auf den hochgradig nicht-linearen Charakter der involvierten dynamischen Prozesse welche für die Störungen nördlich des Strahlstroms verantwortlich sind.