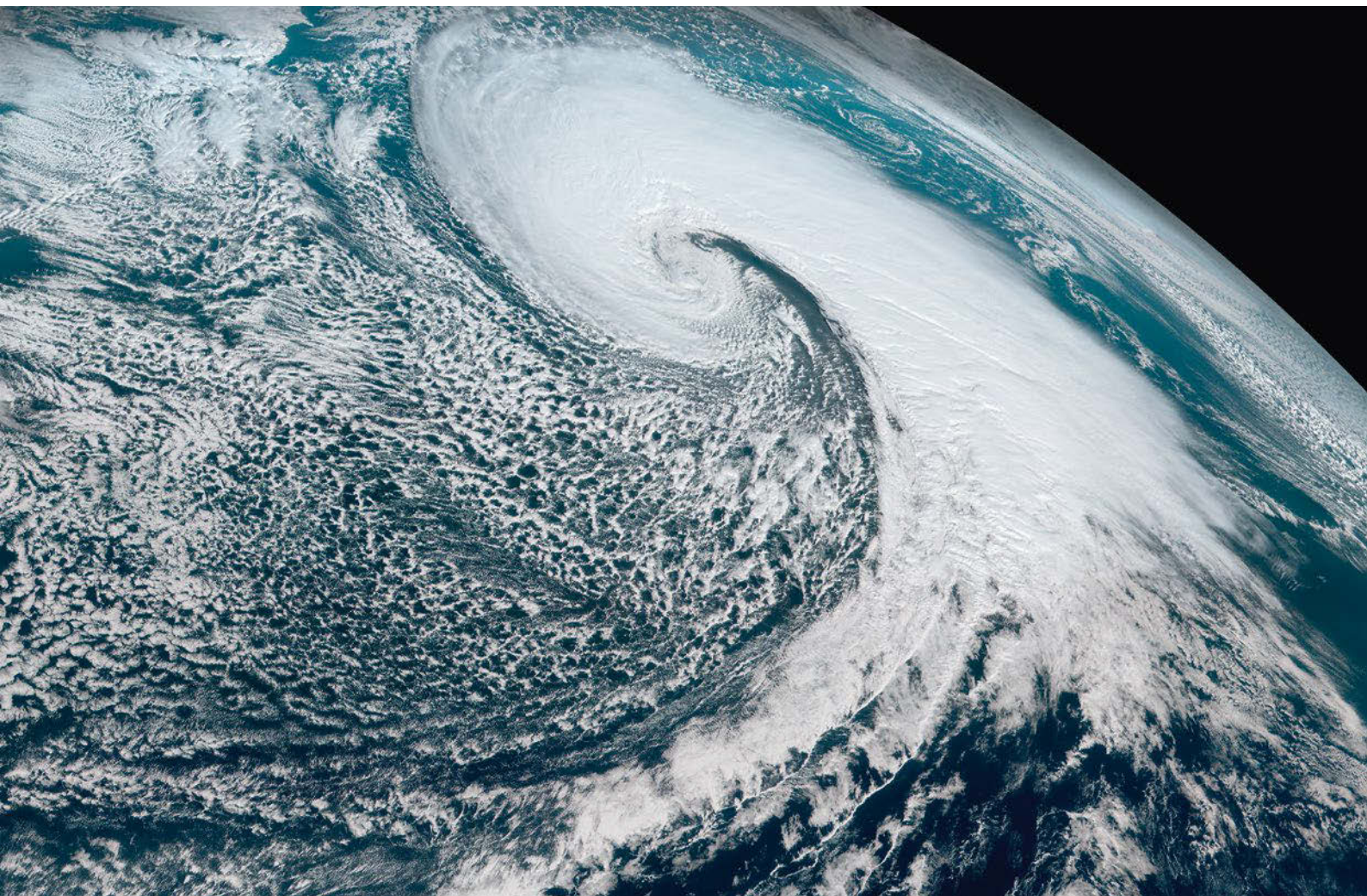


Heft 103 (2020) 18,90 Euro

promet

meteorologische fortbildung

Außertropische Zyklonen



Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleitung

Dipl.-Met. Magdalena Bertelmann (Offenbach/M.)

Redaktionsausschuss

Prof. Dr. G. Adrian (Offenbach/M.)

Prof. Dr. B. Ahrens (Frankfurt/M.)

PD Dr. F. Berger (Lindenberg)

Prof. Dr. C. Bernhofer (Dresden)

Prof. Dr. G. Craig (München)

Prof. Dr. G. Groß (Hannover)

Prof. Dr. A. Macke (Leipzig)

Dr. M. Olefs (Wien)

Dr. C. Plaß-Dülmer (Hohenpeißenberg)

Dr. M. Sprenger (Zürich)

Layout und Satz

Susanne Schorlemmer und

Karin Borgmann Grafikdesign

Mitarbeit

Heike Beck, Tanja Glatz

Auflage: 3 900**Fotohinweis Titelseite**

Außertropische Zyklone am 10. Januar 2019 im Nordwestpazifik während explosiver Zyklognese (Quelle: NOAA/RAMMB/CIRA, JMA)

Redaktionsschluss: 29.09.2020

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Für die ein Jahr später

erscheinende Online-Ausgabe gilt:

**Druck**

Heyne-Druck GmbH

Ferdinand-Porsche-Straße 15

63073 Offenbach/M.

Verlag

Deutscher Wetterdienst

Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

Frankfurter Str. 135

63067 Offenbach/M.

selbstverlag@dwd.de

ISSN 0340-4552 (Druck)

ISSN 2194-5950 (Internet)

ISBN 978-3-88148-522-7 (Druck)

ISBN 978-3-88148-521-0 (Internet)

Preis des Heftes: 18,90 € plus Versandkosten**Internet:** www.dwd.de/promet**Editorial**

Liebe Leserinnen
und Leser,



was für ein großartiges Gefühl, die erste „eigene“ *promet*-Ausgabe in den Händen zu halten! Nie hätte ich geglaubt, wie viel Arbeit in so einer Zeitschrift steckt und welche (oft unvorhersehbaren) Ereignisse die Herausgabe beeinflussen können – und deshalb möchte ich mich zuallererst bei Ihnen für die Verzögerung entschuldigen. Doch das Warten hat sich gelohnt, denn vor Ihnen liegt eine ganz besondere Ausgabe: „Besonders“ nicht nur wegen der professionellen Gestaltung, sondern vor allem wegen der zehn spannenden Beiträge über ein Thema, das eine breite Leserschaft ansprechen dürfte: „Außertropische Zyklonen“ sind zum einen „tägliches Geschäft“ für meine Kolleg(inn)en und mich in der Wettervorhersage, zum anderen ein überaus wichtiges Forschungsfeld. Da diese Tiefdruckgebiete unser Wetter in den mittleren Breiten maßgeblich bestimmen, sind sie darüber hinaus auch sicherlich für die „breite Bevölkerung“ von Interesse.

Und wenn Michael Sprenger in seinem Vorwort (S. 2) schreibt, dass es ihm Freude bereitet hat, die Autoren beim Verfassen der Beiträge zu begleiten, so kann ich nur hinzufügen, dass ich mit ihm als Fachredakteur wohl kein besseres Los hätte ziehen können: Zusammen mit den zuverlässigen Autoren hat er mir den Einstieg in die neue Herausforderung durch die tolle Zusammenarbeit mehr als leicht gemacht.

Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, wünsche ich, dass Sie genauso viel Freude beim Lesen dieses Heftes haben und viel Neues über diese spannenden Wettersysteme erfahren.

Herzlichst

Ihre Magdalena Bertelmann
Schriftleiterin *promet*

Inhalt

promet – Meteorologische Fortbildung, Heft 103 (2020)

Thema des Heftes: **Außertropische Zyklonen**

Fachliche Redaktion: Dr. Michael Sprenger, ETH Zürich

Fachliche Durchsicht: Dipl.-Met. Detlev Majewski mit Unterstützung von Dr. Michael Denhard,
Dipl.-Met. Michael Buchhold, Dr. Axel Seifert, Dr. Jens Bonewitz,
M. Sc. Katharina Isensee und Dr. Jennifer Brauch (alle DWD Offenbach)

Beitrag	Seite
M. SPRENGER Vorwort „Zu diesem Heft“	2-3
Zyklonen als Stürme von großer sozioökonomischer Relevanz	
F. PANTILLON 1 Vorhersage von Zyklonen	7-13
M. KARREMANN, J. PINTO 2 Clustering von Zyklonen	15-21
Struktur und Entwicklung einzelner Zyklonen	
A. SCHÄFLER, F. EWALD, M. RAUTENHAUS 3 Die Vermessung von Zyklonen	25-32
S. SCHEMM, M. SPRENGER 4 Zyklonen und Fronten	33-42
H. DAVIES 5 Zyklonen als Dauerbrenner in der Geschichte der Meteorologie	43-49
M. BOETTCHER, H. WERNLI 6 Die PV-Struktur außertropischer Zyklonen	51-58
H. BINDER, E. MADONNA 7 Warm Conveyor Belts	59-66
M. RIEMER, C. GRAMS, J. KELLER 8 Von der tropischen zur außertropischen Zyklone	67-76
Zyklonen früher und in Zukunft	
C. RAIBLE, P. LUDWIG, M. MESSMER 9 Zyklonen und Paläoklima	79-87
U. ULBRICH, G. LECKEBUSCH 10 Zyklonen in einem sich ändernden Klima	89-94
Buchbesprechung	95-97
Examina im Jahr 2019	99-106
Examina im Jahr 2018	107-115

Außertropische Zyklonen

Zu diesem Heft

Es gibt kaum ein Thema, das eine so lange und interessante Geschichte in der Meteorologie aufweist, wie die Erforschung außertropischer Zyklonen. Das ist nicht erstaunlich, wenn man bedenkt, dass diese Systeme das Wetter und Klima der mittleren Breiten massgeblich beeinflussen, einerseits indem sie für einen grossen Teil des Niederschlags in dieser Region verantwortlich sind, aber auch weil sie oft mit starken Sturmwinden und Sturmfluten verbunden sind. Dieses Themenheft baut auf der sozio-ökonomischen Relevanz der außertropischen Zyklonen auf, behandelt aber auch die eher strömungsdynamischen (theoretischen) Aspekte. Es soll somit eine Einführung in eines der faszinierendsten Wettersysteme der mittleren Breiten bieten. Im Folgenden möchte ich einige Gedanken zur Auswahl der behandelten Themen formulieren, ohne bereits zu stark in die Tiefe zu gehen. Das ist dann den einzelnen Fachbeiträgen vorbehalten, die mit viel Enthusiasmus und didaktischem Geschick von den Autoren verfasst wurden.

Der erste Beitrag befasst sich mit einer grundlegenden Frage: Wie können wir überhaupt die Intensität, aber auch die Zugbahn der außertropischen Zyklonen vorhersagen? Eine solche Vorhersage ist essentiell, um grossen ökonomischen Schaden zu vermeiden und auch Leben zu schützen. Die ersten systematischen Ansätze einer Sturmvorhersage gehen auf den britischen Admiral Robert Fitzroy zurück, der wesentlich zum Aufbau des britischen Wetterdienstes beitrug. Florian Pantillon zeigt in seinem ersten Beitrag sehr schön auf, wie weit sich die meteorologische Vorhersage von Stürmen seit Fitzroy's Zeiten weiterentwickelt hat. Heute stehen uns mit komplexen Assimilationsverfahren und numerischen Wettervorhersagemodellen Verfahren zur Verfügung, von denen Robert Fitzroy nie zu träumen gewagt hätte und die auch weit über die Vision eines Vorhersagezentrums gemäss Lewis Fry Richardson hinausgehen. Kann bereits ein einzelner Sturm einen beträchtlichen Schaden anrichten, so multipliziert sich dieses Schadenspotential nochmals massiv, wenn sich die außertropischen Zyklonen in Serie über eine Region bewegen.

Es gibt zahlreiche Hinweise – wie im Beitrag von Melanie Karremann (und den in diesem Vorwort nicht genannten Koautoren) beschrieben –, dass es Zyklonenfamilien gibt. Ich weiss nicht, ob man die Wetterentwicklung während dem 6. Juni 1944, also bei der Landung der alliierten Truppen in der Normandie am D-Day, als eine Serie von außertropischen Zyklonen verstehen kann. Tatsache ist jedoch, dass dieser Juni ausserordentlich stürmisch war, und dass die Wettervorhersager um Sverre Pettersen sehr gefordert waren, um in einer ständigen Abfolge von Sturmpassagen über den Ärmelkanal ein geeignetes Zeitfenster für die Landung zu finden. Dies zeigt auf, dass unter Umständen die Zugbahnen und die serielle Abfolge von Stürmen Geschichte schreiben können.

Beschäftigen sich die zwei ersten Beiträge vor allem mit der Vorhersage außertropischer Stürme und deren praktischer Relevanz, so behandelt Andreas Schäfler im dritten Beitrag einen ganz anderen Aspekt: Wie lässt sich ein synoptisches System wie eine außertropische Zyklone vermessen? Dass dies bei weitem keine triviale Aufgabe ist, wird man sich bewusst, wenn man an die schiere Ausdehnung (1000 km) und die zeitliche Lebensdauer (1 Woche) einer typischen Zyklone denkt. Zwangsläufig wird also jede Messung nur einen punktuellen Charakter haben, was wiederum die Frage aufwirft, was sich aus solchen Punktmessungen über ein grossskaliges System lernen lässt. Ein gewinnbringender Einsatz aller verfügbaren Messsysteme ist nur dann garantiert, wenn die einzelnen Messungen sorgfältig im Rahmen einer koordinierten Messkampagne geplant werden – wie konkret im dritten Beitrag für die Feldkampagne NAWDEX illustriert wird.

Außertropische Zyklonen sind strukturierte Systeme! Die Rotationsströmung geht einher mit einer klar definierten Wolkenstruktur, und nicht zuletzt mit einem Wetterphänomen, das vermutlich wie kein anderes im Bewusstsein der allgemeinen Bevölkerung ist: Fronten. Warm- und Kaltfronten gehören zu Tiefdruckgebieten! Das Verhältnis zwischen Fronten und Zyklonen reicht besonders tief, denn seit Beginn der Zyklonenforschung stellt sich die Frage, ob Fronten eine kausale Rolle spielen bei der Zyklonenentwicklung, oder doch nur deren Begleiterscheinung sind. Dieser Frage geht Sebastian Schemm in seinem Beitrag nach.

Direkt im Anschluss an die Frage zur Rolle der Fronten in aussertropischen Zyklonen setzt der Beitrag von Huw Davies an, in dem die grundlegenden Mechanismen der Zyklonogenese und Vertiefung in einer historischen Entwicklung vorgestellt wird. Dass wir heute Meteorologie als physikalische und quantitative Wissenschaft verstehen können, liegt sicher zu einem grossen Teil begründet in der historischen Entwicklung der Theorien zur Zyklonogenese.

Der nächste Beitrag widmet sich der inneren Struktur der aussertropischen Zyklonen. Dabei legt Maxi Böttcher den Schwerpunkt auf die Euler'sche Betrachtungsweise. Auch dieser Beitrag zeigt wiederum auf, wie sehr unser Verständnis der physikalischen Prozesse bei der Zyklonogenese in den letzten 50 Jahren gewachsen ist. Es ist aus heutiger Sicht für viele Meteorologen schwer vorstellbar, dass es eine Zeit gab, in der die Dynamik nicht mit Hilfe der Potentiellen Vorticity (PV) betrachtet wurde! Der Übergang zur PV-Perspektive hat unsere Sicht auf die Zyklonogenese verändert. Besonders schön wird das erkennbar, wenn wir in dieser Sicht sogar völlig neue (vielleicht unerwartete) Mechanismen der Zyklonenentwicklung und -bewegung kennen lernen, zum Beispiel bei diabatischen Rossby-Wellen.

Komplementär zur Euler'schen ist die sogenannte Lagrange'sche Betrachtungsweise. Diese schaut nicht etwa das Strömungsfeld zu einem festen Zeitpunkt an, sondern sie verfolgt Luftpakete entlang ihrer Bewegung durch die Atmosphäre. Hanin Binder zeigt in ihrem Beitrag auf, wie sich mit Trajektorien kohärente Luftströmungen innerhalb aussertropischer Zyklonen identifizieren lassen. Sie zeigt aber auch, dass es mit einer Berechnung der Trajektorien nicht getan ist; die Komplexität der Luftbewegungen muss ‚aufgeschlüsselt‘ werden, kohärente Luftströmungen (zum Beispiel „Warm Conveyor Belts“) müssen identifiziert werden; und nicht zuletzt wollen die Trajektorien mit der Euler'schen Sichtweise in Verbindung gebracht werden.

Wir wissen heute, dass tropische Wirbelstürme auf ganz anderen physikalischen Mechanismen beruhen als ihr aussertropisches Gegenstück. Michael Riemer zeigt in seinem Beitrag jedoch, dass tropische Wirbelstürme sich in ihrer Struktur wesentlich verändern können, wenn sie bis in die mittleren Breiten vorstossen. Wenn eine Umwandlung in eine aussertropische Zyklone stattfindet, kann sich dies sogar weit stromabwärts, zum Beispiel über Europa, auswirken und zu grossen Schäden führen.

Es bleiben zwei Beiträge zu erwähnen, die sich mit Zyklonen im Klimasystem beschäftigen. Der erste Beitrag von Christoph Raible schaut weit zurück in die Vergangenheit, nimmt also einen paläoklimatischen Standpunkt ein. Wir sind so sehr mit dem gegenwärtigen Klima beschäftigt und fragen uns wie sich dieses in Zukunft ändern wird, dass manchmal vergessen geht, was sich über das Klima (und die Zyklonenhäufigkeit) lernen lässt mit einem Blick in die Vergangenheit. Der letzte Beitrag von Uwe Ulbrich schliesslich wagt den Blick in die Zukunft. Zahlreiche Studien belegen, dass es in einem wärmeren Klima Veränderungen in den Zyklonenzugbahnen und -intensitäten geben wird. Mit viel Zuversicht können wir heute nicht nur das Wetter (und die Stürme) auf 10 Tage hinaus vorhersagen, sondern sogar basierend auf Erdsystem-Modellen gute Abschätzungen vornehmen, wie sich das Klima und die Sturmhäufigkeiten in Zukunft verändern werden. Und dennoch zeigt die Erfahrung, dass es nicht ausreicht, diese Fakten zu publizieren. Es bedarf einer gewinnenden und überzeugenden Kommunikation.

Gute Kommunikation, das möchte auch das Nebenthema dieses Heftes sein. Es ist zu hoffen, dass die Beiträge in diesem Heft nicht nur Fakten und Einblicke in die historische und aktuelle Forschung zu aussertropischen Zyklonen bieten. Dies ist ein Ziel. Am schönsten aber ist es, wenn die Leser dieser Beiträge spüren, mit welchem Enthusiasmus und Interesse auch heute noch ein Wetterphänomen studiert werden kann, das seit über 100 Jahren ein Dauerbrenner in der meteorologischen Forschung darstellt. In diesem Sinne wünsche ich mir, dass dieses Heft einen wertvollen Beitrag in Lehre und Forschung liefern kann, dass es aber auch von Leuten im operationellen Betrieb (zum Beispiel Vorhersagern) gerne in die Hand genommen wird! Es hat mir als Fachredaktor des Heftes Freude bereitet, die Autoren beim Verfassen der Beiträge zu begleiten. Ihnen, liebe Leser, wünsche ich, dass Sie mit derselben Freude und mit viel Gewinn die Beiträge lesen werden.

Michael Sprenger

Anmerkung der Schriftleitung: Dieser Text wurde bewusst in der schweizerhochdeutschen Schreibweise belassen.

Zyklonen als Stürme von großer sozioökonomischer Relevanz

1 Vorhersage von Zyklonen

F. PANTILLON

Forecasting cyclones

Zusammenfassung

Die Vorhersage intensiver Zyklonen ist von großer Bedeutung, da diese Tiefdruckgebiete gewaltige Stürme verursachen können und damit zu den schlimmsten Naturkatastrophen in den mittleren Breiten gehören. Aus Fehlvorhersagen hat man in den letzten Jahrzehnten viel über die Dynamik von intensiven Zyklonen gelernt, beispielsweise den Grund für eine explosive Intensivierung oder den Ursprung von Extremwinden. Man hat aber auch neue Methoden eingeführt, wie probabilistische Vorhersagen und gezielte Wetterwarnungen. Heutzutage werden mithilfe von Globalmodellen intensive Zyklonen mehrere Tage im Voraus zuverlässig vorhergesagt, während Regionalmodelle den Wind und Niederschlag auf kürzeren Fristen detaillierter beschreiben. Aktuelle Modellentwicklungen und Forschungsthemen betreffen sowohl die kleinsten Skalen, um die Entstehung von Windböen in Stürmen realistischer darzustellen, als auch die größten Skalen, um langfristige Prognosen von Zyklonen zu ermöglichen.

Summary

Forecasting intense cyclones is crucial, because they result in windstorms and belong to the most destructive natural disasters in the mid latitudes. In the past decades, failed forecasts led to new understandings about the dynamics of intense cyclones, such as the reason for explosive intensification or the origin of extreme winds, but also to introducing new methods, such as probabilistic forecasts and targeted weather warnings. Today's global models allow anticipating intense cyclones several days in advance, while at shorter lead times regional models provide more details about wind and precipitation. Current model developments and research topics range from the smallest scales for a realistic representation of gust formation in windstorms to the largest scales to extend the forecast range of cyclones.

1 Zyklonen als Naturkatastrophen

Außertropische Zyklonen bestimmen zum großen Teil das Wetter in den mittleren Breiten. Sie spielen eine wichtige Rolle im Wasserkreislauf durch die Erzeugung von Niederschlag, ob für die Trinkwasserversorgung, die Landwirtschaft oder für Wintersportanlagen. Intensive Zyklonen können aber auch zu Naturkatastrophen werden: Dauerregen beim Durchzug einer oder mehrerer Zyklonen verursacht oftmals Überflutungen und große Schneemengen können den Verkehr eines Landes lahmlegen sowie Berggebiete isolieren. Allerdings liegt die häufigste Ursache der meisten Schäden nicht im Niederschlag, sondern vielmehr im starken Wind, vor allem bei Winterstürmen. Manchmal treten Schäden auch im Zusammenhang mit anderen Prozessen auf. Zum Beispiel bei Sturmfluten im Küstenbereich, die durch eine Kombination von hohem Meeresspiegel und großen Wellen verursacht werden. Insgesamt sind einzelne Stürme für dutzende Opfer und Schäden in Höhe von Milliarden Euro verantwortlich.

Dies weist auf die Notwendigkeit von zuverlässigen Zyklonenvorhersagen hin. Auch wenn Stürme nicht verhindert werden können, können ihre Konsequenzen zumindest vermindert werden. Gute Vorhersagen erlauben Wetterdiensten die Herausgabe von Warnungen bis auf ein paar Tage im Voraus. Vorbereitungen helfen nicht unbedingt gegen Schäden an Infrastruktur, Gebäuden oder in Wäldern, aber sie können die Gefährdung menschlicher Aktivitäten vermindern. Entsprechende Maßnahmen haben in den letzten Jahren zum Beispiel mehrmals Karnevalsumzüge und Weihnachtsmärkte betroffen, die wegen Stürmen eingeschränkt oder sogar abgesagt wurden. In historischer Perspektive war dies nicht immer der Fall und manche Stürme sind derart unauffällig und unerwartet entstanden, dass sie Tragödien an Land, im Meer und/oder im Küstenbereich verursachten.

Das Verständnis über die Zyklonendynamik wurde oft nach historischen Ereignissen verbessert und neue Me-

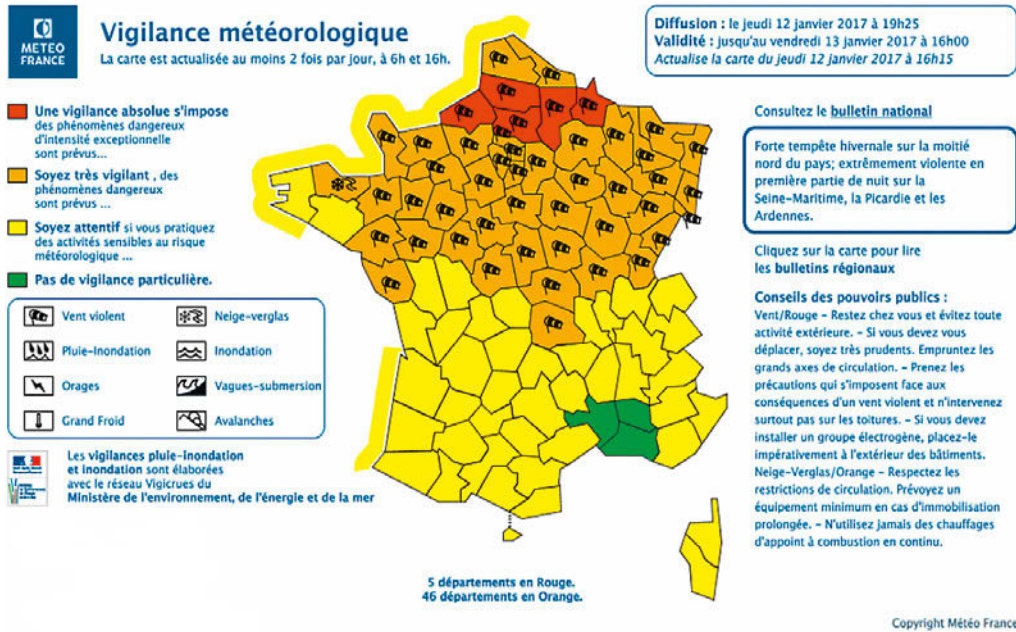


Abb. 1-1: Beispiel einer Karte mit Wetterwarnungen des französischen Wetterdienstes Météo France für Sturm „Egon“ am 13. Januar 2017. Gelb-, orange- und rotmarkierte Regionen entsprechen einer potenziell gefährlichen, gefährlichen und sehr gefährlichen Lage. <http://vigilance-public.meteo.fr/>

methoden in Wettervorhersagen und -warnungen eingeführt, was Abschnitt 2 beschreibt. Dank über einem Jahrhundert der Zyklonenforschung sind solche Tragödien heutzutage kaum mehr vorstellbar (siehe Abschnitt 3). Abschließend wird in Abschnitt 4 thematisiert, warum Vorhersagen manchmal fehlerhaft oder unpräzise sind und somit weitere Forschungsarbeiten notwendig sind.

2 Fehlvorhersagen bei historischen Stürmen

Zyklonenvorhersagen stellen einen wichtigen Teil der Wettervorhersage auf synoptischer Skala dar und daher sind die beiden Entwicklungen eng miteinander verbunden. Ursprünglich basierten Vorhersagen vor allem auf Beobachtungen am Boden und auf konzeptionellen Modellen, die sich Anfang des 20. Jahrhunderts und insbesondere dank der Norwegischen Schule rasch verbesserten (siehe Beitrag 5 in diesem Heft für einen historischen Überblick). In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden Computer entwickelt und damit numerische Modelle ermöglicht, die seitdem Wettervorhersagen immer wieder revolutionieren (BAUER 2015). Trotz Verbesserungen traten noch lange Fehlvorhersagen von Zyklonen auf, insbesondere bei schnellen Intensivierungen, wie zum Beispiel beim unerwarteten *President's Day* Wintersturm im Februar 1979 an der nordamerikanischen Ostküste (BOSART 1981). In den 1980er Jahren brachten Messkampagnen im Nordatlantik wie ERICA und FASTEX ein besseres Verständnis der Dynamik von solchen Ereignissen. Sie zeigten die wichtige Rolle des latenten Heizens in Wolken für die rasche Intensivierung von Zyklonen auf (diabatische Prozesse, siehe Beitrag 7 in diesem Heft). Zusätzlich wurde ein neues konzeptionel-

les Modell für den Lebenszyklus entwickelt, das sogenannte „Shapiro-Keyser-Zyklonenmodell“, das im Vergleich mit der klassischen Sicht aus der norwegischen Schule statt einer Okklusion einen Frontenbruch und eine warme „Seklusion“ beinhaltet (siehe Beitrag 4). Diese neuen Kenntnisse der Dynamik übertrugen sich auf die Entwicklung der numerischen Modelle.

Auch Europa erfuhr markante Ereignisse, die das Verständnis und die Vorhersage von Zyklonen im Anschluss verbessert haben. Ende Dezember 1999, in den letzten Tagen des 20.

Jahrhunderts, zog Sturm „Lothar“ mit extremen Windgeschwindigkeiten durch Westeuropa von Nordfrankreich bis Süddeutschland und die Schweiz. Am Tag darauf folgte auf „Lothar“ der Sturm „Martin“ mit einer ähnlichen Intensität aber einer südlicheren Zugbahn. Zusammen hinterließen die zwei Stürme mehr als hundert Opfer, Schäden in Milliardenhöhe und umfangreiche Zerstörungen in Wäldern. Im Schwarzwald, in den Vogesen und im Jura, wo „Lothar“ als „Jahrhundertsturm“ bekannt wurde, fallen seine Spuren nach 20 Jahren immer noch auf. Der Sturm wurde aber auch als Fehlvorhersage bekannt, weil er damals von manchen numerischen Modellen viel zu schwach vorhergesagt wurde, teilweise wegen einem Mangel an Beobachtungen über dem Nordatlantik. Das führte zu nur kurzfristigen Warnungen und erlaubte kaum entsprechende Vorbereitungen. Seitdem wurde „Lothar“ zum Thema von zahlreichen wissenschaftlichen Studien. Seine rapide, unerwartete Entwicklung und rasche Bewegung durch den Nordatlantik wurde als diabatische Rossby-Welle erklärt, verbunden mit einer explosiven Intensivierung durch einen starken Jetstream (WERNLI 2002; siehe Beitrag 6 in diesem Heft).

Neben theoretischen Erkenntnissen brachte der Sturm zwei wichtige Fortschritte bei Wetterdiensten: Einerseits wurde bei Météo France nach „Lothar“ ein neues System für Wetterwarnungen mit drei Stufen (gelb, orange und rot) eingeführt, um die Kommunikation zu verbessern (Abbildung 1-1). Andererseits wurde das Potential von probabilistischen Vorhersagen für extreme Wetterereignisse erkannt, die statt einer einzigen, eine Mehrzahl (ein Ensemble) von Prognosen rechnen. Im Fall von „Lothar“ wurde ersichtlich, dass der Sturm in einigen der 50 Mit-

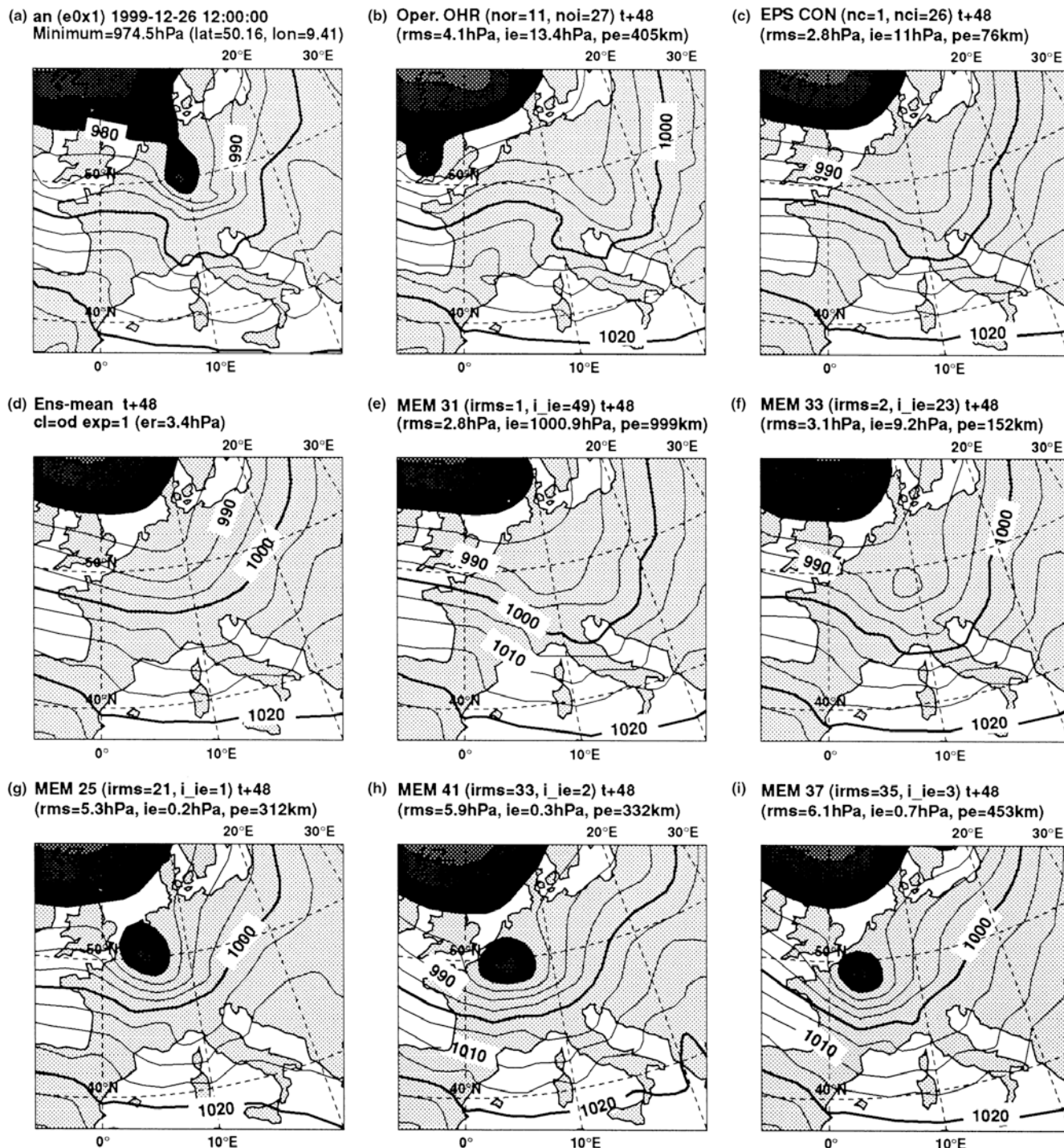


Abb. 1-2: Luftdruck auf Meereshöhe für Sturm „Lothar“ am 26. Dezember 1999 um 12 UTC nach Modellrechnungen des EZMW. Der Sturm (schwarz schattierte Fläche, Luftdruck unter 980 hPa) ist in der Analyse erkennbar (a), aber fehlt in deterministischen Vorhersagen zwei Tage im Voraus (b, c); in der Ensemble-Vorhersage wird der Sturm im Mittelwert nicht gefunden (d), jedoch in einigen der 50 Mitglieder (nicht in e, f aber in g-i). Aus BUIZZA (2002).

glieder des Ensembles aus dem Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) mehrere Tage im Voraus präsent war, was eine frühe Warnung ermöglicht hätte (Abbildung 1-2; BUIZZA 2002). Heutzutage sind solche probabilistischen Vorhersagen ein Bestandteil der Alltagsroutine bei Wetterdiensten.

Ein Jahrzehnt vor „Lothar“ hatte der *Great Storm* im Oktober 1987 Nordfrankreich und vor allem England schwer

getroffen. An den Sturm erinnert man sich in Großbritannien als eine besondere Fehlvorhersage, da seine Intensität damals deutlich unterschätzt wurde. Allerdings war der tiefe Kerndruck der Zyklone nicht allein für die Rekordwinde verantwortlich. Erst Jahre später wurde von BROWNING (2004) als Auslöser ein *Sting Jet* erkannt. Dieser kann als eine lokale und kurzlebige Region von Extremböen beschrieben werden, die nur in bestimmten Shapiro-Keyser-Zyklonen entsteht. Solche Stürme betref-

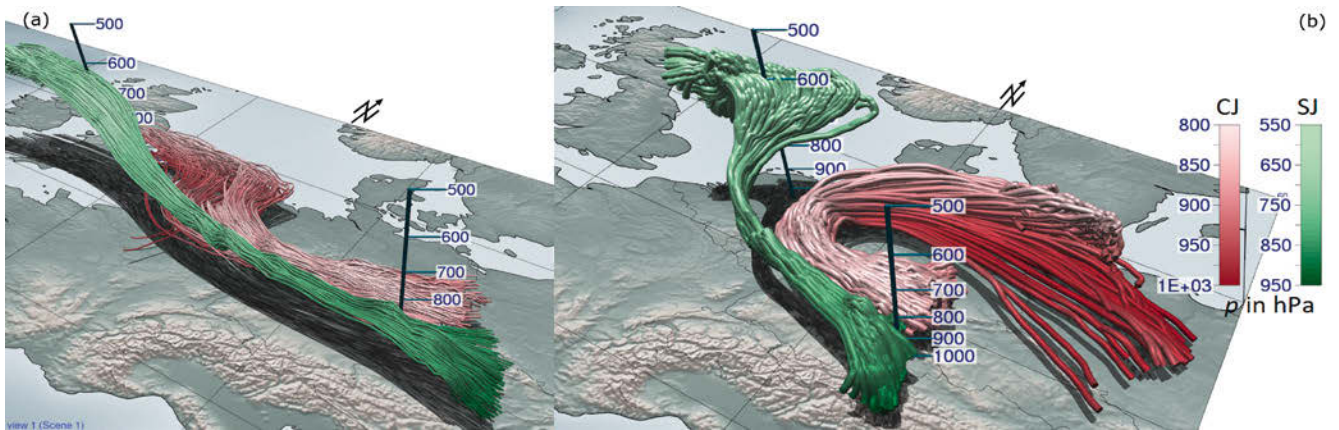


Abb. 1-3: Verantwortliche Luftströmungen (Trajektorien) für starke Winde in einer Simulation von Sturm „Egon“ am 12.-13. Januar 2017. Ein ungewöhnlicher *Sting Jet* (SJ) (grün) entsteht höher und westlicher als eine klassische Luftströmung hinter der Warmfront (*Cold Jet* (CJ), rot). Die Unterschiede werden noch deutlicher, wenn die Trajektorien nicht im Erd-Bezugssystem (a), sondern relativ zur Sturmposition (b) dargestellt werden. Visualisierungen mit der Met.3D Software (<https://met3d.wavestoweather.de>). Aus EISENSTEIN (2020).

fen vor allem Irland und Großbritannien, aber letztens wurde ein *Sting Jet* über dem kontinentalen Westeuropa im Fall von „Egon“ im Januar 2017 nachgewiesen (Abbildung 1-3; EISENSTEIN 2020). Die Beschleunigung des Windes in einem *Sting Jet* entsteht aufgrund einer Mischung von physikalischen Prozessen auf mehreren Skalen, deren Ursprung immer noch nicht ganz verstanden ist und woran weiter geforscht wird. Zusätzlich erfordert die realistische Darstellung von *Sting Jets* in numerischen Modellen eine hohe horizontale und vertikale Auflösung, die 1987 nicht erreichbar war und auch heute noch eine Herausforderung bleibt. Letztendlich wurde beim *Great Storm* neben der eigentlichen Vorhersage auch ihre Kommunikation stark kritisiert, was für die Einführung von innovativen Methoden beim UK Met Office gesorgt hat. Für Risikowarnungen wird heutzutage eine Matrix angewendet, die nicht nur die möglichen Konsequenzen eines Wetterereignisses zeigt, sondern diese mit seiner Eintrittswahrscheinlichkeit kombiniert. So wird ein unsicheres aber schweres Ereignis (*low likelihood high impact*) vergleichbar zu einem sicheren aber weniger schweren Ereignis (*high likelihood low impact*). Diese Darstellung erlaubt eine frühzeitige Vorbereitung auf ein Ereignis.

Seit dem *Great Storm* und „Lothar“ sind im 21. Jahrhundert in Europa immer wieder markante Stürme aufgetreten. Trotz Verbesserungen in Verständnis, Vorhersage und Kommunikation haben „Kyrill“ im Januar 2009 und „Xynthia“ im Februar 2010 jeweils ca. 50 Opfer und mehr als 1 Milliarde EUR Schäden hinterlassen. „Kyrill“ hat vor allem Deutschland getroffen, nach einer raschen Intensivierung über dem Nordatlantik durch eine Kombination von starkem Jetstream und latenterm Heizen. Extreme Windböen entstanden aber wegen einer ungewöhnlichen Gewitterlinie entlang der Kaltfront (LUDWIG 2015). Dies zeigte den möglichen Beitrag von kleinskaligen Prozessen für Sturmschäden, die wegen des Durchbruchs von starken Winden bis zum Boden auftreten können. Eine direkte Vorhersage von solchen Windböen hätte eine sehr hohe räumliche Modellauf-

lösung vorausgesetzt, die damals noch nicht verfügbar war. Ein Jahr später hat „Xynthia“ erneut Deutschland getroffen, aber am meisten die französische Atlantikküste. Eine Besonderheit von „Xynthia“ lag an ihrer seltenen Zyklonogenese in den Subtropen mit quasi-tropischen Eigenschaften über dem warmen Ozean. Außergewöhnlich waren aber nicht nur Xynthias Winde, sondern die Kombination mit einem hohen Meeresspiegel, der zu einer tödlichen und zerstörerischen Sturmflut führte. Unter diesen Bedingungen ist eine Sturmwarnung allein nicht ausreichend und so wurden nach „Xynthia“ bei Météo France Warnungen vor dem Gesamtrisiko inklusive Flutungen eingeführt. Diese relativ kurz zurückliegenden Fälle illustrieren den Bedarf an komplexen Modellen für die erfolgreiche Zyklonenvorhersage, die ein breites Spektrum von physikalischen Prozessen berücksichtigen müssen.

3 Aktueller Stand der Zyklonenvorhersage

Wie alle Wetterprognosen basiert die aktuelle Vorhersage von intensiven Zyklonen hauptsächlich auf numerischen Modellen. Wetterdienste verwenden eine Kette von Modellen für verschiedene Zeitskalen, von ein paar Stunden bis zu einer Woche und mehr. Da Zyklonen, die Europa erreichen, über dem Nordatlantik entstehen, ist ein großflächiges Gebiet für ihre Vorhersage notwendig. Unter den führenden Vorhersagezentren weltweit bietet das EZMW zurzeit ein Globalmodell mit ca. 10 km Gitterabstand. In Europa verfügen der DWD, Météo France und das UK Met Office zusätzlich über eigene Globalmodelle mit vergleichbaren Auflösungen. Die großskalige Dynamik von Zyklonen wird von solchen Modellen realistisch dargestellt, insbesondere die Zugbahn und Intensität sowie die räumliche Verteilung von Wind und Niederschlag. Schwere Stürme können damit in der Regel mehrere Tage im Voraus zuverlässig vorhergesagt werden, auch wenn die Genauigkeit vom Fall zu Fall schwankt. Die Vorhersagbarkeit für die „Stürmigkeit“

liegt teils sogar bei mehr als einer Woche, das heißt, zu diesem Zeitpunkt können Meteorologen erkennen, dass intensive Zyklone voraussichtlich auftreten werden, auch wenn ihre präzise Zugbahn und Intensität noch unklar sind (PANTILLON 2017).

Für kürzere Fristen sind Regionalmodelle mit feineren Auflösungen vorhanden. Beim DWD wurde das Vorhersagemodell COSMO-DE (mittlerweile COSMO-D2 mit 2,2 km Gitterpunktstand) im April 2007 als eines der ersten weltweit eingeführt, kurz nachdem Sturm „Kyrill“ große Schäden verursacht hat. Im Vergleich zu Globalmodellen können solche Regionalmodelle kleinskalige Prozesse wie atmosphärische Konvektion und topographische Effekte besser darstellen, was auf die akurate Vorhersage von Niederschlag und Böen einen großen Einfluss hat. Die Entwicklung von numerischen Modellen hängt allgemein von der Leistung von Großrechnern ab. Dabei geht die hohe räumliche Auflösung der Regionalmodelle zulasten der Fläche des Modellgebiets und des Vorhersagezeitraums, somit können Regionalmodelle zwar kleinskalige Wetterentwicklungen besser vorhersagen, allerdings nur für wenige Tage und eine vergleichsweise kleine Fläche abdeckend (bei COSMO-D2 Deutschland und die Nachbarländer). Sie dienen somit vor allem als Verfeinerung der Globalmodelle. Auch kurzfristige regionale Vorhersagen bleiben daher stark von globalen Vorhersagen abhängig, insbesondere für Zyklonen, die meistens schnell durch das regionale Modellgebiet ziehen.

Die höhere Auflösung ist aber nur eine Komponente der Vorhersagequalität. Die Darstellung von physikalischen Prozessen verbessert sich auch dank neuer Erkenntnisse und ist aber auch durch die Leistung der Großrechner beschränkt. Wie oben erwähnt, werden neben oder zusätzlich zu hochaufgelösten Modellen auch probabilistische Vorhersagen routinemäßig gerechnet. Diese ermöglichen eine frühe Warnung vor extremen Ereignissen wie Stürmen. Letztendlich reichen allein bessere Modelle für bessere Vorhersagen nicht aus. Satellitenmessungen über dem Nordatlantik sind notwendig, da dort die meisten Zyklonen entstehen, aber kaum Beobachtungen vorhanden sind. Der Mangel an direkten Messungen bleibt eine Quelle von Fehlern und Unsicherheiten in Vorhersagen.

4 Offene Fragen und zukünftige Entwicklungen

Die Dynamik intensiver Zyklonen ist allgemein gut verstanden und wird meistens frühzeitig vorhergesagt. Auf lokalen Skalen werden Sting Jets und Konvektion derzeit nur teilweise in numerischen Modellen aufgelöst, ob im operationellen Betrieb oder in der akademischen Forschung. Dies verhindert in beiden Bereichen ein umfassendes Verständnis von Stürmen. Noch kleinskaliger ist die Entstehung von Windböen, die sogar in hochaufgelösten Modellen nicht direkt dargestellt wird,

aber auch selten direkt beobachtet wird. Dank Hochleistungsrechner und technologischem Fortschritt entstehen neue Möglichkeiten sowohl in der Modellierung als auch in der Beobachtung. Dies belegt zum Beispiel die WASTEX-Messkampagne im Winter 2016/2017 im Oberrheintal, als Stürme mit einem Dopplerlidar-Gerät („Lichtradar“) auf sehr feinen Skalen (unter 100 m) vermessen und im Nachhinein modelliert wurden (Abbildung 1-4; PANTILLON 2020). Wegen des hohen Aufwands sind solche Möglichkeiten für systematische Vorhersagen und für den Ausbau von Messstationen aber noch nicht vorstellbar.

Lokale Wolkenprozesse spielen wiederum eine wichtige Rolle für die Entstehung und Intensivierung von Zyklonen. Allerdings werden sie in Modellen nur grob dargestellt, was oft als Ursache für Fehlvorhersagen betrachtet wird. Ein Grund dafür ist das breite Spektrum von Skalen in Zyklonen, die nicht alle gleichzeitig modelliert werden können. Auch die detaillierte Beobachtung von Wolkenprozessen in Zyklonen ist selten und nur durch dezidierte Messungen erhältlich. Die rezente NAWDEX-Messkampagne im Herbst 2016 mit mehreren Forschungsflugzeugen über dem Nordatlantik öffnete neue Möglichkeiten für das Verständnis der Rolle von Wolkenprozessen in der Zyklonendynamik und in der Verbesserung von Vorhersagen (siehe auch Beitrag 3 in diesem Heft). Wechselwirkungen zwischen lokalen Wolkenprozessen und großskaliger Dynamik spielen eine wichtige Rolle bei hybriden Zyklonen, die eine Mischung aus tropischen und außertropischen Eigenschaften besitzen. Beispiele für hybride Zyklone sind die tropischartigen, kleinräumigen Medicanes (*Mediterranean Hurricanes*) im Mittelmeer, sowie die großräumigen Hurrikane über dem Nordatlantik, welche nach außertropischer Umwandlung die mittleren Breiten erreichen (siehe Beitrag 8). Das Verständnis von solchen Wechselwirkungen zwischen Skalen ist noch begrenzt, was sich auch in der Vorhersagequalität widerspiegelt und nach mehr Forschung in diesem Bereich ruft.

Als Ursprung von Fehlvorhersagen in der Darstellung lokaler Prozesse wurde die klassische Idee vom Fehlerwachstum von der kleinen zur großen Skala erkannt, der sogenannte „Schmetterlingseffekt“. Es wurde auch gezeigt, dass winzige aber großräumige Fehler in den Anfangsbedingungen von numerischen Modellen unvermeidlich sind und eine wichtigere Rolle in der Qualität von Zyklonenvorhersagen spielen können – oder karikaturistisch ausgedrückt: „Schmetterlinge haben keine praktische Bedeutung“ (DURRAN 2014). Diese Ansicht ist nicht unumstritten, zeigt aber die Diversität von möglichen Fehlerquellen und die Komplexität derer Verbreitung zwischen lokalen und großräumigen Skalen (BIERDEL 2018). Eine weitere Schwierigkeit liegt in der fundamental chaotischen Natur der Atmosphäre begründet, die eine intrinsische Grenze in der Vorhersagbarkeit darstellt, an welche die Erweiterung von Zyklonenvorhersagen möglicherweise bald stoßen

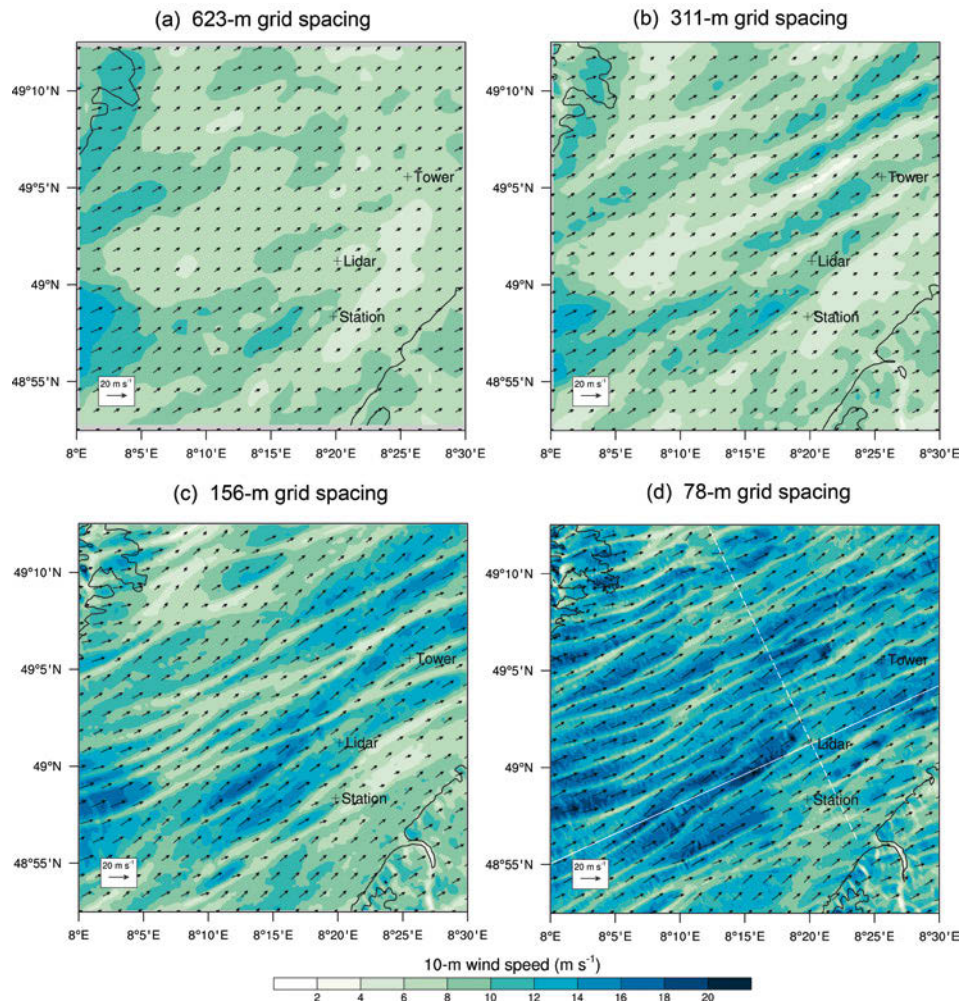


Abb. 1-4: Windgeschwindigkeit auf 10 Meter Höhe in hochaufgelösten Simulationen von Sturm „Thomas“ während der WASTEX-Messkampagne am 23. Februar 2017 um 12 UTC. Längliche Windstrukturen sind mit 623 Meter Gitterabstand kaum bemerkbar (a), werden aber mit noch feineren Auflösungen von 311, 156 und 78 Meter Gitterabstand immer deutlicher (b-d). Aus PANTILLON (2020).

wird. In diesem Kontext verbreiten sich probabilistische Modelle immer mehr und sollen in den nächsten Jahren deterministische Vorhersagen ersetzen, weil sie nicht nur eine einzige, sondern mehrere Szenarien und deren Unsicherheiten berücksichtigen. Der korrekte Umgang mit Wahrscheinlichkeiten kann aber bei einem allgemeinen Publikum nicht vorausgesetzt werden, und deshalb bleibt ihre Kommunikation eine Herausforderung für Wetterdienste (siehe dazu auch *promet*-Ausgabe „Probabilistische Wettervorhersage“, 37. Jahrgang 2011, Heft 3/4).

Trotz Begrenzungen in der Vorhersagbarkeit werden saisonale Modelle entwickelt. Bei Zyklonen geht es nicht um eine detaillierte Prognose, sondern um die Tendenz, ob es zum Beispiel einen eher stürmischen oder windstillen Winter geben wird. Die kurzfristige Wiederholung von Ereignissen, auch wenn jedes für sich relativ harmlos ist, kann besonders große Schäden verursachen wie im Winter 2013/2014, als zahlreiche Zyklonen innerhalb von wenigen Wochen für flächendeckende Überflutungen in Großbritannien verantwortlich waren (siehe Beitrag 2 in diesem Heft). Solche Tendenzen sind von besonderem Interesse für die Versicherungsbran-

che. Auf längeren Zeitskalen wird die Häufigkeit und Intensität von Stürmen in einem kälteren und wärmeren Klima untersucht (siehe Beiträge 9 und 10). Auch wenn diese Fragen nicht mehr zur klassischen Wettervorhersage gehören, tragen sie zum Verständnis der Zyklonendynamik und zur Modellentwicklung bei. Als Beispiel sei die frühe Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit dem Ozean in Klimaprojektionen genannt, die heute auch in Wettervorhersagemodellen integriert sind.

Letztendlich werden für die Verbesserung von Vorhersagen mehr und mehr statistische Methoden diskutiert, insbesondere solche aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz, ob für lokale Prozesse wie Windböen oder für Vorhersagen auf langen Zeitskalen. Solche Methoden wecken neue Hoffnungen, wenn physikalische Modelle erfolglos sind; sie werfen aber auch neue Fragen auf über die Gültigkeit von statistischen Verfahren für extreme Ereignisse wie Stürme. Die Vorhersage intensiver Zyklonen wird sich in den nächsten Jahren vermutlich durch zukünftige Modellentwicklungen und neue Beobachtungsdaten verbessern und weiterhin ein Kernthema von Wettervorhersagen in den mittleren Breiten bleiben.

Literatur

- BAUER, P., THORPE, A., BRUNET, G., 2015: The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature* **525**, 47-55.
- BIERDEL, L., SELZ, T., CRAIG, G.C., 2018: Theoretical aspects of upscale error growth on the mesoscales: Idealized numerical simulations. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **144**, 682-694.
- BOSART, L.F., 1981: The Presidents' Day Snowstorm of 18–19 February 1979: A Subsynoptic-Scale Event. *Mon. Wea. Rev.* **109**, 1542-1566.
- BROWNING, K.A., 2004: The sting at the end of the tail: Damaging winds associated with extratropical cyclones. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **130**, 375-399.
- BUIZZA, R., HOLLINGSWORTH, A., 2002: Storm prediction over Europe using the ECMWF Ensemble Prediction System. *Met. Apps* **9**, 289-305.
- DURRAN, D.R., GINGRICH, M., 2014: Atmospheric Predictability: Why Butterflies Are Not of Practical Importance. *Journal of the Atmospheric Sciences* **71**, 2476-88.
- EISENSTEIN, L., PANTILLON, F., KNIPPERTZ, P., 2020: Dynamics of sting-jet storm Egon over continental Europe: Impact of surface properties and model resolution. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **146**, 186-210.
- LUDWIG, P., PINTO, J.G., HOEPP, S.A., FINK, A.H., GRAY, S.L., 2015: Secondary Cyclogenesis along an Occluded Front Leading to Damaging Wind Gusts: Windstorm Kyrill, January 2007. *Mon. Wea. Rev.* **143**, 1417-1437.
- PANTILLON, F., KNIPPERTZ, P., CORSMEIER, U., 2017: Revisiting the synoptic-scale predictability of severe European winter storms using ECMWF ensemble reforecasts. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **17**, 1795-1810.
- PANTILLON, F., ADLER, B., CORSMEIER, U., KNIPPERTZ, P., WIESER, A., HANSEN, A., 2020: Formation of Wind Gusts in an Extratropical Cyclone in Light of Doppler Lidar Observations and Large-Eddy Simulations. *Mon. Wea. Rev.* **148**, 353-375.
- WERNLI, H., DIRREN, S., LINIGER, M.A., ZILLIG, M., 2002: Dynamical aspects of the life cycle of the winter storm 'Lothar' (24–26 December 1999). *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **128**, 405-429.

Autor

DR. FLORIAN PANTILLON
Laboratoire d'Aérodynamique, Observatoire Midi-Pyrénées
14 avenue Édouard Belin
31400 Toulouse
France
florian.pantillon@aero.obs-mip.fr

M. K. KARREMAN, J. G. PINTO

2 Clustering von Zyklonen

Cyclone Clustering

Zusammenfassung

Zyklonenfamilien sind ein typisches Phänomen über dem Nordatlantik und Westeuropa. Sie können sich unter bestimmten großskaligen Bedingungen entwickeln, unter anderem durch einen starken und semi-stationären Jet, der die Zugbahnen von Zyklonen in eine bestimmte Richtung lenkt. Ein weiterer wichtiger Mechanismus ist die sekundäre Zyklonogenese, bei der sich eine neue Zyklone an der Kaltfront einer Primärzyklone entwickelt. Zyklonen zeigen insbesondere am Ende des Nordatlantischen Stormtracks und an beiden Flanken des Jets serielles Auftreten (*Clustering*). Dieses kann zu hohen kumulativen Schäden führen: Zum einen verursacht durch hohe Windgeschwindigkeiten (wie im Dezember 1999 in Frankreich und Deutschland); zum anderen hervorgerufen durch Überschwemmungen (wie im Februar 2014 über den Britischen Inseln). Grob aufgelöste Klimamodelle können die Zyklonenstatistik und das serielle Auftreten von Zyklonen nur teilweise wie in den Reanalysedaten wiedergeben. Höher aufgelöste Klimamodelle, wie das HiGEM, zeigen jedoch eine bessere Übereinstimmung mit den Reanalysedaten. Die projizierten Änderungen für das serielle Auftreten von Zyklonen in der Zukunft auf Basis von CMIP5-Simulationen sind im Allgemeinen klein und nicht einheitlich zwischen den verschiedenen Klimamodellen. Dadurch überwiegt die Unsicherheit der Stichproben gegenüber dem Klimaänderungssignal.

Summary

Cyclone families are a typical feature over the North Atlantic and Western Europe. They develop under specific large-scale conditions, typically an intense and semi-stationary jet stream which constrains the path of the cyclones towards a certain region. Secondary cyclogenesis also plays an important role, in which new systems develop in the trailing cold fronts of primary cyclones. In climatological terms, cyclones tend to cluster in the downstream area of the North Atlantic storm track and both flanks. Such series of storms may lead to strong cumulative events, either in terms of windstorm losses (like in December 1999 over France and Germany) or widespread floods (like in February 2014 over the British Isles). Low resolution climate models can only partly represent the cyclone statistics and cyclone clustering as in the reanalysis, but a better agreement is found for higher resolution climate models (e.g. HiGEM). The projected changes in cyclone clustering based on CMIP5 simulations are generally small and not consistent between climate models. In fact, the large sampling uncertainty obscures the climate change signal.

1 Was heißt Clustering von Zyklonen?

Außertropische Zyklonen prägen das Wettergeschehen in den mittleren Breiten. Sie können starke Windböen, extreme Niederschläge und Veränderungen der vorherrschenden Luftmassen verursachen und damit beispielsweise zu Änderungen der Temperatur oder der Feuchte führen. Insbesondere Zyklonen, die eine Windgeschwindigkeit von mehr als 64 Knoten überschreiten (Orkan), können sehr hohe volkswirtschaftliche Schäden hervorrufen (siehe voriger Beitrag 1). Unter bestimmten großskaligen Bedingungen ist das Auftreten mehrerer extremer Zyklonen

in einer Region innerhalb eines kurzen Zeitraums nichts Ungewöhnliches. Eine solche Häufung wird als „serielles Auftreten“ (engl.: *Clustering*) von Zyklonen oder als „Zyklonenfamilien“ bezeichnet. Im Dezember 1999 haben zum Beispiel „Anatol“, „Lothar“ und „Martin“¹ einen Gesamtschaden von 13 Milliarden EUR verursacht (ULBRICH et al. 2001). Hohe kumulative Schäden durch Stürme und Sturmserien kommen unter anderem durch die Windlast zustande (KLAWA und ULBRICH 2003). Darüber hinaus können die damit verbundenen enormen Niederschläge starke Überflutungen verursachen, wie im Winter 2013/14 in Großbritannien (KENDON und McCARTHY 2015).

¹ benannt von der Freien Universität Berlin: <http://www.met.fu-berlin.de>

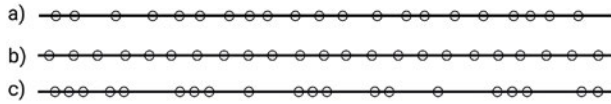


Abb. 2-1: Schematische Darstellung des Auftretens von Ereignissen bzw. Zyklonen an einem Ort über die Zeit: a) zufällig, b) regelmäßig, c) seriell.

Das Auftreten von Zyklonen in Gruppen kann statistisch durch einen Poisson-Prozess quantifiziert werden, der das zufällige Auftreten von Ereignissen über die Zeit an einem Ort beschreibt. Die Abweichung von diesem Verhalten lässt sich durch die Dispersionsstatistik (Ψ) nach MAILIER et al. (2006) beschreiben und ist folgendermaßen definiert:

$$\Psi = \text{VAR}(N) / \text{MEAN}(N) - 1$$

N ist die Anzahl der identifizierten Zyklonen-Transits je Monat an einem Ort, $\text{VAR}(N)$ benennt die Varianz und $\text{MEAN}(N)$ den Mittelwert der identifizierten Zyklonen. Da für die Poissonverteilung die Varianz dem Mittelwert entspricht ($\Psi=0$; Abbildung 2-1a) clustern die Ereignisse (im Vergleich zu dem Zufallsprozess), wenn die Varianz größer als der Mittelwert ist ($\Psi>0$; Abbildung 2-1c). Ist der Mittelwert größer als die Varianz, dann treten die Ereignisse regelmäßiger auf ($\Psi<0$; Abbildung 2-1b). Für außertropische Zyklonen über dem Nordatlantik (Abbildung 2-2a) bedeutet dies entweder ein regelmäßigeres Auftreten, wie im Kernbereich des Nordatlantischen

Stormtracks nahe Neufundland, oder ein Auftreten eher in Gruppen, wie über Westeuropa und bei Island zu beobachten ist (blaue bzw. rote Bereiche in Abbildung 2-2b). Diese statistische Methode quantifiziert somit das Auftreten von Sturmfamilien (siehe beispielsweise die Wetterkarten vom 7. und 12. Februar 2014; Abbildung 2-3), deren Entstehung bereits vor ca. hundert Jahren beschrieben wurde (BJERKNES und SOLBERG 1922). Im nächsten Abschnitt werden die physikalischen Prozesse, die zum Clustering von Stürmen führen können, beschrieben.

2 Physikalische Mechanismen

Die Intensität und Variabilität von außertropischen Zyklonen steht im Zusammenhang mit verschiedenen physikalischen Prozessen, welche die Zyklonenentwicklung begünstigen (z.B. RAIBLE 2007; PINTO et al. 2009). Dabei können sich auch immer wieder Sturmserien entwickeln. Ein solches Auftreten ist insbesondere in der Nordatlantischen Region zu beobachten. ECONOMOU et al. (2015) haben drei Mechanismen genannt, die zum seriellen Auftreten von außertropischen Zyklonen über dem Nordatlantik beitragen. Zuerst werden Sturmserien durch bestimmte großskalige Strömungsmuster begünstigt. Darüber hinaus besteht ein Zusammenhang zwischen aufeinanderfolgenden Zyklonen (sekundäre Zyklonogenese). Und zuletzt können Sturmserien auch rein zufällig entstehen.

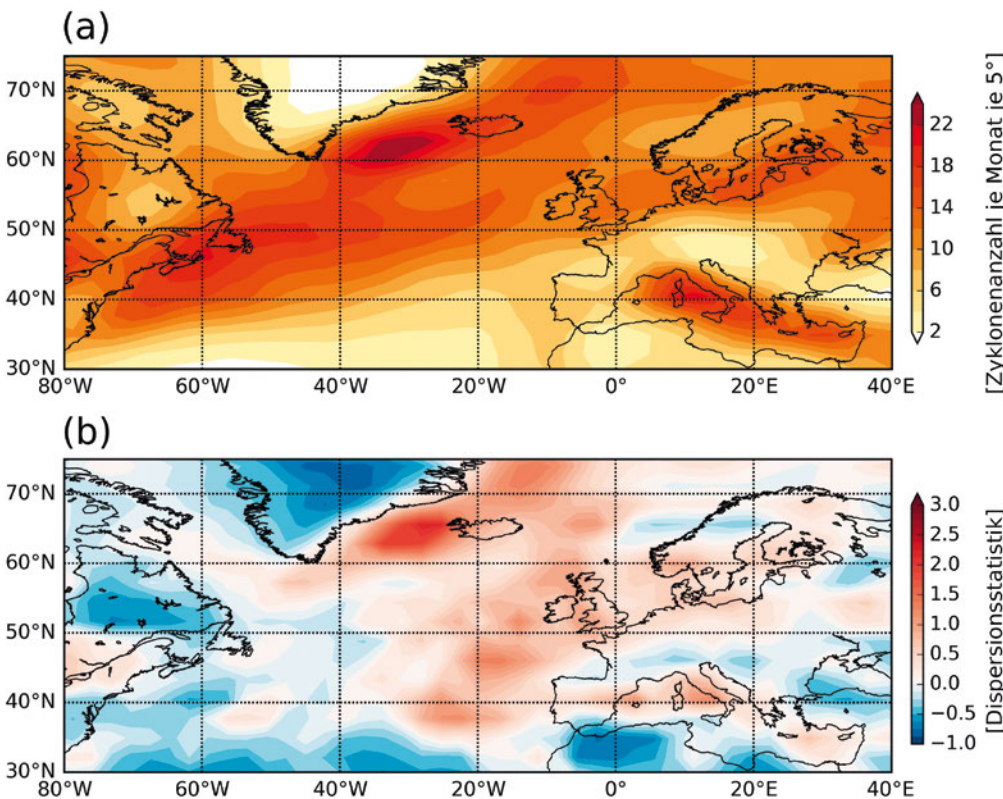


Abb. 2-2: (a) Zugbahndichte von Zyklonen im Winter [Zyklonenanzahl je Monat je 5°], (b) Dispersionsstatistik Ψ für ERA-Interim. Nach PRIESTLEY et al. (2018; © 2018 The Authors. Veröffentlicht mit Creative Commons Attribution 4.0 License).

Bezüglich der großskaligen Strömungsmuster wird das serielle Auftreten von Zyklonen durch einen starken zonal (oder leicht nach Norden geneigten) und nach Europa ausgedehnten Jet begünstigt, der sich über mehrere Tage verstärkt und quasistationär ist (Abbildung 2-4; PRIESTLEY et al. 2017a). Ein solcher Jet wird durch beidseitiges Rossby-Wellenbrechen begünstigt (z. B. HANLEY und CABALLERO 2012). Dadurch werden die Zyklonen in Richtung Europa gelenkt, wie es zum Beispiel im Januar 2007 der Fall war (PINTO et al. 2014). Ein solches großskaliges Strömungsmuster entspricht einer positiven Phase der Nordatlantischen Oszillation (engl.: *North Atlantic Oscillation, NAO*). MAILIER et al. (2006) und ECO-

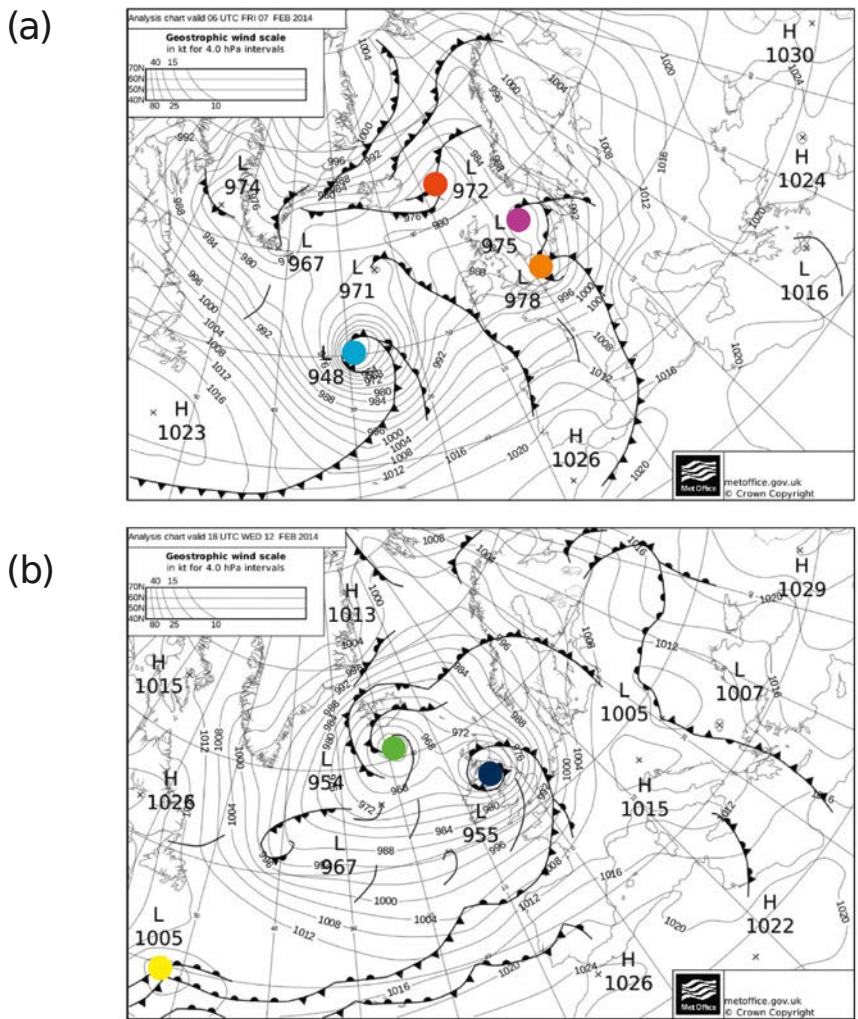


Abb. 2-3: Bodenwetterkarte des UK Met Office: a) 7. Februar 2014, 06 UTC, b) 12. Februar 2014, 18 UTC. Zyklonen, welche die Britischen Inseln beeinflusst haben, sind farblich markiert: „Petra“ (rot), „Qumaria“ (orange), „Ruth“ (blau), „Stephanie“ (lila), „Tini“ (dunkelblau), „Ulla“ (gelb) und unbenannte Zyklone (grün). Aus PRIESTLEY et al. (2017b; © 2017 John Wiley and Sons. Nutzung mit Genehmigung. Lizenznummer 4776950047834).

NOMOU et al. (2015) haben gezeigt, wie die Phase der NAO mit der Variabilität des seriellen Auftretens von Zyklonen in Zusammenhang steht. WALZ et al. (2018) haben dies bestätigt und konnten außerdem zeigen, dass die Jahr-zu-Jahr-Variabilität des seriellen Auftretens von Zyklonen über Teilen des Nordatlantiks auch mit dem Ostatlantischen und Skandinavischen Strömungsmuster zusammenhängen kann.

Zusätzlich trägt sekundäre Zyklongenese (PARKER 1998) zu einer Zunahme der Anzahl der Zyklonen in einer Sturmfamilie bei. Dabei begünstigen Primärzyklonen, dass sich die großskaligen Entwicklungsbedingungen für Sekundärzyklonen verbessern (PRIESTLEY et al. 2020). Solche Sekundärzyklonen entstehen häufig als instabile Wellen entlang der Fronten der Primärzyklone (siehe Beitrag 4 in diesem Heft). Eine schematische Darstellung der relativen Position von Jetstream, Rossby-Wellenbrechen und Fronten wird in Abbildung 2-5a gezeigt. Im Allgemeinen entwickelt sich die neue Zyklone südlich oder südwestlich der Primärzyklone (DACRE und GRAY 2006). Ungefähr die Hälfte aller Zyklonen einer Sturmfamilie sind Sekundär-

zyklonen (PRIESTLEY et al. 2020). Die erhöhte Anzahl von Sekundärzyklonen wird hauptsächlich durch den Einfluss der großskaligen Strömungsmuster bedingt, die alle Zyklonen in eine bestimmte Region lenken, und nicht unbedingt durch häufigere Zyklongenese (PRIESTLEY et al. 2020). Typischerweise liegen die Zugbahnen der Sekundärzyklonen etwas weiter südöstlich als die Zugbahnen der Primärzyklonen (blauer bzw. roter Pfeil in Abbildung 2-5b). Die Analyse verschiedener Reanalysedatensätze hat gezeigt, dass Clustering ($\Psi > 0$) an den Flanken und der Ausgangsregion des Nordatlantischen Stormtracks auftritt (rote Bereiche in Abbildung 2-2b; siehe auch MAILIER et al. 2006; PINTO et al. 2013; BLENDER et al. 2015; ECONOMOU et al. 2015). Das bedeutet, Zyklonen treten hier häufiger in Gruppen auf, als durch einen zufälligen Poisson-Prozess zu erwarten ist. Im Zentrum des Stormtracks bei Neufundland treten die Ereignisse regelmäßiger auf ($\Psi < 0$; blaue Bereiche in Abb. 2-2b; siehe auch MAILIER et al. 2006; PINTO et al. 2013; BLENDER et al. 2015; ECONOMOU et al. 2015). Daher entstehen Zyklonenfamilien hauptsächlich über dem östlichen Nordatlantik nah an Westeuropa (Abbildung 2-3).

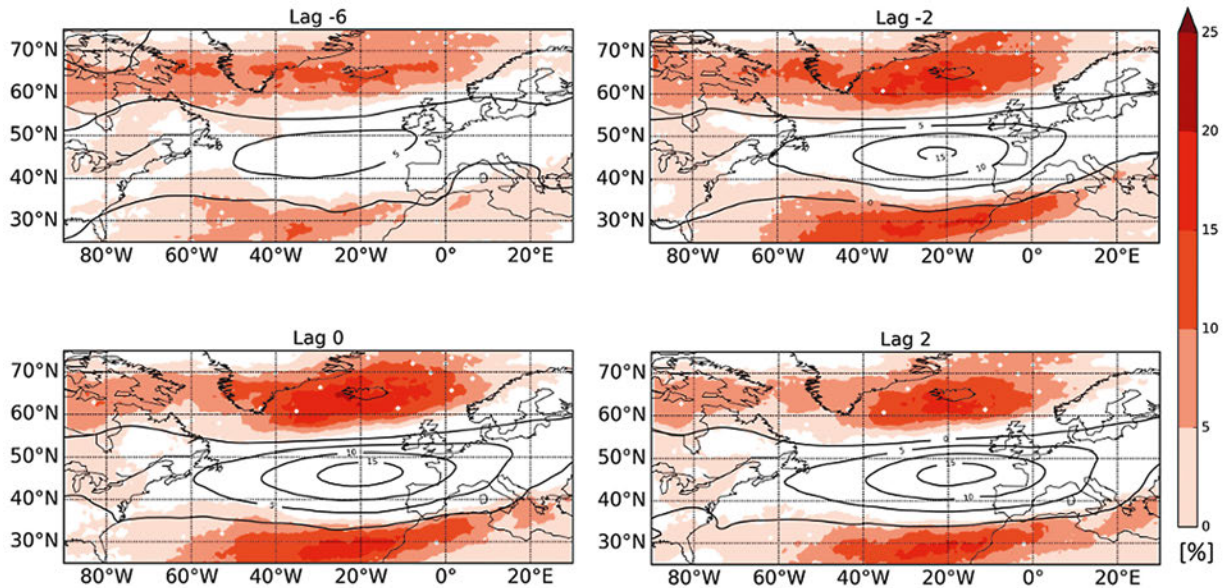


Abb. 2-4: Rossby-Wellenbrechen (Farben) und Jetanomalie (Linien), die zu Clustering bei 55° N führten für verschiedene Zeiten bezüglich des Ereignisses für -6 Tage, -2 Tage, 0 Tage (Start der Sturmserie) und +2 Tage. Rot: Zunahme [%], schwarze Konturen: Anomalien der Windgeschwindigkeit auf 250 hPa [m s^{-1}]. Aus PRIESTLEY et al. (2017a; © 2017 John Wiley and Sons. Nutzung mit Genehmigung. Lizenznummer 4776950298629).

3 Auswirkungen

Ein Beispiel für das oben beschriebene serielle Auftreten von außertropischen Zyklonen ist der Winter 2013/14, der insbesondere starke Auswirkungen auf die Britischen Inseln hatte. Dieser Winter war der sturmreichste der letzten 143 Jahre in der dortigen Region (MATTHEWS et al. 2014). Zwischen Anfang Dezember und Mitte Februar herrschte stürmisches Wetter. Für England und Wales wurde mit einer durchschnittlichen akkumulierten Niederschlagsmenge von 456 mm (175 % des durchschnittlichen Niederschlags) der saisonale Rekord seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1766 gebrochen (KENDON und McCARTHY 2015). Insgesamt haben in dieser Saison 57 Stürme einen Umkreis von 700 km um die Britischen Inseln passiert, 37 davon wurden als extrem eingestuft (anhand des lokalen Bodendruckminimums; siehe PRIESTLEY et al. 2017a). Das bedeutet, dass im Schnitt etwa alle 2,5 Tage eine extreme Zyklone in dieser Region auftrat, was mehr als dem Zweifachen des klimatologischen Mittels entspricht. Allein zwischen dem 6. und dem 13. Februar 2014 waren neun Tiefdruckgebiete (darunter „Petra“, „Qumaria“, „Ruth“) im Bereich der Britischen Inseln zu verzeichnen. Teile der Zyklonenfamilie zwischen dem 6. Februar und dem 13. Februar sind in Abbildung 2-3 gezeigt. Diese Sturmfamilie wurde überwiegend durch sekundäre Zyklonogenese generiert und verursachte erhebliche wirtschaftliche Schäden (PRIESTLEY et al. 2017b). Zum Beispiel wurden starke andauernde Überflutungen, wie in den Somerset Levels, verursacht. Auch wenn der sechs-stündige Niederschlag einzelner Zyklonen nicht besonders hoch war, traten mit jeder Zyklone, die über die Britischen Inseln zog, neue Regenfälle auf. Durch die langsame Zuggeschwindigkeiten der Zyklonen akkumulierten sich so enorme Niederschlagsmengen (PRIESTLEY et al. 2017b).

Hohe Schäden können jedoch nicht nur durch große Regensummen, sondern auch durch starke Windgeschwindigkeiten, insbesondere durch Böen, hervorgerufen werden. KŁAWA und ULBRICH (2003) haben ein einfaches Sturmschadenmodell entwickelt. Mit diesem lässt sich der sogenannte „Sturm-Schaden-Index (SSI)“ auf Basis der maximalen Windböe bzw. der 10-m Windgeschwindigkeit und der Bevölkerungsdichte als Proxy für versicherte Werte in einer Region berechnen. Dabei wird angenommen, dass ein Schaden entsteht, sobald das lokale 98. Perzentil der Windklimatologie überschritten wird. Aus den einzelnen SSIs kann im Anschluss der akkumulierte Schaden je Saison bestimmt werden. Auf Basis dieser akkumulierten Schäden haben KARREMANN et al. (2014a) die Wiederkehrperioden von Sturmserien über Europa bestimmt. Zum Beispiel konnte eine Wiederkehrperiode zwischen 40 und 65 Jahre für die Sturmserie von 1990 bestimmt werden. Insbesondere für Versicherer sind solche Informationen von hohem Interesse (siehe auch HUNTER et al. 2016).

4 Was bringt uns die Zukunft?

In verschiedenen Studien konnte gezeigt werden, dass Klimamodellsimulationen das serielle Auftreten von Winterstürmen für das gegenwärtige Klima im Allgemeinen realitätsnah wiedergeben (PINTO et al. 2013; ECONOMOU et al. 2015; PRIESTLEY et al. 2018). Anhand von Ensemblerechnungen von CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5)-Klimamodellsimulationen haben beispielsweise PINTO et al. (2013) und ECONOMOU et al. (2015) gezeigt, dass extreme Zyklonen häufiger als Zyklonenfamilien auftreten (höhere Dispersion) als bei Betrachtung aller Zyklonen. Dieses Verhalten ist konform zu den Statistiken mit verschie-

denen Reanalysedatensätzen. Jedoch ist zwischen den verschiedenen CMIP5-Modellen eine große Streuung der Dispersion zu verzeichnen. Diese Diskrepanzen können nicht allein durch die Unterschiede der Klimamodelle, die zum Beispiel in verschiedenen Auflösungen liegen, erklärt werden (ECONOMOU et al. 2015).

PRIESTLEY et al. (2018) haben anhand von Simulationen mit dem *High-Resolution Global Environment Model* (HiGEM) bestätigt, dass die Statistik von Zyklonen und deren serielles Auftreten konform zu ERA-Interim-Reanalysedaten ist. Darüber hinaus konnten sie zeigen, dass in HiGEM die physikalischen Zusammenhänge zwischen Jet, Rossby-Wellenbrechen und Zyklonenclustering (siehe Abschnitt 2) gut wiedergegeben werden. Die Berücksichtigung von Klimamodelltdaten ermöglicht aufgrund der Stichprobengröße eine bessere Einschätzung der Unsicherheiten im Vergleich zu den Reanalysedatensätzen. Diese Information kann für eine genauere Bestimmung von Wiederkehrperioden von Sturmserien und deren Schäden genutzt werden (KARREMANN et al. 2014a; PRIESTLEY et al. 2018).

In Bezug auf Zukunftsprojektionen für das Ende des 21. Jahrhunderts können ebenfalls Unterschiede zwischen

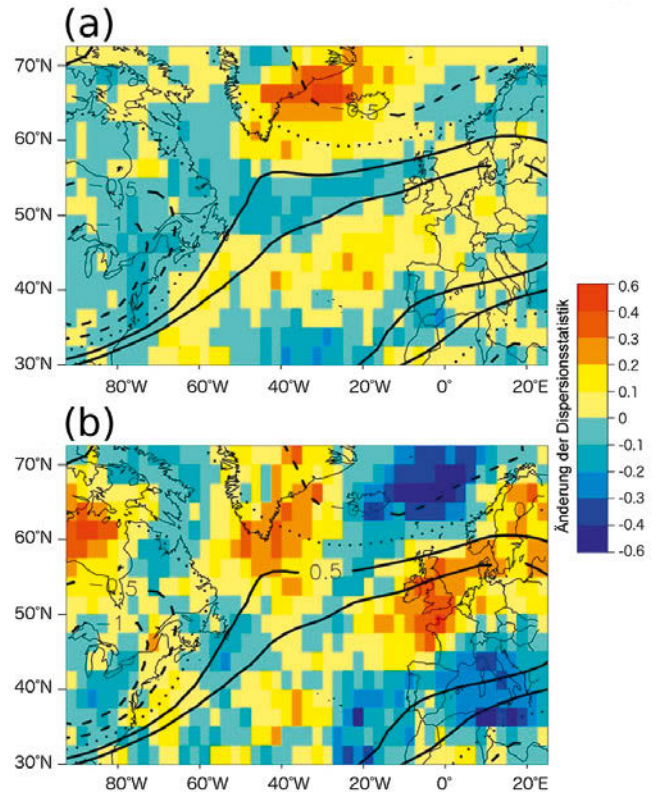


Abb. 2-6: Mittelwert des CMIP5-Ensembles der projizierten Änderung für das 21. Jahrhundert der Dispersionsstatistik für (a) alle Stürme und (b) extreme Stürme. Schwarze Konturen zeigen die Änderung des Mittelwerts des Ensemble-Jets [ms^{-1}]. Negative Änderungen sind gestrichelt, keine Änderungen gepunktet und positive Änderungen mit einer durchgezogenen Linie dargestellt. Nach ECONOMOU et al. (2015; © 2015 John Wiley and Sons. Nutzung mit Genehmigung. Lizenznummer 4776950878593).

den verschiedenen globalen Klimamodellen identifiziert werden. Zum Beispiel konnten PINTO et al. (2013) anhand von ECHAM5-Klimasimulationen eine Abnahme des seriellen Auftretens über Teilen des Nordatlantiks und Teilen Westeuropas zeigen, während eine Zunahme des seriellen Auftretens südlich von Neufundland projiziert wird. Die zu erwartenden Änderungen sind jedoch gering. ECONOMOU et al. (2015) zeigten basierend auf einem CMIP5-Klimamodellensemble ein etwas anderes Muster: Eine Abnahme der Dispersion bei Neufundland und eine Zunahme der Dispersion zwischen Grönland und Island und nordwestlich der Iberischen Halbinsel (Abbildung 2-6a). Für extreme Zyklonen zeigt sich zusätzlich eine Erhöhung der Dispersion über Großbritannien und Skandinavien (Abbildung 2-6b). Diese Veränderung der Dispersion für das Ende des 21. Jahrhunderts über Europa wird mit einer Ausdehnung des Polarjets in Richtung Europa in Zusammenhang gebracht, was zu regelmäßigerem Auftreten von Zyklonen führen kann (PINTO et al. 2013; ECONOMOU et al. 2015).

Da die Veränderungen der Multimodell-Ensemble klein sind und eine große Streuung zwischen den einzelnen Modellen herrscht, ist es nicht möglich, eine eindeutige Aussage bezüglich der Änderung in der Zukunft zu machen (ECONOMOU et al. 2015). KARREMANN et al.

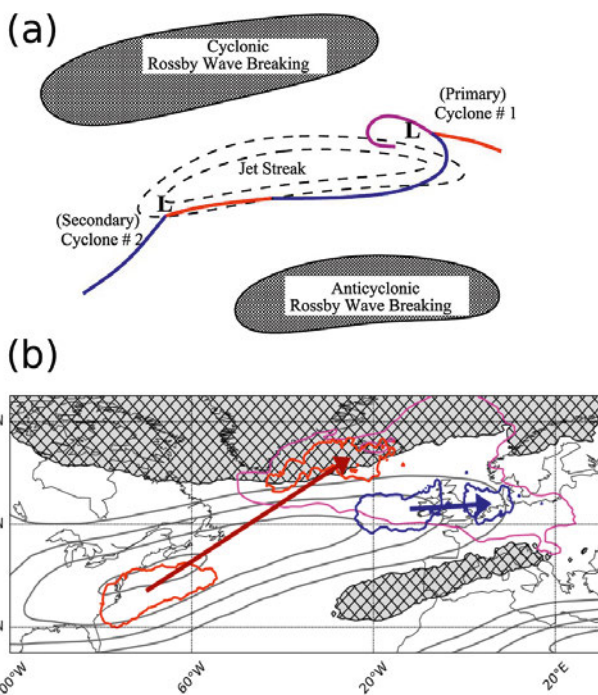


Abb. 2-5: a) Schematische Darstellung der Position von Zyklonen, die in Serien auftreten, bezüglich des Jets (Linien), Rossby-Wellenbrechens (schraffierte Flächen), Fronten (blau/rot) und Zyklonen (L). Nach PINTO et al. (2014; © 2014 John Wiley and Sons. Nutzung mit Genehmigung. Lizenznummer 4776950548510); b) Schematische Darstellung der Zyklogene- und Zyklolyse-Regionen für primäre (rot) und sekundäre Zyklonen (blau) für 55°N . Pfeile zeigen die entsprechenden Zugbahnen. Graue Linien: Jet, pink: Jetanomalie, graue schraffierte Flächen: Rossby-Wellenbrechen. Nach PRIESTLEY et al. (2020; © 2019 The Authors. Veröffentlicht mit Creative Commons Attribution License).

(2014a,b) haben auf Basis der ECHAM5-Klimasimulationen eine mögliche Änderung des seriellen Auftretens und der Wiederkehrperioden von Schäden durch Sturmserien unter zukünftigen Klimabedingungen untersucht. Die Ergebnisse für einzelne Länder/Regionen in Europa zeigen, dass sich das Auftreten von Sturmserien mit einer bestimmten Wiederkehrperiode, sowie die Anzahl an Stürmen in einer Sturmserie bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ändern könnten. Wie für die erwartete Änderung der Sturmzugbahnen sind auch die Änderungen bezüglich einer festen Wiederkehrperiode klein. Trotzdem werden für nahezu alle Länder in Westeuropa kürzere Wiederkehrperioden von Sturmserien prognostiziert. Andererseits werden zum Beispiel für skandinavische Länder längere Wiederkehrperioden für Sturmserien erwartet.

5 Offene Fragen

Die physikalischen Prozesse, die zu Sturmserien führen, sind noch nicht vollständig verstanden. Zum einen zeigen die historischen Sturmserien eine hohe Variabilität, zum anderen gibt es vor allem bei der Betrachtung der Relevanz der sekundären Zyklonogenese im Vergleich zum Jet noch Untersuchungsbedarf. Auch die großskaligen Prozesse, die zu Perioden mit einem starken zonalen und quasi-stationären Jet führen, sind bislang nicht ausreichend gut verstanden. Ein weiteres Defizit ist, dass fast alle Studien, die das serielle Auftreten von außertropischen Zyklonen analysieren, sich ausschließlich mit den Regionen Nordatlantik und Europa befassen. Ausnahmen sind MAILIER et al. (2006) und BLENDER et al. (2015), die auch Bedingungen über dem Nordpazifik bzw. global untersucht haben. Weitere Studien über das Clustering von außertropischen Zyklonen in anderen Regionen sind daher sehr wichtig, um den aktuellen Kenntnisstand zu erweitern.

Bezüglich des Klimaänderungssignals zeigen die Ergebnisse große Unsicherheiten. Daher sind Auswertungen mit neuen CMIP6-Atmosphären-Ozean-Modellen sehr wichtig, um die Veränderung von extremen Ereignissen und deren sozio-ökonomischen Auswirkungen in der Zukunft besser quantifizieren zu können. Tatsächlich ist der Einfluss des Klimawandels auf die physikalischen Prozesse, die im Zusammenhang mit Zyklonenentwicklung und Zyklonenclustering stehen, teilweise noch unsicher (CATTO et al. 2019), vor allem bezüglich der Jetvariabilität und des Rossby-Wellenbrechens (BARNES und HARTMANN 2012). Insgesamt ist der Einfluss des Klimawandels auf das serielle Auftreten von Zyklonen innerhalb eines relativ großen Unsicherheitsbereichs zu betrachten und sollte daher in Zukunft weiter detailliert analysiert werden.

Literatur

BARNES, E.A., HARTMANN, D.L., 2012: Detection of Rossby wave breaking and its response to shifts of the

midlatitude jet with climate change. *J. Geophys. Res. Atmos.* **117**, D09117.

BJERKNES, J., SOLBERG, H., 1922: Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geophys. Publ.* **3**, 1-18.

BLENDER, R., RAIBLE, C.C., LUNKEIT, F., 2015: Non-exponential return time distributions for vorticity extremes explained by fractional Poisson processes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **141**, 249-257.

CATTO, J.L., ACKERLEY, D., BOOTH, J.F., CHAMPION, A.J., COLLE, B.A., PFAHL, S., PINTO, J.G., QUINTING, J., SEILER, C., 2019: The Future Midlatitude Cyclones. *Curr. Clim. Change Rep.* **5**, 407-420.

DACRE, H.F., GRAY, S.L., 2006: Life-cycle simulations of shallow frontal waves and the impact of deformation strain. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **132**, 2171-2190.

ECONOMOU, T., STEPHENSON, D.B., PINTO, J.G., SHAFFREY, L.C., ZAPPA, G., 2015: Serial clustering of extratropical cyclones in a multi-model ensemble of historical and future simulations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **141**, 3076-3087.

HANLEY, J., CABALLERO, R., 2012: The role of large-scale atmospheric flow and Rossby wave breaking in the evolution of extreme windstorms over Europe. *Geophys. Res. Lett.* **39**, L21708.

HUNTER, A., STEPHENSON, D.B., ECONOMOU, T., HOLLAND, M., COOK, I., 2016: New perspectives on the collective risk of extratropical cyclones. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **142**, 243-256.

KARREMAN, M.K., PINTO, J.G., VON BOMHARD, P.J., KLAWA, M., 2014a: On the clustering of winter storm loss events over Germany. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **14**, 2041-2052.

KARREMAN, M.K., PINTO, J.G., REYERS, M., KLAWA, M., 2014b: Return periods of losses associated with European windstorm series in a changing climate. *Environ. Res. Lett.* **9**, 124016.

KENDON M., McCARTHY, M., 2015: The UK's wet and stormy winter of 2013/2014. *Weather* **70**, 40-47.

KLAWA, M., ULBRICH, U., 2003: A model for the estimation of storm losses and the identification of severe winter storms in Germany. *Nat. Hazards Earth. Syst.* **3**, 725-732.

MAILIER, P.J., STEPHENSON, D.B., FERRO, C.A.T., HODGES, K.I., 2006: Serial clustering of extratropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.* **134**, 2224-2240.

MATTHEWS, T., MURPHY, C., WILBY, R.L., HARRIGAN, S., 2014: Stormiest winter on record for Ireland and UK. *Nature Clim. Change* **4**, 738-740.

PARKER, D.J., 1998: Secondary frontal waves in the North Atlantic region: A dynamical perspective of current ideas. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **124**, 829-856.

PINTO, J.G., ZACHARIAS, S., FINK, A.H., LECKEBUSCH, G.C., ULBRICH, U., 2009: Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Clim. Dyn.* **32**, 711-737.

PINTO, J.G., BELLENBAUM, N., KARREMAN, M.K., DELLA-MARTA, P.M., 2013: Serial clustering of ext-

- ratropical cyclones over the North Atlantic and Europe under recent and future climate conditions. *J. Geophys. Res. Atmos.* **118**, 12476-12485.
- PINTO, J.G., GÓMARA, I., MASATO, G., DACRE, H.F., WOOLINGS, T., CABALLERO, R., 2014: Large-scale dynamics associated with clustering of extratropical cyclones affecting Western Europe. *J. Geophys. Res. Atmos.* **119**, 13.704-13.719, doi: 10.1002/2014JD022305.
- PRIESTLEY, M.D.K., PINTO, J.G., DACRE, H.F., SHAF-FREY, L.C., 2017a: Rossby wave-breaking, the upper level jet and serial clustering of extratropical cyclones in Western Europe. *Geophys. Res. Lett.* **44**, 514-521.
- PRIESTLEY, M.D.K., PINTO, J.G., DACRE, H.F., SHAF-FREY, L.C., 2017b: The role of cyclone clustering during the stormy winter of 2013/2014. *Weather* **72**, 187-192.
- PRIESTLEY, M.D.K., DACRE, H.F., SHAFFREY, L.C., HODGES, K.I., PINTO, J.G., 2018: The role of serial European windstorm clustering for extreme seasonal losses as determined from multi-centennial simulations of high-resolution global climate model data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **18**, 2991-3006.
- PRIESTLEY, M.D.K., DACRE, H.F., SHAFFREY, L.C., SCHEMM, S., PINTO, J.G., 2020: The Role of Secondary Cyclones and Cyclone Families for the North Atlantic Storm Track and Clustering over Western Europe. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **146**, 1184-1205, doi: 10.1002/qj.3733.
- RAIBLE, C.C., 2007: On the relation between extremes of midlatitude cyclones and the atmospheric circulation using ERA40. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L07703.
- ULBRICH, U., FINK, A.H., KLAWA, M., PINTO, J.G., 2001: Three extreme storms over Europe in December 1999. *Weather* **56**, 70-80.
- WALZ, M.A., BEFORT, D.J., KIRCHNER-BOSSI, N.O., ULBRICH, U., LECKEBUSCH, G.C., 2018: Modelling serial clustering and inter-annual variability of European winter windstorms based on large-scale drivers. *Int. J. Climatol.* **38**, 3044-3057.

Autor/in

DR. MELANIE K. KARREMANN
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Department Troposphärenforschung (IMK-TRO)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
melanie.karremann@kit.edu

PROF. DR. JOAQUIM G. PINTO
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Department Troposphärenforschung (IMK-TRO)
Wolfgang-Gaede-Strasse 1
76131 Karlsruhe
joaquim.pinto@kit.edu

Struktur und Entwicklung einzelner Zyklonen

A. SCHÄFLER, F. EWALD, M. RAUTENHAUS

3 Die Vermessung von Zyklonen

Observing cyclones

Zusammenfassung

Während der Forschungskampagne *North Atlantic Waveguide and Downstream Impact Experiment* (NAWDEX) wurden im Nordatlantik mit modernen, aktiven Fernerkundungsverfahren Tiefdruckgebiete vermessen. Dieser Artikel liefert einen kurzen Einblick in die Geschichte der Vermessung von Zyklonen und eine Zusammenfassung von NAWDEX. Es werden ausgewählte Instrumente dargestellt, die auf den Forschungsflugzeugen HALO und Falcon zum Einsatz kamen, sowie deren Eigenschaften in Zusammenhang mit der Dynamik eines vermessenen Tiefdruckgebiets diskutiert. Darüber hinaus wird ein kurzer Einblick in aktuelle Forschungsthemen zu Zyklonen gegeben, die mithilfe von NAWDEX-Daten untersucht werden.

Summary

During the *North Atlantic Waveguide and Downstream Impact Experiment* (NAWDEX) cyclones were observed over the North Atlantic Ocean using modern active remote sensing instruments. This article gives a short overview of the history of cyclone observations and a summary of NAWDEX. Selected instruments on board the research aircraft HALO and Falcon are explained and their characteristics are discussed in the context of the dynamics of an observed cyclone. Additionally, a summary of current research topics using NAWDEX data is presented.

1 Vorwort

Die Vermessung von Zyklonen blickt auf eine lange und umfangreiche Geschichte zurück, deren vollständige historische Aufarbeitung – von der Verwendung unterschiedlicher Messplattformen und Instrumente bis zur Verknüpfung mit theoretischen Arbeiten – den Umfang dieses Beitrages übersteigen würde. Daher beschränkt sich der Inhalt dieses Beitrags auf moderne Beobachtungen mithilfe aktiver Fernerkundungsinstrumente, die während der internationalen Forschungskampagne *North Atlantic Waveguide and Downstream Impact Experiment* (NAWDEX) im Jahr 2016 an Bord der Forschungsflugzeuge HALO und Falcon durchgeführt wurden. Ziel ist es, die Möglichkeiten dieser Methoden zur Untersuchung von Zyklonen anhand aktueller Ergebnisse aufzuzeigen und zu diskutieren.

2 Die Rolle von Beobachtungen in der Erforschung von Zyklonen

Ein großer Teil unserer Vorstellung über den Aufbau, die Bildung und den Lebenszyklus von Tiefdruckgebieten so-

wie das Verständnis über die damit verbundenen physikalischen Prozesse ist seit jeher durch eine synergistische Betrachtung von Theorie, Beobachtungen und Diagnosemethoden entstanden (SHAPIRO et al. 1999). Bereits frühe Arbeiten zur außertropischen Zyklonogenese wurden durch den Einsatz von Profilmessungen mit Ballonen möglich, die ein Bild der Wind- und Temperaturverteilung in der oberen Troposphäre lieferten. Wie in SHAPIRO et al. (1999) ausführlich beschrieben, hat – neben einem verbesserten Verständnis der Theorie und der Entwicklung der numerischen Wettervorhersage – der technologische Fortschritt von Beobachtungsmethoden zu einer Vielzahl von konzeptionellen Modellen zur Beschreibung von Zyklonen geführt, die zu Teilen in diesem *promet*-Heft näher beschrieben werden. Ein breiterer historischer Überblick über die Erforschung von Zyklonen und die Verwendung von Beobachtungen erschien zur 100. Wiederkehr der Gründung der *American Meteorological Society* (SCHULTZ et al. 2019).

In den letzten Jahrzehnten hat eine Verbesserung der numerischen Modelle, aber auch die erhöhte Qualität, Menge, Auflösung und bessere Verwendung von konventionellen und satellitenbasierten Messdaten zu immer besseren Si-

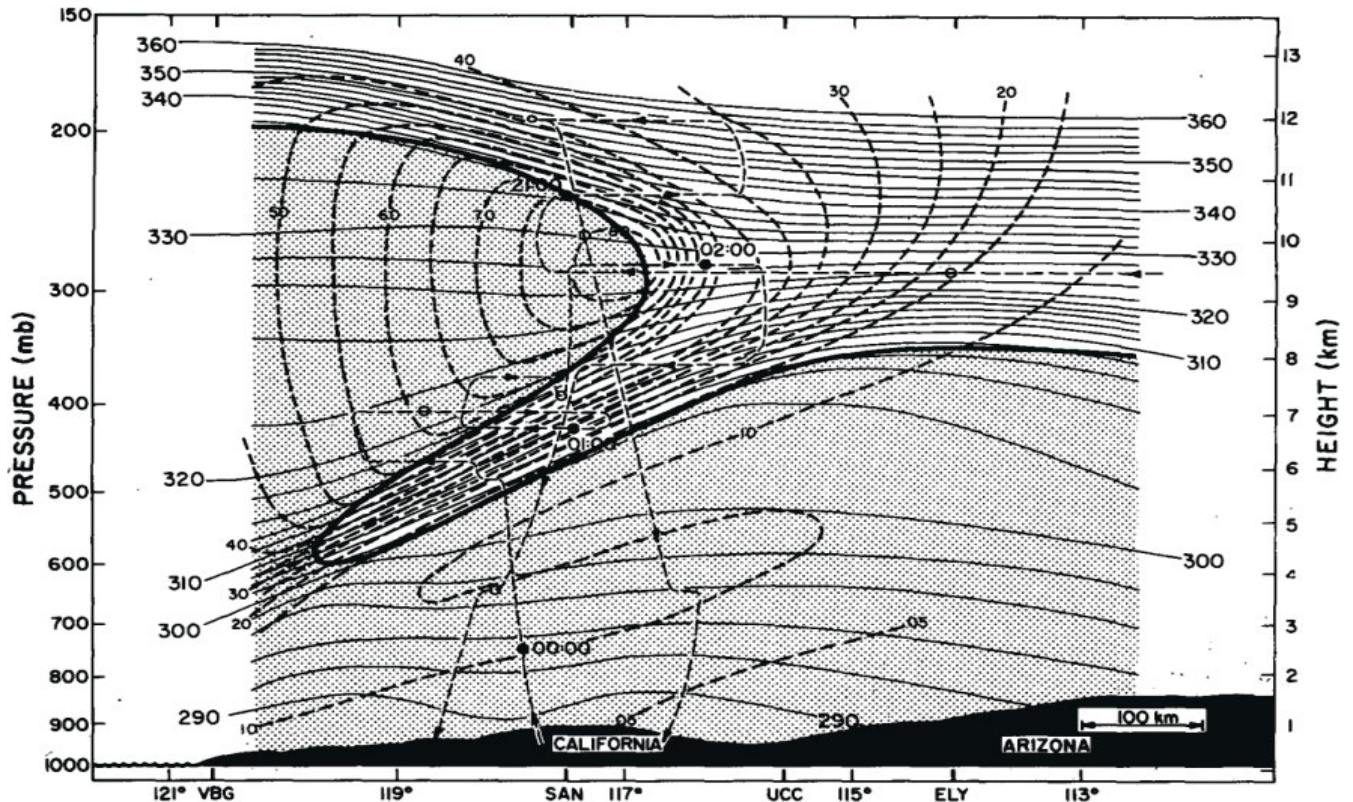


Abb. 3-1: Querschnitt durch eine Tropopausenfalte über den westlichen Vereinigten Staaten von Amerika am 13. März 1978. Der Verlauf der potentiellen Temperatur (dünne Linien, K), Windgeschwindigkeit (dicke gestrichelte Linien, m/s) und Tropopause (dicke Linie) wurde mithilfe von Flugzeugmessungen (Flugprofil als dünne gestrichelte Linie) und Radiosondendaten erstellt (nach SHAPIRO 1980).

mulationen von Tiefdruckgebieten geführt. In dieser Zeit wurden neben den operationellen Daten auch Messdaten während Feldmesskampagnen gewonnen. Neben dem Ziel, neue Beobachtungstechniken zu testen und zu validieren, die Repräsentation meteorologischer Phänomene in Simulationen zu prüfen, haben diese Daten zur Weiterentwicklung und Verbesserung von Parametrisierungen und Methoden zur Assimilation neuer Datensätze beigetragen. Zu nennen sind das *Genesis of Atlantic Lows Experiment* (GALE) im Jahr 1986, das *Experiment of Rapidly Intensifying Cyclones over the Atlantic* (ERICA) im Winter 1988/89 und das *Fronts and Atlantic Storm Track Experiment* (FASTEX) im Jahr 1997, welche die Bildung und Intensivierung von extratropischen Zyklonen untersuchten (siehe auch SCHULTZ et al. 2019). Die beobachteten Tiefs dienten dabei häufig als Testfälle für eine Reihe von Publikationen, die Simulationen mit Messungen von Schiffen, Flugzeugen und Bodenstationen vereinten.

Der Einsatz von Forschungsflugzeugen ermöglicht ausgedehnte Messungen in den Ursprungsregionen von Tiefdruckgebieten, die häufig in abgelegenen Regionen über Atlantik oder Pazifik liegen und sich durch eine geringe Anzahl konventioneller Daten auszeichnen. Eine besondere Bedeutung für die Untersuchung der Struktur von Tiefdruckgebieten haben seit jeher Vertikalschnitte, die früher häufig entweder durch räumlich verteilte Radiosonden, durch in-situ Flugzeugbeobachtungen in verschiedenen Höhen oder aus dem Flugzeug abgeworfenen Messsonden, erstellt wurden. Als computergestützte Interpolationen we-

nig ausgereift bzw. nicht vorhanden waren, waren händische Analysen ein probates Mittel, um die Vertikalstruktur zu untersuchen. Abbildung 3-1 zeigt eine manuelle Analyse einer komplexen Tropopausenstruktur über dem Westen der Vereinigten Staaten, die durch eine Kombination von Flugzeug in-situ Messungen und Radiosondendaten entstanden ist.

Basierend auf Ideen von FASTEX wurden zwischen 2003 und 2014 im Rahmen des *The Observing System Research and Predictability Experiment* (THORPEX; PARSONS et al. 2017) der Weltorganisation für Meteorologie (engl.: *World Meteorological Organization*, WMO) eine Reihe von Feldmesskampagnen koordiniert, die den Fokus auf die Verbesserung der Vorhersage von Tiefdruckgebieten mithilfe zusätzlicher Beobachtungen legten. Hier sind die *Atlantic THORPEX Regional Campaign* (ATReC), die *Winter Storm Reconnaissance* (WSR) Kampagne, die *THORPEX Pacific Asian Regional Campaign* (T-PARC) und die *Convective and Orographically-induced Precipitation Study/European THORPEX Regional Campaign* (COPS/ETReC 2007) zu nennen. Insgesamt zeigte die Nutzung der zusätzlich gewonnenen Daten für die Initialisierung der Wettermodelle einen positiven Einfluss auf die Vorhersagequalität, der sich jedoch schwächer zeigte als ursprünglich angenommen. Gleichzeitig wuchs die Ansicht, dass Vorhersagefehler ihren Ursprung häufig in Regionen mit starken diabatischen Prozessen haben. Fallstudien unter Verwendung der Kampagnendaten von ERICA und FASTEX gaben bereits erste Hinweise, dass diabatische Prozesse entscheidenden Einfluss

auf Tiefdruckgebiete und auch auf die großskalige Dynamik haben können (BOETTCHER und WERNLI 2020). Dies war auch die Motivation für eine neue Forschungskampagne im Jahr 2016, die im Folgenden näher beschrieben wird.

3 Die Forschungskampagne NAWDEX

Das internationale *North Atlantic Waveguide and Downstream Impact Experiment* (NAWDEX) verfolgte das Ziel, den Einfluss diabatischer Prozesse auf Störungen im Jetstream, ihre zeitliche und räumliche Entwicklung sowie deren Auswirkung auf „High-Impact-Wetter“ stromabwärts zu untersuchen. Störungen des Jetstreams sind häufig mit der Entwicklung außertropischer Tiefdruckgebiete verbunden. Um deren Einfluss quantifizieren zu können, sind hochaufgelöste Beobachtungen der horizontalen und vertikalen Verteilung von Wind, Temperatur und Feuchte sowie Wolkeneigenschaften vom Boden bis in die untere Stratosphäre nötig. Da dies mit konventionellen Beobachtungen nicht zu erreichen ist, wurden vier Forschungsflugzeuge eingesetzt, die Fernerkundungs- und in-situ Beobachtungen kombinierten. Ergänzt durch zusätzliche Bodenbeobachtungen konnte ein großes Gebiet abgedeckt werden, das den Nordatlantik und Europa umfasste. Die Flugzeuge operierten von Island aus, um einen optimalen Zugang zu den Wettersystemen über dem Atlantik zu garantieren.

NAWDEX fand vom 17. September bis zum 22. Oktober 2016 statt. Es konnten insgesamt 47 teilweise koordinierte Forschungsflüge mit den vier Flugzeugen durchgeführt und dabei eine Vielzahl verschiedener Tiefdruckgebiete und der Jetstream beflogen werden. Die synoptische Situation mit einer erhöhten Häufigkeit von relevanten Wettersystemen, die im Fokus der Kampagnenziele standen, begünstigte dies. Es traten mehr Tiefs und mehr damit verbundene *Warm Conveyor Belts* (WCB, siehe Beitrag 7 in diesem Heft: BINDER und MADONNA 2020) auf als klimatologisch erwartet wurde. Die Zugbahn in Richtung Nordosten brachte die Tiefs häufig in die Nähe von Island. Zudem traten insgesamt sechs tropische Stürme auf, wovon drei in die Außertropen zogen (siehe Beitrag 8: RIEMER et al. 2020). NAWDEX liefert den bisher umfangreichsten Datensatz von kombinierten Wind-, Feuchte-, Temperatur- und Wolkenprofilen über dem Nordatlantik, der einen ganzheitlichen Blick in die Vertikalstruktur der Troposphäre und unteren Stratosphäre in einem Skalenbereich erlaubt, der sich von der synoptischen Skala bis hin zu Skalen von kleinräumigen Wolkenstrukturen erstreckt.

Die in diesem Artikel gewählten Messbeispiele beziehen sich auf Beobachtungen mit den deutschen Forschungsflugzeugen HALO (*High Altitude and Long Range Research Aircraft*) und Falcon. HALO, ein für Forschungszwecke modifiziertes Flugzeug des Typs Gulfstream G-550, zeichnet sich durch eine große Reichweite (max. 10.000 km) und eine Flugdauer von bis zu 10 Stunden aus. Dies erlaubte, bereits weit stromaufwärts von Island befindliche Tiefdruckgebiete zu vermessen. Die Falcon mit ihrer Reich-

weite von etwa 3.000 km und maximal 4 Stunden Flugzeit konzentrierte sich auf Messungen heranziehender Tiefs in der Nähe von Island. Der interessierte Leser findet eine detaillierte Aufstellung der Messplattformen und -instrumente, eine umfassendere Beschreibung der synoptischen Situation sowie eine Übersicht über die Ziele und zugehörigen Beobachtungen im Kampagnenübersichtsartikel von SCHÄFLER et al. (2018).

4 Aktive Fernerkundung mit Radar und Lidar während NAWDEX

Während NAWDEX war HALO mit einer Fernerkundungsinstrumentierung ausgerüstet (STEVENS et al. 2019; SCHÄFLER et al. 2019), wobei im folgenden Abschnitt nur auf die aktiven Fernerkundungsinstrumente, das Differentielle-Absorptions-Lidar (DIAL) für Wasserdampfmessungen sowie das Wolkenradar eingegangen wird. Ebenfalls wird ein Windlidargerät an Bord der Falcon näher beschrieben.

Das Messprinzip des DIAL WALES (WIRTH et al. 2009) basiert auf der differentiellen Absorption von Laserlichtpulsen bei unterschiedlichen Wellenlängen, die durch ein Fenster in die Atmosphäre unterhalb des Flugzeugs ausgesendet werden. Die spektral sehr nah beieinanderliegenden Wellenlängen im Bereich von 935 nm sind so gewählt, dass sie sich bezüglich der Absorptions- und Streueigenschaften auf ihrem Weg nur durch unterschiedlich starke Wasserdampfabsorption unterscheiden. Das bedeutet, dass eine der ausgesuchten Wellenlängen abhängig von der Wasserdampfkonzentration verschieden stark absorbiert wird, wohingegen die andere Wellenlänge eine möglichst geringe Absorption und somit ein stärkeres Rückstreuungssignal aufweist. Das Verhältnis der beiden rückgestreuten Signale in Abhängigkeit der Laufzeit des Laserpulses ermöglicht eine entfernungsabhängige Berechnung der mittleren Wasserdampfkonzentration im ausgeleuchteten Messvolumen. Für eine Auswertung der Wasserdampfprofile mit geringem statistischen Fehler werden die empfangenen Signale horizontal und vertikal gemittelt, sodass sich eine Auflösung von etwa 200 m vertikal und, in Abhängigkeit der Flugzeuggeschwindigkeit, von etwa 6 km horizontal ergibt. Durch die starke Absorption des Laserlichts in optisch dichten Wolken ist die Bestimmung des Wasserdampfs meist nur im oberen Bereich von Eiswolken möglich.

Das Ka-Band Wolkenradar MIRA-36 (MECH et al. 2014) an Bord von HALO sendet gepulste Mikrowellenstrahlung (35,5 GHz) in die Atmosphäre unterhalb des Flugzeugs und misst die Stärke der Rückstreuung an Hydrometeoren. Die gemessenen Profile der Radarreflektivität werden durch die Anzahl, Größe und Form der Hydrometeore bestimmt und liefern Information über die Ausdehnung und Struktur der Wolken unterhalb des Flugzeugs. Weiterhin misst das Wolkenradar das Depolarisationsverhältnis, welches Information über die Art der Hydrometeore (Tropfen, Eiskristalle) sowie die Vertikalgeschwindigkeit der fallenden Hydrometeore liefert.

Ein weiteres Lidarinstrument, ein kohärentes Doppler Windlidar, das während NAWDEX auf der Falcon betrieben wurde, nutzt den optischen Dopplereffekt zur Vermessung von Windprofilen (WITSCHAS et al. 2017). Das Windlidar misst die Frequenzverschiebung der vom Lidar ausgesandten Lichtwellen, die durch die Relativbewegung von Laser und Aerosolen und Wolkenteilchen entsteht. Daraus wird die Windgeschwindigkeit in Richtung des ausgesandten Strahls ermittelt. Das Instrument ist in der Lage, verschiedene Positionen unter einem Winkel von 20° relativ zur Senkrechten anzusteuern und misst somit die Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Strahlrichtungen, also die Projektion des realen Windes in die jeweiligen Richtungen. Die Kombination der Windgeschwindigkeiten unter verschiedenen Blickrichtungen erlaubt die Bestimmung des horizontalen Windvektors. Mit einem Nadir-blickenden Windlidar ist es ebenfalls möglich den Vertikalwind zu messen. Typischerweise benötigt die Ansteuerung der 21 verschiedenen Positionen sowie die jeweilige Messung insgesamt ca. 42 s pro Umdrehung, woraus sich eine horizontale Auflösung von etwa 8,5 km ergibt. Vertikal besitzen die Windprofile eine Auflösung von etwa 100 m. Da das kohärente Windlidar von der Rückstreuung von Aerosol- und Wolkenteilchen abhängt, besitzen die Windprofile häufig eine geringe Messabdeckung in sehr trockenen und sauberen Luftmassen, wie in der Stratosphäre, wohingegen sich dünne Zirruswolken oder Aerosol in der Grenzschicht ideal für Windmessung mit großer Messabdeckung eignen.

5 Fallstudie zum Tiefdrucksystem „Karl“

Im Folgenden werden Messungen der oben dargestellten Instrumente am Beispiel des Tiefdruckgebiets „Karl“ demonstriert, das während einer sechstägigen Messphase vom 22. bis 28. September 2016 vermessen wurde. Es war erstmals möglich, einen tropischen Sturm auf dem gesamten Weg aus den Tropen in die mittleren Breiten zu verfolgen. Die Messflüge erfolgten während der tropischen Entwicklungsphase, des Übergangs in die mittleren Breiten, der Wiederverstärkung als außertropisches Tief, sowie während der Ausbildung eines starken Jetstreams und starker Niederschläge stromabwärts.

Wir betrachten im Folgenden zunächst Messdaten von einem Flug am 26. September 2016 während der Interaktion von „Karl“ mit dem Jetstream der mittleren Breiten. Abbildung 3-2a zeigt das Tiefdruckgebiet mit einem minimalen Druck von 966 hPa unmittelbar nördlich eines starken Jetstreams mit bis zu 80 m/s Wind aus südwestlichen Richtungen. Südlich von Island sieht man an der Verteilung der potentiellen Vorticity (PV) auf 325 K troposphärische Luft ($PV < 2$ PVU) auf der Nordseite des Tiefs. Betrachtet man das Satellitenbild in Abbildung 3-3a zum gleichen Zeitpunkt, so erkennt man, dass es sich um wolkenreiche Luft handelt, die in Karls WCB aufsteigt und um das Tief herumgeführt wird. Wie in Abbildung 3-3a ersichtlich, näherte sich HALO zunächst dem großskaligen WCB-Wolkenband von Nordosten an, überquerte es nach einer Kurve in Rich-

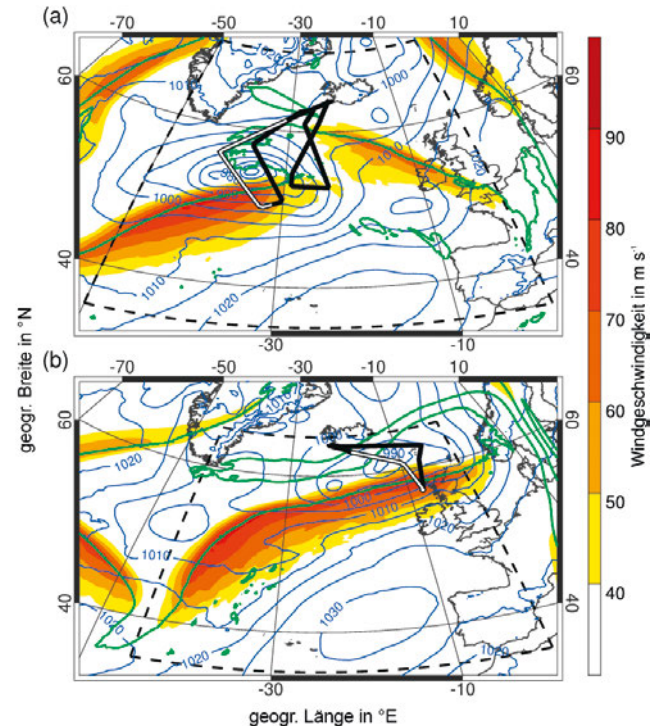


Abb. 3-2: Windgeschwindigkeit (Farbschattierung in $m\ s^{-1}$), 2-PVU-Isolinie auf 325 K (grüne Linien) und Bodendruck (blaue Linien, hPa) am (a) 26. September 2016 um 12:00 UTC mit dem HALO Flugweg (schwarze Linie) und am (b) 27. September 2016 um 12:00 UTC mit dem DLR Falcon Flugweg (schwarze Linie). Die weißen Abschnitte innerhalb der schwarzen Linien zeigen die in Abb. 3-4 und 3-6 gezeigten Datenausschnitte für (a) HALO (10:40–12:50 UTC) und (b) Falcon (11:40–12:55 UTC). Schwarz gestrichelte Linien kennzeichnen die in Abb. 3-5 dargestellten Regionen.

tung Südosten und überflog dabei den umgebogenen okkludierten Teil südlich des Tiefzentrums bevor ein relativ wolkenfreies Gebiet erreicht wurde. Die nachfolgend beschriebenen Messdaten beziehen sich auf den etwa 1750 km (1,5 h) langen Flugabschnitt, der in Abbildung 3-2a in weiß dargestellt ist.

Wir betrachten drei verschiedene Messgrößen: Das vom DIAL gemessene Wasserdampf-mischungsverhältnis außerhalb von Wolken (Abbildung 3-4a), die vom Wolkenradar gemessene Radarreflektivität (Abbildung 3-4b) sowie das lineare Depolarisationsverhältnis (Abbildung 3-4c) in den Wolken. Zur leichteren Erklärung der Messdaten wurden Analyse- und Vorhersagedaten des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) räumlich und zeitlich auf den Flugweg interpoliert. Abbildung 3-4a zeigt eine wolkenreiche und relativ feuchte Region zwischen 11:15 und 12:10 UTC, die an den erhöhten Feuchtewerten ($0,05 - 5\ g\ kg^{-1}$) sowie den Messlücken, die ein Hinweis auf dichtere Wolken sind, erkennbar ist. Der scharfe vertikale Übergang zu einer trockenen Schicht ($\approx 0,002\ g\ kg^{-1}$) verläuft oberhalb einer homogenen Wolkenoberkante in 10,5 km Höhe, die entlang des Flugwegs bis auf ca. 6 km absinkt. Dieser Verlauf entspricht recht genau der dynamischen Tropopause, die mit Hilfe der 2-PVU-Isolinie definiert ist und die Grenzfläche zur darüber liegenden

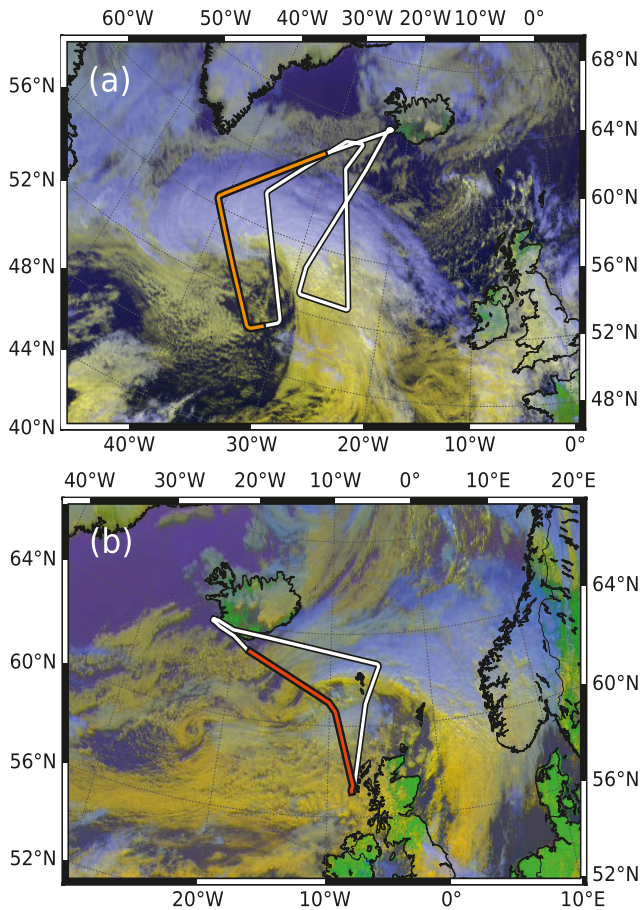


Abb. 3-3: Meteosat SEVIRI Satellitenbilder für den 26. September 2016 um 12:00 UTC (oben) und den 27. September 2016 um 12:00 UTC (unten), überlagert mit den Flugwegen von HALO (a) und Falcon (b). In (a) zeigt die orangefarbene Linie den Zeitraum 10:40–12:50 UTC wie in Abb. 3-4 und in (b) die rote Linie den Zeitraum 11:40–12:55 UTC wie in Abb. 3-6.

Stratosphäre darstellt. Die hohe Drängung der Isolinien der potentiellen Temperatur weist auf die stabile Schichtung in stratosphärischer Luft hin. Dass sich die Bewölkung über die gesamte Troposphäre erstreckt, können wir an der Radarreflektivität erkennen, die von der Größe und Anzahl der Hydrometeore in der Wolke abhängt. Die keilförmige Erstreckung der Wolke lässt sich durch ein Aufgleiten der Luftmassen im WCB erklären. Die Messlücken im DIAL entstehen durch eine zu starke Rückstreuung des Signals an vielen kleinen Eiskristallen im oberen Teil der Wolke, die wiederum durch das Radar nicht erkannt werden. In einem Bereich geringerer Radarreflektivität (-40 bis 0 dBz) zwischen 6 und 8 km Höhe sind Wasserdampfmessungen in einem Bereich weniger stark streuender Wolkenpartikel möglich. Die hohen Radarreflektivitäten (10 bis 30 dBz) bis etwa 5 km zwischen 11:40 und 12:05 UTC sind Folge von großen Wolkentropfen und Eiskristallen, die dort durch Wolkenbildungsprozesse wie Aggregation und Riming entstehen. Unterhalb der 0 °C-Grenze schmelzen die Eiskristalle und die Radarreflektivität nimmt auf Grund der größeren Dielektrizitätskonstante von flüssigem Wasser erneut zu. Die Schmelzschicht, die besonders gut an hohen Werten in der linearen Depolarisation (Abbildung 3-4c) erkennbar ist, steigt entlang des Fluges an und weist auf

die Baroklinität des Tiefs mit warmen Temperaturen weiter südlich hin. Vergleicht man die gezeigten Konturen des simulierten Eis- und Flüssigwassergehalts mit der Erstreckung der Wolke in Lidar und Radar, so erkennt man eine gute Übereinstimmung. Die Ausdehnung der tiefliegenden Grenzschichtbewölkung scheint etwas überschätzt zu werden. Am südöstlichen Ende des Wolkenkomplexes (12:10 UTC) verändert sich die Struktur der Wolken. Weniger hochreichende und horizontal geringer ausgedehnte Bewölkung weist auf eine konvektiv aktive Zone im Bereich der umgebogenen Okklusion hin. Hohe Werte der linearen Depolarisation im oberen Bereich der Wolke entstehen durch Graupelbildung in Folge hoher Vertikalgeschwindigkeiten. Im letzten Drittel des Fluges, von 12:10 bis 12:45 Uhr zeigt das DIAL fast vollständige Abdeckung des Was-

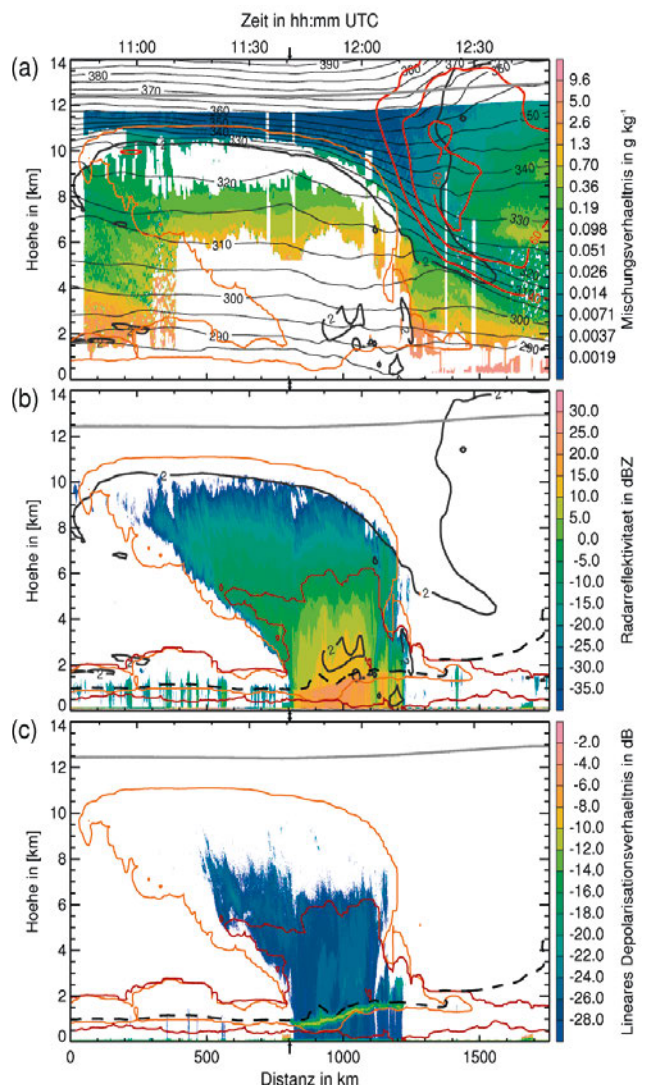


Abb. 3-4: (a) Wasserdampfmischungsverhältnis (Farbschattierung, $g\ kg^{-1}$), (b) Radarreflektivität (dBz) und (c) Lineares Depolarisationsverhältnis (dB) für einen Flugabschnitt des HALO-Fluges am 26. September 2016 (siehe auch Abb. 3-2). Die graue Linie zeigt die Flughöhe. Überlagerte Konturlinien zeigen interpolierte Modellwerte des EZMW: Potentielle Temperatur (schwarze dünne Linien, K), dynamische Tropopause (2 PVU, dicke Linie), Windgeschwindigkeit (rote Linien, $m\ s^{-1}$), Eiswassergehalt (orangefarbene Linie), Flüssigwassergehalt (rote Linie), 0°C Isotherme (gestrichelte schwarze Linie). Pfeile um 11:42 UTC markieren den westlichen Wendepunkt von HALO.

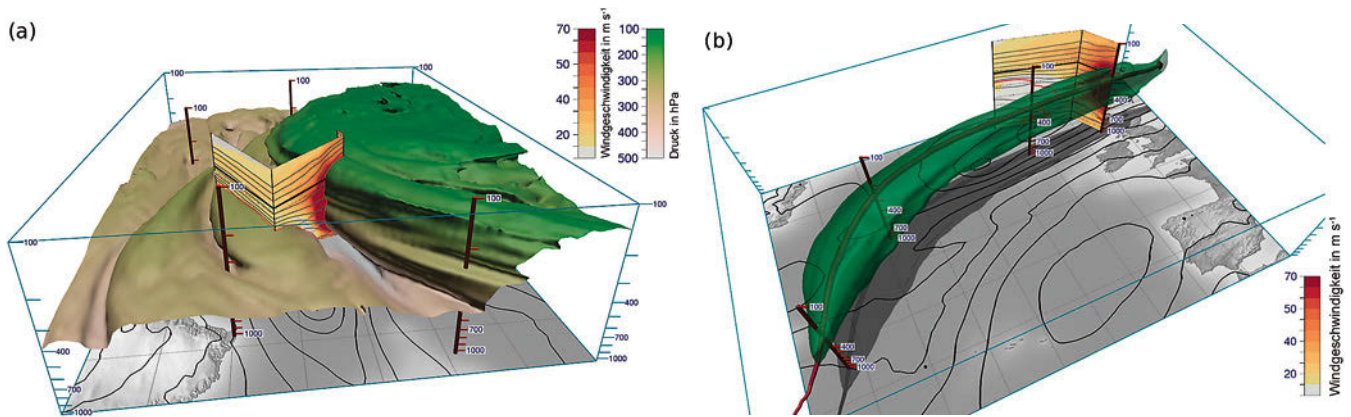


Abb. 3-5: Dreidimensionale Darstellungen (a) der auf EZMW Modelldaten basierenden dynamischen Tropopause am 26. September 2016, 12:00 UTC (2-PVU-Isofläche, die grünliche Farbschattierung zeigt den Druck in hPa), sowie (b) des Jetstreams am 27. September 2016, 12:00 UTC (Isofläche der Windgeschwindigkeit von 65 m s^{-1} , die breite Linie markiert den Kern des Jetstreams). Die Vertikalschnitte von HALO und Falcon (vgl. die weißen Flugsegmente in Abb. 3-2) sind mit der Windgeschwindigkeit (gelb- bis rötliche Farbschattierung, m s^{-1}) und der potentiellen Temperatur (graue Linien) überlagert (vgl. Abb. 3-2). Die dicken schwarzen Linien markieren die Flughöhe. Zusätzlich ist das Bodendruckfeld (schwarze Linien) gezeigt. Abb. 3-2 zeigt die Position der dargestellten Regionen über dem Nordatlantik. Vertikale Achsen zeigen den Druck in hPa. Die Abbildungen wurden mit Met.3D (RAUTENHAUS et al. 2015, <https://met3d.wavestowweather.de>) erstellt.

serdampfs (Abbildung 3-4a), die von hoher Variabilität geprägt ist. Über einer sehr feuchten Schicht in der unteren Troposphäre, deren oberer Rand bis zum Ende der Messphase kontinuierlich absinkt, erkennt man das Vordringen trockener Luft bis in eine Höhe von 3 bis 6 km. Darüber liegend erkennen wir erhöhte Feuchte, die sich bis zum oberen Rand des Messbereichs erstreckt. Diese Verteilung wird verständlich, wenn man die Lage der aus Modelldaten diagnostizierten Tropopause betrachtet, die von etwa 10 km bis auf etwa 4 km absinkt und dann sehr steil bis etwa 14 km ansteigt. Entlang des Flugwegs erkennt man deutlich, wie die trockenen Luftmassen aus der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre in der Intrusion auf der Rückseite des Tiefs absinken. Dies ist auch gut an den zum Boden hin geneigten Isentropen erkennbar. Die oberhalb liegenden troposphärischen feuchteren und wolkenfreien Luftmassen werden mit dem Jetstream (vergleiche rote Konturen in Abbildung 3-4a) aus südwestlichen Richtungen herantransportiert. Die hohen Werte der Tropopause weisen auf einen Ursprung der Luftmasse in den Subtropen hin. Zum besseren Verständnis der Komplexität der Tropopause zeigt Abbildung 3-5a die dreidimensionale Struktur mit Blick von Nordamerika in Richtung Osten. Der Flugweg von HALO führt zunächst durch eine Region mit einer Tropopausenhöhe von etwa 250 hPa ($\approx 10,5 \text{ km}$) im Umfeld der Aufstiegsregion im WCB nördlich des Tiefs, bevor sie in Richtung Süden bis ca. 500 hPa absinkt. Am südlichen Ende dieses Tropopauseneinschnitts erkennt man, dass der Flugweg die vertikal bis auf etwa 100 hPa ($\approx 14 \text{ km}$) ansteigende Tropopause sowie den Jetstream erreicht. Diese fast senkrecht geschnittene Kante der hochreichenden Troposphärenluft erstreckt sich mit dem Jetstream weit von Südwest nach Nordost.

Im Folgenden wird nun noch ein Messflug am darauffolgenden Tag, den 27. September 2016, beschrieben, der mit dem Forschungsflugzeug Falcon durchgeführt wurde und dessen Ziel es war, den sich weiter intensivierten Jetstream südöstlich von Island zu vermessen. Zunächst die Situation

wie sie sich aus der Modellsimulation darstellt. Innerhalb von 24 Stunden ist das Tiefdruckgebiet „Karl“ nach Nordosten gewandert (siehe Abbildung 3-2b). Die Diskussion beschränkt sich auf den zweiten Teil des Flugs, der zwischen 11:40 und 12:55 UTC von Schottland in Richtung Keflavik (ca. 900 km) erfolgte und dabei erneut über das nun abgeschwächte Tiefdruckgebiet mit einem Kerndruck von 982 hPa führte. Die maximalen Windgeschwindigkeiten im Jetstream folgen wie gewöhnlich der 2-PVU-Kontur auf 325 K, die auch die zonal verlaufende nördliche Kante der hochreichenden troposphärischen Luft markiert. Abbildung 3-3b zeigt die weiterhin nördlich liegende wolkenreiche troposphärische Luft.

In Abbildung 3-6 sind die Messungen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung dargestellt. Trotz einiger Datenlücken erkennt man die hohen Windgeschwindigkeiten im Umfeld des Jetstreams mit westlichen Windrichtungen im ersten Flugabschnitt. Die maximale gemessene Windgeschwindigkeit beträgt 91 m s^{-1} ($327,6 \text{ km h}^{-1}$), was auch der höchsten mit diesem Lidar bis dahin gemessenen Windgeschwindigkeit entspricht. Im Zentrum des Jetstreams sinkt die aus Modelldaten diagnostizierte Tropopause nach Norden vertikal ab, und man kann erneut eine leichte, in Richtung Süden geneigte Intrusion erkennen. Die Windrichtungsmessung zeigt, dass sich auch unterhalb des Jetstreams die westlichen Richtungen bis zur Meeresoberfläche fortsetzen. Die gemessene Geschwindigkeit der Westwinde in der unteren Troposphäre und in Bodennähe liegt bei etwa 30 m s^{-1} südlich von „Karl“. In der oberen Troposphäre bleiben die westlichen Winde in Richtung Keflavik erhalten, verlieren aber kontinuierlich an Stärke. In der unteren Troposphäre nehmen die Winde ebenfalls ab und drehen bei Überquerung des Bodentiefs auf östliche bzw. nordwestliche Richtungen. Abbildung 3-5b zeigt den auf Modelldaten basierten Verlauf des Jetstreams über dem Atlantik (vergleiche auch Abbildung 3-2b) anhand einer dreidimensionalen Isofläche der Windgeschwindigkeit (65 m s^{-1}) und der Jetstream-Kernlinie, der Linie der höchsten

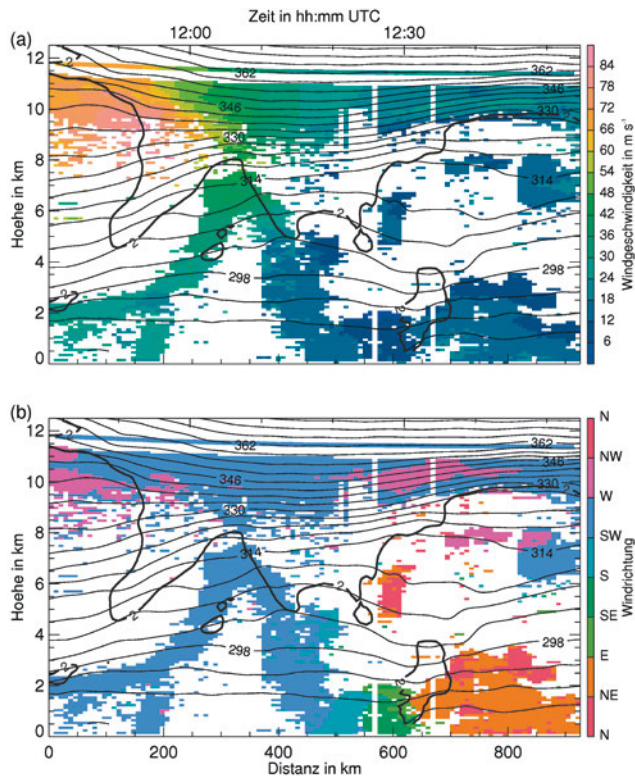


Abb. 3-6: Vom Windlidar an Bord der Falcon gemessene (a) Windgeschwindigkeit (Farbschattierung, $m s^{-1}$) und (b) Windrichtung (Farbschattierung) überlagert mit der dynamischen Tropopause (2 PVU, dicke schwarze Linie) und potentiellen Temperatur (dünne schwarze Linien, K) für einen Flugabschnitt des DLR Falcon Flugs am 27. September 2016 (siehe auch Abb. 3-2b).

Windgeschwindigkeiten im Inneren des Jetstreams. Der Flugweg hat den östlichen Teil des Jetstreams senkrecht durchschnitten und es wird deutlich, dass die maximalen Windgeschwindigkeiten gleich zu Beginn des Messwegs durchflogen wurden. Ebenfalls erkennt man die darunterliegende Bodenzyklone, die auf dem Weg nach Island überquert wurde. Im Bereich des hier nicht gezeigten antizyklonal gekrümmten Höhenrückens hat sich ein Bodenhoch weiter nach Norden ausgedehnt.

6 Aktuelle Forschungsthemen und Ausblick

Die oben gezeigten Messungen zeigen die Möglichkeiten hochaufgelöster Querschnitte, die einen ganzheitlichen Blick in die Vertikalstruktur der Troposphäre und unteren Stratosphäre, von der synoptischen bis hin zu Skalen von kleinräumigen Wolkenstrukturen, erlauben. Der NAWDEX-Datensatz findet Anwendung in zahlreichen Studien. Im Folgenden werden einige ausgewählte Arbeiten genannt, die Fragestellungen im Bereich der Erforschung von Tiefdruckgebieten aufgreifen. Daten von Radar und Lidar wurden beispielsweise in einer Studie von OERTEL et al. (2019) verwendet, um die konvektive Aktivität innerhalb von WCBs zu untersuchen. Winddaten werden zur Verifikation von Windanalysen globaler Wettermodelle im Bereich des Jetstreams benutzt (SCHÄFLER et al. 2020). Dabei zeigte sich eine erhöhte Unsicherheit im Bereich der

Tropopause, deren Auswirkung in Zukunft weiter erforscht wird. Ebenfalls konnte ein positiver Einfluss der Nutzung von NAWDEX Radio- und Dropsondenmessungen in der Datenassimilation numerischer Modelle gezeigt werden, wobei der Einfluss bei besonders sensitiven Wettersystemen, wie z. B. die Entwicklung von „Karl“, besonders groß war (SCHINDLER et al. 2019). Mit Hilfe von Dropsondendaten wurden Indizien gefunden, dass PV im Umfeld von Zyklonen auch negativ werden kann (HARVEY et al. 2020). Der interessierte Leser findet weitere Informationen und eine Übersicht der aktuellen Arbeiten unter <http://nawdex.org/>.

Ausgehend von NAWDEX-Ergebnissen nimmt die internationale NAWDEX-Gemeinschaft derzeit einen neuen Anlauf für eine koordinierte Messkampagne in den kommenden Jahren. Ziel ist es, mit Flugzeugmessungen die Verbindung der Tropopausenstruktur mit stromabwärtigen Wettererscheinungen in Zyklonen, wie Starkniederschläge, Sturmböen, etc. zu untersuchen, die große Auswirkungen auf Gesellschaft und Wirtschaft haben.

Literatur

BINDER, H., MADONNA, E., 2020: Warm conveyor belts, *siehe Beitrag 7 in diesem Promet-Heft*.
 BOETTCHER, M., WERNLI, H., 2020: Die PV-Struktur außertropischer Zyklonen, *siehe Beitrag 6 in diesem Promet-Heft*.
 HARVEY, B., METHVEN, J., SANCHEZ, C., SCHÄFLER, A., 2020: Diabatic generation of negative potential vorticity and its impact on the North Atlantic jet stream. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **146**, 1477-1497, doi: 10.1002/qj.3747.
 MECH, M., ORLANDI, E., CREWELL, S., AMENT, F., HIRSCH, L., HAGEN, M., PETERS, G., STEVENS, B., 2014: HAMP–The Microwave Package on the High Altitude and Long Range Research Aircraft (HALO). *Atmos. Meas. Tech.* **7**, 4539-4553.
 OERTEL, A., BOETTCHER, M., JOOS, H., SPRENGER, M., KONOW, H., HAGEN, M., WERNLI, H., 2019: Convective activity in an extratropical cyclone and its warm conveyor belt – a case-study combining observations and a convection-permitting model simulation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **145**, 1406-1426.
 PARSONS, D.B. et al., 2017: THORPEX research and the science of prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **98**, 807-830.
 RAUTENHAUS, M., KERN, M., SCHÄFLER, A., WES-TERMANN, R., 2015: Three-dimensional visualization of ensemble weather forecasts – Part 1: The visualization tool Met.3D (version 1.0). *Geosci. Model Dev.* **8**, 2329-2353.
 RIEMER, M., 2020: Von der tropischen zur außertropischen Zyklone, *siehe Beitrag 8 in diesem Promet-Heft*.
 SCHÄFLER, A. et al., 2018: The North Atlantic Waveguide and Downstream Impact Experiment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **99**, 1607-1637.

- SCHÄFLER, A., HARVEY, B., METHVEN, J., DOYLE, J.D., RAHM, S., REITEBUCH, O., WEILER, F., WITSCHAS, B., 2020: Observation of jet stream winds during NAWDEX and characterization of systematic meteorological analysis error. *Mon. Wea. Rev.* **148**, 2889-2907, doi: 10.1175/MWR-D-19-0229.1.
- SCHINDLER, M., WEISSMANN, M., SCHÄFLER, A., RADNOTI, G., 2019: The impact of dropsonde and extra radiosonde observations during NAWDEX in autumn 2016. *Mon. Wea. Rev.* **148**, 809-824, doi: 10.1175/MWR-D-19-0126.1.
- SCHULTZ, D.M. et al., 2019: Extratropical Cyclones: A Century of Research on Meteorology's Centerpiece. *Meteorol. Monographs*. **59**, 16.1-16.56, doi: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0005.1.
- SHAPIRO, M.A., 1980: Turbulent Mixing within Tropopause Folds as a Mechanism for the Exchange of Chemical Constituents between the Stratosphere and Troposphere. *J. Atmos. Sci.* **37**, 994-1004.
- SHAPIRO, M. et al., 1999: A Planetary-Scale to Mesoscale Perspective of the Life Cycles of Extratropical Cyclones: The Bridge between Theory and Observations. In: Shapiro M.A., Grønås S. (Hrsg.). Pp. 139-185 in: *The Life Cycles of Extratropical Cyclones. American Meteorological Society*, Boston, USA.
- STEVENS, B. et al., 2019: A High-Altitude Long-Range Aircraft Configured as a Cloud Observatory: The NARVAL Expeditions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **100**, 1061-1077.
- WIRTH, M., FIX, A., MAHNKE, P., SCHWARZER, H., SCHRANDT, F., EHRET, G., 2009: The airborne multi-wavelength water vapor differential absorption lidar WALES: System design and performance. *Appl. Phys.* **96B**, 201-213.
- WITSCHAS, B., RAHM, S., DÖRNBRACK, A., WAGNER, J., RAPP, M., 2017: Airborne wind lidar measurements of vertical and horizontal winds for the investigation of orographically induced gravity waves. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **34**, 1371-1386.

Autoren

DR. ANDREAS SCHÄFLER
Institut für Physik der Atmosphäre
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Münchener Straße 20
82234 Oberpfaffenhofen-Wessling
andreas.schaefer@dlr.de

DR. FLORIAN EWALD
Institut für Physik der Atmosphäre
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Münchener Straße 20
82234 Oberpfaffenhofen-Wessling
florian.ewald@dlr.de

DR. MARC RAUTENHAUS
Universität Hamburg
Regional Computing Center, Visualization
Schlüterstrasse 70
20146 Hamburg
marc.rautenhaus@uni-hamburg.de

4 Zyklonen und Fronten

Cyclones and fronts

S. SCHEMM, M. SPRENGER

Zusammenfassung

Warm- und Kaltfronten sind markante Erscheinungsmerkmale außertropischer Zyklonen. Frühe Theorien zur Entstehung von Zyklonen postulierten, dass Fronten ursächlich für deren Entstehung sind. Die Norwegische Denkschule identifizierte die Polarfront als treibende Kraft hinter der Entstehung außertropischer Zyklonen. Die Front existiert gemäß dieser Denkschule bereits vor der Zyklone. Andererseits argumentiert die später entwickelte Theorie der baroklinen Instabilität, dass außertropische Zyklonen in einer breiten und schwachen baroklinen Zone entstehen und sich die markanten Bodenfronten erst im Verlauf des Lebenszyklus einer Zyklone entwickeln. Beobachtungen zeigen jedoch, dass ausgewählte Zyklonen durchaus auf der bereits existierenden Kaltfront einer vorangegangenen Zyklone entstehen. Bis heute bestehen beide Sichtweisen: Fronten als ursächlicher Antrieb der Zyklognese einerseits, und andererseits Fronten als Begleiterscheinungen der Entwicklung außertropischer Zyklonen. In diesem Beitrag werden die beiden Sichtweisen zunächst historisch beleuchtet und im Anschluss aufgezeigt, wie diese Dualität im Licht moderner Methoden und Datensätze erscheint.

Summary

Warm and cold fronts are key features of extratropical cyclones. Already the first scientific theories addressing the development of extratropical cyclones argued that fronts act as the origin of cyclogenesis. Indeed, the polar front theory of the Norwegian School sees a frontal instability as the driving mechanism of cyclogenesis, and thus assumes that the front exists before the cyclone. On the other hand, the basic theory of baroclinic instability assumes that cyclones develop in a broad and weak baroclinic region, and that the fronts only develop in parallel to the evolution of the cyclone. In summary, there result two concurring views on the role of fronts during cyclogenesis: either, they act as the driving mechanism, or are just accompanying features during the later evolution of the cyclone. This article shows how modern methods and datasets allow the duality of these two concurring theories to be studied anew.

1 Über die Rolle von Fronten während der Entstehung von Zyklonen

Die Entstehung und die Entwicklung außertropischer Zyklonen ist traditionell mit der Darstellung von Bodenfronten und den dazugehörigen Zyklonen, in Form von geschlossenen Isobaren, verknüpft. Am Anfang des Lebenszyklus einer außertropischen Zyklone steht, nach BJERKNES und SOLBERG (1922), die Polarfront. Demnach ist die außertropische Entstehung von Zyklonen („Zyklognese“) das Resultat einer, damals nicht näher spezifizierten, intrinsischen Instabilität der bereits bestehenden Polarfront, auf welcher kleine wellenartige Störungen ihr Wachstum beginnen (Abbildung 4-1).

Zwar wurde der Charakter der Polarfront, ihre Struktur und Erscheinungsform, im Laufe der Zeit immer wieder angepasst (BJERKNES und PALMÉN 1937), die grundlegende Frage nach der fluiddynamischen Natur dieser Instabilität (SOLBERG 1928; KOTSCHIN 1932; ORLANSKI 1968; KASAHARA und RAO 1972; SINTON und MECHOSO 1984; SINTON und HEISE 1993; PARKER 1998; PATOUX et al. 2005) konnte aber erst Jahrzehnte später theoretisch beantwortet werden. Erst die analytischen Arbeiten von SCHÄR und DAVIES (1990) sowie JOLY und THORPE (1990) lieferten die theoretische Grundlage für die bis dahin auf Beobachtungen basierenden Konzepte der Zyklognese, nach welchen – zumindest für einige Tiefdruckgebiete – die bereits bestehende Bodenfront den

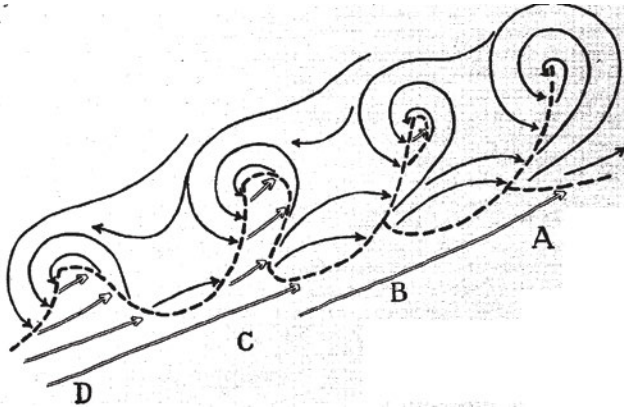


Abb. 4-1: Das vierstufige Norwegische Zyklonenmodell und die Entwicklung der Polarfront (gestrichelt). Aus BJERKNES und SOLBERG (1922).

ursächlichen Antrieb für das Zyklonenwachstum liefert. Ein der Front vorlaufendes Warmluftband, bzw. eine positive Anomalie in der potentiellen Vorticity auf isentropen Flächen (IPV), ergibt in den analytischen Modellen von SCHÄR und DAVIES (1990) und JOLY und THORPE (1990) eine instabile Frontkonfiguration, welche aufgrund mehrheitlich barotroper Energieumwandlung das Wachstum kleiner Störungen ermöglicht. Jahrzehnte nach den Beobachtungen durch die Norwegische Schule erhielt somit das Wachstum von außertropischen Zyklonen entlang von Bodenfronten einen theoretischen Überbau.

Die Darstellung der Bodenentwicklung mithilfe von Isobaren und Fronten verdanken wir mehrheitlich der Norwegischen Denkschule, nach welcher eine außertropische Zyklone durch eine Verschiebung von warmen Luftmassen nach Norden und kalten Luftmassen nach Süden, separiert durch Warm- und Kaltfront (BJERKNES 1919), charakterisiert wird. Am Anfang steht nach diesem Modell also die Front, welche die Zyklone während ihrer Entwicklung begleitet.

Mitte des 20. Jahrhunderts setzte ein fundamentaler Wandel ein. Die Entwicklung von Zyklonen wurde als Folge einer baroklinen Instabilität gesehen (CHARNEY 1947; EADY 1949). Im Unterschied zur Norwegischen Denkschule wird in diesem Modell keine markante Front als Ausgangspunkt der Zyklonogenese vorausgesetzt, sondern die Zyklone entwickelt sich in einer breiten baroklinen Zone. Warm- und Kaltfronten bilden sich erst im Lauf der Intensivierung der Zyklone aus und die Fronten sind folglich Begleiterscheinungen einer wachsenden Zyklone und nicht ihre Ursache.

Seit der Einführung dieser beiden konzeptionellen Modelle der Zyklonogenese besteht die Dualität der relevanten Prozesse weiter und zwar nicht nur von einem theoretischen Standpunkt aus, sondern auch gestützt durch Beobachtungen. Tatsächlich gibt es viele Beobachtungen, die darauf hinweisen, dass beide Modelle ihre Richtigkeit haben. Es gibt außertropische Zyklonen, deren Entwicklung klar im Zusammenhang mit einer bereits vorherrschenden Boden-

front stehen und bei denen eine frontale Instabilität in dem Moment ausgelöst wird, wenn eine Störung auf Tropopauzenhöhe über die Front zieht (Fallstudien hierzu sind zum Beispiel: PETERSSSEN 1955; PETERSSSEN et al. 1962; THORNCROFT und HOSKINS 1990; THORNCROFT et al. 1993). Häufig spricht man in diesem Zusammenhang auch von einer „Sekundärzyklone“, wenn sie sich entlang einer Front entwickelt, die einer Mutterzyklone „hinterherläuft“. Andere Beobachtungen hingegen zeigen, dass sich eine Zyklone auch dann ausbilden kann, wenn keine oder nur eine schwache und breite barokline Zone vorhanden ist. Beispiele hierfür sind die Fallstudien in: MUDRICK 1974; HOBBS et al. 1996; LACKMANN et al. 1997; WERNLI et al. 1997; THOMAS und MARTIN 2007; SCHEMM et al. 2013.

Es ist erstaunlich, dass auch nach hundert Jahren Forschung zu Zyklonen keine Einigkeit zur Bedeutung der Fronten für deren Entstehung besteht (siehe nachfolgender Beitrag 5 in diesem Heft). Andererseits drückt sich darin vermutlich auch aus, dass es eben kein einheitliches Konzept gibt, mit welchem sich alle Varianten der Zyklonogenese erfassen lassen. Es gibt also verschiedene Kategorien der Zyklonenentwicklung, ein unterscheidendes Merkmal ist die Rolle der Fronten. Trotzdem ist auch dieser Standpunkt unbefriedigend und es besteht der Wunsch, quantitative Aussagen machen zu können, ob und wie oft Fronten Auslöser oder Begleiterscheinungen der Zyklonenentwicklung sind. Zudem stellt sich die Frage, ob es sogar Zyklonen gibt, die weder zu Beginn, noch während ihres ganzen Lebenszyklus Fronten besitzen. Um diese Fragen quantitativ beantworten zu können, muss jedoch zunächst klar definiert sein, was man unter einer Front zu verstehen hat.

2 Definition von Fronten im Wandel der Zeit

Kalt- und Warmfronten treten, wie oben skizziert, typischerweise im Lebenszyklus von außertropischen Zyklonen auf. Neben der Frage, wann dies der Fall ist – zu Beginn oder erst im ausgereiften Stadium der Zyklone –, stellt sich zusätzlich die Frage, wo genau die Front zu liegen kommt. Diese Frage mussten sich zum Beispiel die Meteorologen unter der Leitung von Petterssen gegen Ende des zweiten Weltkriegs stellen, als es darum ging, das Datum für die Landung in der Normandie festzulegen; oder überhaupt zu entscheiden, ob diese möglich ist oder nicht (WELKER et al. 2014). Es braucht neben der Intuition der Vorhersagemeteorologen auch objektive Kriterien, anhand derer die Fronten auf einer synoptischen Wetterkarte eingezeichnet werden können. Dass dies keine triviale Aufgabe ist, zeigt zum Beispiel ein Versuch, bei dem verschiedene Meteorologen in den Vereinigten Staaten aufgefordert waren, Fronten in einer synoptischen Karte einzuzichnen. Die einzelnen Lösungen wichen stark voneinander ab (siehe Abbildung 4-2), obwohl allen Meteorologen dieselben Daten zur Verfügung standen (UCCELLINI et al. 1992).

Die Mehrdeutigkeit in der Lokalisierung der Fronten spiegelt eine fundamentale Frage wider – nämlich, was genau unter einer Front zu verstehen ist. Soll man sich darunter eine geneigte Isentrope vorstellen? Oder einen Dichteunterschied zwischen verschiedenen Luftmassen? Oder soll nur von einer normalen Front gesprochen werden, wenn es sich um eine „wetteraktive Trennlinie“ handelt? Bestimmte Charakteristika werden einheitlich mit Fronten verbunden, zum Beispiel eine erhöhte Baroklinität (als Ausdruck eines thermodynamischen Unterschiedes der frontalen Luftmassen) oder eine anomale relative Vorticity (als Ausdruck der lokalen Windfelder beim Durchzug von Fronten). Welche Kombination all dieser Größen aber die optimale Frontenlage bestimmt, ist weit weniger klar.

Die Unsicherheit in der Definition lässt sich etwas konkreter an zwei Fragen festlegen: Welche meteorologische Größe soll betrachtet werden, um die prä- und postfrontalen Luftmassen voneinander zu unterscheiden? Und auf welcher Höhe ist dieser Parameter zu analysieren? Der meteorologische Parameter soll die beiden frontalen Luftmassen möglichst klar voneinander trennen, denn – wie bereits BJERKNES und SOLBERG (1922) in ihrer Polarfront-Theorie hervorheben – ist das Wesensmerkmal einer Front, dass sie Luftmassen verschiedenen Ursprungs trennt. Im Beispiel der Polarfront sind dies die kalten polaren Luftmassen auf der Nordseite und die wärmeren Luftmassen auf ihrer Südseite. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Größen vorgeschlagen, die diesem Kriterium genügen. Zum Beispiel:

- Die äquivalent-potentielle Temperatur θ_e berücksichtigt sowohl den Temperatur-, als auch den Feuchteunterschied verschiedener Luftmassen, und folgt damit der Feststellung von RENARD und CLARKE (1965), dass nämlich Fronten in erster Näherung als Diskontinuitäten im Temperatur- und Feuchtefeld zu betrachten sind. Tatsächlich bleibt θ_e unter reversiblen, feuchtadiabatischen Prozessen erhalten und bietet sich deshalb als Lagrange'scher Tracer der beiden frontalen Luftmassen an. Heute wird θ_e zum Beispiel vom Britischen (UKMO) und Deutschen Wetterdienst (DWD) verwendet als Basisfeld, der synoptischen Frontenanalyse. Typischerweise wird θ_e auf

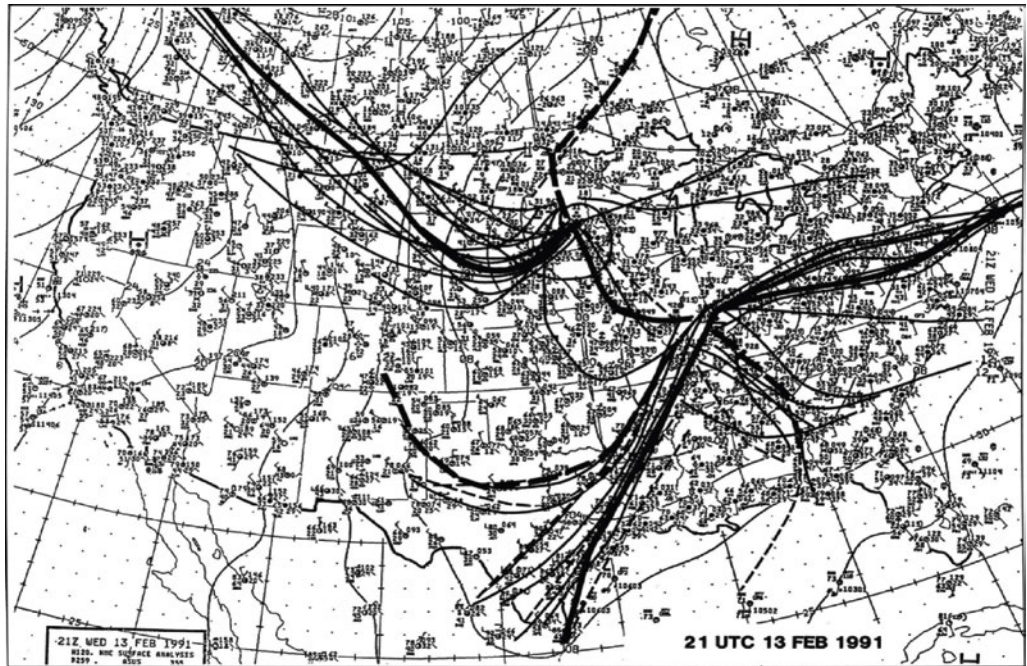


Abb. 4-2: Bodenkarte vom 13. Februar 1991 mit handgezeichneten Bodenfronten ausgewählter Experten am *National Meteorological Center Workshop* 25.–28. März 1991 (UCCELLINI et al. 1992).

einer Höhe betrachtet, die nicht zu weit vom Boden entfernt ist, damit auch nicht vertikale Fronten mit genügender Genauigkeit in ihrer Position am Boden lokalisiert werden können. Andererseits soll die Fläche auch nicht zu stark durch Feuchte- und Wärme-flüsse an der Erdoberfläche beeinflusst werden. Ein guter Kompromiss besteht darin, θ_e auf 850 hPa oder 700 hPa zu betrachten.

- SANDERS und DOSWELL (1995) hingegen argumentieren, dass man die potentielle Temperatur θ unmittelbar über der Erdoberfläche nehmen sollte, um Fronten zu bestimmen. Die Motivation für diesen Entscheid liegt einerseits in der Beobachtung, dass Fronten typischerweise in Bodennähe am stärksten ausgeprägt sind und mit zunehmender Höhe in ihrer Intensität abnehmen. Andererseits basiert diese Frontendefinition darauf, dass die entscheidenden Prozesse für die Entstehung von relevanten Wetterereignissen (Hagel und Tornados bei SANDERS und DOSWELL) auf der Mesoskala und in Bodennähe stattfinden. Diese bodenbasierte Frontenanalyse ist besonders in den U.S.A weit verbreitet und stützt sich dort auf die breite Erfahrung in der Analyse mesoskaliger Systeme. Weniger im Zentrum dieser Analyse stand – und steht – die großskalige (synoptische) Bewegung der Zyklonen.

Vermutlich spiegeln diese doch recht unterschiedlichen Ansätze bei der Lokalisierung von Fronten auch sehr unterschiedliche Zielsetzungen wider: Steht die Lokalisierung mesoskaliger Luftmassengrenzen in Bodennähe im Zentrum oder geht es mehr darum, die Ausgangslage und die weitere Entwicklung synoptisch-skaliger Zyklonen zu studieren? Traditionen und das Wissen über die regionale

Meteorologie spielen zudem sicher eine gewisse Rolle bei der Lokalisierung der Fronten. Da in diesem Beitrag die Verbindung von Fronten und Zyklonen im Zentrum steht, stützt sich die weitere Diskussion vor allem auf Fronten, die auf der äquivalent-potentiellen Temperatur θ_e auf 850 hPa basieren. Zudem wird aber auch die potentielle Temperatur θ auf 2 m Höhe über dem Boden betrachtet. Ein Beispiel einer synoptischen Frontenkarte ist in Abbildung 4-3 gegeben.

Schließlich darf nicht vergessen werden, dass es weitere Methoden gibt, mit denen sich Fronten identifizieren lassen. Bekannte Beispiele sind die Frontogenesefunktion nach PETTERSEN (1936), die Lokalisierung geneigter Isentropen oder die Verfahren, die sich nicht auf thermodynamische, sondern kinematische Größen (Windsprung, Vorticity) stützen (SIMMONDS et al. 2012).

Neben eher konzeptionellen Überlegungen zur Identifikation von Fronten, stellt sich weiter die Herausforderung, wie diese Identifikation und Lokalisierung automatisiert werden kann. Denn die Zielfrage dieses Beitrags – ob und wann Zyklonen mit Fronten verbunden sind –, lässt sich nicht schlüssig beantworten, wenn nur einzelne Fallbeispiele besprochen werden. Stattdessen verlangt die Beantwortung, dass Fronten und Zyklonen in langjährigen Reanalyse-Datensätzen (zum Beispiel ERA-Interim des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersagen, EZMW) automatisiert identifiziert werden und anschließend diese beiden vorerst voneinander unabhängigen Zyklonen- und Frontenklimatologien miteinander verbun-

den werden. Die Fortschritte im Bereich des maschinellen Lernens erlauben inzwischen auch das Trainieren von Algorithmen anhand von Fronten auf Bodenanalysekarten, jedoch erlernt und vermischt der Algorithmus damit zum einen den Bias der unterschiedlichen Meteorologen, zum anderen bringt uns auch dies auf der Suche nach der Definition von Fronten nicht weiter.

3 Die archetypische Entwicklung von Fronten und Zyklonen

So verschieden Zyklonen sich auch entwickeln: Es gibt doch viele Gemeinsamkeiten in der Bodenentwicklung. Dies drückt sich darin aus, dass sich viele Zyklonen-Lebenszyklen in verschiedene Kategorien einteilen lassen. Drei Lebenszyklen, die historisch äußerst bedeutsam waren oder immer noch sind, sollen im Folgenden an konkreten Beispielen kurz vorgestellt werden.

3.1 Fronten im Norwegischen Zyklonenmodell

Auch wenn viele Elemente des Norwegischen Zyklonenmodells heute als überholt gelten, lohnt sich ein Blick zurück. Am Anfang steht im Norwegischen Zyklonenmodell die Polarfront, also jene ausgedehnte Grenze, an der kalte und dichtere Luftmassen aus polaren Regionen auf mildere und weniger dichte Luftmassen aus den tropischen Breiten treffen. Durch eine zyklonale Störung auf der Polarfront beginnt sich die warme Luft nach Norden zu bewegen und auf die kältere Luftmasse aufzugleiten.

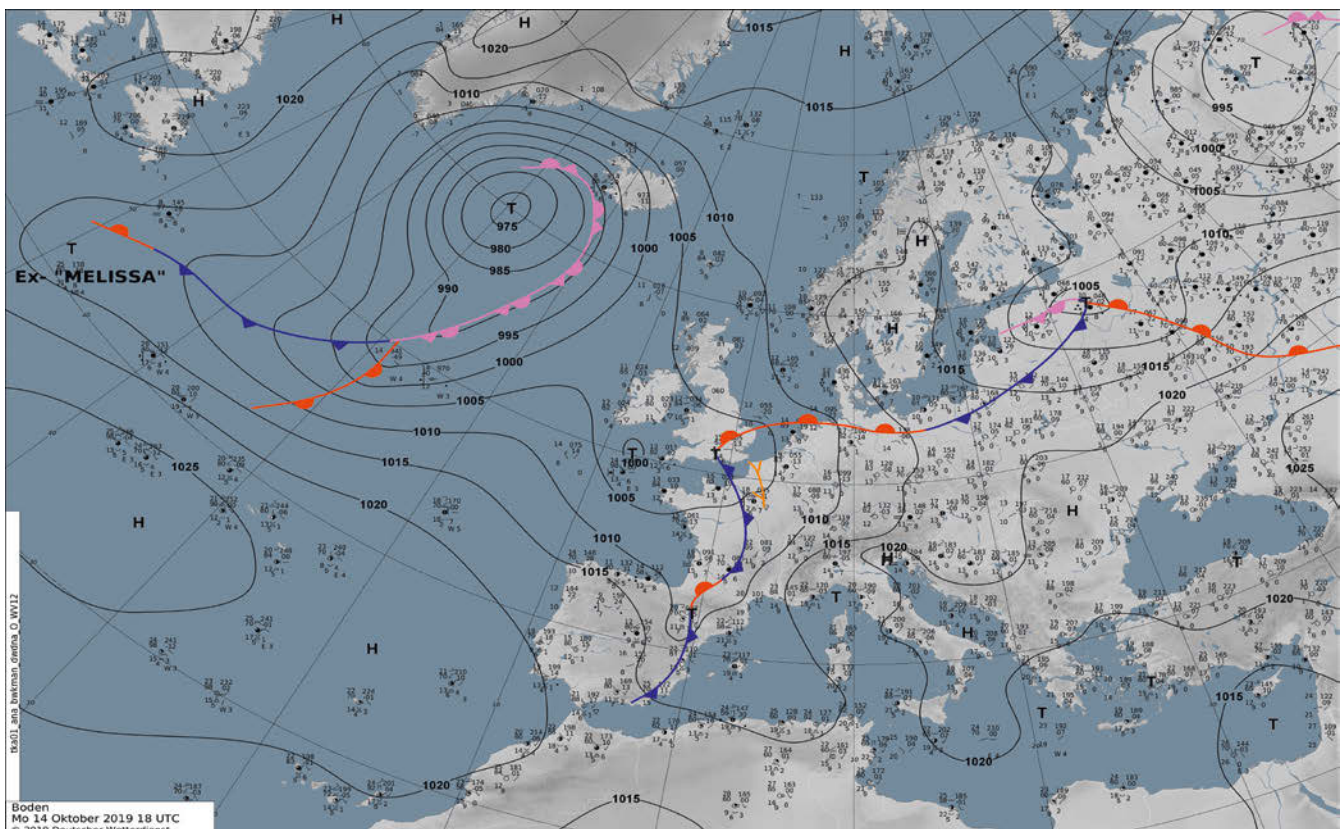


Abb. 4-3: Bodenwetterkarte des Deutschen Wetterdienstes vom 14. Oktober 2019.

Gleichzeitig bewegt sich stromaufwärts die kältere Luft nach Süden und hebt dabei die wärmeren Luftmassen in die Höhe. Die Verschiebung der Polarfront gilt im Norwegischen Zyklonenmodell als Entstehungsprozess der Warm- und Kaltfronten. Durch die Hebung der warmen Luftmassen bildet sich frontaler Niederschlag. Am Ende des Verschiebungsprozesses steht die Okklusion. Eine ausgedehnte Front vermag jedoch im Anschluss zu bestehen und dient der nächsten Zyklonogenese als Ursprung: Eine Beobachtung, die Jahrzehnte später zur Theorie der frontalen Wellen führte. Der Ursprung der Störung der Polarfront wird im Norwegischen Modell nicht weiter definiert. Heute wissen wir, dass diese Störung nicht selten durch einen Höhentrog entsteht – eine Vermutung, die bereits die Wiener Denkschule um Exner während der Norwegischen Denkschule postulierte (siehe Beitrag 5).

3.2 Fronten im Shapiro-Keyser-Zyklonenmodell

Das Shapiro-Keyser-Zyklonenmodell legt, wie das Norwegische Modell, ein Augenmerk auf die Entwicklung der Bodenfronten während des Lebenszyklus (SHAPIRO und KEYSER 1990). Das Ziel des Anfangs der 1990er Jahre entwickelten Modells war es nicht, die der Zyklonogenese zugrundeliegenden Prozesse oder die Rolle der Dynamik der oberen Troposphäre neu zu quantifizieren. Stattdessen ging es darum – basierend auf aktuellen Beobachtungen, die während der ERICA-Kampagnen Ende der 1980er Jahre gesammelt wurden (HADLOCK und KREITZBERG 1988; siehe Beitrag 1) –, die detaillierte Entwicklung der Fronten phänomenologisch zu beschreiben.

Der Lebenszyklus im Shapiro-Keyser-Zyklonenmodell wird in vier Stadien untergliedert (Abbildung 4-4): (1) Das frühe Wachstum der frontalen Welle; (2) die Fraktur der Front mit der Separierung in Warm- und Kaltfront; (3) das „T-bone Stadium“ mit der Entstehung der „bent-back Front“; und (4) der Warmlufteinschluss durch die sich immer stärker zyklonal krümmende Warmfront, welche schlussendlich eine Warmluftregion vom Warmsektor abkapselt (*seclusion*). Ein entscheidender Unterschied zum Norwegischen Zyklonenmodell ist die Fraktur der Fronten. Dabei bricht, sobald die frontale Welle ihr frühes Wachstum beendet hat, die Kaltfront von der Warmfront ab. Ob die frontale Welle tatsächlich auseinanderbricht, wie es auf den idealisierten Abbildungen erscheint, oder sich an unterschiedlichen Regionen die Frontogenese besonders verstärkt, wird im Rahmen des phänomenologischen Konzepts nicht weiter quantifiziert. Das Resultat der Fraktur ist eine Kaltfront, die im Gegensatz zum Norwegischen Modell nicht mehr durchgehend mit der Warmfront verbunden ist. Stattdessen liegen beide Fronten nahezu senkrecht in T-Form zueinander. Im dritten Stadium beginnt die Warmfront sich zyklonal nördlich um das Kerntief herum zu krümmen, um sich dabei weiter zu verstärken. Auf der stromaufwärtigen Seite des Kerntiefs bildet sich eine Erweiterung der Warmfront aus, welche aus kinematischer Sicht wieder eine Kaltfront darstellt. Diese rückwärtige Verlängerung der Warmfront wird „bent-back Front“ ge-

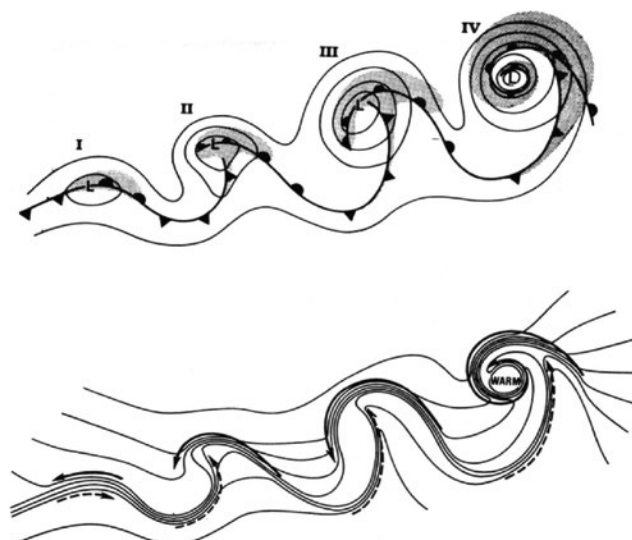


Abb. 4-4: Das vierstufige Shapiro-Keyser-Zyklonenmodell (SHAPIRO und KEYSER 1990). Obere Reihe: Entwicklung der Isobaren. Untere Reihe: Entwicklung der potentiellen Temperatur.

nannt und sie stellt aus dynamischer Sicht eine Verlängerung der Warmfront dar und wird nicht als Kaltfront angesehen. An dieser rückwärtigen Frontverlängerung wird häufig der stärkste bodennahe Wind in einem Tiefdruckgebiet beobachtet. Auch im Shapiro-Keyser-Zyklonenmodell spielen die Fronten von Beginn an eine entscheidende Rolle. Man spricht folglich auch vom archetypischem Lebenszyklus einer *marine frontal cyclone*.

3.3 Frontale Wellen und sekundäre Zyklonogenese

Als im Jahr 1919 einige Wetterdienste die Häufigkeit ihrer Sondierungen auf bis zu viermal täglich erhöhten und Bjerknes den Auftrag erhielt, die offiziellen Sturmwarnungen für die norwegische Westküste herauszugeben, machten er und seine Mitarbeitenden eine erstaunliche Entdeckung. Auf der Kaltfront einer ausgewachsenen Zyklone, so schien es, können neue Zyklonen entstehen, welche sich zunächst als wellenartige Muster auf der Front bemerkbar machten. Schon bald kam man zu der Erkenntnis, dass viele der Zyklonen, welche die norwegische Westküste im stürmischen Herbst und Winter erreichten, nicht unabhängig voneinander sind, sondern durch Fronten miteinander in Verbindung stehen. Die Entstehung einer neuen Zyklone auf der ausgewachsenen Kaltfront einer bereits vollständig entwickelten Zyklone taufte man „sekundäre Zyklonogenese“. Eine Serie solcher Zyklonen wird seitdem als „Zyklonenfamilie“ bezeichnet (siehe Beitrag 2 in diesem Heft).

Was bis in die 1990er Jahre jedoch fehlte, war eine Theorie, die das Wachstum von Störungen auf einer Front und damit die sekundäre Zyklonogenese erklären konnte. Erst die analytischen Modelle von SCHÄR und DAVIES (1990) sowie JOLY und THORPE (1990) lieferten den erhofften Durchbruch. Unter der Hinzunahme eines der Front vorlaufenden Warmluftbandes konnten Störungen in einem semi-geostrophem zweidimensionalen Frontenmodell wach-

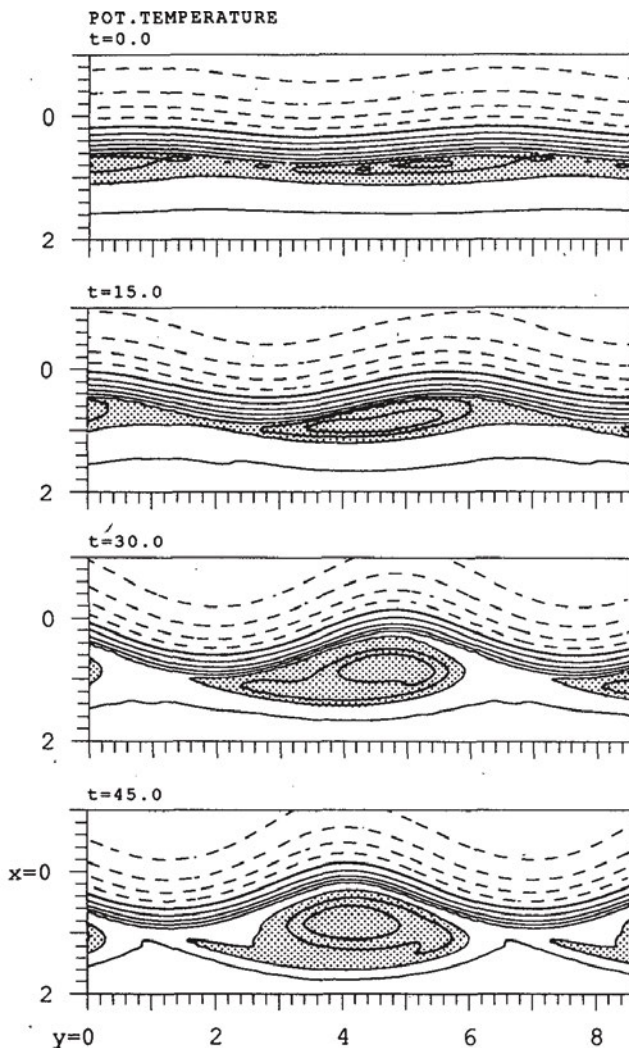


Abb. 4-5: Entstehung einer frontalen Welle und eines mesoskaligen Tiefs aus einer frontalen Instabilität gemäss SCHÄR und DAVIES (1990).

sen. Im Modell von JOLY und THORPE (1990) basiert das frühe Wachstum einer frontalen Welle auf einer rein barotropen Energieumwandlung, während im Modell von SCHÄR und DAVIES (1990) sich eine Mischung aus barotropem und baroklinem Wachstum einstellt (Abbildung 4-5). Nach der Ausbildung einer klaren mesoskaligen Anomalie in der Vorticity versiegt jedoch in den beiden analytischen Modellen der Antrieb für weiteres Wachstum. Interessanterweise beobachtete bereits die Norwegische Schule, dass sich nicht alle frontalen Wellen in ausgewachsene Zyklonen entwickelten, sondern das Wachstum wieder versiegt (BERGERON und SWOBODA 1924).

Mehrere Faktoren sind für den Fortbestand und das Wachstum einer frontalen Welle nach der ursprünglich barotropen Entstehungsphase entscheidend. Dies ist einerseits die Interaktion mit einem Höhentrog, der es der frontalen Welle ermöglicht, ihr Wachstum in eine ausgewachsene Zyklone fortzusetzen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die (horizontale) Windscherung entlang der Front, welche das Wachstum einer frontalen Wel-

le schwächen oder sogar unterdrücken kann. Bereits in den 1990er Jahren erkannte man in analytischen Modellen den wichtigen Einfluss der Windscherung. Falls die horizontale Windscherung entlang der Front zu stark ist, unterdrückt sie das Wachstum der frontalen Welle (BISHOP und THORPE 1994a, b; RENFREW et al. 1997). Die Existenz eines Schwellenwertes, oberhalb dessen die Windscherung frontales Wellenwachstum effektiv verhindert, wurde dank der Verfügbarkeit von Reanalyse-Daten 25 Jahre später erstmals klimatologisch nachgewiesen (SCHEMM und SPRENGER 2015).

4 Was entsteht zuerst: Die Front oder die Zyklone?

Die Frage, die sich nach über einem Jahrhundert Forschung stellt, ist schlussendlich: „Was kommt zuerst: die Zyklone oder die Front?“ Oder anders formuliert: „Wann, während des Lebenszyklus einer außertropischen Zyklone entwickeln sich die Bodenfronten?“ Dank der Verfügbarkeit von Reanalyse-Daten und der Entwicklung von Methoden, die es erlauben, Fronten und Zyklonen automatisiert und objektiv zu erkennen, lassen sich diese beiden Fragen phänomenologisch quantifizieren. Phänomenologisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass einzig die Existenz einer Zyklone und die Existenz einer Front überprüft wird, ohne dabei festzustellen, welches der beiden ursächlich für die Existenz des jeweils anderen ist. Wie bereits in Abschnitt 2 im Detail beschrieben, spielt die Frontendefinition bei der Klassifizierung von Tiefdruckgebieten in die folgenden drei Kategorien eine wichtige Rolle:

- Kategorie 1: Zyklonen, die bereits zum Zeitpunkt ihrer Entstehung mit einer ausgewachsenen Front in Verbindung stehen.
- Kategorie 2: Zyklonen mit Fronten, die erst während des Lebenszyklus entstehen.
- Kategorie 3: Zyklonen, welche nie mit einer ausgewachsenen Front in Verbindung gebracht werden können.

Eine auf der äquivalent-potentiellen Temperatur beruhende Frontdefinition (θ_e auf 850 hPa mit 500 km minimaler Frontenlänge) klassifiziert Zyklonen, die über dem Nordatlantik und Nordpazifik vorkommen, mehrheitlich (> 50 %) in die Kategorie 1 (mit Front während des Zeitpunktes der Zyklonogenese). Im Gegensatz dazu werden Zyklonen über Land und im Lee von Gebirgen mehrheitlich der Kategorie 2 zugeordnet. Zyklonen in polaren Regionen werden mehrheitlich der Kategorie 3 zugeordnet, also stehen nicht mit Fronten in Verbindung, die der oben genannten Definition genügen. Auch eine verfeinerte Unterscheidung der Zyklonen in Kategorie 1 (Front bereits während der Entstehung der Zyklone) ist möglich, nämlich in sekundäre Zyklonogenese und nicht-sekundäre Zyklonogenese. Wie zu erwarten, findet sich sekundäre Zyklonogenese mehrheitlich über

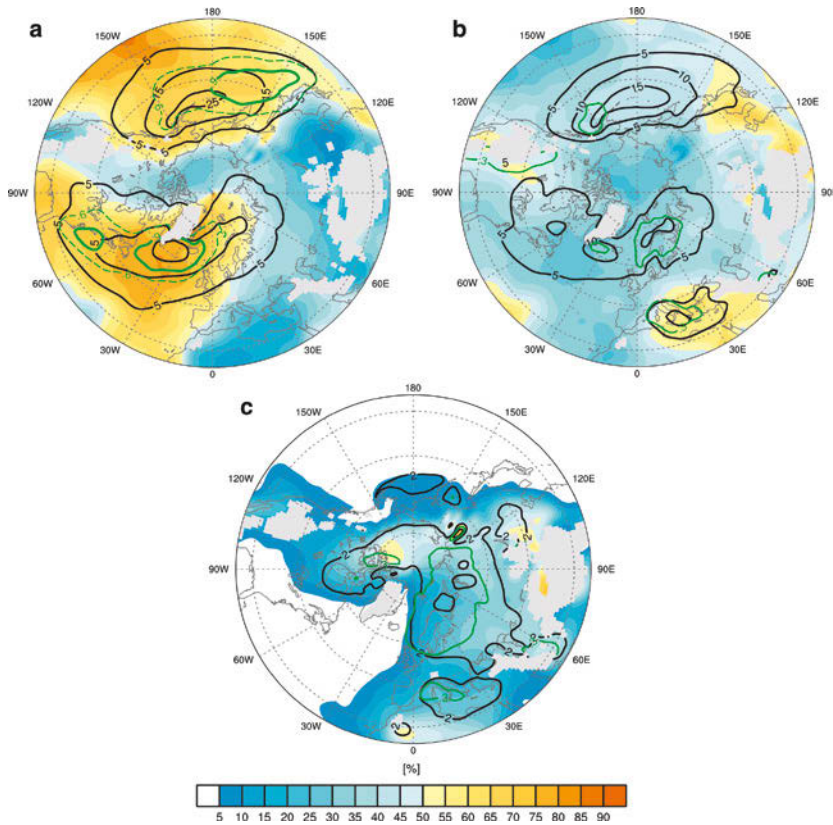


Abb. 4-6: Relativer Anteil (farbig; %) der verschiedenen Zyklonenkategorien an der klimatologischen Zyklonenverteilung im Winter mit einer auf äquivalent-potentieller Temperatur beruhenden Frontdefinition. Zusätzlich gezeigt sind die Zyklonengeshäufigkeit (grün; %) und Zyklonenhäufigkeiten für jede der drei Kategorien (schwarz; %).

dem östlichen Nordatlantik und zentralem Pazifik (Abbildung 4-6; und Fig. 5 in SCHEMM et al. 2018).

Eine auf der äquivalent-potentiellen Temperatur beruhende Frontdefinition (θ auf 2 m Höhe und mit einer minimalen Frontlänge von 500 km) ordnet wiederum Zyklonen über Nordamerika, dem Nordatlantik und Nordeuropa (inklusive der polaren Regionen) der Kategorie 1 zu. Dies verwundert nicht, da nun Fronten in nahezu allen entscheidenden Zyklonengese-Regionen (Rocky Mountains, Golfstrom, Grönland) gefunden werden. Der Nordpazifik ist nun jedoch mehrheitlich dominiert von Zyklonen der Kategorie 2. Dies ist einerseits mit den klimatologischen Unterschieden in der potentiellen Temperatur erklärbar, andererseits damit, dass diese Frontdefinition deutlich weniger Zyklonengese über dem zentralen und östlichen Pazifik als Kategorie 1, sondern als Kategorie 2 klassifiziert. Polare Zyklonen werden nun nicht mehr in Kategorie 3 (keine Front während des Lebenszyklus) eingeordnet, sondern ebenfalls in Kategorie 1 (Front bereits während der Entstehung). Dieser

Unterschied ist somit auf den Einfluss der abnehmenden absoluten Feuchte in höheren Breiten und dessen Einfluss auf die θ_e -basierende Frontdefinitionen zurückzuführen (Abbildung 4-7).

Erstaunlicherweise lässt sich die grundlegende Frage „Wann entstehen, während des Lebenszyklus einer außertropischen Zyklone, ihre Fronten?“ beantworten, ohne dass die beiden Frontdefinitionen signifikant unterschiedliche Resultate liefern. Der Anteil der Zyklonen, die bereits von Beginn ihres Lebenszyklus an mit einer Bodenfront wachsen (Kategorie 1), nimmt im Lauf der Wachstumsphase auf 80 % aller Zyklonen in dieser Kategorie zu. Einige Zyklonen dieser Kategorie verlieren ihre Front, die Mehrheit jedoch durchlebt bis zur Phase der maximalen Intensität eine gemeinsame Entwicklung von Zyklone und Front. Erst nach der Phase mit maximaler Intensität nimmt die Anzahl der Zyklonen mit beibehaltender Front merklich ab, auf ungefähr 50 %. Jede zweite Zyklone, die bereits zur Genese mit einer ausgewachsenen Bodenfront in Verbindung steht, durchläuft also ihren Lebenszyklus bis zur Zy-

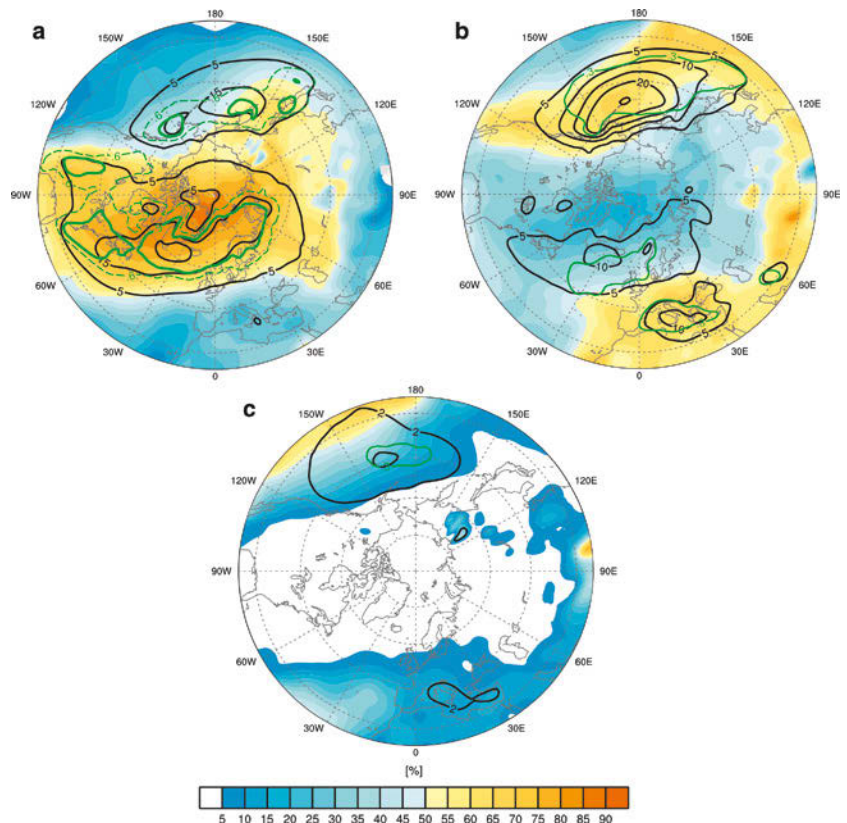


Abb. 4-7: Relativer Anteil (farbig; %) der verschiedenen Zyklonenkategorien an der klimatologischen Zyklonenverteilung im Winter mit einer auf potentieller Temperatur beruhenden Frontdefinition. Zusätzlich gezeigt sind die Zyklonengeshäufigkeit (grün; %) und Zyklonenhäufigkeiten für jede der drei Kategorien (schwarz; %).

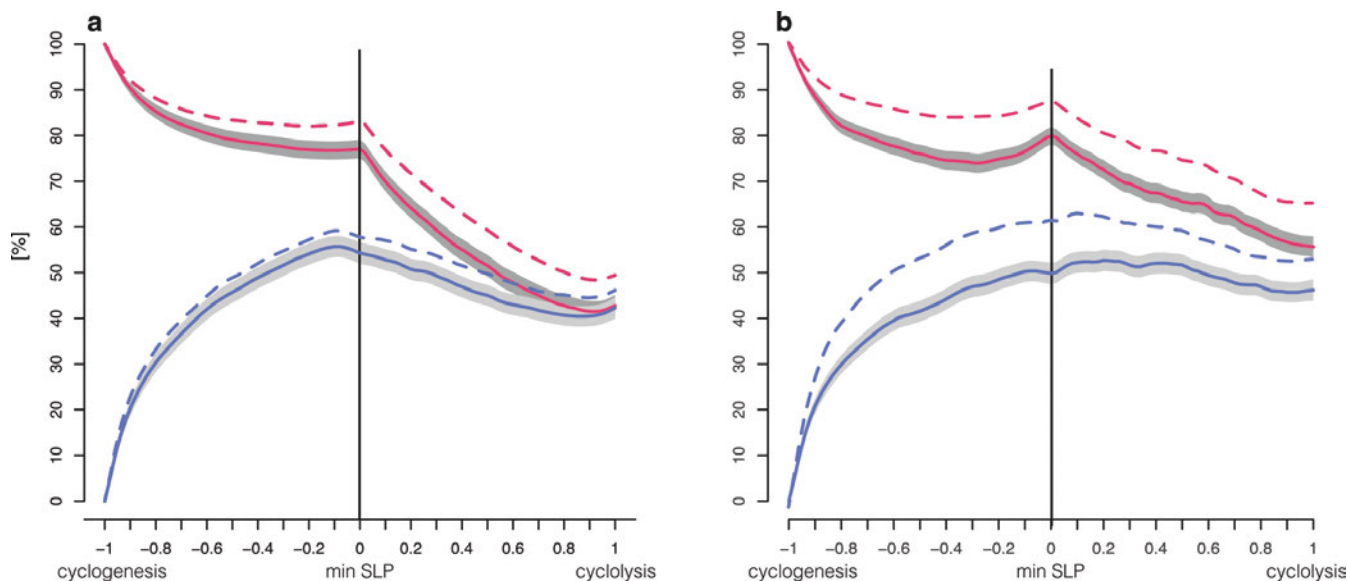


Abb. 4-8: Relativer Anteil der Zyklonen mit Fronten im Verlauf des Lebenszyklus für Zyklonen mit Front während der Zyklonogenese (rot) und ohne Front während der Zyklonogenese (blau) bei einer auf (a) äquivalent-potentieller und (b) potentieller Temperatur basierenden Frontdefinition. Die graue Schattierung entspricht dem Unsicherheitsbereich. Gestrichelte Linien entsprechen einer Frontdefinition mit reduziertem Temperaturgradienten. Der Verlauf des Lebenszyklus von Zyklonogenese bis Zyklolyse ist relativ zum tiefsten Kerndruck dargestellt (min SLP: *minimum sea-level pressure*). Für Details dieser Normalisierung siehe SCHEMM et al. 2018.

klolyse gemeinsam mit der Front und hinterlässt diese, oder eine neue Front, als mögliche Quellregion für neue Genese. Von allen Zyklonen, die noch nicht während der Genese mit einer ausgewachsenen Bodenfront in Verbindung gebracht werden können, entwickelt sich bis zur Phase der maximalen Intensivierung bei etwa 60 % aller Zyklonen eine Bodenfront. Der relative Anteil nimmt nach der Wachstumsphase ab, jedoch hinterlassen wiederum auch in etwa 50 % dieser Zyklonen eine ausgewachsene Front nach der Zyklolyse.

Dieses Resultat demonstriert unter anderem die Selbsterhaltung der Sturmzugbahnen (*Stormtracks*). Bei beiden Kategorien von Zyklonen bleibt in jedem zweiten Fall eine Front zurück, welche dann als Ausgangspunkt für Genese der Kategorie 1 dienen kann. Darüber hinaus zeigt das Resultat, dass die Mehrheit der Zyklonen, deren Lebenszyklus nicht mit einer Front startet, zum Zeitpunkt der maximalen Intensität eine Front entwickelt haben und dass beide Typen von Lebenszyklen in etwa gleichwertig existieren: Zyklonen mit und ohne ausgewachsene Bodenfront am Beginn ihres Lebenszyklus treten beide auf, wobei es jedoch regional deutliche Unterschiede in der Häufigkeit gibt (Abbildung 4-8).

5 Quo vadis Bodenfronten?

Die automatisierte Erkennung von Fronten hat sich als ein für die Wissenschaft hilfreiches Handwerkzeug erwiesen, insbesondere seit der Verfügbarkeit von räumlich und zeitlich gegitterten Datensätzen. Sei es bei der Erforschung der Frontogenese und Zyklonogenese, der Bildung von Niederschlag und Hagel, oder für die Quantifizierung von Trends und Variabilität meteorologischer

Beobachtungen: Bei all diesen Themen werden Fronten auch in Zukunft ein wichtiger Bestandteil der Forschung im Bereich der dynamischen Meteorologie spielen. Jedoch erfordert das Design und die Implementierung von automatisierten Erkennungsmethoden in hochaufgelösten Datensätzen ganz neue Ansätze, welche in Zukunft voraussichtlich immer weiter von der klassischen Frontlinie auf einer Bodenanalysekarte abweichen werden. Dies zum einen wegen der fehlenden Anerkennung einer universellen Frontdefinition; zum anderen wegen der Schwierigkeit, Frontlinien in hochaufgelösten Datensätzen zu identifizieren. Zudem finden Methoden immer größere Verbreitung, die Fronten als zweidimensionale Flächen oder sogar als dreidimensionale Volumen identifizieren. Die Weiterentwicklung solcher Ansätze erscheint erstrebenswert; ebenso wie Ansätze, die Luftmassengrenzen aus der Lagrange'schen Perspektive zu betrachten. Ein gewisser Freiheitsgrad wird dabei natürlich stets erhalten bleiben und die exakte Vorgehensweise muss folglich immer der wissenschaftlichen Fragestellung angepasst werden. Einige solche Fragen, die sich stellen, sind:

- Welche Rolle spielen Fronten in der Kommunikation der Wettervorhersage in Zeiten von trivialisierten Wettersymbolen, wie sie in zahlreichen Printmedien und Apps verwendet werden?
- Wie sehen Fronterkennungsmethoden für Forschungszwecke in Zukunft aus und lohnt sich ein mutiger Sprung weg von der klassischen Frontlinie auf einer Bodenwetterkarte?
- Wird sich die Fronterkennung in Theorie und Praxis in Zukunft deutlicher unterscheiden oder ist eine vereinheitlichende Frontdefinition realisierbar und überhaupt wünschenswert?

Literatur

- BERGERON, T., SWOBODA, G., 1924: Wellen und Wirbel an einer quasi-stationären Grenzfläche über Europa. *Veröffentlichungen des Geophysikalischen Instituts Leipzig, 2. Ser., Vol. 3*, 63-172.
- BISHOP, C.H., THORPE, A.J., 1994a: Frontal wave stability during moist deformation frontogenesis. Part I: Linear wave dynamics. *J. Atmos. Sci.* **51**, 852-873.
- BISHOP, C.H., THORPE, A.J., 1994b: Frontal wave stability during moist deformation frontogenesis. Part II: The suppression of nonlinear wave development. *J. Atmos. Sci.* **51**, 874-888.
- BJERKNES, J., 1919: On the structure of moving cyclones. *Geofys. Publ.* **1**, 1-8.
- BJERKNES, J., SOLBERG, H., 1922: Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geofys. Publ.* **3**, 3-18.
- BJERKNES, J., PALMÉN, E., 1937: Investigations of selected European cyclones by means of serial ascents. *Geofys. Publ.* **12**, 5-62.
- CHARNEY, J.G., 1947: The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J. Meteor.* **4**, 135-162.
- EADY, E.T., 1949: Long waves and cyclone waves. *Tellus* **1**, 33-52.
- HADLOCK, R., KREITZBERG, C.W., 1988: The Experiment on Rapidly Intensifying Cyclones over the Atlantic (ERICA) Field Study: Objectives and Plans. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **69**, 1309-1320.
- HOBBS, P.V., LOCATELLI, J.D., MARTIN, J.E., 1996: A new conceptual model for cyclones generated in the lee of the Rocky Mountains. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **77**, 1169-1178.
- JOLY, A., THORPE, A.J., 1990: Frontal instability generated by tropospheric potential vorticity anomalies. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **116**, 525-560.
- KASAHARA, A., RAO, D.B., 1972: Instability of frontal motions in the atmosphere. *J. Atmos. Sci.* **29**, 1090-1108.
- KOTSCHIN, N., 1932: Über die Stabilität von Margules'schen Diskontinuitätsflächen. *Beitr. Phys. Atmos.* **18**, 129-164.
- LACKMANN, G., KEYSER, D., BOSCHART, L.F., 1997: A characteristic life cycle of upper-tropospheric cyclogenetic precursors during the Experiment on Rapidly Intensifying Cyclones over the Atlantic (ERICA). *Mon. Wea. Rev.* **125**, 2729-2758.
- MUDRICK, S.E., 1974: A numerical study of frontogenesis. *J. Atmos. Sci.* **31**, 869-892.
- ORLANSKI, I., 1968: Instability of frontal waves. *J. Atmos. Sci.* **25**, 178-200.
- PARKER, D.J., 1998: Secondary frontal waves in the North Atlantic region: A dynamical perspective of current ideas. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **124**, 829-856.
- PATOUX, J., HAKIM, G.J., BROWN, R.A., 2005: Diagnosis of frontal instabilities over the Southern Ocean. *Mon. Wea. Rev.* **133**, 863-875.
- PETTERSSSEN, S., 1936: Contribution to the theory of frontogenesis. *Geofys. Publ.* **11**, 1-27.
- PETTERSSSEN, S., 1955: A general survey of factors influencing development at sea level. *J. Meteor.* **12**, 36-42.
- PETTERSSSEN, S., BRADBURY, D.L., PEDERSEN, K., 1962: The Norwegian cyclone models in relation to heat and cold sources. *Geofys. Publ.* **24**, 243-280.
- RENARD, R., CLARKE, L., 1965: Experiments in numerical objective frontal analysis. *Mon. Wea. Rev.* **93**, 547-556.
- RENFREW, I.A., THORPE, A.J., BISHOP, C.H., 1997: The role of the environmental flow in the development of secondary frontal cyclones. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **123**, 1653-1675.
- SANDERS, F., DOSWELL III, C.A., 1995: A case for detailed surface analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **76**, 505-521.
- SCHAER, C., DAVIES, H.C., 1990: An instability of mature cold fronts. *J. Atmos. Sci.* **47**, 929-950.
- SCHEMM, S., WERNLI, H., PAPRITZ, L., 2013: Warm conveyor belts in idealized moist baroclinic wave simulations. *J. Atmos. Sci.* **70**, 627-652.
- SCHEMM, S., SPRENGER, M., 2015: Frontal-wave cyclogenesis in the North Atlantic – A climatological characterisation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **141**, 2989-3005.
- SCHEMM, S., SPRENGER, M., WERNLI, H., 2018: When during Their Life Cycle Are Extratropical Cyclones Attended by Fronts? *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **99**, 149-165.
- SHAPIRO, M., KEYSER, D., 1990: Fronts, jet streams, and the tropopause. Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume, C. Newton and E.O. Holopainen, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, 167-191.
- SIMMONDS, I., KEAY, K., BYE, J.A.T., 2012: Identification and climatology of Southern Hemisphere mobile fronts in a modern reanalysis. *J. Climate* **25**, 1945-1962.
- SINTON, D.M., MECHOSO, C.R., 1984: Nonlinear evolution of frontal waves. *J. Atmos. Sci.* **41**, 3501-3517.
- SINTON, D.M., HEISE, W.D., 1993: Frontal instability in a sheared basic state. *J. Atmos. Sci.* **50**, 1691-1707.
- SOLBERG, H., 1928: Integrationen der atmosphärischen Störungsgleichungen. *Geofys. Publ.* **5**, 1-120.
- THOMAS, B.C., MARTIN, J.E., 2007: A synoptic climatology and composite analysis of the Alberta clipper. *Wea. Forecasting* **22**, 315-333.
- THORNCROFT, C.D., HOSKINS, B.J., 1990: Frontal cyclogenesis. *J. Atmos. Sci.* **47**, 2317-2336.
- THORNCROFT, C.D., HOSKINS, B.J., MCINTYRE, M.E., 1993: Two paradigms of baroclinic-wave life cycle behaviour. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **119**, 17-55.
- UCCELLINI, L.W., CORFIDI, S.F., JUNKER, N.W., KOCIN, P.J., OLSON, D.A., 1992: Report on the surface analysis workshop held at the National Meteorological Center 25-28 March 1991. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **73**, 459-471.
- WELKER, C., BIELI, M., PIAGET, N., SPRENGER, M., 2014: The D-Day landing of June 1944: extratropical cyclones and surface winds in June 1944 compared with a climatology based on the Twentieth Century Reanalysis. *Weather* **69**, 176-180.

WERNLI, H., SHAPIRO, M.A., SCHMIDLI, J., 1999:
Upstream development in idealized baroclinic wave ex-
periments. *Tellus* **51A**, 574-587.

Autoren

PROF. DR. SEBASTIAN SCHEMM
ETH Zürich
Institut für Atmosphäre und Klima
Universitätstrasse 16
8092 Zürich
Schweiz
sebastian.schemm@env.ethz.ch

DR. MICHAEL SPRENGER
ETH Zürich
Institut für Atmosphäre und Klima
Universitätstrasse 16
8092 Zürich
Schweiz
michael.sprenger@env.ethz.ch

H. C. DAVIES

5 Zyklonen als Dauerbrenner in der Geschichte der Meteorologie

Cyclones as a perennial theme in the history of meteorology

Zusammenfassung

In den letzten 150 Jahren hat sich unser Wissen und Verständnis von außertropischen Zyklonen rasant weiterentwickelt. Dieser Beitrag fasst die wichtigsten Errungenschaften in dieser langen Geschichte zusammen. In einer ersten Phase bis circa 1920 haben bahnbrechende Studien die Gesamtstruktur von Zyklonen untersucht und lieferten neuartige, aber dichotome Ideen zu ihrer Entstehung. In der daran anschließenden Phase, etwa von 1920 bis 1975, wurden grundlegende, dynamische Prinzipien gezielt auf synoptische Strömungen angewendet und dies führte zu einem Quantensprung in unserem Verständnis der Zyklogenese. In der dritten Phase nach 1975 boten schließlich zwei neuartige Entwicklungen attraktive und revolutionäre Perspektiven für die Evolution von synoptischen Strömungen.

Summary

Over the last 150 years, our knowledge and understanding of extratropical cyclones evolved rapidly. Here, a brief account is provided of key achievements in this long history. In a first phase prior to 1920, pioneering studies established the overall structure of cyclones and provided novel but contrasting ideas for their formation. In a second phase, approximately from 1920 to 1975, the tailored application of fundamental dynamical principles to synoptic-scale flows resulted in a quantum leap in our understanding. In the post-1975 phase, two novel developments provided attractive and revolutionary perspectives to view the evolution of synoptic-scale flow.

1 Einleitung

Außertropische Zyklonen und Fronten sind Hauptmerkmale der täglichen Wetterentwicklung in den mittleren Breiten. Es ist daher nicht verwunderlich, dass ihr Studium in den letzten 150 Jahren ein zentrales Thema der Meteorologie war. Zahlreiche Studien stützten sich hierbei auf folgende Grundlagen: den Aufbau von Beobachtungsnetzen, die Durchführung von Feldprogrammen und Fallstudienanalysen, die Entwicklung numerischer Modelle und die Formulierung verfeinerter Hypothesen und Theorien. Die damit verbundenen bemerkenswerten Fortschritte in unserem Wissen und Verständnis der Struktur und Entstehung dieser faszinierenden Systeme waren Gegenstand mehrerer Übersichtsartikel (LUDLAM 1967, BERGERON 1959, REED 1990, DAVIES 1997, THORPE 2002).

Der Fokus dieses Beitrags liegt ausschließlich auf wissenschaftlichen Errungenschaften, die zu erheblichen Verständnisfortschritten geführt haben. Zu diesem Zweck wird die Entwicklung in drei Abschnitte, beziehungsweise Zeiträume unterteilt. Abschnitt 2 befasst sich mit den bahnbrechenden Studien, die im Zeitraum bis circa 1920 einen ersten Einblick in den Charakter außertropischer Zyklone lieferten. Abschnitt 3 fasst für die Zeit zwischen 1920 und 1975 die Fortschritte zusammen, die eine fundierte physikalische und dynamische Grundlage für das weitere Studium und das Verständnis der Systeme bildeten. Anschließend werden in Abschnitt 4 zwei weitere Entwicklungen kurz erläutert, die einen deutlich anderen Rahmen für die Analyse synoptischer Strömungen bieten und so eine neue und revolutionäre Perspektive der außertropischen Zyklogenese bilden.

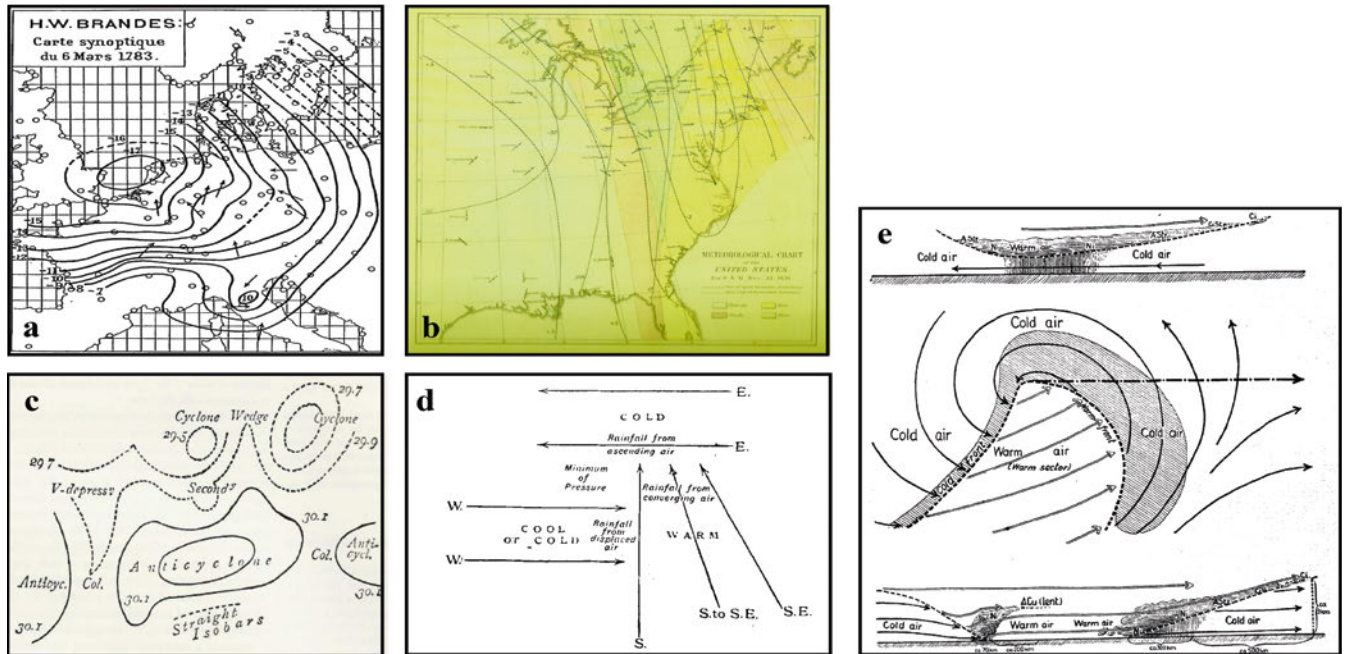


Abb. 5-1: Frühe Darstellungen der Oberflächenmerkmale von Zyklonen: (a) Druckmuster aus den Daten von BRANDES für den 6. März 1783; (b) Druck (gestrichelt), Temperatur (gepunktet), Wind (Pfeile) und Wetter (Farbschattierung) für den 8. Dezember 1836 von LOOMIS; (c) Schlüsselmuster (ABERCROMBY); (d) Schema des „Zyklonen-Front-Systems“ (SHAW und LEMPFERT); (e) die klassische Darstellung des konzeptionellen Modells einer Zyklone nach der Norwegischen Schule (BJERKNES und SOLBERG).

2 Wegweisende Studien

2.1 Identifizierung von Fronten und Zyklonen

Den Pionieren der Zyklonenforschung im frühen 19. Jahrhundert stellten sich zwei Herausforderungen: a) der Mangel an verfügbaren Daten auf synoptischer Skala, der begründet war im vergänglichen Charakter, der komplexen und sich entwickelnden räumlichen Struktur von Zyklonen sowie deren großer Variabilität von Ereignis zu Ereignis und b) das Fehlen einer befriedigenden theoretischen Grundlage.

Eine notwendige Voraussetzung war deshalb die Entwicklung der synoptischen Analyse. Das Konzept einer synoptischen Oberflächenkarte wurde von BRANDES (1819) vorgeschlagen. Die spätere Konstruktion einer solchen Karte auf der Grundlage seiner Daten (HILDEBRANDSSON und DE BORT 1907) zeigte ein Tiefdrucksystem über Westeuropa und den Hauch einer Lee-Zyklone im Alpenraum (Abbildung 5-1a). Dieser „synoptische“ Ansatz wurde von LOOMIS (1860) ausgearbeitet und weiter genutzt. Seine zahlreichen Fallstudien für Nordamerika zeigten die allgemeine räumliche Struktur und Bewegung von außertropischen Zyklonen sowie die Existenz frontaler Merkmale (Abbildung 5-1b).

Mit der Entwicklung von Beobachtungsnetzen wurden synoptische Oberflächenkarten Mitte und Ende des 19. Jahrhunderts zu einem weit verbreiteten Analysewerkzeug. Eine aufschlussreiche Synthese solcher Diagramme lieferte ABERCROMBY (1887). Er kategorisierte die am

häufigsten auftretenden Muster in Zyklonen, Antizyklonen, sekundäre Vertiefungen, V-förmige Vertiefungen und Spalten (Abbildung 5-1c) und illustrierte das räumliche Muster der Wetterelemente, die normalerweise mit jeder Kategorie einhergehen würden. Es ist bemerkenswert, dass heutzutage noch immer eine scharfe V-förmige Vertiefung als frontales Merkmal einer Zyklone identifiziert wird. Diese Assoziation wurde von SHAW und LEMPFERT (1906) hervorgehoben. Sie zeigten, dass Kalt- und Warmfrontmerkmale typischerweise vorhanden sind und integrale Bestandteile einer Oberflächenzyklone bilden (Abbildung 5-1d; siehe Beitrag 4).

Dieses „Zyklone-Front-System“ und das damit verbundene Konzept einer langgestreckten Grenzfläche zwischen Luftmassen unterschiedlicher Temperatur wurden zu den beiden zentralen Merkmalen der Darstellung der synoptischen Strömung in der Norwegischen Schule (BJERKNES und SOLBERG 1922; Abbildung 5-1e). Ihre anspruchsvolle Darstellung zeigte, dass sich die Grenzfläche in abwechselnde Kalt- und Warmfrontsegmente verformte, begleitet von Konvergenzbändern auf niedrigerer Höhe und mit entsprechenden Wolkenmustern. Diese brillante Interpretation der vorhandenen Oberflächenbeobachtungen wurde schnell als Standarddarstellung von außertropischen Zyklonen akzeptiert.

Neben der Fokussierung auf die Merkmale einer einzelnen Zyklone wurden ab Anfang der 1880er Jahre tägliche synoptische Karten erstellt, die beispielsweise Nordamerika oder den nordatlantischen und europäischen Sektor abdeckten. Diese Karten dienten dazu, die gleichzeitige Existenz eines Zugs von Zyklonen und Antizyklonen zu

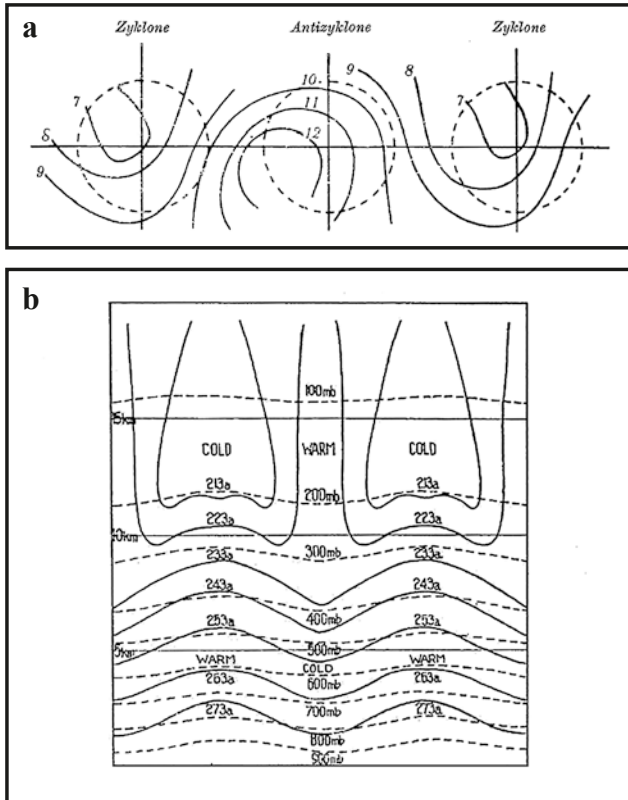


Abb. 5-2: Frühe Darstellung der vertikalen Struktur von Zyklonen und Antizyklonen: (a) zeigt das horizontale Muster der Tropopausenhöhe in km (durchgezogene Linien) relativ zur Position des Systems an der Oberfläche (gestrichelte Linien); (b) ist ein Querschnitt entlang eines Breitenkreises der Temperatur- und Druckverteilung. Quelle: (a) aus EXNER (1925), (b) aus LEMPFFERT (1920).

zeigen, die Existenz von wiederkehrenden großräumigen Strömungsmustern zu belegen (ABERCROMBY 1887) und die klimatologisch bevorzugten Zyklonen-Zugbahnen zu bestimmen. So erreichten die Oberflächenkarten bis 1920 eine bemerkenswerte Ähnlichkeit mit denen der Gegenwart.

Im Gegensatz dazu war die Strukturbestimmung von Zyklonen in der freien Atmosphäre durch den anhaltenden Mangel an Beobachtungsdaten stark eingeschränkt. Ab den späten 1890er Jahren wurden Daten von Ballonsondierungen verfügbar, welche die Höhe der Tropopause erreichen konnten. Statistische Analysen der Druck- und Temperaturschwankungen in verschiedenen Höhenlagen (DINES 1912) zeigten: a) die Standardabweichung der Druckschwankungen weist keine merkliche Abnahme mit der Höhe auf; b) reife Zyklonen besitzen einen kalten Kern in der Troposphäre und einen warmen Kern in der unteren Stratosphäre; und c) Variationen des Oberflächendrucks korrelieren signifikant mit den Variationen an der darüber liegenden Tropopause. Diese Ergebnisse implizierten (DINES 1912, LEMPFFERT 1920, EXNER 1925; siehe Abbildung 5-2), dass Zyklonen Systeme sind, die eine tiefe Tropopause überspannen. Hierbei ergab sich, dass die Druckschwankungen in der oberen Umgebung erheblich zum Oberflächendruck einer Zyklone

beitragen – was der damals vorherrschenden Ansicht von Zyklonen widersprach.

2.2 Frühe Überlegungen zur Zyklonogenese

Bis 1920 hatten sich zwei Haupthypothesen für die Zyklonogenese herauskristallisiert. Eine Hypothese bezog sich auf die oben erwähnte Grenzfläche zweier Gegenströme (MARGULES 1906; Abbildung 5-3a). Die Zyklonogenese wurde entweder auf das Wachstum instabiler Störungen an der Grenzfläche (FITZROY 1839 und 1863, HELMHOLTZ 1888, BJERKNES und SOLBERG 1922) oder auf die erzwungene Störung der Grenzfläche durch einen Kaltluftausbruch (EXNER 1920) zurückgeführt. Veranschaulichende schematische Darstellungen dieser verschiedenen Vorschläge sind in den Abbildungen 5-3b, 5-3c und 5-3d wiedergegeben. Insbesondere die Norwegische Schule verband diesen Prozess mit der Darstellung des kombinierten Zyklone-Front-Systems und konzipierte eine zirkumpolare Grenzfläche, an der sich Wellen zu einem Zug von Zyklonen entwickeln.

Die zweite Hypothese verband die Zyklonogenese mit Prozessen in höheren Schichten. Diese Hypothese basierte auf der beobachteten Verbindung in der Druckverteilung (Abbildung 5-2a) zwischen der oberen Schicht und der Oberfläche (EXNER 1925), und auf der vertikalen Wärmestruktur einer ausgereiften Zyklone (Abbildung 5-2b), die durch die Divergenz in der Nähe der Tropopause erklärt werden konnte (DINES 1912).

Tatsächlich waren dies zwei stark gegensätzliche Hypothesen für die Zyklonogenese. Zum damaligen Zeitpunkt konnte aufgrund fehlender Beobachtungsdaten und theoretischer Einschränkungen keine dieser Hypothesen außer Acht gelassen werden. Sie boten Anlass und Leitmotiv für die nachfolgenden Studien (siehe Abschnitt 3).

Es ist jedoch auch bemerkenswert, dass die Bedeutung einiger früher (vor 1920) und wichtiger Studien von Margules erst viel später vollständig erkannt wurde. So leitete Margules die Formel für die Grenzfläche zwischen zwei inkompressiblen Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte her (Abbildung 5-3a; MARGULES 1906), überlegte, in welcher Form Störungen einer solchen Schnittstelle auftreten würden und identifizierte die Zyklonogenese als die meteorologische „große Herausforderung“. Darüber hinaus sind weitere von Margules' Beiträgen in einer Reihe früherer Studien bemerkenswert: a) Er leitete eine Gleichung für die Oberflächendruckneigung in Bezug auf die horizontale Fließdivergenz her und zeigte, dass letztere eine Komponente zweiter Ordnung der Strömung ist; b) er schlussfolgerte, dass die wichtigste Energiequelle für die Zyklonogenese die verfügbare Energie der Wärmeverteilung ist; und c) er einen natürlichen Schwingungsmodus einer ruhenden isothermen Atmosphäre identifizierte, der Zyklonen- und Antizyklonen-ähnliche Merkmale besitzt. Jedes dieser Ergebnisse war entscheidend für die weiteren Fortschritte.

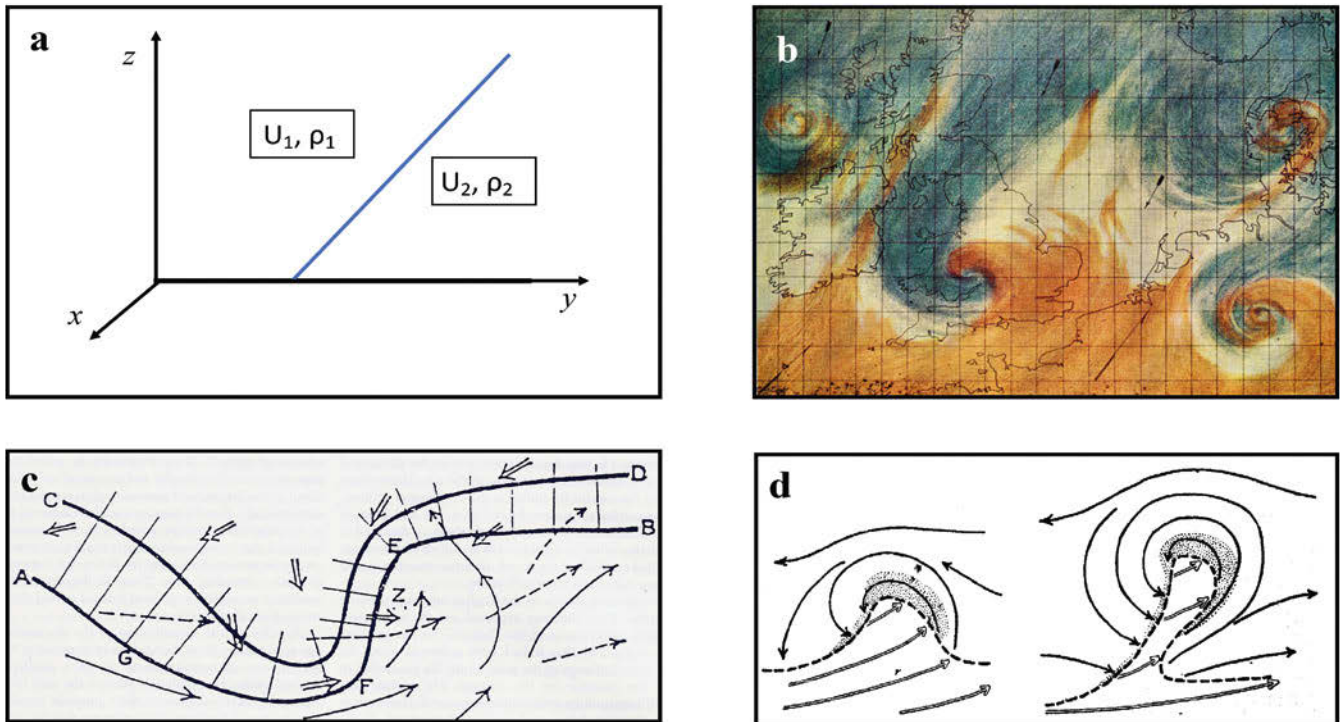


Abb. 5-3: Darstellung früherer Konzepte zur frontalen Zyklonogenese. Tafel (a) entspricht der klassischen Frontenschnittstelle von MARGULES (1906) und die nachfolgenden Tafeln zeigen schematische Darstellungen der Entwicklung von Zyklonen an einer solchen Front nach (b) FITZROY (1863), (c) EXNER (1920) und (d) BJERKNES und SOLBERG (1922).

3 Entstehung zweier Theorien über reife Zyklonogenese

Mitte des 20. Jahrhunderts erlangte die Meteorologie den Status einer ausgereiften physikalischen Disziplin mit einer großen Beobachtungsbasis und einer fundierten theoretischen Grundlage. Diese Bestandteile waren von zentraler Bedeutung für die weitere Verfolgung der oben genannten Hypothesen. Während dieses Zeitraums wurden zwei Ansätze gewählt, um die Entwicklung von synoptischen Strömungen, das heißt die zeitliche Entwicklung von Wettermustern, zu untersuchen. Der eine nutzte die verfügbaren Daten und versuchte, den Beitrag von realisierten Strömungsmustern der oberen Schichten diagnostisch abzuleiten; der andere war theoretisch orientiert und versuchte, die Dynamik des Raum-Zeit-Charakters von Störungen in stark idealisierten Strömungszuständen abzuleiten.

Im Folgenden skizzieren wir lediglich die Geschichte dieser beiden Ansätze, stellen jedoch zunächst fest, dass beide Ansätze, obwohl sie sich in ihrer Konzeption unterscheiden, auf denselben Annahmen aus der Theorie synoptischer Strömungen aufbauen. Eine Annahme führte zu dem Konzept der „Quasi-Geostrophie“ (DURST und SUTCLIFFE 1938), bei dem die horizontale Strömung in zwei Komponenten zerlegt wird: eine primäre „geostrophische“ Komponente und eine schwächere „ageostrophische“ (und divergierende) Komponente. Die zweite Annahme ergab sich aus der Erkenntnis (ROSSBY 1940), dass eine vereinfachte Version der Gleichung für die vertikale Komponente der Vorticity für synoptische Strömungen verwendet werden kann.

3.1 Durch Störungen in höheren Schichten induzierte Zyklonogenese

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts ermöglichten die verfügbaren synoptischen Karten auf Tropopausenhöhe die Diagnose der Hauptbestandteile, die zur Zyklonogenese beitragen (FICKER 1920), und die Identifizierung von charakteristischen, wiederkehrenden synoptischen Mustern, welche die Zyklonogenese begünstigen. Ein solches Muster ist das diffluent, deltaförmige Druckmuster im Austrittsbereich des Jetstreams (SCHERHAG 1934). Tatsächlich deuteten plausible physikalische Überlegungen darauf hin, dass der linke und der rechte Austrittsbereich des Jets (Abbildung 5-4a) Orte mit bevorzugten zyklonogenetischen und antizyklonogenetischen Tendenzen sind (NAMIAS und CLAPP 1949).

Der oben erwähnte diagnostische Ansatz hat diese beobachtungsbasierten Studien auf eine feste dynamische Grundlage gestellt. Es wurde eine diagnostische Gleichung hergeleitet, die es ermöglichte, die sekundäre ageostrophische Strömungskomponente aus dem Wissen über die primäre geostrophische Komponente zu bestimmen (SUTCLIFFE 1938, 1947). In der Tat bot dieser Ansatz mehrere positive Effekte: den „Vorbehalt“ von Margules zu entkräften, der die direkte Schätzung der divergierenden Strömung betrifft, Dines Hypothese zu verfeinern und zu ermöglichen, dass die Strömungsentwicklung einfach und direkt aus der Inspektion von Wetterkarten abgeleitet werden kann. Der Ansatz untermauerte auch frühere empirische Schlussfolgerungen, wie zum Beispiel die Regel zur bevorzugten Zyklonenentwicklung im rechten

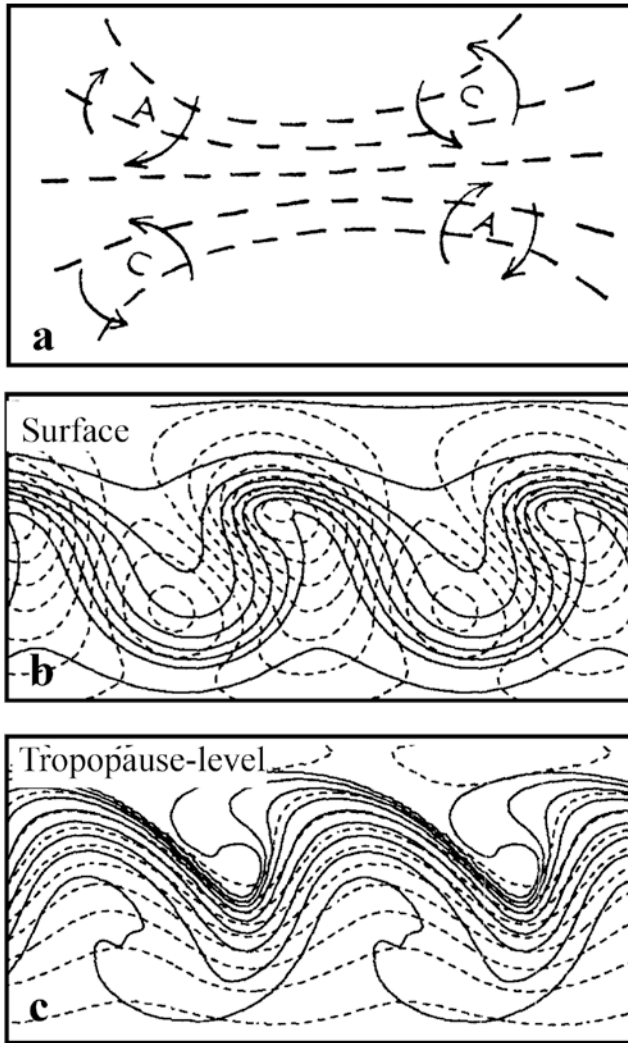


Abb. 5-4: Hauptmerkmale der diagnostischen und deduktiven Konzepte der Zyklonogenese: (a) zeigt die abgeleiteten erwarteten Positionen von zyklonogenetischen (C) und antizyklonogenetischen (A) Tendenzen relativ zu den thermischen Konturen (gestrichelte Konturen) eines Jets; (b, c) zeigen die Oberflächen- und Tropopausenmuster der Temperatur (durchgezogene Konturen) und des gestörten Drucks (gestrichelte Konturen), die sich aus der baroklinen Instabilität ergeben.

Ausgangsquadranten eines Jets (Abbildung 5-4a) oder die Identifizierung anderer synoptischer Muster (diffluente und konfluente Tröge; das thermische Steuerungsniveau), die für die weitere Strömungsentwicklung von entscheidender Bedeutung sind.

3.2 Ableitung der mit Baroklinität verbundenen Zyklonogenese

Die andere, im vorherigen Abschnitt erwähnte Hypothese zur Zyklonenentstehung bezieht sich auf die mögliche Instabilität einer frontalen Grenzfläche. Diese würde eine plausible und attraktive Theorie für die Zyklonogenese liefern. Allerdings müsste gezeigt werden, dass die instabilsten Störungen eine räumliche Struktur und eine Wachstumsrate besitzen, die der Struktur von beobachteten Zyklonzügen an langgestreckten atmosphärischen Fronten ähnelt. Bis heute konnten die zahlreichen Studien, die sich

auf Varianten der Margules-Front stützen, die Hypothese jedoch nicht schlüssig untermauern.

Stattdessen wurden wichtige Fortschritte erzielt, indem komplett andere Grundzustände betrachtet wurden, wie die einer gleichmäßigen baroklinen Scherströmung in den Außertropen. Es war möglich, die Instabilität solcher Grundzustände herzuleiten (CHARNEY 1947). Später konnte Eady zeigen, dass die instabilste Störung tatsächlich eine räumliche Skala und Wachstumsraten aufwies, die denen typischer Zyklonen und Zyklonogenesen ähnelte (EADY 1949). Darüber hinaus belegten nachfolgende numerische Simulationen, dass sich eine Zyklone mit ihren begleitenden Kalt- und Warmfronten bildet, wenn die barokline Störung auf eine große Amplitude anwächst (Abbildung 5-4b,c). Schließlich zeigte sich, dass sich eine Reihe von Zyklontypen aus unterschiedlichen, aber realistischen Grundzuständen entwickeln können. In dieser Theorie entstehen Fronten während der Zyklonogenese - und dies steht in scharfem Gegensatz zu der Vorstellung, dass Fronten die Quelle der Zyklonogenese sind (siehe Beitrag 4 in diesem Heft).

3.3 Vereinigung

Die unterschiedlichen Theorien zur Zyklonogenese und die oben diskutierten Ansätze zu ihrer Untersuchung sind im Wesentlichen komplementär. Erstens stimmen die beobachtungsbasierte diagnostische Darstellung der Zyklonogenese (Abbildungen 5-1e,f; 5-2a; 5-3d) und das theoretisch-basierte deduktive Muster einer simulierten Zyklonogenese aufgrund einer Störung in einer tiefen baroklinen Zone (Abbildung 5-4b,c) sehr gut überein. Diese Komplementarität ist auch im klassischen Zyklonogenese-Klassifikationsschema von PETERSSSEN und SMEBYE (1971) enthalten.

Zweitens sind die diagnostische Gleichung für die ageostrophische Strömung und die deduktive Gleichung für die Strömungsentwicklung vereinfachte Formen der diagnostischen ω -Gleichung für die Vertikalgeschwindigkeit und der prognostischen Gleichung für die quasigeostrophische potentielle Vorticity (PV). Zusammen bilden sie das sogenannte „quasigeostrophische Gleichungssystem“, das unser Verständnis der außertropischen Zyklonen tiefgreifend beeinflusst hat (DAVIES und WERNLI 2015). Beispielsweise wurden im quasigeostrophischen System detaillierte Fallstudien durchgeführt, allgemeine Stabilitätskriterien festgelegt, der Einfluss verschiedener Grundzustände untersucht, der Beitrag von Oberflächenflüssen und diabatischen Effekten bewertet und die Dynamik von Phänomenen wie die Entwicklung stromabwärts und schnelle Zyklonogenese untersucht.

4 Neuere Perspektiven

In der Zeit nach 1975 wurden zwei Ansichten entwickelt, die einen anderen Rahmen für die Untersuchung der syn-

optischen Strömung bildeten. Hier machen wir in prägnanter Kürze auf ihre historische Entwicklung und Bedeutung aufmerksam.

4.1 Zyklonogenese im Zusammenhang mit potentieller Vorticity

Die Perspektive basierend auf der potentiellen Vortizität bildet einen übergreifenden dynamischen Rahmen (HOSKINS et al. 1985). Zyklonen (und Zyklonogenese) werden dabei im Hinblick auf die räumliche Verteilung und zeitliche Entwicklung der PV im Inneren der Zyklonen und der potentiellen Temperatur (θ) an der Oberfläche betrachtet (siehe Beitrag 6). Diese Perspektive kombiniert mehrere frühere Entwicklungen in der Geschichte der Meteorologie, darunter das Konzept der Lagrangeschen Strömungsverfolgung auf isentropen Flächen, die materielle Erhaltung der PV bei adiabatischen Strömungen (ERTEL 1942), die gegenseitige Abhängigkeit zwischen PV und den primären meteorologischen Feldern von Druck, Temperatur und Strömung (KLEINSCHMIDT 1950) sowie die Verfeinerung der quasigeostrophischen Gleichungen zu einem allgemeineren Rahmen.

Aus dynamischer Sicht hebt die PV-Perspektive den Unterschied zwischen der stratosphärischen Luft mit hoher PV und der troposphärischen Luft mit niedriger PV hervor. Außerdem betont sie die charakteristischen Signaturen von lokalisierten PV-Anomalien in thermodynamischen und dynamischen Feldern. Auch die Wellenausbreitung auf einem Gradienten der Hintergrund-PV lässt sich in dieser Perspektive konzeptionell verstehen. Schließlich kann damit auch das barokline Wachstum einer Störung elegant verstanden werden: Es wird als das gegenseitige kooperative Wachstum einer Oberflächen- θ -Welle und einer PV-Welle auf Tropopausenhöhe betrachtet. Ebenso wird die induzierte Zyklonogenese in den oberen troposphärischen Schichten als eine lokalisierte PV-Anomalie betrachtet, die sich über einer Oberflächenfront bewegt und mit dieser wechselwirkt. Schließlich hat die PV-Perspektive dazu geführt, andere mögliche Mechanismen zu identifizieren, die zur schnellen Zyklonogenese beitragen. Als Beispiel seien hier die diabatisch induzierten Rossby-ähnlichen Wellen genannt, die sich an langgestreckten Fronten ausbilden können (siehe Beitrag 6).

4.2 Zyklonen und Deterministisches Chaos

Die zweite Perspektive betrifft das Konzept des „Deterministischen Chaos“, das von LORENZ (1963) im meteorologischen Kontext entwickelt wurde. Er stellte fest, dass kleine Fehler in der Spezifikation des Anfangszustandes mit der Zeit stark zunehmen können. In der Tat zeigen numerische Wettervorhersagen eine empfindliche Reaktion auf kleine Unterschiede im Ausgangszustand.

Im Zusammenhang mit der Zyklonogenese folgt daraus, dass kleine Anfangsfehler im Prinzip dazu führen können, dass eine zu schwache oder zu starke Entwicklung einzelner

Zyklonen vorhergesagt wird oder gar ein Ausbleiben einer signifikanten Entwicklung (siehe Beitrag 1). Daher besteht die neue Herausforderung darin, zu erkennen, ob kleine Abweichungen des ursprünglichen Strömungszustands der Atmosphäre das spätere Auftreten eines Ereignisses erheblich fördern oder hemmen. In dieser Herausforderung sind Atmosphärendynamiker nicht allein, denn Lorenz' Konzept des „deterministischen Chaos“ trifft auf eine Vielzahl von Disziplinen zu, von Physik und Astronomie bis hin zu Physiologie und Sozialwissenschaften.

5 Weitere Bemerkungen

Das Studium der außertropischen Wirbelstürme war ein Leitmotiv der Meteorologie. Es hat detaillierte Kenntnisse über die Struktur und die Entstehung dieser Tiefdruckgebiete geliefert. Dabei hat sich die Meteorologie von einer empirisch fundierten beobachtungsorientierten Disziplin zu einer theoretisch fundierten deduktionsorientierten Disziplin entwickelt. Darüber hinaus hat das Studium der Zyklonogenese zu theoretischen Entwicklungen geführt, deren Wirkung sich auf ein breites Spektrum von Disziplinen erstreckt.

Literatur

- ABERCROMBY, R., 1887: Weather: A Popular Exposition of the Nature of Weather Changes from day to day. New York: Appleton, 472 Seiten.
- BERGERON, T., 1959: Methods in scientific weather analysis and forecasting. An outline in the history of ideas and hints at a program. Erschienen in *The Atmosphere and the Sea in Motion*, B. Bolin, Ed., *The Rockefeller Institute Press*, New York, 440-474.
- BJERKNES, J., SOLBERG, H., 1922: Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geofys. Publ.* **3** (1).
- BRANDES, H.W., 1819: Einige Resultate aus der Witterungs Geschichte des Jahres 1783 und Bitte um Nachrichten aus jener Zeit. Aus einem Schreiben des Professor Brandes an Gilbert. *Annalen der Physik* **61**, 421-426.
- CHARNEY, J.G., 1947: The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J. Met.* **4**, 136-162.
- DAVIES, H.C., 1997: Emergence of the mainstream cyclogenesis theories. *Meteorol. Z.* **6**, 261-274.
- DAVIES, H.C., WERNLI, H., 2015: Quasigeostrophic Theory. In: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. 2nd Edition., Vol. 2, 393-403. Amsterdam, Elsevier.
- DINES, W.H., 1912: Total and partial correlation coefficients between sundry variables of the upper air. *Geophys. Memoirs* **2**, 31-47.
- DURST, C.S., SUTCLIFFE, R.C., 1938: The Effect of Vertical Motion on the 'Geostrophic Departure' of the Wind. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **64**, 240.
- EADY, E.T., 1949: Long waves and cyclone waves. *Tellus* **1**, 33-52.

- ERTEL, H., 1942: Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteorol. Zeit.* **59**, 277-281.
- EXNER, F.M., 1925: Anschauungen über kalte und warme Luftströmungen nahe der Erdoberfläche und ihre Rolle in den niedrigen Zyklonen. *Geogr. Annaler.* **3**, 225-236.
- EXNER, F.M., 1925: Dynamische Meteorologie. Leipzig, Teubner, 421 Seiten.
- FICKER, H. v., 1920: Der Einfluss der Alpen auf Fallgebiete des Luftdrucks und die Entwicklung von Depressionen über dem Mittelmeer. *Meteor. Z.* **37**, 350-363.
- FITZROY, R., 1839: Appendix to the Narrative of the surveying voyages of His Majesty's ships Adventure and Beagle between 1826 and 1836. London.
- FITZROY, R., 1863. The Weather Book. A Manual of Practical Meteorology. London.
- HELMHOLTZ, H., 1888: Über atmosphärische Bewegungen. I. Mitteilung. *Sitz-Ber. d. Preuss. Akad. Wiss.* **5**, 647-663.
- HILDEBRANDSSON, H.H., TEISSERENC DE BORT, L., 1907: Les bases de la météorologie dynamique. Tome II, Paris.
- HOSKINS, B.J., McINTYRE, M.E., ROBERTSON, A.W., 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **111**, 877-946.
- KLEINSCHMIDT, E., 1950: Ueber Aufbau und Entstehung von Zyklonen, 1. und 2. Teil. *Meteor. Rundschau* **3**, 1-6 und 54-61.
- LEMPFERT, R.G.K., 1920: Meteorology. Methuen, London, 186pp.
- LOOMIS, E., 1860: On certain storms in Europe and America, December 1936. *Smithsonian Contributions to Knowledge*, 46pp.
- LORENZ, E.N., 1963: Deterministic non-periodic flow. *J. Atmos. Sci.* **20**, 130-141.
- LUDLAM, F.H., 1967: The Cyclone Problem: A history of models of the cyclonic storm. Inaugural Lecture, 8 Nov. 1966, London, Imperial College.
- MARGULES, M., 1906: Zur Sturmtheorie. *Meteor. Z.* **23**, 481-497.
- NAMIAS, J., CLAPP, P.F., 1949: Confluence theory of the high tropospheric jet stream. *J. Meteor.* **6**, 330-336.
- PETTERSEN, S., SMEBYE, S.J., 1971: On the development of extratropical cyclones. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **97**, 457-482.
- REED, R.J., 1990: Advances in knowledge and understanding of extratropical cyclones during the past quarter century: An overview. In "Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume". *Amer. Meteor. Soc.*, 27-45.
- ROSSBY, C.-G., 1940: Planetary flow patterns in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **66**, 68-87.
- SHAW, W.N., LEMPFERT, R.G.K., 1906: The life history of surface air currents. A study of the surface trajectories of moving air. Meteor. Office Memoir No.174.
- SCHERHAG, R., 1934: Zur Theorie der Hoch- und Tiefdruckgebiete. *Meteor. Z.* **51**, 129-138.
- SUTCLIFFE, R.C., 1938: On development in the field of barometric pressure. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **64**, 495-509.
- SUTCLIFFE, R.C., 1947: A contribution to the problem of development. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **73**, 370-383.
- THORPE, A.J., 2002: Extratropical cyclones: An historical perspective. In *Meteorology at the Millennium*, R.P. Pearce. Ed., Royal Meteorological Society, Academic Press, London, 14-22.

Autor

PROF. DR. HUW C. DAVIES
ETH Zürich
Institut für Atmosphäre und Klima
Universitätstrasse 16
8092 Zürich
Schweiz
huw.davies@env.ethz.ch

M. BOETTCHER, H. WERNLI

6

Die PV-Struktur außertropischer Zyklonen

The PV structure of extratropical cyclones

Zusammenfassung

Dieser Artikel beschreibt die Struktur und Entwicklung außertropischer Zyklonen mit dem Konzept der potentiellen Vorticity (PV). Von zentraler Bedeutung sind dabei zyklonale PV-Anomalien in der oberen und unteren Troposphäre. Diese entstehen in der oberen Troposphäre durch Absinken stratosphärischer Luftmassen auf geneigten Isentropen und in der unteren Troposphäre durch Freisetzen latenter Wärme in Wolken. Zum Zeitpunkt maximaler Intensität sind Zyklonen oft durch einen sogenannten *PV-Tower* charakterisiert, das heißt eine vertikal kohärente Säule mit zyklonalen PV-Anomalien vom Boden bis in die untere Stratosphäre. Die Lebenszyklen der meisten Zyklonen beginnen mit einer PV-Anomalie in der oberen Troposphäre, die dann mit einer diabatisch produzierten PV-Anomalie in der unteren Troposphäre in Wechselwirkung tritt. Spezielle Zyklonen wie der Wintersturm „Lothar“ (1999) beginnen jedoch als PV-Anomalie in der unteren Troposphäre, die sehr rasch propagiert und erst später mit PV-Strukturen in der oberen Troposphäre interagiert.

Summary

This article uses the concept of potential vorticity (PV) to describe the structure and evolution of extratropical cyclones. Central elements thereby are cyclonic PV anomalies in the upper and lower troposphere. In the upper troposphere, they are created by descending stratospheric air on tilted isentropes, in the lower troposphere, they are produced by latent heating in clouds. At the time of maximum intensity, cyclones are frequently characterized by a so-called PV tower, a vertically coherent column of cyclonic PV anomalies from the surface to the lower stratosphere. Most cyclone lifecycles begin with a PV anomaly in the upper troposphere, which later interacts with a diabatically produced low-tropospheric PV anomaly. However, special cyclones like winter storm “Lothar” (1999) originate as low-tropospheric PV anomalies, which propagate rapidly and only later start interacting with PV structures in the upper troposphere.

1 Einführung in das Konzept der potentiellen Vorticity

Das Konzept der potentiellen Vorticity (PV) eignet sich sehr gut, um die Struktur und Entwicklung außertropischer Zyklonen zu beschreiben und zu verstehen. Obwohl keine direkt messbare meteorologische Größe, ist die PV spätestens seit dem umfangreichen Übersichtsartikel von HOSKINS et al. (1985) zur eigentlichen Schlüsselvariablen der dynamischen Meteorologie avanciert. Bereits KLEINSCHMIDT (1950) verwendete die besonderen Eigenschaften der PV zur Untersuchung der Dynamik von Zyklonen – seine Arbeiten wurden jedoch erst Jahrzehnte später geschätzt und gewürdigt (siehe Beitrag 5).

Die PV ist gemäß ERTEL (1942) definiert als Skalarprodukt des Vektors der absoluten Vorticity ω und des Gradienten der potentiellen Temperatur $\nabla\theta$, multipliziert mit dem Inversen der Dichte ρ :

$$PV = \frac{1}{\rho} \omega \cdot \nabla\theta \quad (1)$$

Auf synoptischen und planetaren Skalen dominiert der dritte Term des Skalarprodukts, sodass die PV näherungsweise dem Produkt der inversen Dichte mit der vertikalen Komponente der absoluten Vorticity und der statischen Stabilität ($\frac{\partial\theta}{\partial z}$) entspricht.

Daraus ergibt sich, dass die PV in der Stratosphäre deutlich höhere Werte annimmt als in der Troposphäre (höhere statische Stabilität, kleinere Dichte). Die gebräuchliche Einheit der PV ist $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$; in sehr vielen Studien wird der Wert von 2 PVU als Definition der (dynamischen) Tropopause verwendet, das heißt PV-Werte sind in der Stratosphäre größer als 2 PVU und in der Troposphäre (normalerweise, siehe unten) kleiner.

Die PV hat die folgenden drei fundamentalen Eigenschaften:

- (A) Im Falle einer adiabatischen und reibungsfreien Strömung ist die PV eine materielle Erhaltungsgröße.
- (B) Abweichungen von der klimatologischen Verteilung werden als PV-Anomalien bezeichnet; diese haben eine Fernwirkung auf die Temperaturstruktur und das Windfeld in der Umgebung der Anomalie.
- (C) PV kann durch diabatische Prozesse erzeugt und vernichtet werden.

Diese Eigenschaften werden im Folgenden erklärt, wobei für Zyklonen relevante Aspekte im Vordergrund stehen. Eigenschaft (A) besagt, dass sich die PV eines Luftpakets nicht ändert, egal wie sich das Luftpaket bewegt, solange es sich in einer reibungsfreien und adiabatischen Strömung befindet und damit nicht von Strahlung, der Freisetzung latenter Wärme in Wolken oder Turbulenz betroffen ist. Eine wichtige Folgerung dieser materiellen Erhaltungseigenschaft ist, dass stratosphärische Luft, die in mittleren Breiten adiabatisch auf den geneigten Isentropen absinkt, ihre PV beibehält und damit stratosphärisch bleibt. Dadurch wird die Tropopause deformiert, es kommt zu einer Absenkung der Tropopause und in Fällen, in denen stratosphärische Luft besonders weit absinkt, eventuell zur Bildung einer sogenannten Tropopausenfalte (engl.: *tropopause fold*).

Eigenschaft (B) folgt aus dem sogenannten Invertibilitätsprinzip der PV: Kennt man die PV in der Atmosphäre (plus geeignete Randbedingungen am Boden), so sind die Temperaturstruktur und das balancierte Windfeld (zum Beispiel der geostrophische Wind) eindeutig festgelegt. Ähnlich wie in der Elektrostatik, wo elektrische Ladungen ein elektrisches Feld induzieren, sprechen wir davon, dass eine PV-Anomalie, das heißt eine Abweichung von der klimatologischen Verteilung, ein Windfeld induziert. Positive PV-Anomalien, zum Beispiel in einem intensiven Trog oder einer Tropopausenfalte, induzieren ein zyklonales Windfeld und wie bei der elektrischen Ladung setzt sich der Effekt der PV-Anomalie auch außerhalb der Anomalie selbst fort. Starke PV-Anomalien in der oberen Troposphäre beeinflussen deshalb die Temperaturstruktur in der ganzen Troposphäre und ihr induziertes Windfeld reicht bis zum Boden. Dieser Fernwirkungseffekt von PV-Anomalien ist sehr zentral, um die Entwicklung von Zyklonen zu verstehen.

Die dritte Eigenschaft (C) ergänzt (A): in einer nichtreibungsfreien oder nichtadiabatischen Strömung bleibt die PV nicht erhalten. Anders ausgedrückt: Turbulenz, Strahlung und die Freisetzung latenter Wärme in Wolken können die PV eines Luftpakets verändern, gemäß:

$$\frac{D}{Dt} PV = \frac{1}{\rho} \boldsymbol{\omega} \cdot \nabla \dot{\theta} + \frac{1}{\rho} (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot \nabla \theta \quad (2)$$

Der erste Term auf der rechten Seite beschreibt den Effekt von diabatischen Temperaturänderungen $\dot{\theta}$, der zweite Term den Effekt der nicht-konservativen Kräfte \mathbf{F} . Wir beschränken uns hier auf den ersten Term und vereinfachen ihn, indem wir beim Skalarprodukt die ersten beiden Terme (die für Zyklonen allgemein relativ klein sind) vernachlässigen. Damit gilt näherungsweise:

$$\frac{D}{Dt} PV \approx \frac{1}{\rho} (f + \zeta) \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial z} \quad (3)$$

wobei f den Coriolisparameter und ζ die Vertikalkomponente der relativen Vorticity bezeichnen. Die absolute Vorticity, $f + \zeta$, ist in der Nordhemisphäre im Allgemeinen positiv. Diese Gleichung besagt deshalb, dass die PV in Luftpaketen, die sich im unteren Teil einer Wolke befinden (wo die Freisetzung latenter Wärme $\dot{\theta}$ mit der Höhe zunimmt) durch die Freisetzung latenter Wärme anwächst, während sie in Luftmassen oberhalb des Maximums der Freisetzung latenter Wärme abnimmt. Wichtig zu verstehen ist, dass die diabatische PV-Änderung nicht proportional zur freigesetzten latenten Wärme selbst ist, sondern zu ihrem vertikalen Gradienten. Ein Luftpaket im Zentrum einer Wolke, wo die Freisetzung latenter Wärme maximal ist, erfährt keine PV-Änderung! Als Faustregel gilt damit, dass durch die Freisetzung latenter Wärme im unteren Bereich der Wolke PV produziert und im oberen Bereich PV vernichtet wird. Dies hat für das Verständnis der Dynamik von Zyklonen zwei sehr wichtige Implikationen:

- (i) Die Wolkenbildung in Zyklonen kann in der unteren Troposphäre positive PV-Anomalien erzeugen und
- (ii) dieselbe Wolkenbildung baut die PV in der oberen Troposphäre ab und verstärkt dadurch die Rückenbildung stromabwärts von Zyklonen.

2 Die PV-Struktur intensiver Zyklonen

Zum Zeitpunkt ihres minimalen Kerndrucks sind Zyklonen oft durch einen sogenannten PV-Tower charakterisiert, also eine vertikale Säule mit anomal hoher PV vom Boden bis zur Tropopause. Die verschiedenen Schichten dieses PV-Towers induzieren alle eine zyklonale Strömung (siehe Eigenschaft B) und die Überlagerung dieser Strömungen führt zum starken zyklonalen Windfeld der Zyklone vom Boden bis zur Tropopause. Der obere Teil des PV-Towers (etwa 4-8 km Höhe) ist durch den Prozess (A) entstanden: stratosphärische Luftmassen mit hohen PV-Werten bewegen sich auf geneigten Isentropenflächen in die obere Troposphäre hinab und produzieren so eine zyklonale PV-Anomalie. Der untere Teil des PV-Towers (1-4 km Höhe) entsteht durch den Prozess (C): die Kondensation von Wasserdampf in aufsteigenden und Niederschlag produzierenden Luftmassen erzeugt eine zyklonale PV-Anomalie in der unteren Troposphäre. Die Wechselwirkung und Überlagerung der PV-Anomalien in der oberen und unteren Troposphäre, sowie einer bodennahen Warmano-

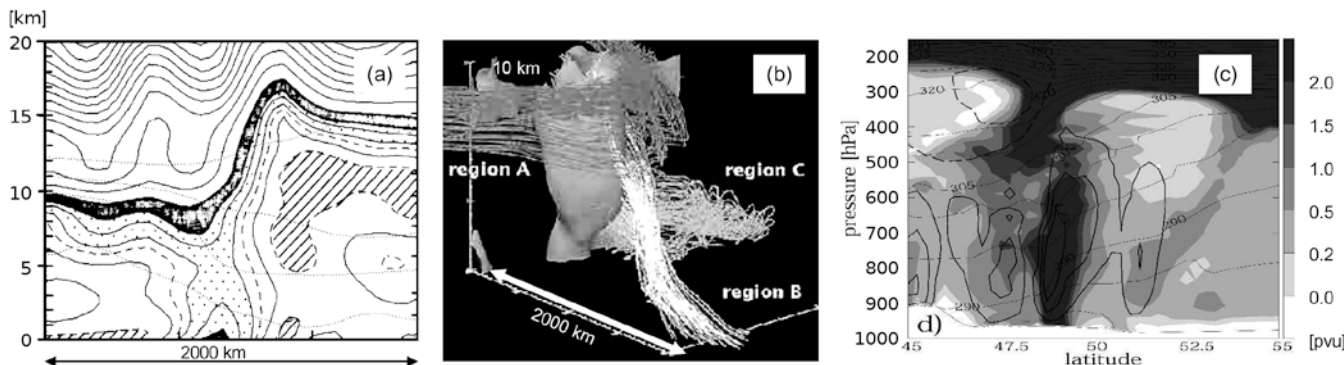


Abb. 6-1: Beispiele von PV-Towers. (a) Vertikaler Querschnitt durch den PV-Tower des *October Storm* am 16. Oktober 1987, 00 UTC (von HOSKINS und BERRISFORD 1988); Werte kleiner 0,25 PVU sind schraffiert, zwischen 1-2 PVU gepunktet und zwischen 2-3 PVU schwarz. (b) Dreidimensionale Ansicht des PV-Towers einer Islandzyklone aus Südwesten am 23. November 1992, 18 UTC (von ROSSA et al. 2000); die graue Fläche ist die 1-PVU Isofläche, zusätzlich sind Rückwärtstrajektorien aus dem PV-Tower da hinter dargestellt. (c) Vertikaler Querschnitt durch den PV-Tower des Sturms „Lothar“ am 26. Dezember 1999, 06 UTC (von WERNLI et al. 2002); Grautöne zeigen die PV-Werte (in PVU), dünn gestrichelte Linien die potentielle Temperatur (in K), dick gestrichelte Linien zeigen den Jetstream (80 m s^{-1}), sowie dicke durchgezogene Linien Regionen mit starker Freisetzung latenter Wärme.

malie, kennzeichnet die Intensivierung außertropischer Zyklonen. Besonders intensive Zyklonen haben deshalb auch einen besonders ausgeprägten PV-Tower, das heißt besonders anomal positive PV-Anomalien in der oberen und/oder unteren Troposphäre.

Abbildung 6-1 zeigt drei Beispiele von PV-Towers in ausgewählten Zyklonen, die teilweise mit extremen Sturmschäden verbunden waren. Das erste Beispiel ist der *October Storm*, eine sich explosiv entwickelnde frontale Welle (siehe Beitrag 4), die am 15./16. Oktober 1987 im Südwesten Englands zu außergewöhnlich starken Winden geführt hat (HOSKINS und BERRISFORD 1988). Abbildung 6-1a zeigt einen Querschnitt der PV von Nordwesten nach Südosten durch das Zentrum der Zyklone. Das schwarze Band markiert den Bereich der dynamischen Tropopause (2-3 PVU), die im Zyklonenzentrum auf einer Höhe von etwa 7 km liegt und südöstlich der Zyklone auf über 15 km ansteigt. Der PV-Tower ist die Säule mit PV-Werten von 1-2 PVU, die sich im Zyklonenzentrum vom Boden bis zur Tropopause erstreckt (gepunktet). Dies ist historisch eines der ersten Beispiele, welches aufzeigt, dass sehr intensive Zyklonen typischerweise mit einem PV-Tower verbunden sind.

Abbildung 6-1b zeigt eine dreidimensionale Ansicht von Südwesten auf den PV-Tower einer Zyklone bei Island (ROSSA et al. 2000). Hier ist der PV-Tower durch die 1-PVU-Isofläche definiert und erstreckt sich wiederum vertikal vom Boden bis zur Tropopause. Zusätzlich zeigen hier Rückwärtstrajektorien, ausgehend vom PV-Tower dargestellt, wie sich die Luftmassen in den vorangegangenen zwei Tagen in den PV-Tower hineinbewegt haben. Drei relative kohärente Strömungen sind erkennbar: der oberste Teil des PV-Towers (Luftmasse A, dunkelgrau) besteht aus stratosphärischer Luft, die mit dem Jetstream aus Westen kommt, die Luft im mittleren Segment (Luftmasse B, weiß) kommt aus Süden und steigt stark auf, und der unterste Teil des PV-Towers (Luftmasse C, hellgrau) strömt von Osten in die Zyklone ein und steigt dabei leicht auf. Die PV der sich adiabatisch bewegenden Luftmas-

se A bleibt erhalten, während in den Luftmassen B und C die erhöhten PV-Werte durch Aufstieg und Freisetzung latenter Wärme bei der Wolkenbildung diabatisch erzeugt werden. Die hier dargestellte Luftmasse B ist Teil eines sogenannten *Warm Conveyor Belts*, einem wichtigen Luftstrom einer Zyklone (siehe Beitrag 7).

Das dritte Beispiel (Abbildung 6-1c) betrachtet den Wintersturm „Lothar“ (WERNLI et al. 2002), einer der intensivsten Zyklonen in Zentraleuropa in den letzten Jahrzehnten. Auch „Lothar“ weist zum Zeitpunkt der maximalen Intensität einen markanten PV-Tower mit Werten deutlich größer als 2 PVU auf, der recht offensichtlich aus zwei Teilen besteht: einem stratosphärischen Teil, der bis auf 500 hPa in die Troposphäre abgesunken ist, sowie einem diabatisch produzierten Teil, der sich vom Boden bis 500 hPa erstreckt und sich dort mit der stratosphärischen PV verbindet. Im Vergleich zu den ersten beiden Beispielen ist dieser PV-Tower deutlich schmaler, im Einklang mit dem vergleichsweise kleinen Durchmesser von „Lothar“. Die resultierenden starken PV-Gradienten am Rand des PV-Towers führten zu den außerordentlich hohen Windgeschwindigkeiten.

Diese Beispiele zeigen eindrücklich das Auftreten von PV-Towers in intensiven Zyklonen. Um zu quantifizieren, ob sich die PV-Struktur in intensiven Zyklonen systematisch von der Struktur in schwächeren Zyklonen unterscheidet, haben ČAMPA und WERNLI (2012) die vertikalen PV-Profile in allen nordhemisphärischen Zyklonen in den Wintern von 1989-2009 untersucht. Der systematische Vergleich intensiver Zyklonen mit einem Kerndruck von 930-970 hPa und schwächeren Zyklonen mit einem Kerndruck von 990-1010 hPa zeigt die erwarteten Unterschiede (Abbildung 6-2): die PV in intensiven Zyklonen ist von ca. 900-250 hPa durchgehend erhöht im Vergleich zu schwächeren Zyklonen. Besonders ausgeprägt ist der Unterschied auf 300-400 hPa, was darauf hindeutet, dass bei intensiven Zyklonen stratosphärische Luft mit hoher PV in der Nähe des Zyklonenzentrums besonders tief absinkt

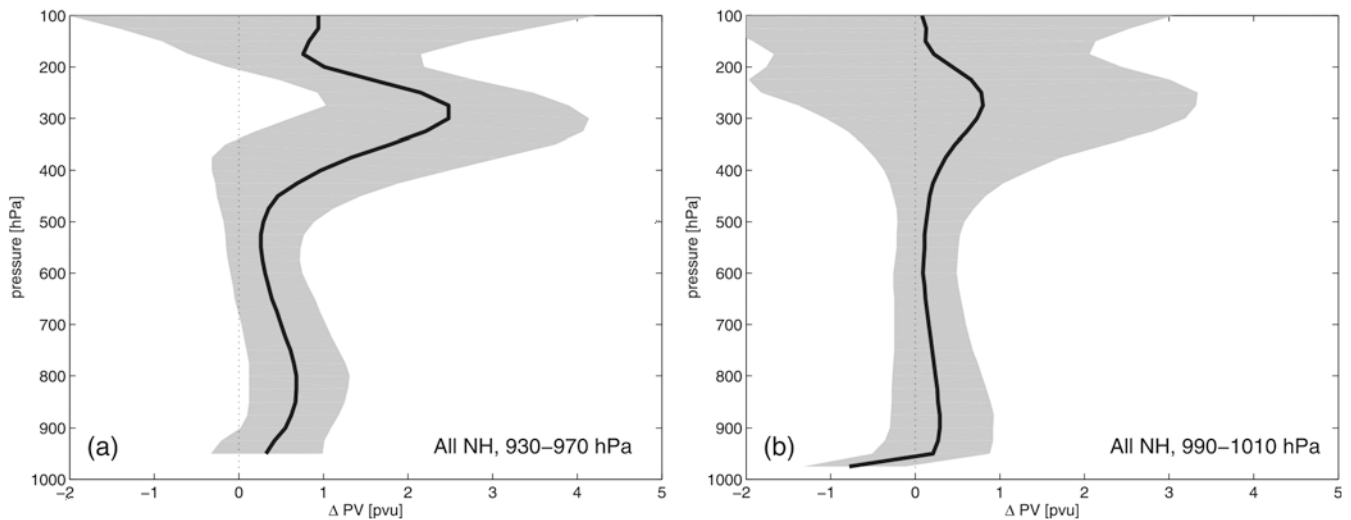


Abb. 6-2: Gemittelte vertikale Profile der PV-Anomalien von 1000-100 hPa im Zentrum von nordhemisphärischen Zyklonen in den Wintern 1989-2009, (a) für intensive Zyklonen mit einem Kerndruck von 930-970 hPa und (b) für schwächere Zyklonen mit einem Kerndruck von 990-1010 hPa. Die schwarze Linie zeigt das gemittelte Profil und in Grau wird auf jeder Höhe das Intervall zwischen den 10 %- und 90 %-Perzentilen dargestellt. Abbildung aus ČAMPA und WERNLI (2012).

(siehe auch Abbildung 6-1c). Wichtig sind jedoch auch die in den intensiven Zyklonen erhöhten PV-Werte auf 700-900 hPa, die durch stärkere diabatische Prozesse zustande kommen. Die PV-Werte in Abbildung 6-2 sind Anomalien, also Abweichungen vom klimatologischen Mittelwert. Die PV-Anomalien in intensiven Zyklonen auf 800 hPa von im Durchschnitt etwa 0,5 PVU sind so zu interpretieren, dass in diesen Zyklonen die diabatischen Prozesse zu einer Erhöhung der PV von ca. 0,5 PVU (klimatologischer Hintergrundwert) auf ca. 1 PVU beitragen und so der untere Teil eines PV-Towers entstehen kann.

3 PV-Perspektive der zeitlichen Entwicklung von Zyklonen

Wenn wir verstehen, dass eine intensive Zyklone zum Zeitpunkt ihrer maximalen Intensität einen PV-Tower aufweist, so kann die Frage „Wie entwickelt sich eine Zyklone und warum intensiviert sie sich?“ auf die folgenden Fragen reduziert werden: „Wie entstehen die PV-Anomalien im PV-Tower und wie kommt es zur vertikalen Kohärenz des PV-Towers?“ Diese Fragen wurden vor bald 30 Jahren erstmals untersucht (zum Beispiel DAVIS und EMANUEL 1991) und werden hier anhand zweier illustrativer Fallstudien erläutert.

Die Lebenszyklen der meisten Zyklonen beginnen mit einer PV-Anomalie in der oberen Troposphäre, die dann mit einer Warmanomalie am Boden sowie einer diabatisch produzierten PV-Anomalie in der unteren Troposphäre in Wechselwirkung tritt. Einzelne Zyklonen, sogenannte „diabatische Rossby-Wellen“ beginnen ihren Lebenszyklus mit einer PV-Anomalie in der unteren Troposphäre, die sehr rasch propagiert und erst später mit PV-Strukturen in der oberen Troposphäre interagiert. Nachfolgend werden für beide Szenarien illustrative Fallstudien präsentiert.

Die Entwicklung einer Zyklone, die mit einer positiven PV-Anomalie an der Tropopause startet, wird anhand eines Fallbeispiels vom April 2017 über dem Nordpazifik gezeigt. Der Höhentrog über Japan in Abbildung 6-3a ist mit einer zyklonalen Rotation des Windes verbunden. An der Trogvorderseite hat die Windrichtung eine Komponente nordwärts, was zu einem Aufsteigen auf den geneigten Isentropen (starke Baroklinität) führt. Aufgrund der Fernwirkung der PV-Anomalie setzt sich diese Hebung bis zum Boden fort. Die Folge ist der Beginn der Zyklonenentwicklung (Zyklogese) in der bodennahen baroklinen Zone und die Ausbildung von Fronten (Abbildung 6-3c). Die aufsteigenden Luftmassen im Zentrum der jungen Bodenzyklone und an den Fronten wiederum sorgen für Wolkenbildung, der Freisetzung latenter Wärme und der Entstehung von PV in der unteren Troposphäre, wie in Abbildung 6-3b zu sehen ist.

Fortan existieren positive PV-Anomalien in Bodennähe und in der Tropausenregion, die in der weiteren Entwicklung anwachsen und miteinander in Wechselwirkung treten werden. Die Spitze des Warmsektors, der Okklusionspunkt, bildet die vorher erwähnte Warmanomalie am Boden, welche das zyklonale Windfeld um die Zyklone zusätzlich verstärkt (Abbildung 6-3f).

Bereits 18 Stunden nach dem ersten dargestellten Zeitpunkt hat sich eine deutliche geschlossene Zirkulation um die Bodenzyklone eingestellt. Auch die Werte der PV in der unteren Troposphäre sind mit über 2 PVU stark angewachsen (Abbildung 6-3e), ein Zeichen der gegenseitigen Verstärkung der Anomalien. Die PV-Anomalie in der Höhe bewegt sich relativ auf die Boden-anomalie der PV im Zyklonenzentrum zu, was eine effektivere Interaktion der beiden zyklonalen Anomalien zur Folge hat (Abbildung 6-3d). Zum Abschluss der Zyklonenintensivierung, nochmals 18 Stunden später, liegen die beiden PV-Anomalien

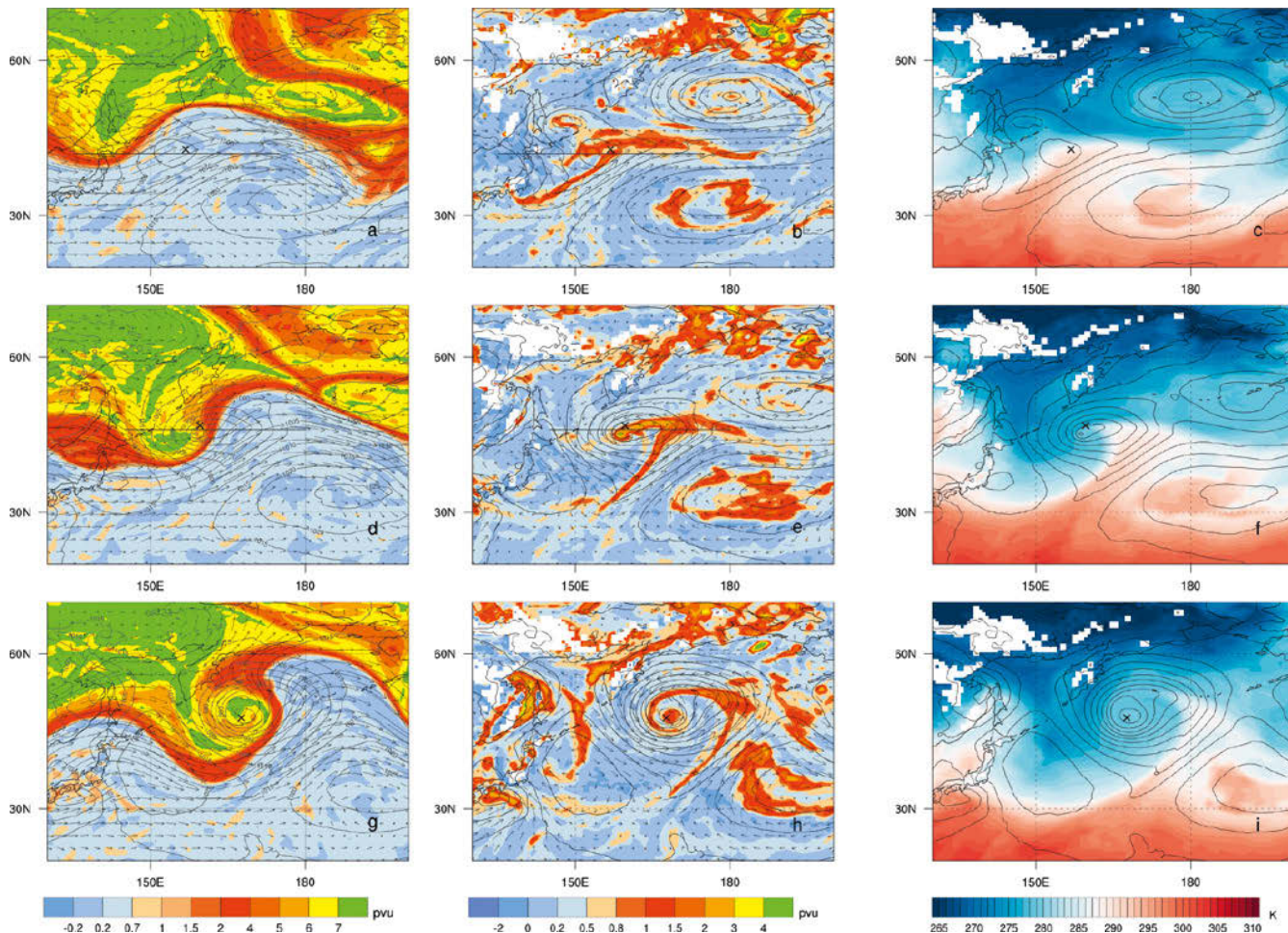


Abb. 6-3: Zeitentwicklung der PV-Struktur einer außertropischen Zyklone über dem Nordpazifik. (a,d,g) PV (farbig, in PVU), Windpfeile auf der 325 K Isentrope und Bodendruck (schwarze Linien, in hPa). (b,e,h) PV (farbig, in PVU), Windpfeile auf 900 hPa und Bodendruck (schwarze Linien, in hPa). (c,f,i) potentielle Temperatur (in K) auf 900 hPa und reduzierter Bodendruck (schwarze Linien, hPa) für (a,b,c) 09. April 2017, 12 UTC, (d,e,f) 10. April 2017, 06 UTC und (g,h,i) 11. April 2017, 00 UTC. Die schwarzen Kreuze in jedem Bild markieren jeweils das Zyklonenzentrum und die schwarzen Linien in (a,b,d,e) die Lage der Vertikalschnitte in Abbildung 6-4.

mit einer kohärenten zyklonalen Strömung vertikal übereinander (Abbildung 6-3g, f). Zu diesem Zeitpunkt erreicht die nun voll ausgebildete Zyklone einen Kerndruck von 966 hPa.

In der Vertikalansicht in Abbildung 6-4a ist der PV-Trog in der Höhe mit stratosphärischen Werten von PV > 2 PVU schon zu Beginn der Entwicklung (entsprechend dem Zeitpunkt von Abbildung 6-3a-c) bis auf 500 hPa abgesunken. Die im baroklinen Umfeld geneigten Isentropen geben die Bahnen für die adiabatische Bewegung der PV vor. Im gezeigten Fall kann die stratosphärische PV bei gegebenem Antrieb auf der 315-K Isentrope weiter nach unten gleiten. Vereinzelt Regionen erhöhter PV in der mittleren und unteren Troposphäre östlich der PV-Anomalie in der Höhe deuten auf einsetzende diabatische (also wolkenbildende) Prozesse im Zyklonenzentrum hin. Zum Ende der Intensivierungsphase, wenn der tiefste Bodendruck erreicht ist (Abbildung 6-4b), haben sich die stratosphärische und die diabatisch produzierte PV-Anomalie in Bodennähe derart verstärkt, dass sie zusammengewachsen sind und einen PV-Tower bilden. Die erhöhte Windgeschwindigkeit im

Vergleich zum Anfangsstadium ist wie bei „Lothar“ (vergleiche Abbildung 6-1c) auf die starken PV-Gradienten entlang der Isentropen zurückzuführen und es zeigt auch, dass sich die vertikale PV-Säule verstärkend auf das horizontale Windfeld auswirkt.

Eine spezielle Art der Zyklonenentwicklung weisen „diabatische Rossby-Wellen“ (DRW) auf, die mit einer bodennahen, durch Wolkenbildung diabatisch geformten PV-Anomalie starten. Die geschlossene Isobare um die PV-Anomalie, sowie ein zyklonales Windfeld, lassen die Bodenzyklone erkennen (Abbildung 6-5b). Da das Bodendruckfeld von DRWs, zumindest im frühen Stadium, meist schwach und unscheinbar ist, stellt die PV in der unteren Troposphäre eine wichtige diagnostische Größe für DRWs dar. Zunächst besteht diese untere PV-Anomalie völlig eigenständig, denn in der Höhe ist in ihrer Nähe keine PV-Anomalie, also kein markanter Trog vorhanden – dies im starken Gegensatz zum ersten Fallbeispiel. Mit anderen Worten, die Höhenströmung verläuft zonal und befindet sich deutlich nördlich der Boden-anomalie (Abbildung 6-5a). Dies ist auch im Vertikalschnitt in Abbil-

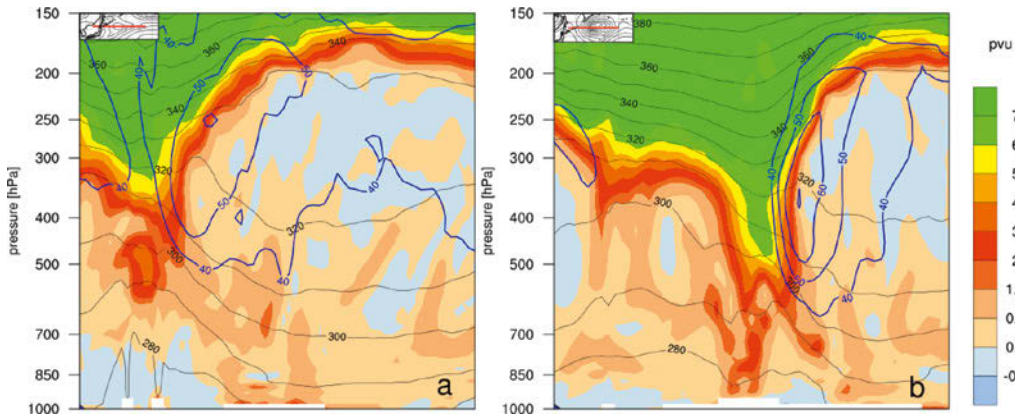


Abb. 6-4: Vertikalschnitte durch das Anfangs- und Reifestadium der in Abb. 6-3 porträtierten außertropischen Zyklone: PV (farbig, in PVU), potentielle Temperatur (schwarze Linien) und Windgeschwindigkeit (blaue Linien) für (a) 09. April 2017, 12 UTC und (b) 10. April 2017, 12 UTC. Die Positionen der Vertikalschnitte sind in Abbildungen 6-3a,b und 6-3d,e eingezeichnet.

dung 6-6a eindrücklich zu sehen: Die DRW besteht aus der isolierten bodennahen PV-Anomalie, die zu diesem Zeitpunkt unabhängig von einer PV-Anomalie an der Tropopause existiert. Unverzichtbar für die Existenz der DRW ist jedoch ein bodennaher Temperaturgradient (Abbildung 6-5c; Abschnitt 4). Diese isolierte PV-Anomalie in der unteren Troposphäre, wie auch im frühen Stadium von Sturm „Lothar“, propagiert sehr rasch mit nahezu konstantem Kerndruck entlang der baroklinen Zone. Während mehr als 24 Stunden legt sie dabei eine beachtliche Strecke zurück (z.B. Abbildung 6-3c,f,i). Die Intensivierung der Boden-

zyklone setzt erst durch die Wechselwirkung mit einer Höhenanomalie der PV ein, wie im gezeigten Fall vom Dezember 2005 mit einem von Westen herannahenden Höhentrog (Abbildung 6-5d). Wie im vorherigen Beispiel nimmt die Entwicklung mit der zunehmenden vertikalen Wechselwirkung der PV-Anomalien ihren Lauf (Abbildung 6-5g-i). Zu diesem Zeitpunkt kommen ähnlich wie beim ersten Beispiel die positiven PV-Anomalien in der oberen und unteren Troposphäre übereinander zu liegen (Abbildung 6-5g,h). Der Vertikalschnitt in Abbildung 6-6b zeigt, dass sich auch im Fallbeispiel der intensivierenden DRW ein markanter PV-Tower mit PV-Werten grösser als 0,7 PVU gebildet hat.

4 Mehr zu diabatischen Rossby-Wellen (DRWs)

Man fragt sich nun, wie die bodennahen PV-Anomalien zu Beginn der Entwicklung einer DRW ihre PV über die Dau-

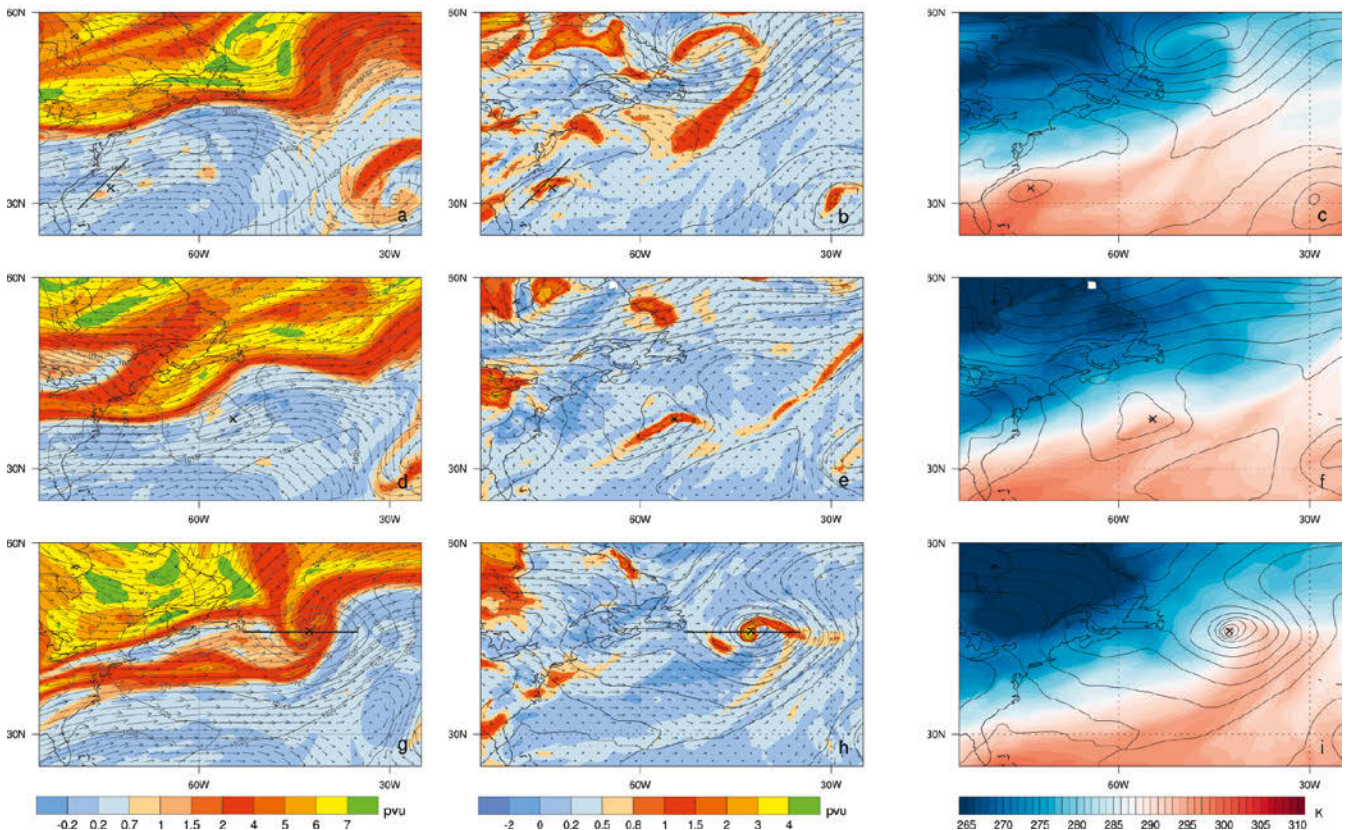


Abb. 6-5: Wie in Abb. 6-3, hier für eine außertropische Zyklone über dem Nordatlantik für (a,b,c) 18. Dezember 2005, 18 UTC, (d,e,f) 20. Dezember 2005, 00 UTC und (g,h,i) 21. Dezember 2005, 00 UTC. Die schwarzen Linien in (a,b,g,h) zeigen die Lage der Vertikalschnitte in Abbildung 6-6.

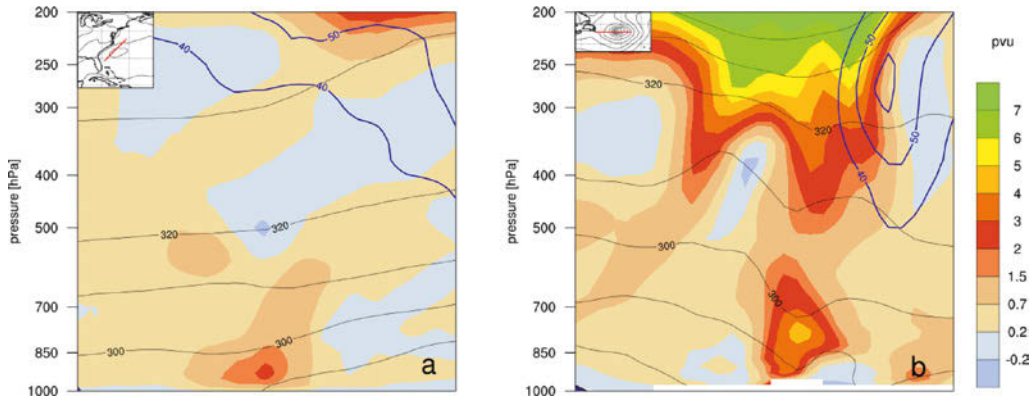


Abb. 6-6: Vertikalschnitte wie in Abb. 6-4, hier für die in Abb. 6-5 dargestellte Zyklone für (a) 18. Dezember 2005, 18 UTC und (b) 21. Dezember 2005, 00 UTC. Die Positionen der Vertikalschnitte sind in Abb. 6-5 als schwarze Linien eingezeichnet.

er aufrechterhalten können. Wie bereits vorher erwähnt, liegt diese wie jede außertropische Zyklone in einer Region mit einem starken horizontalen Temperaturgradienten (Abbildung 6-5c). Die zyklonale Strömung sorgt stromabwärts des Zyklonenzentrums (also an der Warmfront) für ein Aufsteigen der Luft entlang der Isentropen, was man sich im Vertikalschnitt in Abbildung 6-6a gut vorstellen kann. Sobald die feuchte Luft Sättigung erreicht, setzt Wolkenbildung und damit im unteren Teil der Wolke die Produktion von PV ein. Es sind zusammen die geeigneten Isentropen (Baroklinität), die zyklonale Rotation aufgrund der PV-Anomalie und die feuchte (subtropische) Luft, welche die Voraussetzungen für den DRW-Mechanismus schaffen. Sind diese Voraussetzungen gegeben, so kann der DRW-Mechanismus selbstständig und selbsterhaltend ablaufen. Insbesondere ist also der Hebungsantrieb durch einen Höhentrog nicht erforderlich. Es ist demnach keine reine Advektion, mit der sich die DRW so rasch fortbewegt, sondern die kontinuierliche Neubildung der PV in der unteren Troposphäre durch diabatische Prozesse. Materiell ist die PV der DRW nicht erhalten und dieser Typus von Zyklone wird deshalb „Welle“ genannt.¹

nicht, sondern behält eine mehr oder weniger zonale Richtung entlang der baroklinen Zone bei. Die Hauptsaison für DRWs sind die Sommermonate (Abbildung 6-7b), in denen genügend Feuchte in der ozeanischen Grenzschicht zur Verfügung steht. Im Mittel bilden sich über dem Nordatlantik 43 DRWs pro Jahr aus, aber nur etwa 13 % von ihnen intensivieren sich stark und erfüllen das Kriterium für eine „meteorologische Bombe“ (SANDERS und GYAKUM 1980). Die klimatologischen Ergebnisse zeigen, dass sich nur wenige DRWs zu starken Zyklonen entwickeln (Abbildung 6-7b) und davon trifft auch nur ein kleiner Teil mit ihrer Zugbahn auf Land (Abbildung 6-7a). Neben dem verheerenden Sturm „Lothar“ ist auch die *Great Coastal Gale* von 2007 über dem Nordpazifik eine weitere, in Nordamerika berühmte Zyklone mit dramatischen Sturmschäden, die aus einer DRW hervorgegangen ist.

Gerade weil die mesoskaligen DRWs das Potential für eine besonders rasante und starke Intensivierung mitbringen (durch die starken Feuchtprozesse und die in der unteren Troposphäre bereits gut entwickelte PV-Anomalie), sind sie für die numerische Wettervorhersage eine besondere

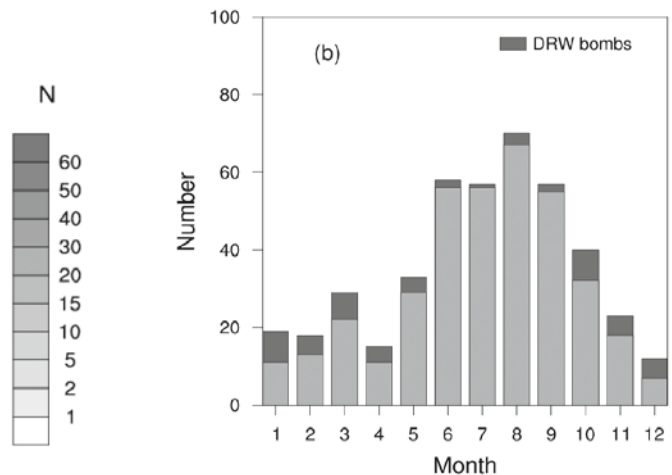
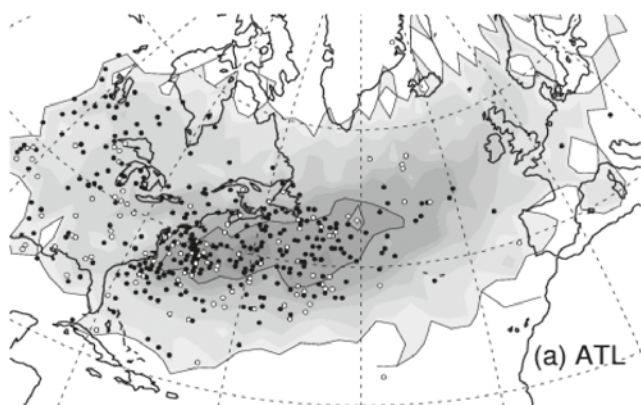


Abb. 6-7: Vorkommen von diabatischen Rossby-Wellen (DRW) im Nordatlantischen Raum in den Jahren 2001 bis 2010 aus BOETTCHER und WERNLI (2013): (a) Dichte der Zugbahnen (Grauschattierung) und Startorte (schwarze und weiße Punkte) und (b) monatliche Anzahl und die sich davon als „meteorologische Bombe“ stark intensivierenden DRWs im Nordatlantik.

¹ en.wikipedia.org/wiki/Great_Coastal_Gale_of_2007

Herausforderung. Obwohl die Propagationsphase von DRWs in Vorhersagen recht gut wiedergegeben wird, sind ihre relativ kleine Skala und die Geschwindigkeit ihrer Propagation – die von den Umgebungsbedingungen abhängt – ein Unsicherheitsfaktor für die Intensivierung. Dazu müssen die Geschwindigkeit und Struktur des heranahenden PV-Troges in der Höhe genau passen. In den von BOETTCHER und WERNLI (2011) untersuchten operativen Vorhersagen des vorgestellten Fallbeispiels konnte nur jede zweite die Intensivierung der DRW reproduzieren. Die zunehmende Gitterauflösung der Vorhersagemodelle stellt DRWs zwar im Verlauf der letzten Jahre immer besser dar, die Vorhersage ihrer Intensivierung wird aber bis auf Weiteres mit großen Unsicherheiten behaftet sein.

Literatur

- BOETTCHER, M., WERNLI, H., 2011: Life cycle study of a diabatic Rossby wave as a precursor to rapid cyclogenesis in the North Atlantic – Dynamics and forecast performance. *Mon. Wea. Rev.* **139**, 1861-1878.
- BOETTCHER, M., WERNLI, H., 2013: A 10-yr climatology of diabatic Rossby waves in the Northern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.* **141**, 1139-1154.
- ČAMPA, J., WERNLI, H., 2012: A PV perspective on the vertical structure of mature midlatitude cyclones in the Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.* **69**, 725-740.
- DAVIS, C.A., EMANUEL, K. A., 1991: Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.* **119**, 1929-1953.
- ERTEL, H., 1942: Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteorologische Zeitschrift* **59**, 271-281.
- HOSKINS, B.J., BERRISFORD, P., 1988: A potential vorticity perspective of the storm of 15-16 October 1987. *Weather* **43**, 122-129.
- HOSKINS, B.J., McINTYRE, M.E., ROBERTSON, A.W., 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **111**, 877-946.
- KLEINSCHMIDT, E., 1950: Über Aufbau und Entstehung von Zyklonen (1. Teil). *Meteorologische Rundschau* **3**, 1-6.
- ROSSA, A.M., WERNLI, H., DAVIES, H.C., 2000: Growth and decay of an extra-tropical cyclone's PV-tower. *Meteor. Atmos. Phys.* **73**, 139-156.
- SANDERS, F., GYAKUM, J.R., 1980: Synoptic-dynamic climatology of the "bomb." *Mon. Wea. Rev.* **108**, 1589-1606.
- WERNLI, H., DIRREN, S., LINIGER, M.A., ZILLIG, M., 2002: Dynamical aspects of the life cycle of the winter storm 'Lothar' (24-26 December 1999). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **128**, 405-429.

Autor/in

DR. MAXI BOETTCHER
ETH Zürich
Institut für Atmosphäre und Klima
Universitätstrasse 16
8092 Zürich
Schweiz
maxi.boettcher@env.ethz.ch

PROF. DR. HEINI WERNLI
ETH Zürich
Institut für Atmosphäre und Klima
Universitätstrasse 16
8092 Zürich
Schweiz
heini.wernli@env.ethz.ch

7

H. V. BINDER, E. MADONNA

Warm Conveyor Belts

Warm Conveyor Belts

Zusammenfassung

Außertropische Zyklonen sind oft mit kohärenten, stark aufsteigenden Luftströmungen verbunden, sogenannten *Warm Conveyor Belts* (WCBs). WCBs produzieren den größten Teil der Wolken und des Niederschlags in den Außertropen und sind hauptverantwortlich für den Energietransport in Richtung Pole. Das latente Heizen in den Wolken führt zudem zur Entstehung einer zyklonalen Anomalie der potentiellen Vorticity (PV) in der unteren Troposphäre und einer antizyklonalen PV-Anomalie in der oberen Troposphäre. Die zyklonale PV-Anomalie kann zur explosiven Intensivierung der Zyklonen beitragen, während die antizyklonale Anomalie für die Rückenbildung in der Tropopausenregion eine wichtige Rolle spielt. Unsicherheiten in der Darstellung von WCBs in numerischen Wettermodellen können auch zu Vorhersagefehlern des Wetters stromabwärts führen. Dieser Artikel beschreibt die wichtigsten Eigenschaften von WCBs und illustriert ihre Bedeutung für die Dynamik von außertropischen Zyklonen und die großskalige Strömung.

Summary

Extratropical cyclones are often associated with coherent, well-defined airstreams, so-called *Warm Conveyor Belts* (WCBs). WCBs are responsible for most of the cloud and precipitation formation and poleward energy transport in the extratropics. Furthermore, the latent heating within the clouds leads to the formation of a cyclonic potential vorticity (PV) anomaly in the lower troposphere and an anticyclonic PV anomaly at upper levels. The cyclonic low-level PV anomaly can contribute to the explosive intensification of the associated cyclone, while the anticyclonic anomaly in the tropopause region plays an important role for the amplification of upper-level ridges. Uncertainties in the representation of WCBs in numerical weather prediction models can also lead to forecast errors in the downstream weather. This article describes the most important properties of WCBs and illustrates their crucial role for the dynamics of cyclones and the large-scale flow.

1 Die Lagrangesche Betrachtungsweise von außertropischen Zyklonen

Außertropische Zyklonen sind auf Satellitenbildern gut zu erkennen, da sie eine charakteristische Wolkenverteilung aufweisen. Das Beispiel in Abbildung 7-1 zeigt einen spiralförmigen Wirbel über dem Zentrum der Zyklone bei der Labradorsee und ein ausgedehntes Wolkenband entlang der Kalt- und Warmfronten. Das Satellitenbild zeigt die Wolkenstruktur an fixen Orten zu einem bestimmten Zeitpunkt. Dies entspricht der Eulerschen Perspektive, bei welcher die zeitliche Entwicklung von atmosphärischen Größen an raumfesten Punkten untersucht wird. Im Gegensatz dazu wird bei der Lagrangeschen Perspektive die Veränderung der atmosphärischen Größen entlang des Pfades eines Luftpaketes, einer sogenannten „Trajektorie“, angeschaut. Oft erweist sich auch die Kombination dieser beiden komplementären Methoden als sehr wertvoll, um

ein vertieftes Verständnis über die Dynamik von Wettersystemen zu gewinnen (siehe beispielsweise WERNLI und DAVIES 1997).

Aus der Lagrangeschen Perspektive kann die Struktur und Entwicklung außertropischer Zyklonen durch das „Conveyor Belt Modell“ beschrieben werden (Abbildung 7-2; siehe zum Beispiel die Übersichtsartikel von BROWNING 1990 und CATTO 2016). In dieser Modellvorstellung ist die Zyklone mit drei kohärenten Luftströmungen mit unterschiedlichen Eigenschaften verbunden, welche sich relativ zum Zentrum des Systems bewegen: ein warmer und feuchter aufsteigender Luftstrom (*warm conveyor belt*), ein kalter aufsteigender Luftstrom (*cold conveyor belt*) und ein trockener absinkender Luftstrom (*dry intrusion*). Vor dem Aufkommen hochauflösender numerischer Modelle wurden die drei Luftströmungen mithilfe von isentropen Analysen im mitbewegten Bezugssystem visualisiert (GREEN et al.

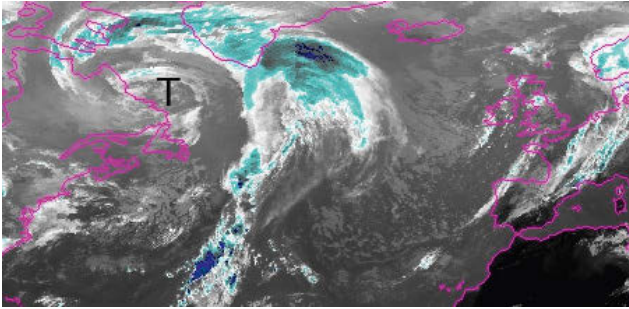


Abb. 7-1: Infrarot-Satellitenbild vom 21. September 1993, 12 UTC (GridSat-B1 Daten, KNAPP et al. 2011). Die Farben zeigen die Temperatur der abstrahlenden Oberflächen (dunkel für warme Regionen, weiß für kältere und blau für besonders kalte Regionen). Hochreichende Bewölkung ist aufgrund der tiefen Temperaturen blau dargestellt. Das Tiefdruckzentrum über der Labradorsee ist mit einem „T“ markiert.

1966). Später konnten sie durch dreidimensionale Trajektorienrechnungen und die Anwendung von objektiven Auswahlkriterien in numerischen Modellen bestätigt werden (WERNLI und DAVIES 1997).

In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf den Warm Conveyor Belt (WCB). Auf dem Satellitenbild in Abbildung 7-1 entspricht der WCB dem ausgedehnten Wolkenband, das sich vom zentralen Nordatlantik bis nach Grönland erstreckt. In der Lagrangeschen Perspektive wird häufig folgendes Kriterium verwendet, um WCBs zu identifizieren: Ein Aufstieg der Luftmassen um mehr als 600 hPa muss innerhalb von zwei Tagen in der Nähe einer Zyklone stattfinden (MADONNA et al. 2014). Abbildung 7-3a zeigt die Trajektorien des im Satellitenbild zu erkennenden WCBs, wobei die Farbskala den Druck und damit die Höhe der Luftpakete angibt. Das dazugehörige Zyklonenzentrum befindet sich über der Labradorsee und ist mit einem „T“ markiert. Zu Beginn befinden sich die Luftpakete im Warmsektor der Zyklone in der Grenzschicht (blaue Farben). Über die folgenden zwei Tage bewegen sie sich Richtung Norden und steigen dabei bis in die obere Troposphäre auf

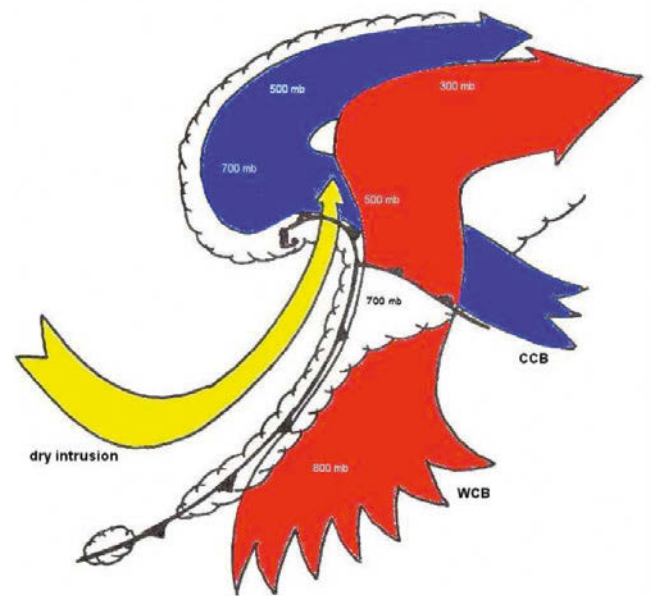


Abb. 7-2: Schematische Darstellung der drei charakteristischen Luftströmungen in einer außertropischen Zyklone: ein warmer aufsteigender Luftstrom (rot, warm conveyor belt), ein kalter aufsteigender Luftstrom (blau, cold conveyor belt) und ein trockener absteigender Luftstrom (gelb, dry intrusion). Aus CARLSON, 1980.

(gelbe bis rote Farben). Während dieses starken Aufstiegs kondensieren die feuchten Luftmassen, was zu starker Wolken- und Niederschlagsbildung führt.

WCBs sind dynamisch und physikalisch sehr wichtige Luftströme und für eine Reihe von atmosphärischen Prozessen in den Außertropen von entscheidender Bedeutung. Sie sind hauptverantwortlich für die Wolken- und Niederschlagsbildung in außertropischen Zyklonen, sowie für den polwärts gerichteten Transport von Wärme und Feuchtigkeit. Gleichzeitig können sie Schad- und Spurenstoffe über weite Distanzen transportieren und beeinflussen somit die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre. WCBs spielen auch für die Dynamik der synoptisch- und groß-

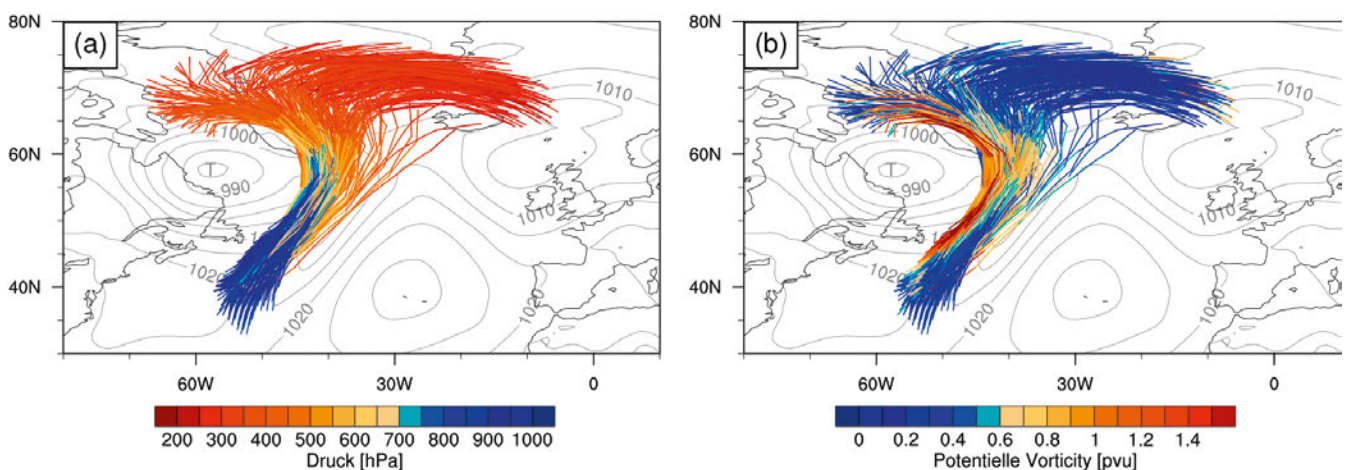


Abb. 7-3: WCB-Trajektorien mit Start am 20. September 1993 um 12 UTC. Die Farben zeigen (a) den Druck und (b) die PV entlang der Trajektorien. Das Label „T“ markiert das Zentrum des dazugehörigen Tiefdruckgebiets und die schwarzen Konturen zeigen den Bodendruck einen Tag nach Start der Trajektorien.

skaligen Strömung eine sehr wichtige Rolle. So geht die Freisetzung von latenter Wärme während der Wolkenbildung mit einer Veränderung der potentiellen Vorticity (PV) einher (siehe Beitrag 6). PV wird im unteren Teil der Wolke erzeugt und im oberen Teil vernichtet. Dies führt zu einer charakteristischen PV-Entwicklung entlang der aufsteigenden WCB-Trajektorien (Abbildung 7-3b). In Bodennähe haben die Luftpakete typische troposphärische PV-Werte von ungefähr 0,5 PVU (blaue Farben). In der frühen Aufstiegsphase, im unteren Teil der Wolke, steigen die Werte auf mehr als 1 PVU und bilden eine starke positive PV-Anomalie (gelbe bis rote Farben). Im oberen Teil der Wolke, oberhalb des diabatischen Heizmaximums, sinken die Werte wieder auf ungefähr 0,5 PVU (blaue Farben), was in der Tropopausenregion einer ausgeprägten negativen PV-Anomalie entspricht. Die Produktion und Vernichtung von PV entlang der WCBs gleicht sich ungefähr aus, sodass netto keine PV erzeugt wird. Die Entstehung der PV-Anomalien hat jedoch Auswirkungen auf das Windfeld und die Temperaturstruktur in der Umgebung (siehe Beitrag 6). Die positive PV-Anomalie in der mittleren Troposphäre kann die Intensität der dazugehörigen Zyklone beeinflussen, während die negative PV-Anomalie in der oberen Troposphäre die Rückenbildung stromabwärts verstärken kann. Aufgrund dieser Eigenschaften ist es auch sehr wichtig, WCBs in numerischen Wettermodellen korrekt darzustellen, da sie die Qualität der Vorhersagen stark beeinflussen können. Im Folgenden wird auf die verschiedenen Charakteristiken von WCBs vertieft eingegangen. Ein besonderer Fokus wird dabei auf die Bedeutung von WCBs für die Dynamik gelegt.

2 Klimatologische Verteilung von WCBs und Bedeutung für (extreme) Niederschläge

Abbildung 7-4 zeigt die saisonale klimatologische Verteilung von WCBs zu Beginn ihres zweitägigen Aufstiegs für alle vier Jahreszeiten. Hierbei wurden, wie in Abbildung 7-3, alle Trajektorien in der Nähe von Tiefdruckgebieten berücksichtigt, welche innerhalb von zwei Tagen um mehr als 600 hPa aufgestiegen sind. Die Verteilung zeigt, dass WCBs im Winter häufiger vorkommen als im Sommer. Im Winter starten auf der Nordhemisphäre die meisten WCBs ihren Aufstieg im westlichen Nordatlantik und Nordpazifik, mit einem Häufigkeitsmaximum von fast 10 % der Zeit. Im Frühling und im Herbst sind die Startregionen ähnlich wie im Winter, die absoluten Häufigkeiten sind jedoch geringer, insbesondere im Frühling über dem Nordatlantik. Im Sommer finden sich schließlich Maxima von mehr als 5 % über dem westlichen Nordpazifik, China und Taiwan. Auf der Südhemisphäre liegt über Südamerika, im Lee der Anden, ganzjährig ein Häufigkeitsmaximum von WCB-Startpunkten und die zonale Variabilität ist geringer als auf der Nordhemisphäre, insbesondere im südhemisphärischen Winter. Die WCBs bewegen sich während ihres Aufstiegs pol- und ostwärts und verlieren in der oberen Troposphäre an Kohärenz, wodurch sie sich in der Tropopausenregion über fast die gesamten mittleren Breiten verteilen (nicht gezeigt).

Die wichtige Rolle von WCBs für die Bildung von Niederschlag in den Außertropen ist in Abbildung 7-5a ersicht-

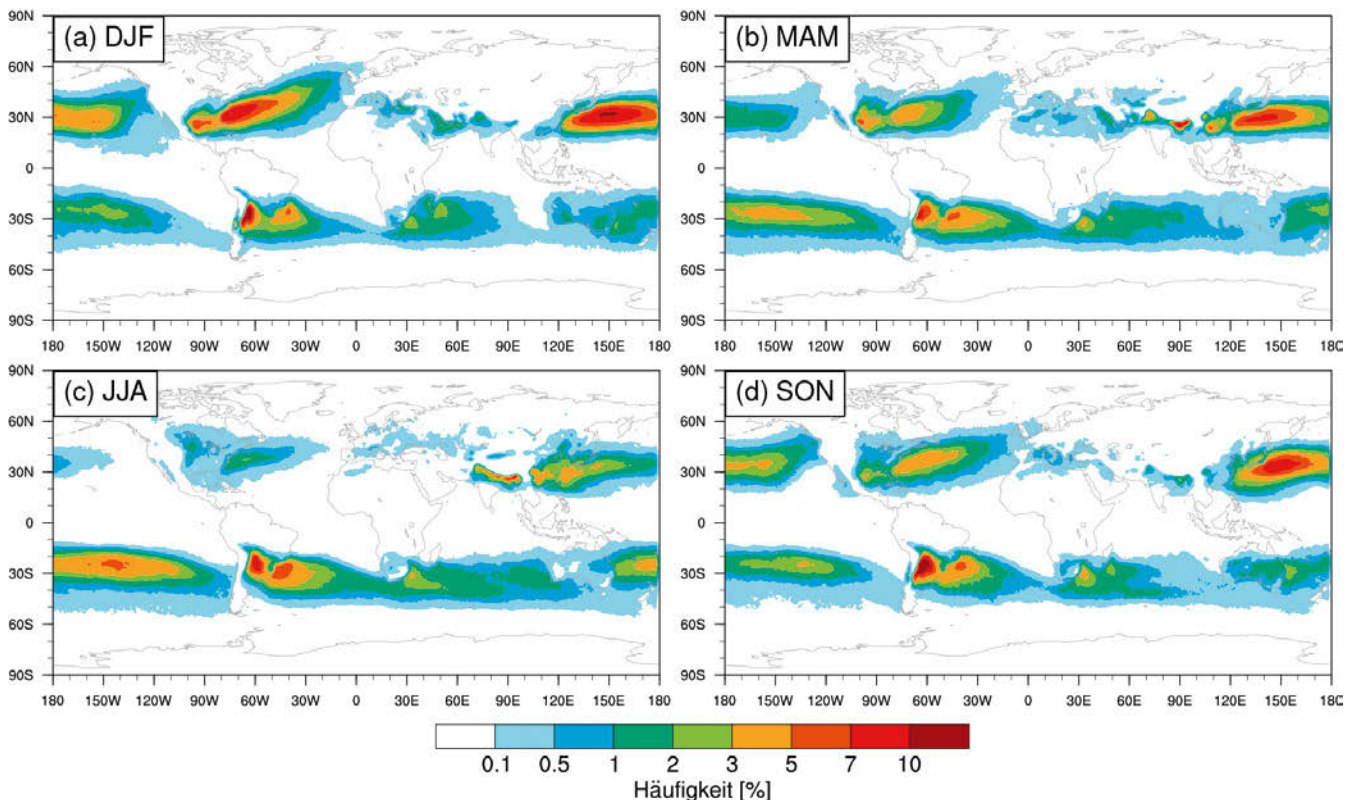


Abb. 7-4: Klimatologische Häufigkeit von WCB-Trajektorien zu Beginn ihres zweitägigen Aufstiegs für die Jahre 1979–2018 für (a) Dezember–Februar, (b) März–Mai, (c) Juni–August und (d) September–November. Die Einheit bezeichnet die Prozentzahl aller Zeitschritte mit mindestens einer WCB-Trajektorie an einem bestimmten Gitterpunkt. Reproduziert und aktualisiert von MADONNA et al. 2014.

lich. Sie zeigt, wieviel Prozent des totalen Niederschlags zwischen 1979 und 2010 mit einem WCB in Verbindung

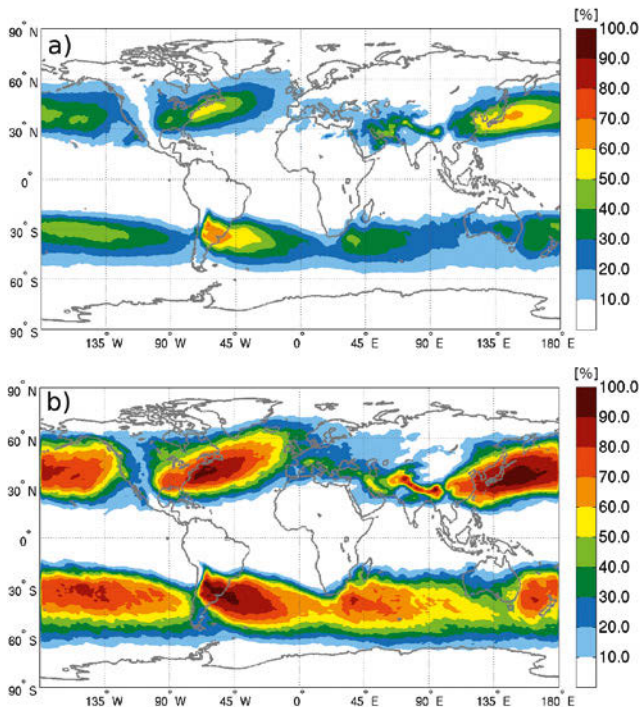


Abb. 7-5: Prozentzahl (a) des Gesamtniederschlags und (b) des Extremniederschlags, welcher mit WCBs in Verbindung steht, für alle 6-stündigen Zeitschritte zwischen 1979 und 2010. Extremniederschlag wird hierbei als die 1% stärksten Niederschlagsereignisse an jedem Gitterpunkt definiert. Aus PFAHL et al. 2014.

standen. Die Verteilung ist sehr ähnlich wie die klimatologische Verteilung der WCBs in Abbildung 7-4a. Über vielen Teilen der außertropischen Ozeane sowie im Lee der Anden in Südamerika fallen 40 bis 60 % des Niederschlags in der Nähe eines WCB; und über dem Südosten der Vereinigten Staaten, Ostchina, Australien und Teilen Arabiens und des mittleren Ostens sind es über 30 %. Wenn nur Extremniederschlagsereignisse berücksichtigt werden (definiert als die 1% stärksten 6-stündigen Niederschlagsereignisse an jedem Gitterpunkt in der Zeit zwischen 1979 und 2010), spielen WCBs sogar eine noch wichtigere Rolle (Abbildung 7-5b): Über einem Großteil der außertropischen Ozeane sowie über einigen stark bevölkerten Landgebieten (insbesondere über Teilen von Südamerika, im Südosten der Vereinigten Staaten, Japan, Korea und Ostchina) stehen 60 bis 90 % des Extremniederschlags in Verbindung mit WCBs. Auch über Kalifornien, südlich der Alpen und im mittleren Osten, wo WCBs relativ selten vorkommen, tragen sie substantiell (> 50 %) zu Extremniederschlagsereignissen bei.

Im Folgenden werden wir sehen, dass WCBs auch indirekt zu Starkniederschlagsereignissen beitragen können, indem sie die großskalige Strömung beeinflussen.

3 Bedeutung von WCBs für die großskalige Dynamik

In diesem Abschnitt wird anhand von zwei Beispielen illustriert, wie WCBs durch den Transport von geringer PV in die Tropopause zur Rückenbildung und in be-

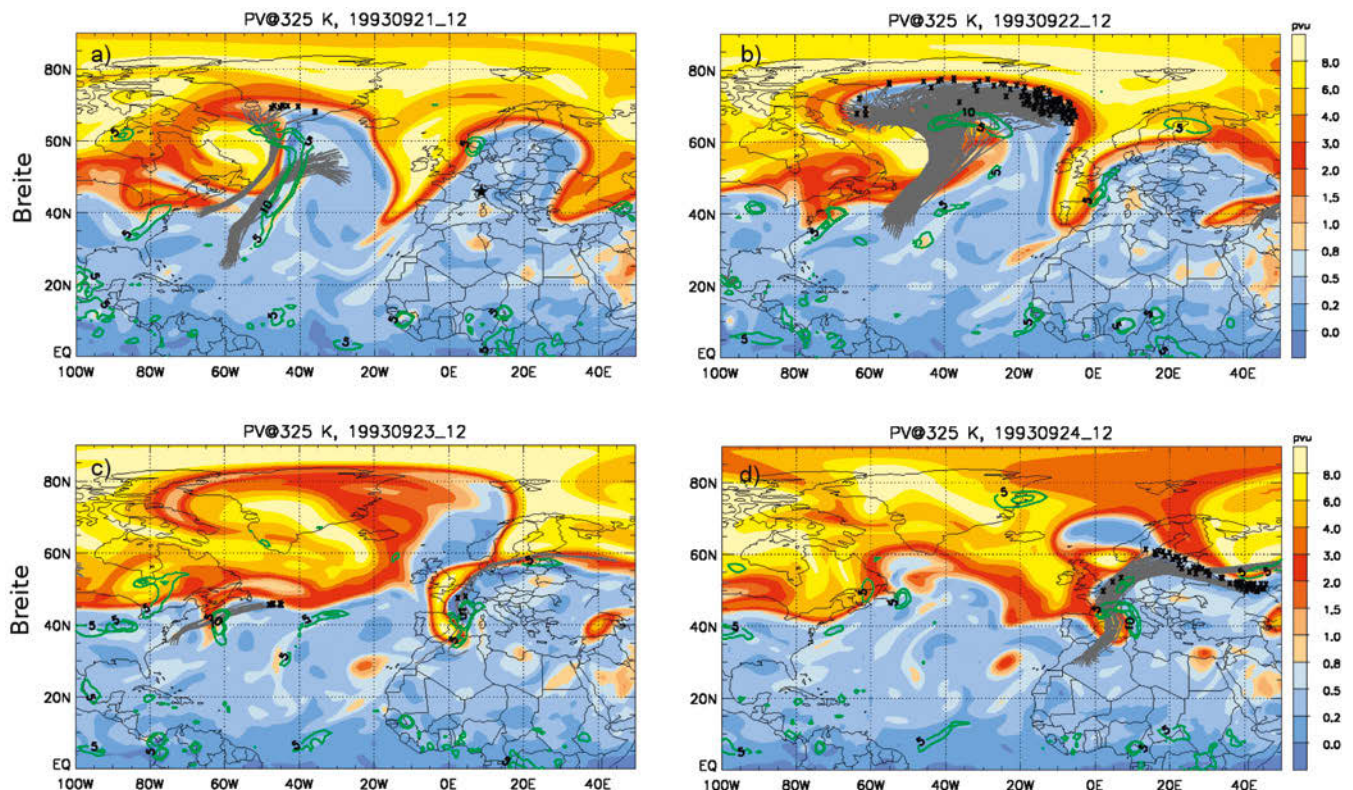


Abb. 7-6: PV auf der 325-K-Isentropen, alle 24 Stunden zwischen dem 21. und 24. September 1993 um 12 UTC. Grüne Konturen markieren 6-stündlich akkumulierten Niederschlag (in mm). WCB Trajektorien, die zwei Tage früher starteten, sind grau eingezeichnet und die schwarzen Kreuze markieren ihre Endposition, wenn diese über 325 K liegt. Aus MADONNA et al. 2014.

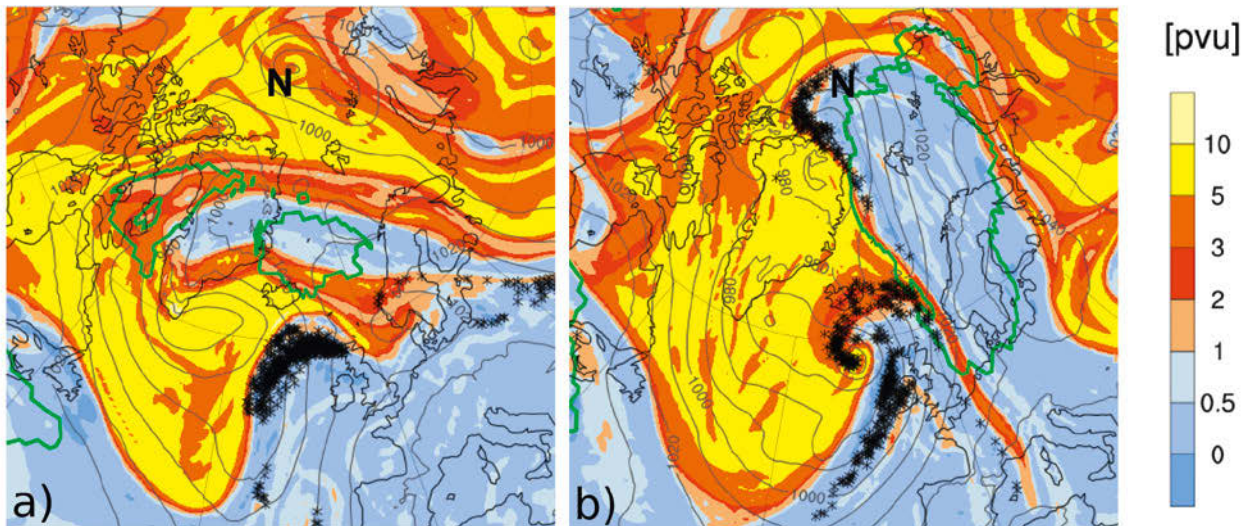


Abb. 7-7: PV auf 310 K (PVU; in Farbe), Bodendruck (graue Konturen) und Lage von blockierenden Antizyklonen in der Tropopausenregion (grüne Kontur) am (a) 27. Dezember 2015 um 12 UTC und (b) 29. Dezember 2015 um 18 UTC. Die schwarzen Kreuze zeigen WCB-Trajektorien, welche zu diesem Zeitpunkt die 310-K-Isentrope durchstießen. Aus BINDER et al. 2017.

stimmten Fällen zu blockierenden Wetterlagen beitragen und damit die großskalige Dynamik beeinflussen können. Für einen vertieften Einblick sind die Artikel von GRAMS et al. (2011) und PFAHL et al. (2015) zu empfehlen.

Abbildung 7-6 zeigt die PV-Entwicklung auf der 325-K-Isentrope zwischen dem 21. und 24. September 1993, zusammen mit dem 6-stündigen Niederschlag (grüne Konturen) und den WCB-Trajektorien (graue Linien). Die Tropopause ist durch die rote 2-PVU-Kontur markiert, nördlich davon befindet sich stratosphärische Luft mit hoher PV (gelbe Farben), südlich davon troposphärische Luft mit geringer PV (blaue Farben).

Um 12 UTC am 21. September (Abbildung 7-6a) zeigte die PV-Struktur ein wellenförmiges Muster, das sich von Nordamerika nach Zentraleuropa erstreckte. Über dem zentralen Nordatlantik ist ein Rücken zu erkennen (Auslenkung von troposphärischer Luft nach Norden) und östlich davon, über England, ein Trog (Auslenkung von stratosphärischer Luft nach Süden). Ein WCB befand sich zu dieser Zeit im westlichen Nordatlantik, aber erst wenige Trajektorien erreichten die obere Troposphäre (schwarze Kreuze). 24 Stunden später hatte sich der WCB stark intensiviert, und nun füllten die Luftpakete den Rücken im Zentralatlantik fast aus (Abbildung 7-6b). Es ist derselbe WCB, der auf dem Satellitenbild in Abbildung 7-1 sowie als Trajektorien in Abbildungen 7-3 dargestellt ist.

Wie in der Einleitung erläutert, erreichten die WCB-Luftmassen die Tropopausenregion aufgrund der starken diabatischen Prozesse mit sehr tiefen PV-Werten (siehe blaue Farben in Abbildung 7-3b). Diese geringen PV-Werte leisteten einen wichtigen Beitrag dazu, die negative PV-Anomalie im Rücken zu verstärken und ihn damit bis weit in den Norden auszudehnen. Gleichzeitig führte die Erweiterung des Rückens dazu, dass sich der Trog stromabwärts zu einem schmalen PV-Filament verlängerte,

welches sich bis nach Südspanien erstreckte (Abbildung 7-6b). Während sich der WCB und der Rücken über dem Nordatlantik in den nächsten Tagen abschwächten (Abbildung 7-6c,d), blieb das PV-Filament relativ stationär über Westeuropa und an seiner Vorderseite strömte über mehrere Tage warme und feuchte Luft in Richtung Alpen. Dies führte zu orographisch induziertem Starkniederschlag, der insbesondere in der Stadt Brig in der Schweiz großen Schaden anrichtete. Ein Teil dieses Extremniederschlags stand wiederum mit einem WCB in Verbindung, der am 24. September an der Vorderseite des PV-Filaments aufstieg (Abbildung 7-6d).

Das Beispiel illustriert, wie die anomal tiefen PV-Werte, mit denen WCBs in der Tropopausenregion ankommen, zur Rückenbildung über dem Nordatlantik beitragen können, was in der Folge auch die Strömung über Europa beeinflussen und in den Alpen zu Extremwetter führen kann. Abbildung 7-7 zeigt ein weiteres Beispiel von Ende Dezember 2015: An der Vorderseite einer Reihe starker Zyklogen über dem Nordatlantik stiegen über mehrere Tage WCB-Luftmassen in die obere Troposphäre auf (schwarze Kreuze) und halfen mit, zwischen Island und Skandinavien einen Rücken zu bilden und diesen nach Norden zu erweitern. Dies führte schlussendlich zum Aufbau einer starken, langlebigen, blockierenden Antizyklone in der oberen Troposphäre, welche sich bis zum Nordpol erstreckte (grüne Kontur in Abbildung 7-7b). Darunter entwickelte sich in Bodennähe eine intensive polwärts gerichtete Windströmung, die außergewöhnlich warme Luft in die Arktis transportierte und dort zu Extremtemperaturen über dem Gefrierpunkt und starker Eisschmelze führte. Gleichzeitig wurde die kalte arktische Luft nach Osteuropa ausgelenkt, was über Griechenland und der Türkei ungewöhnlich tiefe Temperaturen zur Folge hatte.

Latentes Heizen in WCBs spielt, wie in diesen beiden Beispielen, oft eine sehr wichtige Rolle für die Entwick-

lung von Rücken und blockierenden Antizyklonen in der oberen Troposphäre. Tatsächlich konnte in einer klimatologischen Studie nachgewiesen werden, dass diabatische Prozesse in aufsteigenden Luftmassen etwa gleich stark zur Bildung von blockierenden Antizyklonen beitragen wie der quasiadiabatische Transport von Luft mit tiefer PV entlang von Isentropen (PFAHL et al. 2015). Da Höhenrücken und blockierende Antizyklonen auch das Wetter am Boden stark beeinflussen und oft mit Extremereignissen im Zusammenhang stehen, ist es sehr wichtig, WCBs in numerischen Modellen richtig zu repräsentieren. Dies wird in Abschnitt 5 diskutiert.

4 Bedeutung von WCBs für die Intensivierung von Zyklonen

Während die negative PV-Anomalie, mit der WCBs in der Tropopausenregion ankommen, die Rückenbildung beeinflussen kann, interagiert die positive, zyklonale PV-Anomalie, die sich während des Aufstiegs in der mittleren Troposphäre bildet (Abbildung 7-3b), mit der dazugehörigen Zyklone und kann ihre Intensivierung begünstigen. Starke Zyklonen bilden zum Zeitpunkt ihrer maximalen Intensität oft einen sogenannten PV-Tower – eine Säule mit anomal hoher PV, die sich über die gesamte Troposphäre erstreckt und dabei ein starkes zyklonales Windfeld induziert (siehe Beitrag 6). Der mittlere Teil des PV-Towers entsteht durch Kondensationsprozesse in aufsteigenden Luftmassen. In diesem Abschnitt wird illustriert, dass oft WCBs für diesen diabatisch produzierten Teil des PV-Towers verantwortlich sind und damit einen wichtigen Beitrag zur Intensivierung der Zyklone leisten.

Als Beispiel betrachten wir eine Zyklone über dem Nordatlantik, die sich zwischen dem 6. und 7. Januar 1990 explosiv vertiefte, mit einem Abfall des Kerndrucks von mehr als 44 hPa innerhalb von 24 Stunden. Ein West-

Ost-Querschnitt durch das Zentrum der Zyklone während dieser Intensivierungsperiode (Abbildung 7-8a) zeigt eine starke zyklonale PV-Anomalie im Zentrum, welche sich vom Boden bis in die mittlere Troposphäre erstreckt und westlich davon eine tiefe stratosphärische Intrusion mit hohen PV-Werten. Die Zyklone besitzt einen sehr starken WCB (schwarze Kreuze in Abbildung 7-8a) und ein großer Teil der Trajektorien fällt mit der zyklonalen PV-Anomalie in der unteren und mittleren Troposphäre zusammen. Infolge von Kondensationsprozessen sind die PV-Werte dieser aufsteigenden Luftmassen anomal hoch (1,5 bis fast 2 PVU) und tragen somit maßgebend zur Stärke der PV-Anomalie bei. Der kontinuierliche Aufstieg von feuchten Luftmassen führt in den nächsten 12 Stunden zu einer weiteren Intensivierung der diabatischen PV-Anomalie, während sich die stratosphärische Intrusion über das Zentrum schiebt, sodass die beiden Anomalien zum Zeitpunkt des minimalen Kerndrucks der Zyklone einen starken PV-Tower bilden (Abbildung 7-8b).

Die diabatische PV-Produktion in WCB-Luftmassen spielt wie in diesem Fall für die explosive Intensivierung von vielen Zyklonen eine sehr wichtige Rolle. Diese sogenannten „meteorologischen Bomben“ (SANDERS und GYAKUM 1980) richten oft großen Schaden an – Beispiele dafür sind die europäischen Winterstürme „Martin“ im Jahr 1999 und „Xynthia“ im Jahr 2010 (LIBERATO et al. 2013), sowie eine Reihe von Schneestürmen wie der *Presidents' Day Storm* im Jahr 1979 über dem Nordosten der Vereinigten Staaten (BOSART 1981). Daneben gibt es aber auch Zyklonen mit starkem WCB, welche sich kaum intensivieren. Ausschlaggebend für die starke Druckabnahme ist, dass die PV-Produktion der WCBs im Zentrum der Zyklone geschieht (und nicht zum Beispiel entlang der Kaltfront), und dass die diabatische PV-Anomalie mit einer stratosphärischen PV-Anomalie in Wechselwirkung tritt (BINDER et al. 2016).

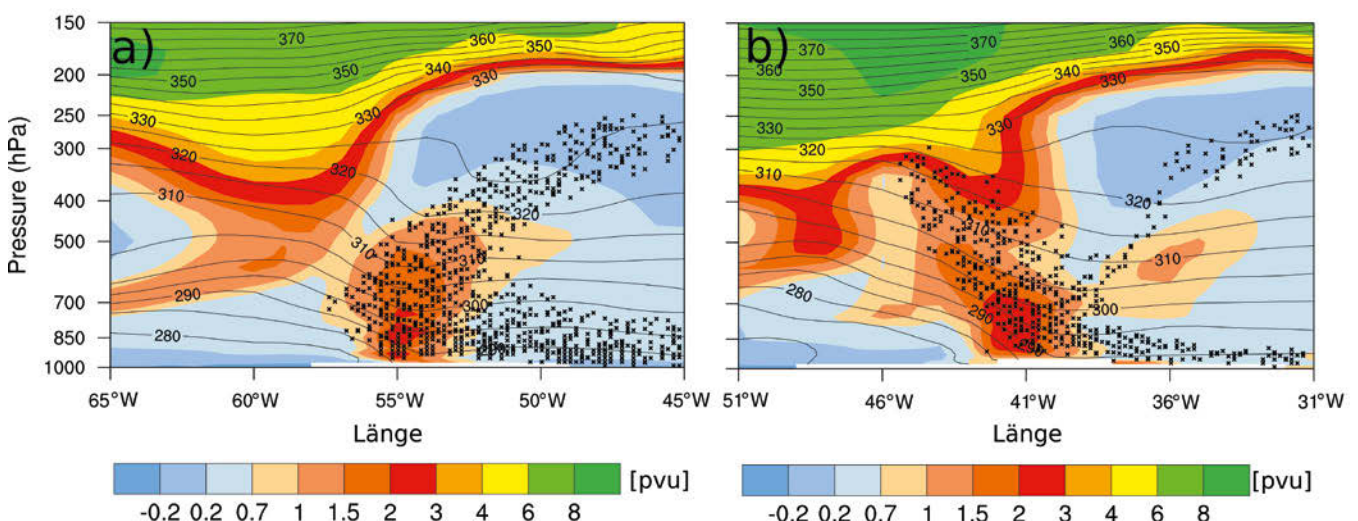


Abb. 7-8: West-Ost-Querschnitt durch das Zentrum eines sich explosiv intensivierenden Tiefdruckgebiets am 7. Januar 1990 um (a) 6 UTC und (b) 18 UTC. Gezeigt sind PV (PVU; in Farbe), die potentielle Temperatur (Konturen alle 5 K) und die Position von WCB-Trajektorien (schwarze Kreuze). Aus BINDER et al. 2016.

5 WCBs in Wetter- und Klimamodellen

Aufgrund der Bedeutung von WCBs für den Niederschlag und die großskalige Dynamik ist es wichtig, sie in numerischen Wetter- und Klimamodellen richtig darzustellen (siehe Übersichtsartikel von RODWELL et al 2018). In den letzten Jahren hat sich beispielsweise das Wettervorhersagemodell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) stetig verbessert und nur selten treten grobe Vorhersagefehler auf. Wenn jedoch Fehler auftreten, sind sie meistens mit diabatischen Prozessen verbunden (z. B. MAGNUSSON 2017), wobei WCBs eine wichtige Rolle spielen. Zentral ist dabei die Freisetzung von latenter Wärme während der Wolkenbildung, die, wie oben erläutert, zu PV-Produktion in der unteren und PV-Vernichtung in der oberen Troposphäre führt und damit die Entwicklung von Zyklonen sowie die Rückenbildung beeinflussen kann. In den früheren Versionen des EZMW-Modells (Winter 2002/2003) wurde die Intensität der aufsteigenden WCB-Luftmassen in dreitägigen Vorhersagen systematisch überschätzt und die PV-Fehler der Luftmassen lagen in der oberen Troposphäre oft bei $\pm 0,5$ PVU (MADONNA et al. 2015). In den neueren Versionen treten diese Fehler nicht mehr systematisch auf, was vermutlich durch eine Kombination von verbesserter Modellphysik, Datenassimilation und höherer Auflösung erklärt werden kann.

Eine Quelle von Vorhersagefehlern von WCBs ist die Darstellung der mikrophysikalischen Prozesse in Wolken. Unterschiedliche mikrophysikalische Parametrisierungen können die PV-Entwicklung entlang der WCBs prägen und die Position der Luftmassen – und damit der negativen PV-Anomalie – in der Tropopausenregion beeinflussen (JOOS und FORBES 2016). Weitere Fehlerquellen sind Unsicherheiten in den Anfangsbedingungen (z. B. in der Lage der dazugehörigen Zyklone oder der Feuchtigkeit in der Grenzschicht), sowie Modellfehler in der Darstellung des dynamischen Kerns. All dies kann zu Unsicherheiten in der Intensität der aufsteigenden Luftmassen, in der Lage der Aufstiegsregion oder in der PV-Entwicklung entlang der WCBs führen und schließlich zu kleinen Fehlern in der Tropopausenstruktur. Diese können sich rasch verstärken und stromabwärts propagieren und letztendlich zu großskaligen Vorhersagefehlern führen. Dies geschah zum Beispiel Anfang März 2016, als eine systematisch falsche Darstellung von WCBs über dem Nordatlantik im EZMW-Modell zu Fehlern in der Tropopausenstruktur über Europa beitrug, was zu einer 5°C zu warm vorhergesagten Temperatur über Deutschland führte (MAGNUSSON 2017).

Mit Hinblick auf die Zukunft ist es letztlich auch wichtig, WCBs und ihre Auswirkungen auf das Wetter- und Klimasystem (Niederschlagsbildung, Wolken-induzierte Strahlungsbilanz und Entstehung von PV-Anomalien) in Klimamodellen zu untersuchen. Die Frage steht offen, ob und wie sich die Häufigkeit und Verteilung von WCBs und ihre Eigenschaften mit dem Klimawandel ändern werden.

Literatur

- BINDER, H., BOETTCHER, M., GRAMS, C.M., JOOS, H., PFAHL, S., WERNLI, H., 2017: Exceptional air mass transport and dynamical drivers of an extreme winter-time Arctic warm event. *Geophys. Res. Lett.* **44**, 12.028-12.036.
- BINDER, H., BOETTCHER, M., JOOS, H., WERNLI, H., 2016: The role of warm conveyor belts for the intensification of extratropical cyclones in Northern Hemisphere winter. *J. Atmos. Sci.* **73**, 3997-4020.
- BOSART, L.F., 1981: The Presidents' Day snowstorm of 18-19 February 1979: A subsynoptic-scale event. *Mon. Wea. Rev.* **109**, 1542-1566.
- BROWNING, K.A., 1990: Organization of clouds and precipitation in extratropical cyclones. *Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume*, C.W. Newton, and E.O. Holopainen, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, 129-153.
- CARLSON, T.N., 1980: Airflow through midlatitude cyclones and the comma cloud pattern. *Mon. Wea. Rev.* **108**, 1498-1509.
- CATTO, J.L., 2016: Extratropical cyclone classification and its use in climate studies. *Rev. Geophys.* **54**, 486-520.
- GRAMS, C.M. et al., 2011: The key role of diabatic processes in modifying the upper-tropospheric wave guide: a North Atlantic case-study. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **137**, 2174-2193.
- GREEN, J.S.A., LUDLAM, F.H., MCILVEEN, J.F.R., 1966: Isentropic relative-flow analysis and the parcel theory. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **92**, 210-219.
- JOOS, H., FORBES, R.M., 2016: Impact of different IFS microphysics on a warm conveyor belt and the downstream flow evolution. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **142**, 2727-2739.
- KNAPP, K.R. et al., 2011: Globally gridded satellite (GridSat) observations for climate studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **92**, 893-907.
- LIBERATO, M.L.R., PINTO, J.G., TRIGO, R.M., LUDWIG, P., ORDÓÑEZ, P., YUEN, D. AND TRIGO, I.F., 2013: Explosive development of winter storm Xynthia over the subtropical North Atlantic Ocean. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **13**, 2239-2251.
- MADONNA, E., WERNLI, H., JOOS, H., MARTIUS, O., 2014: Warm conveyor belts in the ERA-Interim dataset (1979-2010). Part I: Climatology and potential vorticity evolution. *J. Climate* **27**, 3-26.
- MADONNA, E., BOETTCHER, M., GRAMS, C. M., JOOS, H., MARTIUS, O., WERNLI, H., 2015: Verification of North Atlantic warm conveyor belt outflows in ECMWF forecasts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 1333-1344.
- MAGNUSSON, L., 2017: Diagnostic methods for understanding the origin of forecast errors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **143**, 2129-2142.
- PFAHL, S., MADONNA, E., BOETTCHER, M., JOOS, H., WERNLI, H., 2014: Warm conveyor belts in the ERA – Interim dataset (1979-2010). Part II: Moisture origin and relevance for precipitation. *J. Climate* **27**, 27-40.

- PFAHL, S., SCHWIERZ, C., CROCI-MASPOLI, M., GRAMS, C.M., WERNLI, H., 2015: Importance of latent heat release in ascending air streams for atmospheric blocking. *Nature Geosci.* **8**, 610-614.
- RODWELL, M., FORBES, R., WERNLI, H., 2018: Why warm conveyor belts matter in NWP. *ECMWF Newsletter* **154**, 21-28
- SANDERS, F., GYAKUM, J.R., 1980: Synoptic-dynamic climatology of the “bomb”. *Mon. Wea. Rev.* **108**, 1589-1606.
- WERNLI, H., DAVIES, H.C., 1997: A Lagrangian-based analysis of extratropical cyclones. I: The method and some applications. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **123**, 467-489.

Autorinnen

DR. HANIN VERENA BINDER
Laboratoire de Météorologie Dynamique
École Normale Supérieure Paris
24 rue Lhomond
75005 Paris
France
hanin.binder@lmd.ens.fr

DR. ERICA MADONNA
Geophysical Institute
University of Bergen and
Bjerknes Centre for Climate Research
Postboks 7803
5020 Bergen
Norway
erica.madonna@uib.no

M. RIEMER, C. M. GRAMS, J. KELLER

8

Von der tropischen zur außertropischen Zyklone

The extratropical transition of tropical cyclones

Zusammenfassung

Tropische Wirbelstürme, die in die mittleren Breiten ziehen, durchlaufen maßgebliche Veränderungen ihrer Zyklonenstruktur und können sich abschließend in ein außertropisches Tief umwandeln. Während dieses Umwandlungsprozesses kommt es zu lokalen Veränderungen des Jetstreams, die sich in weiterer Folge gemäß eines Rossby-Wellenpakets ausbreiten. Dadurch beeinflusst die sich umwandelnde Zyklone das Wetter der mittleren Breiten in einem großskaligen Bereich stromab der eigentlichen Umwandlung. Dieser Einfluss begünstigt das Auftreten von gefährlichen Wettererscheinungen, insbesondere starke Niederschläge, Stürme oder extreme Temperaturen. Die außertropische Umwandlung und ihre Folgen hängen dabei sehr empfindlich von der genauen Lage des tropischen Wirbelsturms relativ zum Rossby-Wellenmuster der mittleren Breiten zu Beginn der Umwandlung ab. Die Sturmentwicklung selbst, als auch die mittelfristige Entwicklung des Wetters in den mittleren Breiten unterliegen daher einer besonders hohen Vorhersageunsicherheit.

Summary

Tropical cyclones moving into the midlatitudes undergo substantial changes in their cyclone structure and may finally transition into an extratropical cyclone. Local changes of the jet stream, which subsequently propagate downstream according to Rossby wave packet dynamics, occur during this transition process. Thereby, the transitioning cyclone impacts midlatitude weather in a large geographical region downstream of the actual transition. This impact promotes the occurrence of high-impact weather, in particular heavy precipitation, strong winds or extreme temperatures. The extratropical transition and its downstream impacts are highly sensitive to the position of the tropical cyclone relative to the midlatitude Rossby wave pattern at the onset of transition. The storm evolution itself, as well as the medium-range evolution of midlatitude weather are thus subject to particularly low predictability.

1 Einleitung

Tropische Wirbelstürme, die in die mittleren Breiten ziehen, durchlaufen substantielle Veränderungen ihrer Zyklonenstruktur und können sich letztlich in ein außertropisches Tief umwandeln. Die Umwandlung bedingt zudem eine starke Wechselwirkung mit dem Jetstream der mittleren Breiten. Auftretende Änderungen im Jetstream breiten sich daraufhin tausende von Kilometern stromabwärts aus, sodass das Wetter der mittleren Breiten in einem großskaligen Bereich stromab der eigentlichen Umwandlung beeinflusst wird. Durch diesen Zusammenhang bekommen die Hurrikane des Nordatlantiks eine direkte Relevanz für das Wetter in Europa. Von besonderer Bedeutung ist, dass im Zusammenhang mit der Umwandlung auch über Europa gefährliche Wettererscheinungen auftre-

ten können und zugleich die mittelfristige Vorhersageunsicherheit häufig erhöht ist. Um die Vorhersage solcher Ereignisse zu verbessern und so ihre möglichen sozioökonomischen Auswirkungen zu mildern, ist ein gründliches Verständnis der Zyklondynamik, der Wechselwirkung mit dem Jetstream, der stromabwärts gerichteten Ausbreitung der auftretenden Störung, der Entwicklung der Vorhersageunsicherheit sowie des Auftretens gefährlicher Wettererscheinungen nötig.

Dieser Beitrag beruht maßgeblich auf zwei aktuellen Übersichtsartikeln: EVANS et al. (2017) und KELLER et al. (2019). In den folgenden Abschnitten werden zunächst allgemeine Charakteristiken der Umwandlung erläutert: von den strukturellen Änderungen der Zyklone, über die Klimatologie des Auftretens bis hin zu

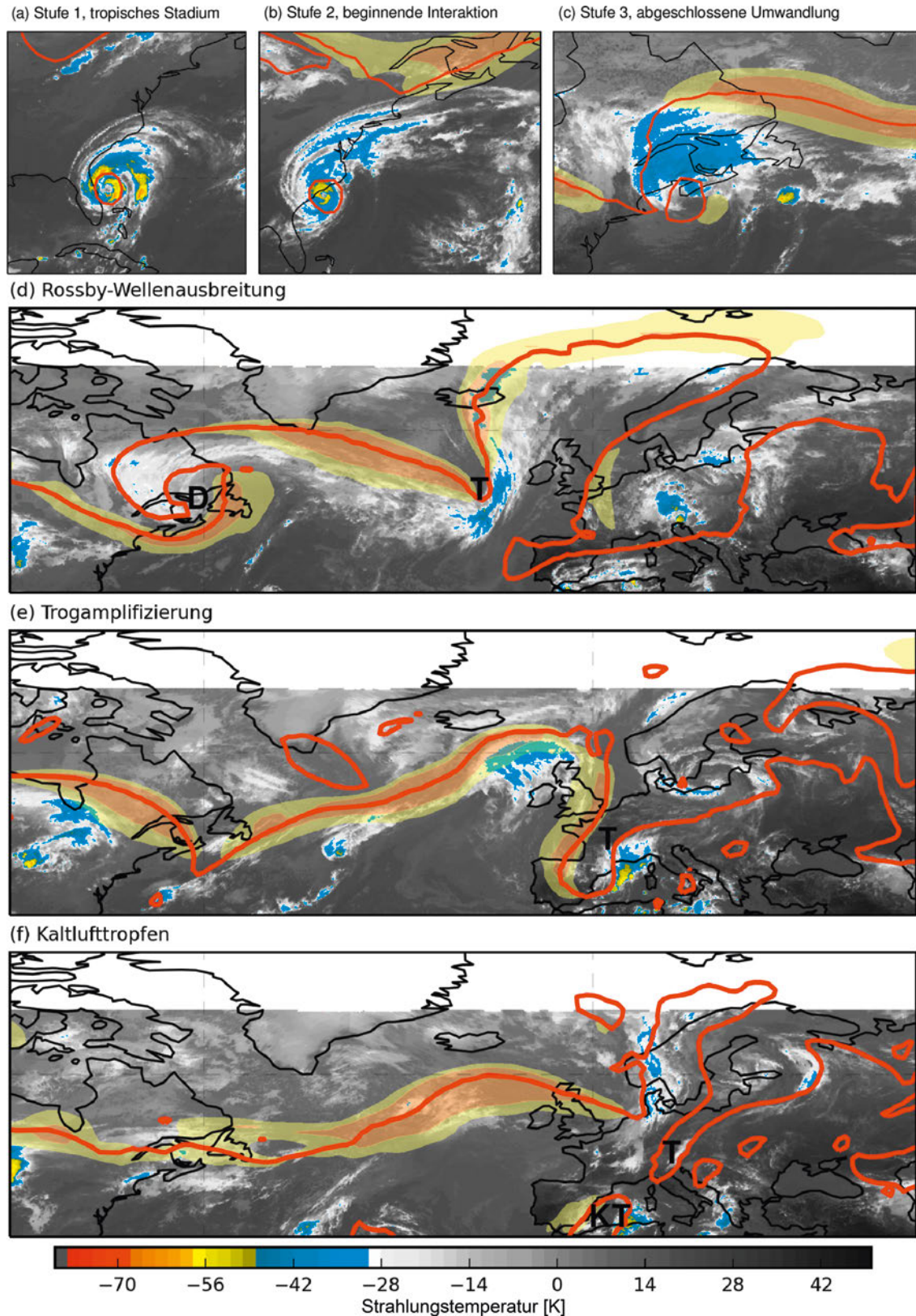


Abb. 8-1: Zeitliche Entwicklung der außertropischen Umwandlung im Infrarot-Satellitenbild (Strahlungstemperatur in Farbtönen in K) für Hurrikan „Dorian“ im September 2019. (a)-(c): (4. September, 06 UTC; 6. September, 00 UTC; 7. September, 18 UTC) Stufe 1-3 der außertropischen Umwandlung nach KLEIN et al. (2000) mit sukzessiver Ausbildung eines Zirrusschirms und Zerfall der symmetrischen Struktur. (d)-(f): (je 12 UTC am 8. September, 10. September, 11. September) Rossby-Wellenauslenkung stromab über dem Nordatlantik und Extremwetter als Folge der stromabwärtigen Entwicklung. Die ungefähre Lage des Jetstreams wird durch die rote Kontur (2 PVU) sowie Windmaxima (transparent gelb: $>40 \text{ m s}^{-1}$, rot: $>50 \text{ m s}^{-1}$) auf dem 330 K isentropen Level gezeigt und markiert die sich daran ausbreitenden Rossbywellen. Markierungen in (d)-(f) zeigen die Lage von „Dorian“ (D), des Trops (T), und des Kaltlufttropfens (KT). Die Satellitendaten entstammen dem globalen GridSAT B1 CDR Datensatz des NOAA National Climate Data Centers <https://www.ncdc.noaa.gov/gridsat/> (KNAPP et al. 2011). PV und Wind basieren auf operationellen Analysen des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW). Wir danken Julian Quinting für die Bereitstellung des Plotskripts.

Wettergefahren im direkten Zusammenhang mit der Umwandlung. Daran anschließend wird der Einfluss der Umwandlung auf den Jetstream und die damit verbundenen Auswirkungen stromabwärts (zum Beispiel auf Europa) diskutiert.

2 Vom tropischen Wirbelsturm zum außertropischen Tief

2.1 Strukturänderungen der Zyklone

Ein tropischer Wirbelsturm bezieht seine Energie aus dem darunterliegenden warmen Ozean, maßgeblich durch den Fluss latenter Wärme. Diese wird in der hochreichenden Konvektion im inneren Kern des Sturms wieder freigesetzt. Die stärksten Winde des tropischen Wirbelsturms finden sich innerhalb der Grenzschicht und nehmen mit der Höhe ab. Die thermische Windbalance bedingt dadurch eine Warmanomalie im Sturmkern in der mittleren und oberen Troposphäre. Wind, Temperatur und Niederschlag sind, in einer ersten Näherung, axialsymmetrisch um das Zentrum verteilt. Im Gegensatz dazu bezieht ein außertropisches Tief seine Energie zu erheblichen Teilen aus barokliner Energieumwandlung in Gegenwart relativ starker Temperatur- und Feuchtegradienten (siehe Beitrag 5). Frontalzonen trennen dabei die unterschiedlichen Luftmassen und bedingen eine charakteristische asymmetrische Wind- und Niederschlagsverteilung. Windgeschwindigkeiten nehmen in der Regel mit der Höhe zu und die thermische Windbalance bedingt dadurch im Kern der Zyklone eine Kaltanomalie in der oberen Troposphäre.

Die fundamentalen Unterschiede in der Struktur und Dynamik der beiden Zyklontypen deuten die weitreichenden Strukturänderungen an, welche die Zyklone bei der außertropischen Umwandlung durchlaufen muss. Zur Beschreibung dieser Änderungen hat sich ein 3-Stufen-Modell nach KLEIN et al. (2000) durchgesetzt, dargestellt in Abbildung 8-1a,b,c. In Stufe 1 nähert sich der tropische Wirbelsturm der baroklinen Zone und es findet eine anfängliche Wechselwirkung statt. Diese ist geprägt durch die Zunahme der vertikalen Windscherung, die durch die thermische Windbalance inhärent mit der baroklinen Zone verbunden ist: Der tropische Wirbelsturm neigt sich mit der Höhe und die Konvektion verlagert sich vermehrt in Richtung des Schervektors. Diese Strukturänderungen sind häufig mit einer Abschwächung des Sturms verbunden, in der Regel unterstützt durch einen abnehmenden oberflächennahen Wärmegehalt des Ozeans. Im Satellitenbild erscheint der Wirbelsturm weiterhin überwiegend symmetrisch, wobei der Zirrusschirm allmählich stärker nach Nordosten ausgreift (Abbildung 8-1a). In Stufe 2 ist die sich umwandelnde Zyklone bereits sehr nahe an die barokline Zone herangezogen, was zu einer noch stärker ausgeprägten Neigung mit der Höhe führt und zur anfänglichen Ausbildung von *Conveyor Belts*, den charakteristischen Luftströmen eines außer-

tropischen Tiefs (siehe Beitrag 7). Dadurch beginnt die Kopplung der Konvektion an das Aufgleiten von Luftmassen an der baroklinen Zone, wodurch sie sich in Richtung des Schervektors und polwärts des Sturmzentrums verlagert. Mit der allmählichen Ausbildung eines markanten Warmsektors wird die Struktur im Satellitenbild asymmetrischer und es deutet sich bereits eine schwache Kaltfront an (Abbildung 8-1b). Während dieser ersten beiden Stufen nimmt die vertikale Ausdehnung des warmen Kerns der Zyklone nach und nach ab. Durch die Wechselwirkung mit einem Höhentrog bildet sich dort ein kalter Kern aus. In Stufe 3 schließt die Zyklone die Umwandlung ab, bildet markante Frontalzonen aus und wird vollständig Teil der baroklinen Strömung der mittleren Breiten (Abbildung 8-1c).

Das 3-Stufen-Modell verdeutlicht, dass die Umwandlung als Prozess zu verstehen ist. Dieser verläuft über einen Zeitraum von ein bis zwei Tagen. Während das 3-Stufen-Modell eine gute erste Einordnung der strukturellen Änderungen erlaubt, ist jedoch zu beachten, dass sowohl die Ausprägung der einzelnen Stufen, als auch die zeitliche Dauer der Umwandlung von Fall zu Fall stark variieren können. Dies gilt insbesondere für die Struktur und Intensität des resultierenden außertropischen Tiefs in Stufe 3. Zudem wandelt sich nur ein Teil der tropischen Wirbelstürme vollständig in außertropische Tiefs um; der andere Teil löst sich während der Umwandlung auf.

2.2 Die Zyklone nach der Umwandlung

Während der Umwandlung kann sich die Zyklone entweder auflösen, mit einer bestehenden Zyklone in den mittleren Breiten verschmelzen oder sich als eigenständiges System in den mittleren Breiten verstärken. Die Gründe für diese unterschiedlichen Entwicklungsszenarien sind noch Gegenstand der Forschung. Klar ist, dass die Lage relativ zum Höhentrog stromauf (RITCHIE und ELSBERRY 2007), sowie die Struktur dieses Trogs, eine wichtige Rolle spielen. Die Intensität des Wirbelsturms zu Beginn der Umwandlung ist jedoch von untergeordneter Bedeutung. Befindet sich die Zyklone während der Umwandlung trogvorderseitig in einer Region, in der die Höhenströmung günstig für außertropische Tiefdruckentwicklung ist, so tendiert die Zyklone am Ende der Umwandlung zu einer Intensivierung. Bei solch einer günstigen Lage relativ zum Höhentrog werden in der unteren Troposphäre auch vermehrt die warmen und feuchten Luftmassen des ehemaligen tropischen Wirbelsturms in das sich entwickelnde außertropische Tief miteinbezogen, sodass das damit verbundene Freiwerden latenter Wärme die Entwicklung des Tiefs weiter unterstützt. Weist der Trog stromauf eine relative geringe zonale Skala auf, so neigt die Zyklone am Ende der Umwandlung dazu, im Kern Warmluft einzuschließen. Einzelne Fallstudien belegen jedoch auch Abweichungen von dieser allgemeinen (statistischen) Beobachtung.

2.3 Objektive Beschreibung der außertropischen Umwandlung

Um die Umwandlung tropischer Wirbelstürme in großen Datensätzen zu erfassen, wie in Reanalysedaten oder in Klimaprojektionen, ist es wichtig, die Strukturänderungen objektiv beschreiben und dadurch automatisch identifizieren zu können. Die relativ hohe Komplexität der Änderungen, der Skalenerunterschied zwischen der tropischen und der außertropischen Zyklone, sowie die große Variabilität von Fall zu Fall gestalten eine objektive Beschreibung und Identifizierung jedoch sehr schwierig. Ein weit verbreiteter Ansatz ist der von HART (2003) eingeführte Phasenraum für Zyklonen. Dieser Phasenraum beschreibt Zyklonen anhand von drei Parametern: der thermischen Struktur des Kerns in der unteren und der oberen Troposphäre, sowie dem Grad der Asymmetrie der Temperaturverteilung in der unteren Troposphäre. Typischerweise zeigt der Phasenraum sehr klar die Umwandlung eines weitgehend symmetrischen tropischen Wirbelsturms mit einem hochreichenden warmen Kern in ein asymmetrisches außertropisches Tief mit kaltem Kern. Anhand dieses Phasenraums ist es also möglich, grundlegende Charakteristiken verschiedener Zyklontypen zu erfassen und damit zumindest eine objektive Erkennung und Beschreibung der groben Strukturänderung zu liefern.

Trotz der weit verbreiteten Anwendung dieses Phasenraums unterliegt der Ansatz gewissen Einschränkungen. Zum einen wird der Phasenraum anhand von Modelldaten ausgewertet und ist daher nur so zuverlässig, wie das Modell die Strukturänderungen auch realistisch darstellt. Gerade bei Klimaprojektionen ist diese Bedingung aufgrund der oftmals geringen Auflösung nicht immer gewährleistet. Zudem beruht der Phasenraum auf einer relativ groben räumlichen Mittelung. Dabei wird der Kern der Zyklone, in dem sich wichtige Strukturänderungen abspielen, nicht hinreichend aufgelöst. Andere Ansätze, beispielsweise basierend auf der potentiellen Vorticity (PV)-Struktur der Zyklone, unterliegen prinzipiell ähnlichen Einschränkungen, haben jedoch das Potenzial, die Strukturänderungen schärfer zu erfassen. Harts Phasenraum ist aktuell jedoch der De-facto-Standard für die objektive Definition einer außertropischen Umwandlung.

2.4 Klimatologisches Auftreten der außertropischen Umwandlung

Die außertropische Umwandlung tritt im Grunde in allen Ozeanbecken auf, in denen tropische Wirbelstürme vorkommen. Relativ gesehen durchlaufen tropische Wirbelstürme die Umwandlung am häufigsten im Nordwestpazifik, im Nordatlantik und im südwestlichen Indischen Ozean (40-45 % aller Wirbelstürme). Im Südwestpazifik beträgt die relative Häufigkeit 30 % und im Nordostpazifik nur 10 %.

Die relative Häufigkeit zeigt eine ausgeprägte saisonale Abhängigkeit, mit Maxima im ersten und letzten Drit-

tel der Wirbelsturmsaison des entsprechenden Ozeanbeckens, also im späten Frühjahr/Frühsummer bzw. Herbst der jeweiligen Hemisphäre. In dieser Übergangszeit ist die Wahrscheinlichkeit am höchsten, dass sich Tröge aus den mittleren Breiten weit in Richtung der Tropen erstrecken und dadurch den Umwandlungsprozess initiieren können. Absolut betrachtet treten dadurch die meisten Umwandlungen im Herbst auf (zum Beispiel September bis Oktober im Nordatlantik), da zu dieser Zeit im Mittel mehr tropische Wirbelstürme vorkommen als im späten Frühjahr/Frühsummer.

Im Nordostpazifik führen die relativ kühlen Ozeantemperaturen aufgrund des Kalifornienstroms dazu, dass sich tropische Wirbelstürme nördlich von 25° N häufig schnell abschwächen und auflösen. Zudem befindet sich in überwiegender Zeit der Wirbelsturmsaison in dieser Region ein stabiles Subtrophenhoch, welches das Vordringen von Trögen aus den mittleren Breiten in Richtung Tropen unterbindet. Aufgrund dieser ungünstigen Faktoren findet die Umwandlung tropischer Wirbelstürme in diesem Ozeanbecken selten statt.

Ein direkter Einfluss einer sich umwandelnden Zyklone auf Europa findet in etwa alle ein bis zwei Jahre statt. Deutlich häufiger kommt es jedoch zu einem indirekten Einfluss über die Veränderungen des Jetstreams. Direkt relevant für Europa sind auch mögliche Veränderungen im Rahmen des Klimawandels im Nordatlantik. Klimaprojektionen deuten auf eine mögliche Zunahme von außertropischen Umwandlungen hin, was mit einer beobachteten Zunahme in den letzten 30 Jahren konsistent ist. Insbesondere könnte die Umwandlung öfter als bisher im östlichen Nordatlantik auftreten, sodass dann auch häufiger ein direkter Einfluss solcher Zyklonen auf Europa wahrscheinlich wird.

2.5 Direkte Auswirkungen während der außertropischen Umwandlung

Die direkten Auswirkungen der Umwandlung sind charakterisiert durch eine Gefährdung aufgrund von hohen Windgeschwindigkeiten, starkem Niederschlag und hohem Seegang in der unmittelbaren Umgebung des Sturms. Das Windfeld verbreitert sich während der Umwandlung und wird zunehmend asymmetrisch. Dadurch ändert sich der durch hohe Windgeschwindigkeiten gefährdete Bereich. Häufig befindet sich dieses Gebiet rechts der Zugbahn des Sturms, was näherungsweise mit der Überlagerung der Primärzirkulation mit der Translationsgeschwindigkeit des Sturms erklärt werden kann. Jedoch besteht auch hier eine große Variabilität von Fall zu Fall und Gefährdungsregionen links der Zugbahn sind keine Seltenheit. Es ist bereits klar, dass diese Unterschiede in der Windverteilung an die Zyklondynamik gekoppelt sind, ein grundlegendes Verständnis der Prozesse, welche die Variabilität von Fall zu Fall erklären können, steht allerdings noch aus. Ein solches Verständnis ist wichtig, um parametrische Windmodelle für die

Risikomodellierung zu verbessern. Die Entwicklung des Windfelds spielt auch eine maßgebliche Rolle in der Anregung hoher Ozeanwellen und potentieller Sturmfluten (EVANS et al. 2017).

Die Änderungen in der Verteilung des Starkniederschlags während der Umwandlung sind besser verstanden als die Änderungen in der Windverteilung. Zu Beginn wird die Verlagerung des stärksten Niederschlags durch die verstärkte vertikale Windscherung bestimmt: der stärkste Niederschlag verlagert sich in Richtung des Schervektors und radial nach außen. Die weitere Entwicklung hängt von der relativen Lage zum Trog stromaufwärts ab. Ist diese Lage günstig für die Entwicklung eines außertropischen Tiefs (siehe oben) so verlagert sich der stärkste Niederschlag in der Regel in Richtung des Trogs, also links der Zugbahn in der Nordhemisphäre. Für ungünstige Verhältnisse hingegen verbleibt der stärkste Niederschlag in der Regel in Richtung des Schervektors, häufig rechts der Zugbahn in der Nordhemisphäre. Zusätzlich wird die Niederschlagsverteilung noch durch Wechselwirkung mit der Orografie beeinflusst. Besonders intensive Niederschläge können zudem etwa 500 bis 2000 km polwärts des tropischen Wirbelsturms auftreten und stehen im Zusammenhang mit großskaligem Wasserdampftransport. Dabei trifft feuchte Luft, die an der Ostseite des Wirbelsturms polwärts transportiert wird, auf eine Luftmassengrenze. Dies kann in einem begrenzten Gebiet über mehrere Tage zu starkem Niederschlag und entsprechend hohen Niederschlagssummen führen. Dieses Phänomen wird als *predecessor rain event* bezeichnet (GALARNEAU et al. 2010) und kann auf die weitere Entwicklung der außertropischen Umwandlung rückkoppeln.

Die Vorhersage dieser Wettergefahren ist mit größerer Unsicherheit belastet als die entsprechenden Vorhersagen für rein tropische Wirbelstürme. Wie oben angesprochen, ist dies darauf zurückzuführen, dass die Zyklonenentwicklung hochsensitiv von der Lage relativ zum Trog stromaufwärts abhängen. Insbesondere die hohe Sensitivität der Zugbahn lässt sich durch die Existenz von Bifurkationspunkten eindrucksvoll veranschaulichen (beispielsweise Abbildung 6 in KELLER et al. 2019). Darüber hinaus tendieren numerische Vorhersagemodelle dazu, den warmen Kern der Zyklone während der Umwandlung nicht stark genug abzuschwächen, das heißt die Umwandlung setzt in den Modellen tendenziell zu spät ein und die Intensität der Zyklone wird überschätzt.

3 Einfluss auf die Strömung der mittleren Breiten

Wie eingangs erwähnt, beeinflusst eine außertropische Umwandlung die mittleren Breiten auch in stromab gelegenen Regionen. Dieser Einfluss nimmt seinen Ausgang in Veränderungen des Jetstreams in der direkten Umgebung der sich umwandelnden Zyklone. Von dort breitet er sich stromabwärts aus. Abbildung 8-2a gibt einen Über-

blick über die daran maßgeblich beteiligten synoptischen Systeme und Prozesse.

Es stellt sich dabei als günstig heraus, den Einfluss aus der PV-Perspektive zu betrachten (AGUSTI-PANAREDA et al. 2004; Beitrag 6 in diesem Heft). Der hochreichende, diabatisch erzeugte positive¹ PV-Kern des tropischen Wirbelsturms, diabatisch erzeugte positive PV-Anomalien entlang der sich entwickelnden Warmfront, sowie die bodennahe Warmanomalie sind dabei mit der zyklonalen Zirkulation der Zyklone verbunden. Die in der Höhe aus dem Sturm ausströmende Luft bedingt eine negative PV-Anomalie und damit eine antizyklonale Zirkulation (vgl. Abbildung 8-2b,c). Der Jetstream der mittleren Breiten verläuft entlang eines scharfen PV-Gradienten, der die dynamische Tropopause markiert; Tröge und Rücken manifestieren sich als positive bzw. negative PV-Anomalien.

3.1 Wechselwirkung mit dem Jetstream

Die Umwandlung eines tropischen Wirbelsturms ist geprägt durch die Wechselwirkung mit dem Jetstream und der baroklinen Zone der mittleren Breiten. Der bedeutendste Einfluss wird dabei durch die Auslenkung des Jetstreams vermittelt (Abbildungen 8-1d, 8-2a). Er nimmt seinen Anfang mit der Ausbildung eines markanten Rückens in der oberen Troposphäre unmittelbar stromab des sich umwandelnden tropischen Wirbelsturms: Als Netto-Effekt des Freiwerdens latenter Wärme im tropischen Wirbelsturm kommt es oberhalb des Heizmaximums zum Ausströmen von Luft mit relativ niedriger PV, die Tropopause wird angehoben und die negative PV-Anomalie im Bereich der ausströmenden Luft bildet sich aus. Im weiteren Verlauf verstärkt negative PV-Advektion den Rücken weiter. Diese negative PV-Advektion resultiert aus dem Zusammenspiel der antizyklonalen Zirkulation in der oberen Troposphäre, des divergenten Ausströmens und der zyklonalen Sturmzirkulation aufgrund der positiven PV-Anomalie. Das divergente Ausströmen stellt dabei den größten Einzelanteil (Abbildung 8-2b,c). Gleichzeitig zur Rückenbildung verstärkt sich der PV-Gradient nahe der Tropopause und es bildet sich ein Maximum der Windgeschwindigkeit des Jetstreams aus.

Das Freiwerden latenter Wärme, das für die Rückenbildung wie auch für die lokale Verstärkung des Jetstreams mit einer entscheidenden Rolle spielt, erfährt im Verlauf der außertropischen Umwandlung wichtige systematische Veränderungen: Findet es zu Beginn noch maßgeblich in der Konvektion im Zentrum des tropischen Wirbelsturms statt, so verlagert es sich allmählich zum Aufgleiten feuchter Luftmassen entlang der baroklinen Zone im sich entwickelnden Warmsektor und schließlich in den daraus resultierenden *warm conveyor belt* (Abbildung 8-2d,e; Beitrag 7). Diese strukturellen Änderungen der Zyklone spielen daher auch eine wichtige Rolle für den Einfluss auf den Jetstream während der Umwandlung.

¹ Im Folgenden wird die auf der Nordhalbkugel gültige Vorzeichenkonvention verwendet.

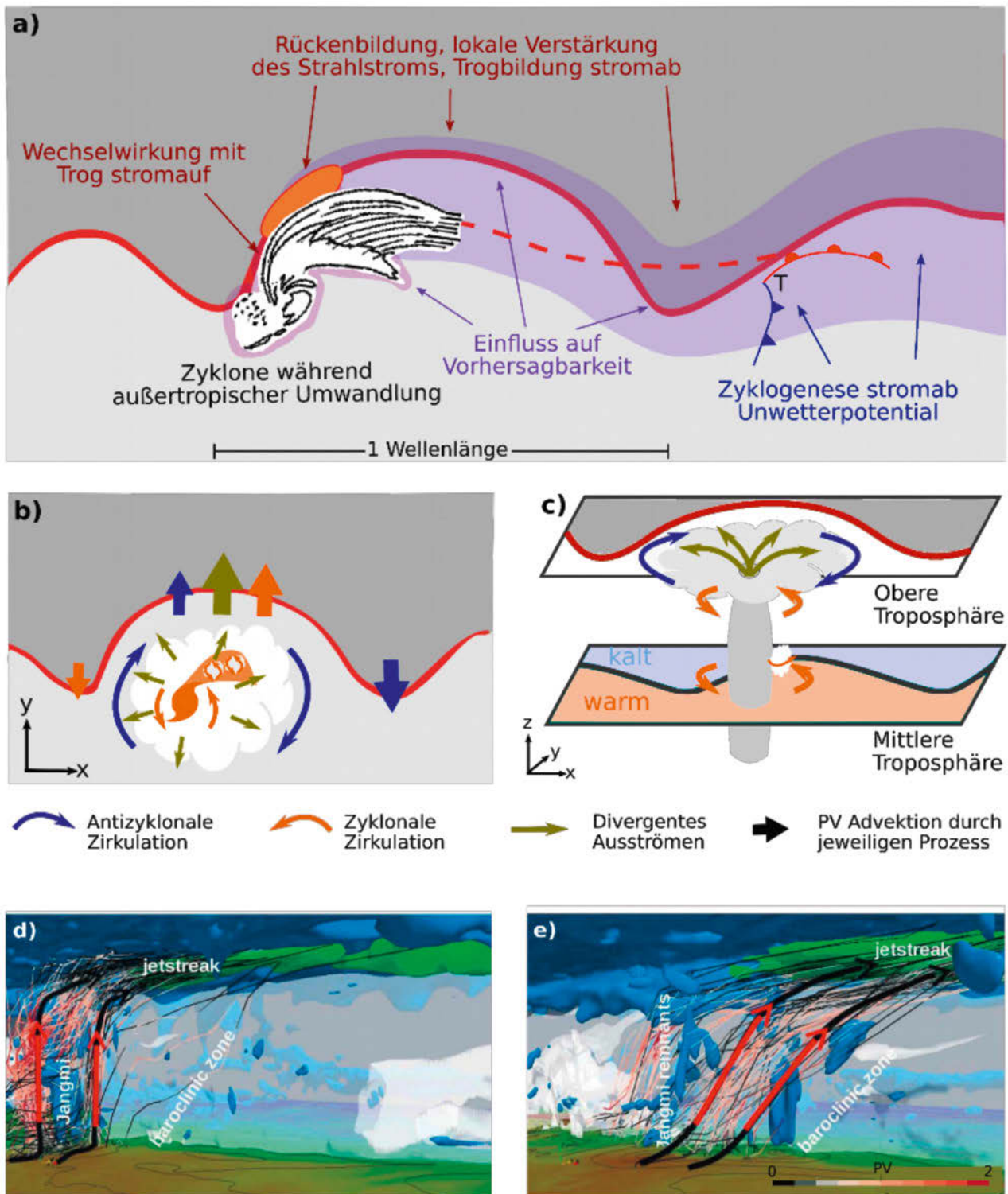


Abb. 8-2 (a): Schematische Darstellung der an der außertropischen Umwandlung beteiligten synoptischen Systeme und Prozesse. Der sich umwandelnde tropische Wirbelsturm ist als schwarz-weiße Wolkenstruktur symbolisiert. Die rote Kontur markiert die ungefähre Lage des Jetstreams auf einem isentropen Level und trennt stratosphärische Luft mit hoher PV im Norden von troposphärischer Luft mit niedriger PV im Süden. Die Auslenkung der Kontur symbolisiert das Rossby-Wellenmuster mit einem alternativen Szenario als gestrichelte Linie und dem Unsicherheitsbereich in violett (Abb. 2 aus KELLER et al. 2019). (b): Details zur Rückenbildung in PV-Sicht. Wie in (a), markiert die rote Kontur die Lage des Jetstreams. Blaue und orangefarbige Vektoren zeigen die Fernwirkung der balancierten Antizyklone im Ausströmbereich des tropischen Wirbelsturms (negative PV-Anomalie) bzw. des zyklonalen Kerns im Zentrum des Wirbelsturms (positive PV-Anomalie) auf die Amplifizierung des Rossby-Wellenmusters. Der grüne Pfeil markiert die Wirkung des divergenten Ausströmens, das hauptsächlich mit latentem Heizen verbunden ist (Abb. 3a aus KELLER et al. 2019). (c): Wie in (b) jedoch als dreidimensionale Darstellung mit zusätzlicher schematischer Darstellung der baroklinen Zone in der mittleren und unteren Troposphäre, die kalte und warme Luftmassen trennt und an der sich neue Konvektion bildet (Abb. 3b aus KELLER et al. 2019). (d),(e): Lagrange'sche Sicht auf die außertropische Umwandlung von Taifun „Jangmi“. Die schwarz-roten Trajektorien aufsteigender Luftpakete zeigen den Übergang von vertikalem, konvektivem Aufsteigen zu schrägem feucht-isentropen Aufgleiten während der außertropischen Umwandlung. Gleichzeitig bildet sich immer wieder positive PV in der unteren und mittleren Troposphäre (blau) und das Maximum des Jetstreams (grün) bleibt erhalten (Abb. 5 aus KELLER et al. 2019).

Auch die Ausprägung der initialen Rückenbildung hängt sensitiv von der relativen Lage des tropischen Wirbelsturms zum stromauf gelegenen Trog ab. Befindet sich die Zyklone während der Umwandlung in einer günstigen Lage vorderseitig des Trogs (siehe oben), so kommt es zu einer besonders starken Rückenbildung – und damit Wellenanregung – am Jetstream. In diesem Fall lässt sich die Wechselwirkung mit einer resonanten Wellenanregung vergleichen. Schon vor dem Beginn der eigentlichen Umwandlung gibt es dabei Prozesse, die die resonante Wechselwirkung begünstigen können, insbesondere eine erste Ausbildung des Rückens verbunden mit dem Freiwerden latenter Wärme während eines *predecessor rain event* oder einer durch Luftmassenadvektion verursachten diabatischen Rossbywelle. Wenn der tropische Wirbelsturm jedoch nicht in eine günstige Phasenlage gelangt, dann schwächt er sich meist rasch ab, ohne dass es zur markanten Rückenbildung kommt.

Die Stärke des Jetstreams spielt für die initiale Rückenbildung ebenfalls eine wichtige Rolle. Ein eher schwach ausgeprägter Jetstream erfährt oftmals eine stärkere meridionale Auslenkung als ein starker Jetstream. Ein starker Jetstream kann die Rückenbildung unterdrücken, indem er die ausströmende Luft des tropischen Wirbelsturms in der oberen Troposphäre fortlaufend stromab transportiert, ohne dass diese sich als negative PV-Anomalie akkumulieren und zur Rückenbildung führen kann.

3.2 Ausbreitung des Einflusses stromab

Insgesamt entspricht die Auslenkung des initialen Rückens der Anregung eines Rossby-Wellenpakets (Abbildung 8-1d), also eines transienten, synoptisch-skaligen Wellenzuges (WIRTH et al. 2018). An der Ostflanke des initialen Rückens transportiert die mit der negativen PV-Anomalie verbundene antizyklonale Zirkulation Luft mit hoher PV äquatorwärts (blauer Pfeil in Abbildung 8-2b,c), wodurch stromab ein neuer Trog entsteht. Kommt es stromab des neuen Trogs zur Zyklogenese, so trägt sie zur weiteren Verstärkung dieses Trogs bei. Unterstützt durch diese feucht-barokline Entwicklung breitet sich das Wellenpaket entlang des PV-Gradienten stromabwärts aus (KELLER et al. 2019). Das Vorhandensein von Feuchte im Bereich des sich umwandelnden Sturms und in der Region stromab beeinflusst die Entwicklung des Wellenpakets dabei beträchtlich: Das Freiwerden latenter Wärme und die damit verbundene Erzeugung von PV-Anomalien führt zu einer diabatischen Verstärkung der baroklinen Entwicklung des Wellenpakets.

Die neu entstehenden Tröge begünstigen somit fernab der eigentlichen außertropischen Umwandlung die Entwicklung außertropischer Tiefdruckgebiete und verstärken damit auch das Unwetterpotential. Existiert ein Wellenpaket bereits vor der Umwandlung, so führt die hier beschriebene Wechselwirkung oftmals zu einer Veränderung der Amplitude und Ausbreitungsgeschwindigkeit des Wellenpakets. Im Falle eines bereits sehr stark ampli-

fizierten Wellenpakets kann es im Zuge der Wechselwirkung auch zu einem Wellenbrechen kommen (Abbildung 8-1e,f).

Die Intensität und Größe des tropischen Wirbelsturms zu Beginn der Umwandlung sind nur von sekundärer Bedeutung für den Einfluss auf den Jetstream. Wenn jedoch die relative Position des Sturms, die Stärke des Jetstreams und die verfügbare Feuchte die Entwicklung eines Wellenpakets begünstigen, so führt eine stärkere und größere Zyklone zu stärkerer Rückenbildung.

3.3 Klimatologisches Signal des Einflusses

Ein Zusammenhang zwischen der Wechselwirkung eines sich umwandelnden tropischen Wirbelsturms mit dem Jetstream der mittleren Breiten und der daraus folgenden Veränderung von Rossby-Wellenpaketen zeigt sich auch aus klimatologischer Perspektive. Im Vergleich zum klimatologischen Auftreten ist im Falle einer außertropischen Umwandlung die Auftrittshäufigkeit von Rossby-Wellenpaketen im westlichen Nordpazifik um 15 % und im südlichen Indischen Ozean um 18 % erhöht. Zudem ist die Amplitude der Wellenpakete vergleichsweise stärker. Interessanterweise wurde für den Nordatlantik bislang keine eindeutige Änderung in den Eigenschaften von Rossby-Wellenpaketen stromab der Umwandlung identifiziert. Dies mag damit zusammenhängen, dass der Jetstream in diesem Bereich (klimatologisch betrachtet) eher kurz und schwach ist. Dadurch wird er möglicherweise während einer außertropischen Umwandlung stärker ausgelenkt und es kommt häufiger zum Rossby-Wellenbrechen – ein Zusammenhang, der bislang jedoch noch nicht im Detail untersucht wurde.

4 Konsequenzen in den mittleren Breiten stromab der außertropischen Umwandlung

4.1 Auftreten von Unwettern

Immer wieder kommt es stromab einer außertropischen Umwandlung zum Auftreten von Unwettern oder anderen signifikanten Wetterereignissen. Die Veränderung des Jetstreams der mittleren Breiten durch den sich umwandelnden tropischen Wirbelsturm scheint dabei einen wesentlichen Beitrag zur Ausprägung dieser Wetterereignisse zu leisten. Basierend auf Modellexperimenten zu einzelnen Fällen, in denen die Entwicklung mit und ohne den tropischen Wirbelsturm simuliert wurde, konnte dieser Zusammenhang grundsätzlich bestätigt werden. Jedoch besteht auch hier von Fall zu Fall eine große Variabilität in der beobachteten Entwicklung. Eine klimatologische Betrachtung wurde bisher nur für das Auftreten von Starkniederschlägen stromab von außertropischer Umwandlung im Nordatlantik untersucht (POHORSKY et al. 2019).

Die im Zusammenhang einer Umwandlung stromab auftretenden Wetterereignisse unterscheiden sich von Region

zu Region. Im südlichen Indischen Ozean tritt oftmals eine Hitzewelle im westlichen Australien auf, die sich unterhalb des stark amplifizierten Rückens direkt stromab des tropischen Wirbelsturms bildet. Im Nordpazifik entstehen typischerweise relativ langlebige Rossby-Wellenpakete, die sich bis nach Nordamerika ausbreiten. Je nach Lage der Höhenträge und -rücken kommt es dabei zur Ausbildung von Hitzewellen, Kaltluftausbrüchen und Starkniederschlägen im Zusammenhang mit sich stromab entwickelnden Zyklonen. Stromab des Taifuns „Choi-Wan“ (2009) trat zum Beispiel entlang der Westküste Nordamerikas eine Hitzewelle auf, in der Mitte und im Osten des Kontinents kam es dagegen zu einem Kaltluftausbruch und Starkniederschlägen und in Alaska wurden ebenfalls Starkniederschläge registriert.

Im Nordatlantik kommt es stromab einer außertropischen Umwandlung dagegen häufig zu Wellenbrechen und der Ausbildung eines „PV-Streamers“, der in Europa für die Entwicklung von Starkniederschlägen und schweren Gewittern sorgen kann. Ein aktuelles Beispiel hierfür ist die Entwicklung eines Höhentiefs stromab von Hurrikan „Dorian“ (2019), welches Extremniederschläge in Spanien verursachte (Abbildung 8-1e,f). Möglich ist aber auch im Nordatlantik die Ausbildung starker Hochdruckkeile, die Hitzewellen und den Transport von Saharaluft nach Europa begünstigen. Anhand weiterer Fallstudien wurde auch ein Zusammenhang zwischen einer außertropischen Umwandlung und einer Zyklonogenese im Mittelmeerraum nachgewiesen. Neben diesem mittelbaren Einfluss erreicht im Nordatlantik auch öfters ein ehemals tropischer Wirbelsturm als außertropisches Tief Europa, mit zum Teil orkanartigen Windgeschwindigkeiten und dem Potenzial für Starkniederschläge. Als Beispiel sei hier Ex-Hurrikan „Ophelia“ genannt, der im Oktober 2017 als Orkan über Großbritannien und Irland hinweg zog und drei Todesopfer forderte. Gleichzeitig brachte aber die Ausbildung eines Hochdruckkeils dem europäischen Festland ein paar Tage spätsommerliches Wetter.

4.2 Verringerung der Vorhersagbarkeit

Die Entwicklung stromab einer außertropischen Umwandlung ist oftmals begleitet von einer Zunahme der Vorhersageunsicherheit. Die Umwandlung unterbricht häufig den erwarteten Lebenszyklus von Trögen und Rücken und damit die gewöhnliche Entwicklung der außertropischen Strömung. Insbesondere in der Mittelfristvorhersage (Wetterprognose für die nächsten 3–10 Tage), ist die Interpretation der Entwicklung erschwert, da Erfahrungswerte von gewöhnlichen außertropischen Entwicklungen nur bedingt für die Erstellung der Vorhersage nutzbar sind. Erfahrungen aus der operationellen Vorhersage zeigen, dass die numerischen Wettervorhersagemodelle insbesondere mit der korrekten Wiedergabe des Zeitpunkts und der Art der Kopplung des tropischen Wirbelsturms mit der Strömung der mittleren Breiten Schwierigkeiten haben, sowie mit der daraus resultierenden Ausprägung des Hochdruckkeils. Hat die Kopplung stattgefunden, nimmt die Verläss-

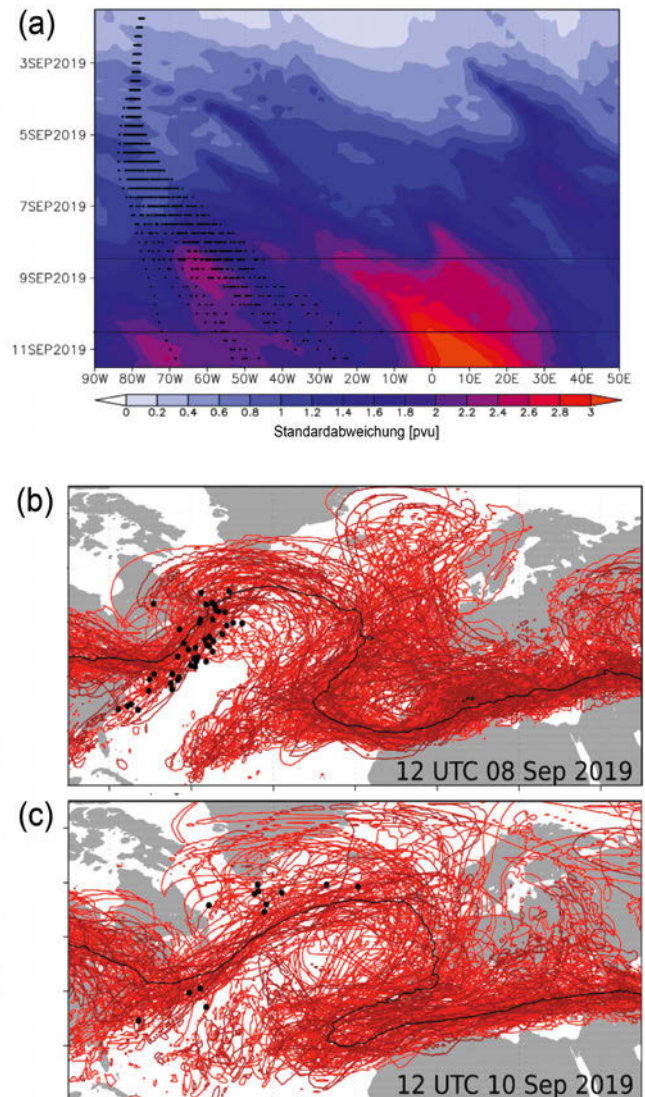


Abb. 8-3: Entwicklung der Vorhersageunsicherheit während der außertropischen Umwandlung von Hurrikan „Dorian“ im September 2019. (a): Entwicklung der Standardabweichung der PV auf dem 340 K isentropen Level in der operationellen EZMW-Ensemblevorhersage von 12 UTC am 1. September 2019. (b), (c): Lage der Rossby-Wellen in einzelnen Ensemble-Mitgliedern dargestellt mittels der 2 PVU Kontur auf 340 K in allen Mitgliedern (rot) und Ensemble-Mittel (schwarz) der EZMW-Ensemblevorhersage von 12 UTC am 1. September 2019 für 8. September, 12 UTC (+168h, b, wie Abb. 8-1d) und 10. September, 00 UTC (+216 h, c, wie Abb. 8-1e). Die schwarzen Punkte in (a)-(c) zeigen die Position von Hurrikan „Dorian“ zum jeweiligen Vorhersageschritt in den Ensemble-Mitgliedern. Daten aus der operationellen Vorhersage des EZMW (für (a)), sowie dem „The Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE)“ Archiv (Track-Information und Daten für (b),(c)).

lichkeit der Vorhersagen wieder zu. Die eigentliche Entwicklung der Wechselwirkung und zum Beispiel auch die Zufuhr tropischer und subtropischer Luftmassen, scheinen von den Modellen bereits recht gut erfasst zu werden. Um die Bandbreite von möglichen Entwicklungen und die damit verbundene Unsicherheit aufzuzeigen, haben sich insbesondere Ensemblevorhersagen als ein wichtiges Hilfsmittel für die Mittelfristvorhersage etabliert (Abbildung 8-3).

Die Vorhersageunsicherheit zeigt sich zunächst im Bereich der direkten Wechselwirkung des tropischen Wirbelsturms mit dem Jetstream und der ersten Rückenaufwölbung (Abbildung 8-3a). Von dort aus breitet sich die Unsicherheit entlang des Jetstreams in stromab gelegene Regionen aus (ANWENDER et al. 2008) und führt zu teils beträchtlich unterschiedlichen Szenarien für die Lage von Trögen und Rücken stromab. Im Fall von „Dorian“ trat stromab erhöhte Unsicherheit beim Brechen der Rossbywelle auf (Abbildung 8-3b,c). Die Unsicherheit kann dabei durch nichtlineare Prozesse, wie beispielsweise die Zyklonogenese außertropischer Tiefs, weiter verstärkt werden. Wie oben gezeigt, lässt sich die Vorhersageunsicherheit auf die starke Sensitivität der Entwicklung bezüglich der relativen Lage des sich umwandelnden tropischen Wirbelsturms zum stromauf liegenden Trog zurückführen. Eine weitere bedeutende Quelle der Vorhersageunsicherheit liegt in der fehlerbehafteten Wiedergabe der diabatischen Prozesse in den numerischen Wettervorhersagemodellen (KELLER et al. 2019). Dadurch wird der Einfluss dieser Prozesse, insbesondere der des Freiwerdens latenter Wärme, auf die Ausbreitung und Amplifizierung des Rossby-Wellenpakets nicht korrekt wiedergegeben und es kommt zu Phasen- und Amplitudenfehlern in der Vorhersage des Wellenpakets und den damit verbundenen Wettererscheinungen. Es ist zu erwarten, dass eine verbesserte Modellierung der diabatischen Prozesse und eine weiter verbesserte Beobachtungslage zu einer Reduktion der mit einer außertropischen Umwandlung verbundenen Vorhersageunsicherheit führt.

Statistisch betrachtet zeigt sich eine Zunahme der Vorhersageunsicherheit stromab einer außertropischen Umwandlung im Nordatlantik, Nordpazifik und im südlichen Indischen Ozean. Die maximale Unsicherheit tritt dabei etwa zwei bis drei Tage nach der abgeschlossenen Umwandlung auf und hat sich nach weiteren ca. drei Tagen wieder auf das normale Niveau abgesenkt. Anhand von Fallstudien konnte gezeigt werden, dass die Zunahme in der Vorhersageunsicherheit zu einer Reduktion der Vorhersagbarkeit um etwa zwei Tage führt. Je näher der Initialisierungszeitpunkt der Modellvorhersage am Zeitpunkt der außertropischen Umwandlung bzw. der Wechselwirkung mit der Strömung der mittleren Breiten liegt, desto geringer wird die Vorhersageunsicherheit.

Danksagung

Die Autoren danken Michael Denhard für die Begutachtung einer früheren Version des Artikels sowie Christian Herold und Helge Tuschy von der Vorhersage- und Beratungszentrale des DWD für die Einblicke in die Herausforderungen der operationellen Vorhersage während einer außertropischen Umwandlung.

Literatur

- AGUSTI-PANAREDA, A., THORNCROFT, C.D., CRAIG, G.C., GRAY, S.L., 2004: The extratropical transition of hurricane Irene (1999): A potential-vorticity perspective. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **130**, 1047-1074, doi: 10.1256/qj.02.140.
- ANWENDER, D., HARR, P.A., JONES, S.C., 2008: Predictability Associated with the Downstream Impacts of the Extratropical Transition of Tropical Cyclones: Case Studies. *Mon. Wea. Rev.* **136**, 3226-3247, doi: 10.1175/2008MWR2249.1.
- EVANS, C. et al., 2017: The Extratropical Transition of Tropical Cyclones. Part I: Cyclone Evolution and Direct Impacts. *Mon. Wea. Rev.* **145**, 4317-4344, doi:10.1175/MWR-D-17-0027.1.
- GALARNEAU, T.J., BOSART, L.F., SCHUMACHER, R.S., 2010: Predecessor Rain Events ahead of Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.* **138**, 3272-3297, doi: 10.1175/2010MWR3243.1.
- HART, R.E., 2003: A Cyclone Phase Space Derived from Thermal Wind and Thermal Asymmetry. *Mon. Wea. Rev.* **131**, 585-616, doi: 10.1175/1520-0493(2003)131<0585:ACPSDF>2.0.CO;2.
- KELLER, J.H. et al., 2019: The Extratropical Transition of Tropical Cyclones. Part II: Interaction with the Mid-latitude Flow, Downstream Impacts, and Implications for Predictability. *Mon. Wea. Rev.* **147**, 1077-1106, doi: 10.1175/MWR-D-17-0329.1.
- KELLER, J.H., JONES, S.C., HARR, P.A., 2014: An Eddy Kinetic Energy View of Physical and Dynamical Processes in Distinct Forecast Scenarios for the Extratropical Transition of Two Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.* **142**, 2751-2771, doi: 10.1175/MWR-D-13-00219.1.
- KLEIN, P.M., HARR, P.A., ELSBERRY, R.L., 2000: Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: An overview and conceptual model of the transformation stage. *Weather and forecasting* **15**, 373-395.
- KNAPP, K.R. et al., 2011: Globally Gridded Satellite Observations for Climate Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **92**, 893-907, doi: 10.1175/2011BAMS3039.1.
- POHORSKY, R., RÖTHLISBERGER, M., GRAMS, C.M., RIBOLDI, J., MARTIUS, O., 2019: The Climatological Impact of Recurring North Atlantic Tropical Cyclones on Downstream Extreme Precipitation Events. *Mon. Wea. Rev.* **147**, 1513-1532, doi: 10.1175/MWR-D-18-0195.1.
- RITCHIE, E.A., ELSBERRY, R.L., 2007: Simulations of the Extratropical Transition of Tropical Cyclones: Phasing between the Upper-Level Trough and Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.* **135**, 862-876, doi:10.1175/MWR3303.1.
- WIRTH, V., RIEMER, M., CHANG, E.K., MARTIUS, O., 2018. Rossby wave packets on the midlatitude waveguide – A review. *Mon. Wea. Rev.* **146**, 1965-2001, doi: 10.1175/MWR-D-16-0483.1.

Autorin/Autoren

PRIV.-DOZ. DR. HABIL. MICHAEL RIEMER
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Institut für Physik der Atmosphäre
Becherweg 21
55128 Mainz
mriemer@uni-mainz.de

DR. CHRISTIAN M. GRAMS
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Department Troposphärenforschung (IMK-TRO)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
grams@kit.edu

DR. JULIA KELLER
Deutscher Wetterdienst
Forschung und Entwicklung – Planung und Koordinierung
Strahlenberger Straße 17, Haus C
63067 Offenbach am Main
Julia.Keller@dwd.de

Zyklonen früher und in Zukunft

C. C. RAIBLE, P. LUDWIG, M. MESSMER

9 Zyklonen und Paläoklima

Cyclones and Paleoclimate

Zusammenfassung

Die Betrachtung der vergangenen Klimaentwicklungen stellt eine wichtige Quelle für das Verständnis des Klimasystems dar. Der vorliegende Beitrag behandelt anhand von zwei Beispielperioden – dem letzten Millennium und dem letzten glazialen Maximum (LGM) vor etwa 21.000 Jahren – wie sich außertropische Zyklonen und deren Charakteristiken verändert haben. Dabei wird unter anderem auch die Frage diskutiert, welche Schlüsse aus dem vergangenen Verhalten für die heutigen und zukünftigen Zyklonen über Europa abgeleitet werden können. Basis des Beitrags sind Klimamodellsimulationen auf globaler und regionaler Skala. Das Hauptaugenmerk der Analyse liegt dabei auf dem Niederschlag. Für beide Perioden zeigt sich, dass für das unterschiedliche Verhalten der Zyklonen neben thermodynamischen Prozessen auch dynamische Veränderungen eine wichtige Rolle spielen. Der Beitrag verdeutlicht, wie paläoklimatische Betrachtungen dazu beitragen, das Verständnis von Prozessen im Klimasystem zu verbessern.

Summary

Considering the past climate evolution is an important source for understanding the climate system. By means of two example periods – the last millennium and the last glacial maximum (LGM) about 21,000 years ago – this contribution shows how extratropical cyclones and their characteristics have changed. Further, we discuss which conclusions can be derived from past behavior for today's and the future cyclone evolution over Europe. The contribution is based on climate model simulations both on global and regional scales. The focus of the analysis is on precipitation. For both periods, we find that in addition to the expected thermodynamic processes, dynamic changes also play an important role in the precipitation behavior of cyclones over Europe. The contribution demonstrates how a paleo-climatic view can foster an extended process understanding.

1 Einleitung

Außertropische Zyklonen sind ein fundamentales Phänomen der täglichen Wettervariabilität. Sie tragen primär zum Energietransport zwischen Tropen und polaren Regionen bei und sind mit zyklonalen Wetterlagen verbunden. Da die Temperaturkontraste zwischen den Tropen und den polaren Regionen im Winter am stärksten sind, dominieren in dieser Jahreszeit zyklonale Wetterlagen und die Zyklonen sind dann am deutlichsten ausgeprägt. Insbesondere extreme Stürme im Winter haben schon seit jeher die Menschheit und deren Lebensraum beeinflusst. Chroniken aus dem Mittelalter belegen, dass extreme Stürme zu katastrophalen Sturmfluten in der Nordsee geführt haben und

die Küstenlandschaft nachhaltig veränderten. Insbesondere die erste und zweite „Grote Mandränke“ (plattdeutsch für „große Mantränke/großes Ertrinken“) von 1362 und 1634 haben zur Bildung der Nordfriesischen Inseln beigetragen. Die Auswirkungen auf die Gesellschaft waren verheerend. Ein Blick in die weiter zurückliegende Vergangenheit kann daher nicht nur die Bandbreite möglicher Sturmextreme erweitern, sondern bietet auch die Möglichkeit, Reaktionen der Gesellschaft auf klimatische Veränderungen zu untersuchen (CAMENISCH et al. 2016). Darüber hinaus hilft eine paläoklimatische Betrachtungsweise außertropischer Zyklonen, die natürlichen Klimaschwankungen zu beschreiben und liefert somit die Grundlage, den Effekt des menschengemachten Klimawandels abzuschätzen. Vergan-

gene Extremereignisse können zudem zu einem vertieften Prozessverständnis beitragen, da mithilfe von Datenreihen, die weit in die Vergangenheit reichen, die Anzahl seltener Extremereignisse vergrößert werden kann. Mit diesem Vorgehen können zudem auch Prozesse, die bei der Entstehung der Extremereignisse eine wichtige Rolle spielen, besser identifiziert werden.

Eine wichtige Quelle zur Abschätzung vergangener Klimaschwankungen, und damit auch der Sturmvariabilität, liefern natürliche und menschliche Archive, wie Baumringe, Tropfsteine, Sedimente oder historische Aufzeichnungen. Enthalten diese Archive klimarelevante Aufzeichnungen oder sind sie klimasensitiv (zum Beispiel temperatursensitiv), so lassen sich daraus indirekte Anzeiger, sogenannte „Klimaproxys“, ableiten, die mithilfe von Transferfunktionen auf Klimavariablen wie die Temperatur oder Niederschlag übertragen werden können. Bis auf historische Dokumente, die durchaus tägliche Auflösung haben können, leiden die Klimaproxys unter einer nicht ausreichenden zeitlichen Auflösung, um Stürme zu erfassen. Auch die spärliche räumliche Auflösung der Proxydaten lässt nur bedingt Aussagen über vergangene Sturmaktivität zu. Nichtsdestotrotz legen einige Archive nahe, dass in der sogenannten kleinen Eiszeit (etwa vom 14. bis zum 19. Jahrhundert) die Sturmaktivität erhöht war (z. B. DE JONG et al. 2007; DEGEAI et al. 2015).

Eine weitere Möglichkeit, Aussagen über die Statistik des Auftretens von Stürmen und deren Extreme in der Vergangenheit zu machen, sind globale und regionale Klimamodellstudien (RAIBLE et al. 2007, 2018; HOFER et al. 2012a, b; LUDWIG et al. 2017, 2019; PINTO und LUDWIG 2020). Der klare Vorteil gegenüber Proxydaten liegt in der räumlichen und zeitlichen Auflösung. Darüber hinaus können die Einflüsse externer Antriebe separat analysiert werden. So zeigt beispielsweise die Studie von RAIBLE et al. (2007), dass die Sturmintensität (bezogen auf Wind) über Europa in der kalten Phase des Maunder Minimums (etwa von 1645 bis 1715 n. Chr.), das sich durch ein Minimum der Sonnenaktivität und verstärkte Vulkanaktivität auszeichnet, im Vergleich zu heute erhöht ist. In diesen Modellsimulationen wurden aber gleichzeitig weniger Stürme in Europa während dieser kalten Periode identifiziert. Neuere Studien mit räumlich höher aufgelösten Modellen bestätigen die Resultate von RAIBLE et al. (2007) nur bedingt (RAIBLE et al. 2018), was einen Hinweis auf die Modellsicherheit liefert.

Auch die Auswirkungen der Stürme auf den Niederschlag werfen bei der Betrachtung des letzten Millenniums Fragen auf. Klimaproxys zeigen erhöhte Niederschlagsextreme in kalten Perioden der Vergangenheit (AMANN et al. 2015; WETTER 2012). Dies steht augenscheinlich im Kontrast zu der Theorie, dass eine Abkühlung zu einer Abnahme von Niederschlagsextremen aufgrund der Clausius-Clapeyron-Gleichung führt. Auch hier können Klimasimulationen bei der Interpretation von Klimaproxys helfen und die genannte Diskrepanz lösen (RAIBLE et al. 2018). Dies wird ausführlich in Abschnitt 3 behandelt.

Neben der Betrachtung des letzten Millenniums liefert die Analyse von stark veränderten Klimazuständen wie zum Beispiel das Maximum der letzten großen Eiszeit (in der Fachliteratur das „letzte glaziale Maximum“, kurz LGM, genannt) ein vertieftes Prozessverständnis. Die maximale Ausdehnung der Eisschilde während der letzten Eiszeit auf der Nordhemisphäre wird aus Proxydaten auf ungefähr 21.000 v. Chr. datiert. Die Temperatur der Atmosphäre an der Erdoberfläche war damals im globalen Mittel etwa 5,5 °C kälter als heute (OTTO-BLIESNER et al. 2006). Die teils mehrere Kilometer mächtigen Eisschilde über Nordamerika (Laurentidisches Eisschild) und Nordeuropa (Skandinavisches Inlandeis) hatten einen etwa 120 m tieferen Meeresspiegel (PELTIER und FAIRBANKS 2006) zur Folge. Diese Veränderungen haben einen starken Einfluss auf die atmosphärische Zirkulation der mittleren Breiten (KUTZBACH und GUETTER 1986; KAGEYAMA und VALDES 2000; LAINE et al. 2009; PAUSATA et al. 2011; HOFER et al. 2012a, b; MERZ et al. 2015; RIVIÈRE et al. 2018) und spielen auch für die Niederschlagsverteilung über Europa eine wichtige Rolle (LUDWIG et al. 201, 2017), was in Abschnitt 4 weiter thematisiert wird.

Diese Studien geben einen ersten Hinweis darauf, dass sich ein Blick in die Vergangenheit lohnt, um insbesondere Prozesse besser zu verstehen, aber auch um heutige und zukünftige Veränderungen in einen längeren Zusammenhang zu stellen. In den nun folgenden Abschnitten werden zuerst die Methoden und die Datengrundlage vorgestellt, um dann Ergebnisse aus der Literatur für zwei wichtige Perioden der Vergangenheit, das letzte Millennium und das LGM, vorzustellen. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf Stürme im nordatlantischen und europäischen Raum im Winter und deren hydrologischen Auswirkungen gelegt. Der Beitrag endet mit Schlussfolgerungen und Fragestellungen für die Zukunft.

2 Datengrundlage und Methodik

Ausgangspunkt der Betrachtung vergangener Sturmaktivität sind Simulationen mit globalen und regionalen Klimamodellen.

Als Basis für die Analyse der Variabilität außertropischer Zyklonen im letzten Millennium dient eine Simulation mit dem Erdsystemmodell CESM (Community Earth System Model, Version 1.0.1; HURRELL et al. 2013). Das Modell enthält Komponenten für Atmosphäre, Ozean, Land, Meeris und den Kohlenstoffkreislauf und löst die zugrundeliegenden Gleichungen auf einem ungefähr 1° aufgelöstem Gitter. Dabei werden die hier verwendeten Variablen alle zwölf Stunden ausgeschrieben. Die Simulation umfasst die Periode von 850 bis 2100 n. Chr. unter Berücksichtigung der natürlichen Antriebe, wie solare Schwankungen und Vulkanaktivität, sowie der anthropogenen Antriebe (Treibhausgase, Landnutzungsänderungen etc.). Abbildung 9-1a zeigt exemplarisch den kombinierten Strahlungsantrieb aus den Treibhausgasen CO₂, CH₄, N₂O und der Sonnenaktivi-

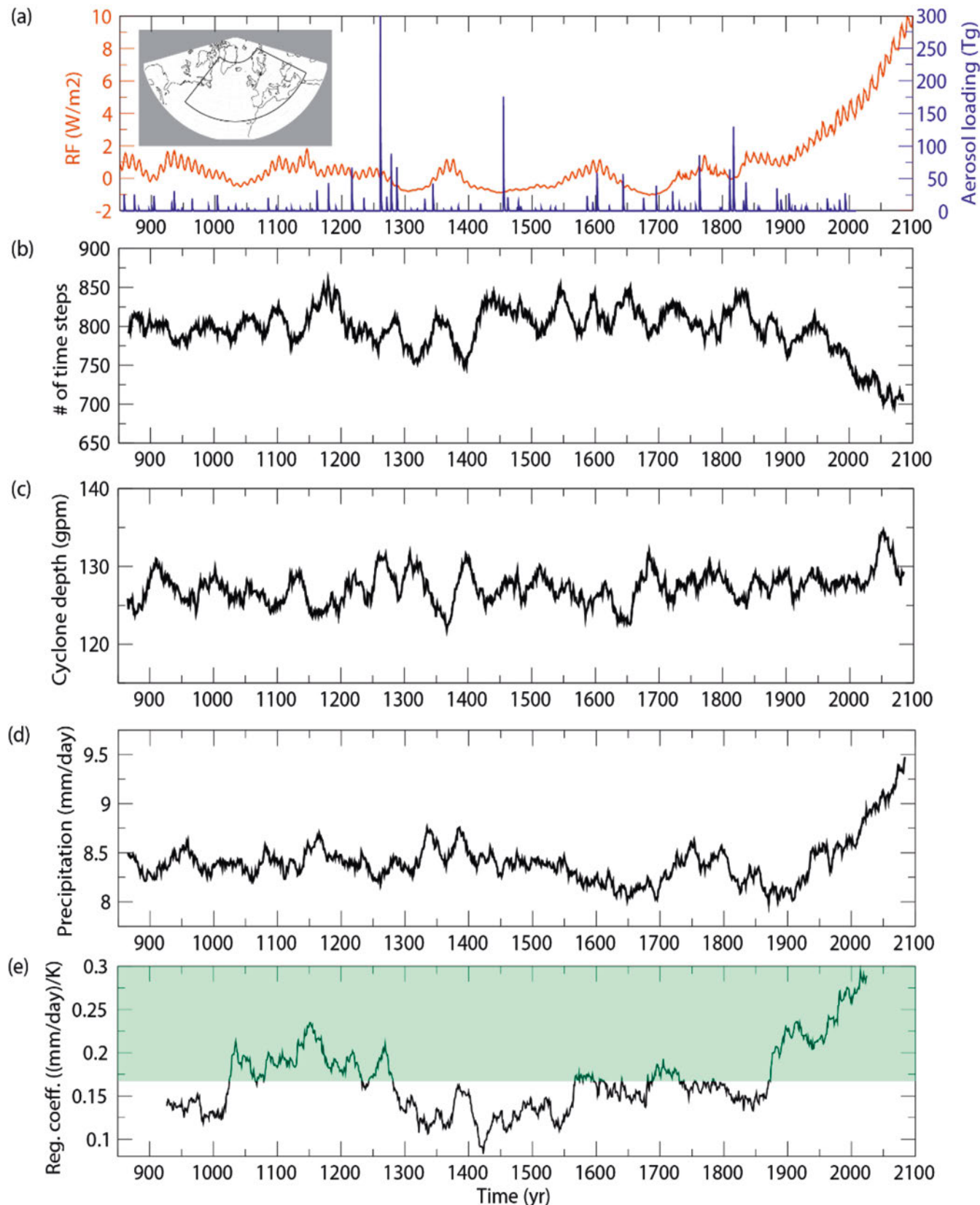


Abb. 9-1: (a) Exemplarische externe Antriebe der Simulation (rot: Summe des Strahlungsantriebs (*radiative forcing*, RF) aus CO_2 , CH_4 , N_2O und der Sonne dargestellt als Änderung zur Periode 1500 bis 1850; blau: vulkanische Aerosolmasse). Zu beachten ist, dass Schwankungen der roten Kurve vor 1850 n. Chr. primär durch die Sonnenaktivität verursacht wurden, während der Trend nach 1850 n. Chr. durch die Treibhausgase verursacht ist. Die Karte zeigt das betrachtete Gebiet, das zur Ableitung der Indizes herangezogen wurde. (b) Anzahl der Zyklonenzeitschritte im Winter (DJF). (c) Extreme Zyklonenvertiefung (90. Perzentil, DJF). (d) Extremer Zyklonen-bezogener Niederschlag (90. Perzentil, DJF). In den Abbildungen (b)-(d) wurde jeweils ein 30-jähriges gleitendes Mittel angewendet. (e) Regressionskoeffizient zwischen der mittleren Zyklonen-bezogenen Temperatur und dem extremen Zyklonen-bezogenen Niederschlag jeweils abgeschätzt für ein 150-jähriges gleitendes Fenster (DJF). Der grüne Bereich zeigt die Dominanz von thermodynamischen Prozessen (Clausius-Clapeyron-Gleichung) an (O’GORMAN und SCHNEIDER 2009). Im weißen Bereich sind dynamische Prozesse relevant.

tät (wobei die Schwankungen vor 1850 n. Chr. primär durch die Sonnenaktivität verursacht wurden und der Trend nach 1850 n. Chr. durch den anthropogenen Treibhausgasanstieg) sowie Vulkaneruptionen. Die Simulation wurde in die Zukunft unter einem Szenario mit hohen Emissionen weitergerechnet, dem RCP8.5 (engl. Abkürzung für *representative concentration pathway*; auf Deutsch „Repräsentativer Konzentrationspfad“). Weitere Details sind in LEHNER et al. (2015) zu finden.

Die Studien zum LGM beruhen auf globalen Modellsimulationen mit einer früheren Version des CESM (CCSM4; HOFER et al. 2012a,b; MERZ et al. 2015). Dabei werden jeweils 30 Jahre einer Simulation des heutigen Klimas und des LGMs genauer analysiert und miteinander verglichen. Bei der ersten Simulation werden insbesondere die Treibhausgaskonzentrationen an die heutige Zeit (1990 n. Chr.) angepasst, während für die LGM-Simulation die orbitalen Parameter, die Treibhausgaskonzentrationen sowie die Eisschilde für die Periode 21.000 Jahre v. Chr. vorgeschrieben werden. Zusätzliche globale Modellsimulationen mit unterschiedlichen Erdsystemmodellen (räumliche Auflösungen von etwa 1° bis 3°) stehen im Rahmen der dritten Phase des Paläoklima-Modellvergleichsprojekts (PMIP3, BRACONNOT et al. 2012) zur Verfügung. Neben globalen Klimamodellen kommen auch regionale Klimamodelle zum Einsatz (LUDWIG et al. 2019).

Regionale Klimamodelle liefern aufgrund ihrer höheren räumlichen Auflösung (50 km anstelle von 150-300 km) detailliertere Informationen über das Wetter und Klimageschehen für eine bestimmte Region. Neben zeitlich hochaufgelösten (6-stündlichen) Antriebsdaten aus globalen Erdsystemmodellen, müssen die Randbedingungen (zum Beispiel Position und Höhe der Eisschilde, geänderte Land-See-Verteilung, Unterschiede bei den orbitalen Parametern, Treibhausgaskonzentrationen) im Modell angepasst werden. Diese Anpassungen wurden für das LGM in das regionale Modell WRF (**W**eather **R**esearch and **F**orecasting Model) eingefügt, um das regionale Klima während des LGMs in Europa genauer zu untersuchen (LUDWIG et al. 2017).

Um außertropische Zyklonen und deren Variabilität in den globalen Simulationen abzuschätzen, wurde eine Identifikations- und Zugbahnbestimmungsmethode verwendet (BLENDER et al. 1997). Die Methode bestimmt lokale Minima im Feld der geopotentiellen Höhe auf 1000 hPa und verknüpft diese Minima in der Zeit mithilfe der Suche nach nächstgelegenen Minima.

Neben den Zugbahnen der Zyklonen können auch andere Charakteristiken, wie der Radius der Zyklonen, die Vertiefungsrate als Unterschied in der geopotentiellen Höhe zwischen dem Zentrum und dem bestimmten Radius, der Kerndruck, der Zyklonen-bezogene Niederschlag oder auch die Zyklonen-bezogene Temperatur bestimmt werden. Die beiden Letzteren werden über die Fläche der Zyklone gemittelt, wobei die Fläche zuvor durch den Radius der Zy-

klonen bestimmt wird. Darüber hinaus bieten diese zusätzlichen Charakteristiken die Möglichkeit, Jahre bzw. Jahreszeiten mit extremeren Zyklonen zu identifizieren. Für die folgenden Beispiele verwenden wir nur jene Zyklonen, die in der jeweiligen Charakteristik größer (zum Beispiel Zyklonen-bezogener Niederschlag) oder kleiner (beispielsweise Kerndruck) als 90 % des Datensatzes im Nordatlantik und in einem Winter sind. Solche Zyklonen, die dieses 90. Perzentil überschreiten, werden im Folgenden als extrem bezeichnet.

3 Variabilität außertropischer Zyklonen von 850 n. Chr. bis 2100 n. Chr. im Winter

In diesem Abschnitt betrachten wir die Variabilität verschiedener Charakteristiken außertropischer Zyklonen im letzten Millennium und untersuchen den Einfluss der externen natürlichen Antriebe. Ein Hauptaugenmerk wird auf dekadische bis multidekadische Schwankungen in der Wintersaison von Dezember bis Februar über Europa und dem Nordatlantik gelegt. Darüber hinaus werden die natürlichen Schwankungen den möglichen menschengemachten Veränderungen seit 1850 n. Chr. und in den nächsten 100 Jahren unter Verwendung des Szenarios RCP8.5 gegenübergestellt.

Um sich einen ersten Überblick über die Variabilität unterschiedlicher Zyklonencharakteristiken zu machen, wurden verschiedene Indizes für den nordatlantischen Raum (Abbildung 9-1a) mithilfe eines 30-jährigen gleitenden Mittels abgeschätzt: die Anzahl der detektierten Zeitschritte mit Zyklonenaktivität (Zyklonenzeitschritte), die extreme Zyklonenvertiefung (90. Perzentil, Definition siehe oben) und der extreme Zyklonen-bezogene Niederschlag (auch 90. Perzentil, Definition siehe oben).

Die Zeitreihen der Indizes zeigen in der Periode von 850 bis 1850 n. Chr., die durch natürliche Schwankungen der externen Antriebe dominiert ist, starke dekadische bis multidekadische Schwankungen (Abbildung 9-1b,c,d). Dabei stellt sich eine erste Frage: Welchen Einfluss haben die natürlichen Antriebe, insbesondere die Sonnenvariabilität aber auch die vulkanischen Eruptionen, die diese Periode dominieren? Ein Vergleich der Antriebe (Abbildung 9-1a) mit den Indizes (Abbildung 9-1b,c,d) zeigt keinen klaren Zusammenhang bis 1850 n. Chr. Eine vertiefende statistische Analyse bestätigt, dass es keinen linearen Zusammenhang zwischen den natürlichen Antrieben und den Charakteristiken der nordatlantischen Zyklonen gibt (daher nicht dargestellt). Dies bedeutet, dass die ausgeprägten dekadischen bis multidekadischen Schwankungen der Indizes (Abbildung 9-1b,c,d) hauptsächlich durch die interne Variabilität des simulierten Klimasystems hervorgerufen werden.

Eine interessante Periode in der Simulation ist das 14. und 15. Jahrhundert, die Teil der Kleinen Eiszeit ist. In dieser relativ kalten Periode zeigt der extreme Zyklonen-bezogene Niederschlag mehrere Phasen mit erhöhten Werten.

Dies ist ungewöhnlich, da aufgrund der relativ kalten Periode thermodynamisch mit einer Abnahme des Niederschlags zu rechnen wäre. Um den Einfluss des thermodynamischen Effekts besser zu analysieren, wurde eine Regressionsanalyse zwischen der mittleren Zyklonen-bezogenen Temperatur und dem extremen Zyklonen-bezogenen Niederschlag für ein 100-jähriges gleitendes Fenster durchgeführt (Abbildung 9-1e). Genau in der Periode des 14. und 15. Jahrhunderts verlässt der Regressionskoeffizient den Bereich der Clausius-Clapeyron-Gleichung. Dies bedeutet, dass in dieser Periode dynamische Prozesse eine wichtige Rolle für den extremen Zyklonen-bezogenen Niederschlag spielen und eben nicht thermodynamische Prozesse. Dieser Hinweis

auf dynamische Prozesse zeigt einen Weg aus der oben erwähnten Diskrepanz von Klimaproxys, die auf erhöhte Niederschlagsextreme in kalten Perioden der Vergangenheit hinweisen (AMANN et al. 2015; WETTER 2012), und der Theorie, dass eine Abkühlung zu einer Abnahme von Niederschlagsextremen aufgrund der Clausius-Clapeyron-Gleichung führt.

In der industriellen Periode nach 1850 n. Chr. und insbesondere unter dem Szenario RCP8.5 können wir nun die Frage untersuchen, welchen Einfluss der anthropogene Treibhausgaseneffekt auf die außertropischen Zyklonen hat und welche Prozesse, die wir in der Periode vor 1850 n. Chr. identifiziert haben, dabei eine Rolle spielen. Wir sehen eine deutliche Reaktion in den Indizes „Anzahl der Zyklonenzeitschritte“ sowie dem „extremen Zyklonen-bezogenen Niederschlag“, wohingegen die Zyklonenintensität, dargestellt als „extreme Zyklonenvertiefung“ unverändert dekadische Schwankungen zeigt (Abbildung 9-1c). Letzteres bedeutet, dass sich die extremen Stürme im Winter über dem nordatlantischen und europäischen Raum auch unter einem Szenario mit hohen Treibhausgasemissionen, wie das RCP8.5, in dieser Simulation nicht verändern.

Für die Anzahl der Zyklonenzeitschritte wird eine deutliche Abnahme identifiziert, die schon im 20. Jahrhundert beginnt und den Bereich der natürlichen Schwankungen etwa im Jahr 2000 unterschreitet (Abbildung 9-1b). Diese

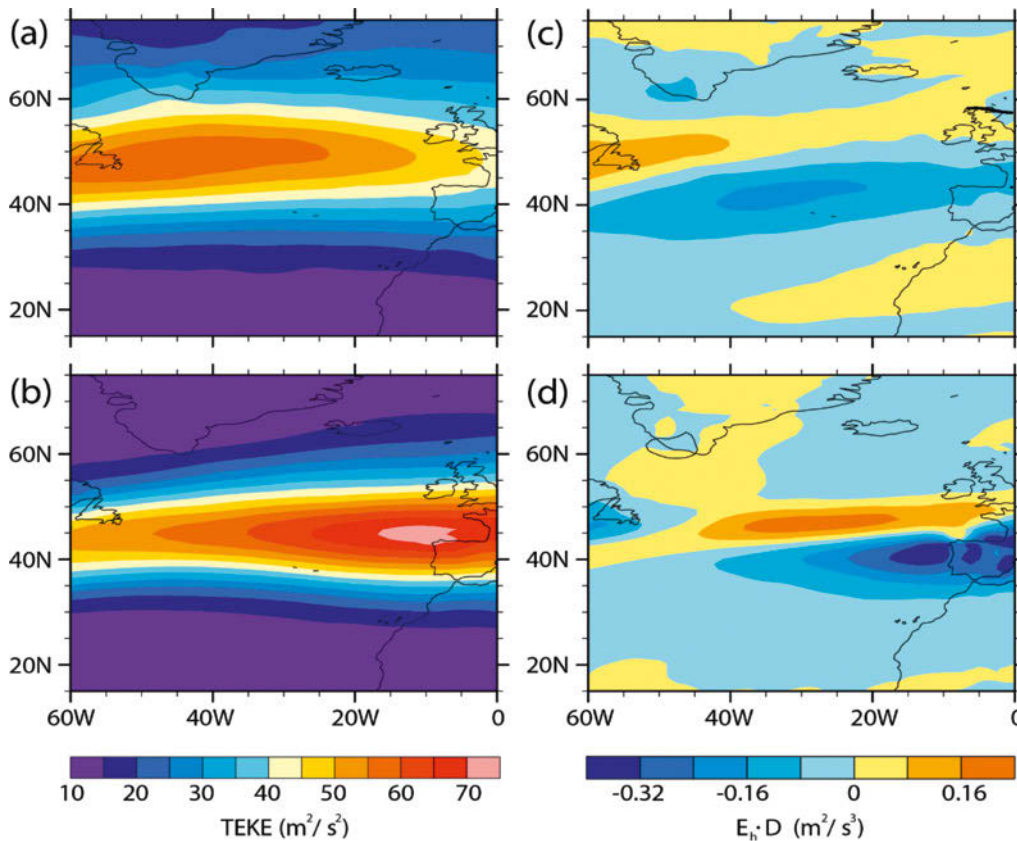


Abb. 9-2: Linke Seite: Verteilung der außertropischen Zyklonen im Nordatlantik im Winter (DJF) dargestellt durch mittlere bandpassgefilterte (2,5-6 Tage) transiente eddy-kinetische Energie TEKE (m^2/s^2): (a) Für heute (1990 n.Chr.) und (b) für das LGM. Rechte Seite: bandpassgefilterte (2,5 bis 6 Tage) barotrope Produktion $E_h \cdot D$ (m^2/s^3) im Winter: (c) Für heute und (d) für das LGM.

Abnahme findet vor allem im zentralen und östlichen Mittelmeerraum statt. Vorangegangene Studien mit einem anderen Modell zeigen eine ähnliche Abnahme im Mittelmeerraum (RAIBLE et al. 2010). Der extreme Zyklonen-bezogene Niederschlag zeigt eine deutliche Zunahme, der wiederum etwa ab dem Jahr 2000 die natürliche Bandbreite übersteigt (Abbildung 9-1d). Um den dominanten Prozess für diese Zunahme zu identifizieren, ziehen wir wiederum die Regressionsanalyse zwischen Temperatur und Niederschlag heran (Abbildung 9-1e). Diesmal ist der Regressionskoeffizient im durch die Clausius-Clapeyron-Gleichung definierten Bereich, das heißt, in der Zukunft sind die durch Zyklonen hervorgerufenen Niederschlagsextreme primär durch thermodynamische und nicht dynamische Prozesse verursacht. Wir sehen also, dass der anthropogene Anstieg der Treibhausgase in der Simulation dazu geführt hat, einem der beiden Prozesse, die wir in der Periode vor 1850 n. Chr. identifiziert haben, den Vorrang zu geben.

4 Änderungen der außertropischen Zyklonen im LGM (21.000 Jahre v. Chr.)

Veränderungen außertropischer Zyklonen im Winter während des LGMs dienen als Beispiel, wie Prozessverständnis mithilfe der Modellierung erreicht werden kann. Darüber hinaus werden im folgenden Abschnitt die Auswirkungen der außertropischen Zyklonen insbesondere auf die

Niederschlagsverteilung über Europa während des LGMs diskutiert.

Zuerst betrachten wir die mittleren Änderungen der Zyklonen sowie die Ursachen, die zu diesen Veränderungen geführt haben. Dabei stützen wir uns auf Modellsimulationen mit dem globalen Modell CCSM4 unter heutigen (1990 n. Chr.) und LGM Bedingungen. Der Vergleich des LGMs mit der heutigen Periode zeigt, dass die Zyklonen während des LGMs nach Süden verlagert waren (Abbildung 9-2 a,b; MERZ et al. 2015). Diese südwärts-gerichtete Verschiebung zeigt sich auch in anderen Maßen zur Charakterisierung der außertropischen Zyklonen, wie der bandpassgefilterten (2,5 bis 6 Tage) Standardabweichung der geopotentiellen Höhe oder der Häufigkeit der Zyklonenzentren (HOFER et al. 2012a). Ähnliche Ergebnisse liefert auch das globale Modell MPI-ESM: Auch hier zeigt sich eine Zunahme der Zugbahndichte, der Intensität sowie der Vertiefungsraten der Zyklonen über dem Nordatlantik und Europa während des LGMs (PINTO und LUDWIG, 2020). Die Ursache der südwärtigen Verschiebung ist die Auswirkung des Laurentidischen Eisschildes wie Sensitivitätssimulationen mit veränderten Eisschilden auf der Nordhemisphäre aufzeigen (HOFER et al. 2012a, MERZ et al. 2015). Das Laurentidische Eisschild mit einer Höhe von bis zu 4 km verändert die stationäre Wellenaktivität über dem Nordatlantik. Die Zentren der stationären Wellenaktivität (stationäre Tröge und Rücken), die sich heute über dem nordamerikanischen Kontinent und dem westlichen Atlantik befinden, verlagern sich nach Südosten (MERZ et al. 2015). Da Störungen der stationären Wellenaktivität eine Quelle für die Entwicklung von außertropischen Zyklonen sind, verschiebt sich während des LGMs das Entstehungsgebiet der Zyklonen von der Region Neufundland in den zentralen Atlantik. Um dies zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 9-2c,d ein Maß für die Produktion von transients Wellenaktivität [das Produkt des E_h Vektors nach HOSKINS und KAROLY (1981) mit dem Deformationsvektor D , wiederum bandpassgefiltert

für 2,5 bis 6 Tage, siehe Details in MAK und CAI (1989)]. Deutlich zu sehen ist, dass sich die Produktion (positive Werte) vom nordwestlichen in den zentralen Nordatlantik verlagert. Die negativen Werte der Grösse $E_h \cdot D$ zeigen an, wo die Zyklonen ihre Energie wieder an den Grundstrom zurückgeben. Dies geschieht in dem untersuchten Gebiet hauptsächlich über Spanien. Somit erklärt die durch das Laurentidische Eisschild verursachte Veränderung der stationären und transienten Wellenaktivität im Nordatlantik auch die Verlagerung des Jets nach Süden sowie dessen Intensivierung insbesondere über dem Mittelmeerraum (MERZ et al. 2015). Die Verlagerung der Zyklonenaktivität über Europa wird durch weitere PMIP3 Simulationen gestützt (LUDWIG et al. 2016). Darüber hinaus zeigt sich ein zusätzliches Maximum der Zyklonenaktivität über Zentral-europa (LUDWIG et al. 2016, PINTO und LUDWIG 2020). Dieses sekundäre Maximum entsteht, da das Skandinavische Inlandeis atlantische Tiefdruckgebiete nach Süden in Richtung Mitteleuropa ablenkt. Dies bedeutet eine Zunahme zyklonaler Aktivität über Süd- und Mitteleuropa, wie eine zusätzliche Analyse der Wetterlagen in den PMIP3-Simulationen zeigt (LUDWIG et al. 2016).

Diese veränderte atmosphärische Zirkulation im LGM hat eine starke Auswirkung auf die Niederschlagsverteilung über Europa. Aufgrund der starken Abkühlung während des LGMs erwartet man eine Abnahme des Niederschlags (Clausius-Clapeyron-Gleichung). Dies ist jedoch für die Wintersaison nicht generell der Fall, da Südwesteuropa im LGM feuchter war als heute (Abbildung 9-3). Diese Zunahme des Niederschlags hängt explizit mit der Lage der außertropischen Zyklonen und den damit verbundenen Wetterlagen im LGM zusammen (HOFER et al. 2012b). Die Autoren kommen zum Schluss, dass etwa 40 % der Änderungen des Niederschlagsmusters über Südeuropa durch Änderungen der Auftrittshäufigkeit der Wettermuster erklärt werden können. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass zyklonale Wetterlagen im Winter (Abbildung 9-4a) einen großen An-

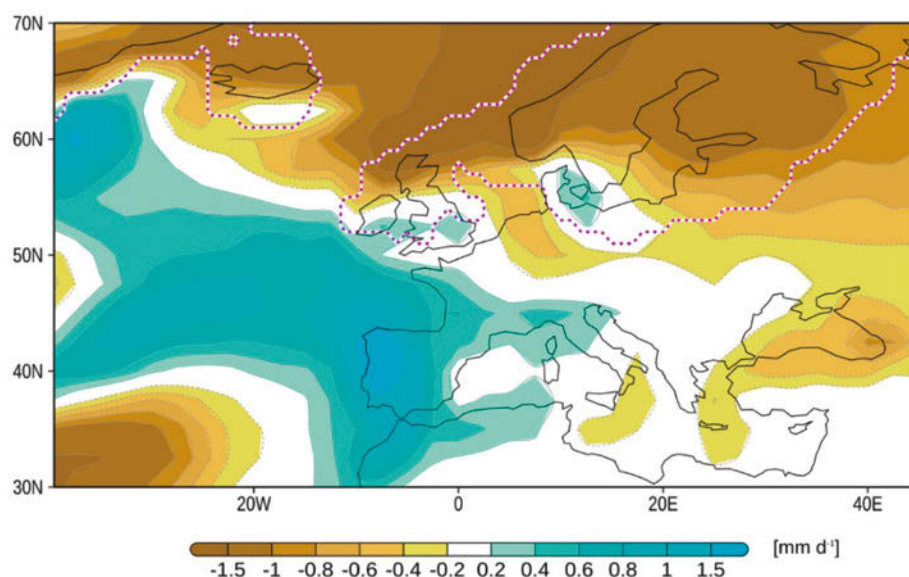


Abb. 9-3: Differenz des täglichen Winterniederschlags (DJF) zwischen LGM und heute auf Grundlage eines Ensembles globaler Simulationen im Rahmen des PMIP3-Projekts. Gepunktete Linie markiert die Grenze der permanenten Eisbedeckung während des LGMs.

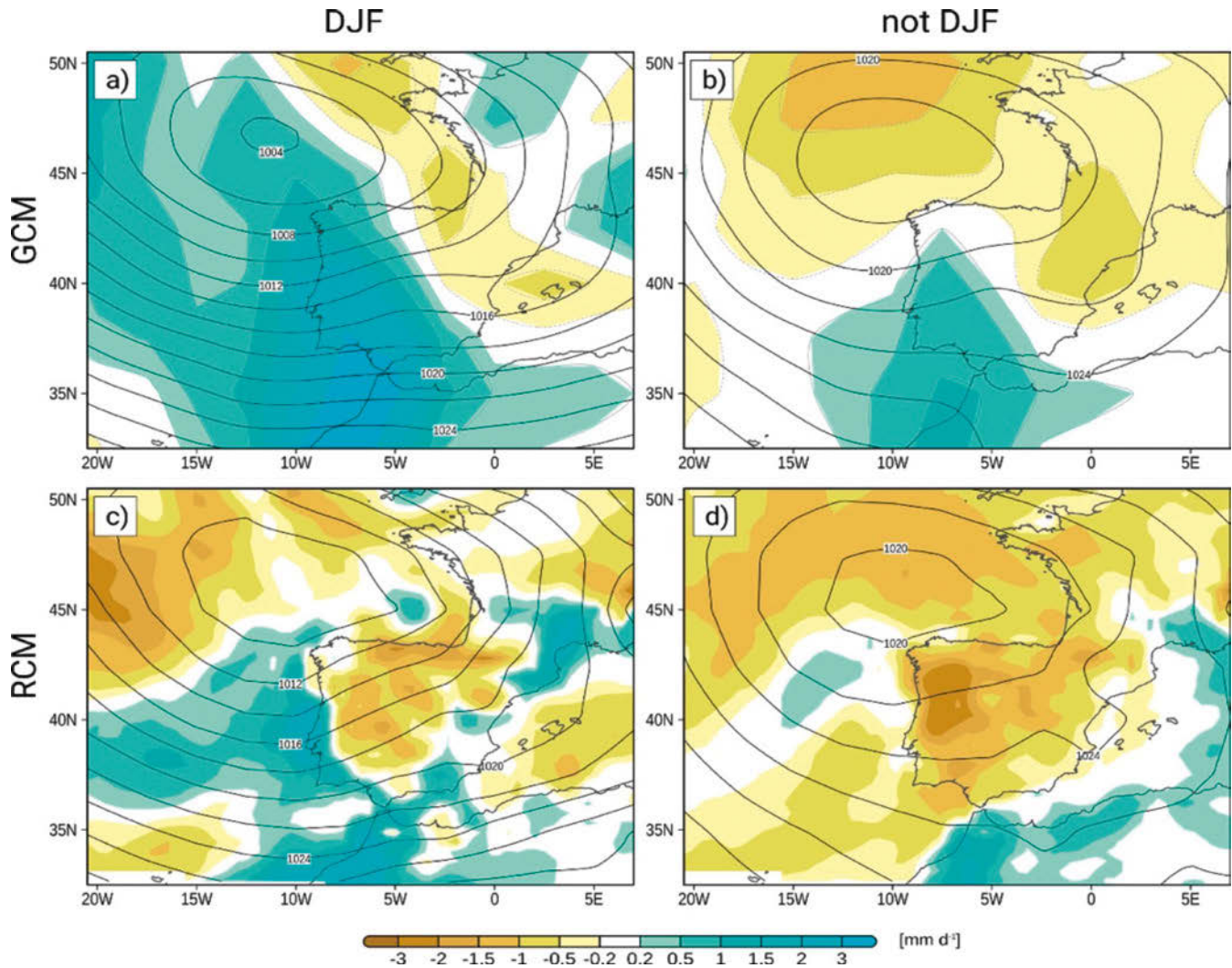


Abb. 9-4: Wetterlagenbasierte Differenz (zyklonale Wetterlage) des täglichen Winterniederschlags (DJF; a, c) sowie des Niederschlags der restlichen Jahreszeiten (nicht DJF; b, d) zwischen LGM und heute auf Grundlage einer globalen (MPI-ESM; a, b) und regionalen (WRF; c, d) Simulation über Südwesteuropa. Zusätzlich sind die der zyklonalen Wetterlage entsprechenden gemittelten Isobaren dargestellt.

teil an der Zunahme des jährlichen LGM Niederschlags in Südeuropa haben. Dagegen sind die Niederschlagsdifferenzen zwischen dem LGM und dem heutigen Klima für die restlichen Jahreszeiten deutlich schwächer ausgeprägt (Abbildung 9-4b). Daraus lässt sich schließen, dass neben der Thermodynamik auch die atmosphärische Dynamik eine wichtige Rolle für das Verständnis der Niederschlagsverteilung während des LGMs in Europa spielt. Aber auch die Meeresoberflächentemperatur (englisch: *sea surface temperature*, SST) sowie die Meereisausdehnung sind für die Niederschlagsverteilung über Europa während des LGMs von großer Bedeutung (LUDWIG et al. 2016). Im Vergleich zu Proxydaten (MARGO-Datensatz, WAELBROEK et al. 2009) überschätzen die Mehrzahl der PMIP3-Modelle die SST im Nordatlantik (WANG et al. 2013), was zu einem erhöhten Feuchtefluss vom Ozean in die Atmosphäre führt. Um den Einfluss der SST genauer zu analysieren, betrachten wir Sensitivitätsexperimente mit einem regionalen Klimamodell (LUDWIG et al. 2017). Eine Anpassung der SST in Richtung des MARGO-Datensatz führt zu einer Reduzierung des Winter- und Jahresniederschlags in Südeuropa. Dies ist in Übereinstimmung mit verschiedenen Proxyre-

konstruktionen des Niederschlags während des LGMs (z. B. BARTLEIN et al. 2011; MORENO et al. 2014). Die wetterlagenbasierte Niederschlagsdifferenz aus der regionalen Klimasimulation zeigt eine Abnahme des LGM Niederschlags im Vergleich zur globalen Simulation sowohl für den Winter (Abbildung 9-4c) als auch für die restlichen Jahreszeiten (Abbildung 9-4d).

5 Fazit

Der vorliegende Beitrag zeigt, wie die paläoklimatische Betrachtung zu neuen Erkenntnissen eines komplexen meteorologischen Phänomens, den außertropischen Zyklonen, führen kann. Für ein tieferes Prozessverständnis der verschiedenen konkurrierenden Prozesse, die die Entstehung und Intensivierung der außertropischen Zyklonen beeinflussen, kann ein Blick in die Vergangenheit beitragen.

Erste Erkenntnisse über die Vergangenheit liefern sogenannte Proxydaten. Da deren räumliche und insbesondere die zeitliche Abdeckung nicht ausreichend sind, um außer-

tropische Zyklonen detailliert zu untersuchen, kommt der Klimamodellierung eine entscheidende Rolle zu. Basierend auf globalen und regionalen Klimasimulationen illustriert der vorliegende Beitrag, wie Erkenntnisse über die zugrundeliegenden Prozesse außertropischer Zyklonen der Vergangenheit gewonnen werden können. Ein wichtiges Ergebnis ist zum Beispiel, dass im letzten Millennium Perioden mit verstärkten Zyklonen-bezogenen Niederschlags-extremen identifiziert wurden, wo die thermodynamischen Prozesse eine untergeordnete Rolle spielten. Auch im LGM zeigt sich, dass dynamische Prozesse, wie die Südwärtsverlagerung der Zugbahnen der Stürme, eine entscheidene Rolle beim Verständnis der Niederschlagsverteilung über Europa im Winter spielen.

Die Modellierung, insbesondere die regionale Modellierung, wird bisher im Paläobereich wenig genutzt. Dieser Beitrag gibt einen ersten Hinweis, welche Möglichkeiten in Zukunft in Bezug auf das Prozessverständnis durch die Verfeinerung der Skala erreicht werden kann.

Literatur

- AMANN, B., SZIDAT, S., GROSJEAN, M., 2015: A millennial-long record of warm season precipitation and flood frequency for the North-western Alps inferred from varved lake sediments: Implications for the future, *Quaternary Science Reviews* **115**, 89-100, doi: 10.1016/j.quascirev.2015.03.002.
- BARTLEIN, P. J. et al., 2011: Pollen-based continental climate reconstructions at 6 and 21 ka: A global synthesis, *Climate Dynamics* **37**, 775-802, doi: 10.1007/s00382-010-0904-1.
- BLENDER, R., FRAEDRICH, K., LUNKEIT, F., 1997: Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **123**, 727-741.
- BRACONNOT, P., HARRISON, S.P., KAGEYAMA, M., BARTLEIN, P.J., MASSON-DELMOTTE, V., ABE-OUCHI, A., OTTO-BLIESNER, B., ZHAO, Y., 2012: Evaluation of climate models using palaeoclimatic data, *Nature Climate Change* **2**, 417-424, doi: 10.1038/nclimate1456.
- CAMENISCH, C. et al., 2016: The 1430s: a cold period of extraordinary internal climate variability during the early Spörer Minimum with social and economic impacts in north-western and central Europe. *Climate of the Past* **12**, 2107-2126.
- DEGEAI, J.-P., DEVILLERS, B., DEZILEAU, L., OUESLATI, H., BONY, G., 2015: Major storm periods and climate forcing in the Western Mediterranean during the Late Holocene, *Quaternary Science Reviews* **129**, 37-56, doi: 10.1016/j.quascirev.2015.10.009.
- DE JONG, R., SCHONING, K., BJÖRCK, S., 2007: Increased aeolian activity during humidity shifts as recorded in a raised bog in south-west Sweden during the past 1700 years, *Climate of Past* **3**, 411-422, doi: 10.5194/cp-3-411-2007.
- HOFER, D., RAIBLE, C.C., DEHNERT, A., KUHLEMANN, J., 2012b: The impact of different glacial boundary conditions on atmospheric dynamics and precipitation in the North Atlantic region, *Climate of the Past* **8**, 935-949.
- HOFER, D., RAIBLE, C.C., MERZ, N., DEHNERT, A., KUHLEMANN, J., 2012a: Simulated winter circulation types in the North Atlantic and European region for preindustrial and glacial conditions, *Geophysical Research Letters* **39**, L15805, doi: 10.1029/2012GL052296.
- HOSKINS, B.J., KAROLY, D.J., 1981: The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *Journal of Atmospheric Sciences* **38**, 1179-1196, doi: 10.1175/1520-0469(1981)038<1179:TSLR>OA.2.0.CO;2.
- HURRELL, J. W. et al., 2013: The Community Earth System Model: A Framework for Collaborative Research, *Bulletin of the American Meteorological Society* **94**, 1339-1360, doi: 10.1175/BAMS-D-12-00121.1.
- KAGEYAMA, M., VALDES, P.J., 2000: Impact of the North American ice-sheet orography on the Last Glacial Maximum eddies and snowfall, *Geophysical Research Letters* **27**, 1515-1518, doi: 10.1029/1999GL011274.
- KUTZBACH, J.E., GUETTER, P.J., 1986: The influence of changing orbital parameters and surface boundary-conditions on climate simulations for the past 18000 years, *Journal of Atmospheric Sciences* **43**, 1726-1759.
- LAÏNÉ, A., KAGEYAMA, M., SALAS-MÉLIA, D., VOLDOIRE, A., RIVIÈRE, G., RAMSTEIN, G., PLANTON, S., TYTECA, S., PETERSCHMITT, J.Y., 2009: Northern Hemisphere storm tracks during the Last Glacial Maximum in the PMIP2 ocean-atmosphere coupled models: Energetic study, seasonal cycle, precipitation. *Climate Dynamics* **32**, 593-614, doi: 10.1007/s00382-008-0391-9.
- LEHNER, F., JOOS, F., RAIBLE, C.C., MIGNOT, J., BORN, A., KELLER, K.M., STOCKER, T.F., 2015: Climate and carbon cycle dynamics in a CESM simulation from 850 to 2100 CE, *Earth System Dynamics* **6**, 411-434, doi: 10.5194/esd-6-411-2015.
- LUDWIG, P., GÓMEZ-NAVARRO, J.J., PINTO, J.G., RAIBLE, C.C., WAGNER, S., ZORITA, E., 2019: Perspectives of regional paleoclimate modeling. *Annals of the New York Academy of Sciences* **1436**, 54-69, doi: 10.1111/nyas.13865.
- LUDWIG, P., PINTO, J.G., RAIBLE, C.C., SHAO, Y., 2017: Impacts of surface boundary conditions on regional climate model simulations of European climate during the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters* **44**, 5086-5095. doi: 10.1002/2017GL073622.
- LUDWIG, P., SCHAFFERNICHT, E.J., SHAO, Y., PINTO, J.G., 2016: Regional atmospheric circulation over Europe during the Last Glacial Maximum and its links to precipitation, *Journal of Geophysical Research – Atmosphere* **121**, 2130-2145, doi: 10.1002/2015JD024444.
- MAK, M., CAI, M., 1989: Local barotropic instability. *Journal of Atmospheric Sciences* **46**, 3289-3311, doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<3289:LBI.2.0.CO;2.

- MERZ, N., RAIBLE C.C., WOOLLINGS, T., 2015: North Atlantic eddy-driven jet in interglacial and glacial winter climates. *Journal of Climate* **28**, 3977-3997.
- MORENO, A. et al., 2014: A compilation of western European terrestrial records 60-8 ka BP: towards an understanding of latitudinal climatic gradients. *Quaternary Science Reviews* **106**, 167-185, doi: 10.1016/j.quascirev.2014.06.030, 2014.
- O'GORMAN, P.A., SCHNEIDER, T., 2009: The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **106**, 14773-14777, doi: 10.1073/pnas.0907610106.
- OTTO-BLIESNER, B.L., BRADY, E.C., CLAUZET, G., TOMAS, R., LEVIS, S., KOTHAVALA, Z., 2006: Last Glacial Maximum and Holocene climate in CCSM3. *Journal of Climate* **19**, 2526-2544, doi: 10.1175/JCLI3748.1.
- PAUSATA, F.S.R., LI, C., WETTSTEIN, J.J., KAGEYAMA, M., NISANCIOGLU, K.H., 2011: The key role of topography in altering North Atlantic atmospheric circulation during the last glacial period. *Climate of the Past* **7**, 1089-1101, doi: 10.5194/cp-7-1089-2011.
- PELTIER, W.R., FAIRBANKS, R.G., 2006: Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record. *Quaternary Science Reviews* **25**, 3322-3337.
- PINTO, J.G., LUDWIG, P., 2020: Extratropical cyclones over the North Atlantic and Western Europe during the Last Glacial Maximum and implications for proxy interpretation. *Climate of the Past* **16**, 611-626, doi: 10.5194/cp-16-611-2020.
- RAIBLE, C.C., MESSMER, M., LEHNER, F., STOCKER, T.F., BLENDER, R., 2018: Extratropical cyclone statistics during the last millennium and the 21st century. *Climate of the Past* **14**, 1499-1514.
- RAIBLE, C.C., YOSHIMORI, M., STOCKER, T.F., CASTY, C., 2007: Extreme midlatitude cyclones and their implications to precipitation and wind speed extremes in simulations of the Maunder Minimum versus present day conditions, *Climate Dynamics* **28**, 409-423, doi: 10.1007/s00382-006-0188-7.
- RAIBLE, C.C., ZIV, B., SAARONI, H., WILD, M., 2010: Winter synopticscale variability over the Mediterranean Basin under future climate conditions as simulated by the ECHAM5, *Climate Dynamics* **35**, 473-488, doi: 10.1007/s00382-009-0678-5.
- RIVIÈRE, G., BERTHOU, S., LAPEYRE, G., KAGEYAMA, M., 2018: On the reduced North Atlantic storminess during the last glacial period: the role of topography in shaping synoptic eddies. *Journal of Climate* **31**, 1637-1652, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0247.1.
- WAELEBROECK, C. et al., 2009: Constraints on the magnitude and patterns of ocean cooling at the Last Glacial Maximum, *Nature Geosci.* **2**, 127-132, doi: 10.1038/ngeo41.
- WANG, T., LIU, Y., HUANG, W., 2013: Last Glacial Maximum sea surface temperatures: A model-data comparison, *Atmos. Oceanic Sci. Lett.* **6**, 233-239, doi: 10.3878/j.issn.1674-2834.13.0019.
- WETTER, O., 2012: Hochwasser-, „Katastrophen“ in Basel vom 13. bis 21. Jahrhundert: Rekonstruktion, Deutung und Lerneffekte. In: Krisen, Ursachen, Deutungen, Folgen, *Schweizerisches Jahrbuch für Wirtschafts- und Sozialgeschichte* **27**, 48-63.

Autorin/Autoren

PROF. DR. CHRISTOPH C. RAIBLE

Universität Bern

Physikalisches Institut

Klima- und Umweltphysik

Sidlerstrasse 5

3012 Bern

Schweiz

und

Oeschger Centre for Climate Change Research (OCCR)

Hochschulstrasse 4

3012 Bern

Schweiz

raible@climate.unibe.ch

DR. PATRICK LUDWIG

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Meteorologie und Klimaforschung

Department Troposphärenforschung (IMK-TRO)

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1

76344 Eggenstein-Leopoldshafen

patrick.ludwig@kit.edu

DR. MARTINA MESSMER

The University of Melbourne

School of Earth Sciences

McCoy Building

Corner of Swanston & Elgin streets

Parkville, VIC 3010

Australia

martina.messmer@unimelb.edu.au

U. ULBRICH, G. C. LECKEBUSCH

10 Zyklonen in einem sich ändernden Klima

Cyclones in a changing climate

Zusammenfassung

Außertropische Zyklonen der mittleren Breiten stellen einen zentralen Mechanismus für polwärtige Energie- und Feuchteflüsse in der Atmosphäre dar. In den mittleren Breiten sind sie zusätzlich eine wesentliche Gefahrenquelle für großflächige Sturm- oder Überflutungsereignisse. Zur ursachenbezogenen, physikalischen Diagnose potentieller Änderungen unter anthropogenen Klimaszenarien werden derzeit im Wesentlichen dynamische Modellsimulationen herangezogen. Dabei zeigen sich global gesehen weniger Zyklonen auf beiden Hemisphären, was mit einem reduzierten meridionalen Temperaturgradienten und einem damit verbundenen reduzierten Bedarf an polwärtigem Energietransport konsistent ist. Während sich auf der Südhemisphäre gleichzeitig eine relativ homogene polwärtige Verschiebung der Hauptzyklonenaktivität diagnostizieren lässt, ist der potentielle anthropogene Einfluss auf der Nordhemisphäre stärker regional geprägt. Vor allem über dem Ostatlantik und Westeuropa kann es demnach auch zu einer Zunahme starker Tiefdruckgebiete mit Sturmcharakter kommen. Aussagen zu Änderungen zyklonen-induzierter Niederschläge sind weniger eindeutig, da hinsichtlich der Anzahl von Zyklonen (und dazugehörigen Frontensystemen) und der Niederschlagsmenge pro Ereignis unterschiedliche Änderungssignale diagnostiziert werden können.

Summary

Extratropical cyclones form vital parts of the atmospheric energy and moisture transport from lower to higher latitudes and are also leading to extreme precipitation and near-surface hazardous wind speeds. To diagnose potential future changes in frequency or intensity of these complex systems, global and regional climate model simulations are the major tool used under specific assumptions of future greenhouse gas developments (scenarios). A proper analysis of those constraint simulations are enabling a view on any potential change of cyclones incorporating a physical reasoning of changes based on related process understanding of forcing factors. Under climate change conditions globally a reduction in cyclone numbers is simulated, consistent with a reduced need for large-scale energy transport into polar regions based on a stronger lower-tropospheric warming there (polar amplification). Southern hemisphere cyclones show a relative homogeneous poleward shift. On the northern hemisphere this poleward shift is only evident at the downstream ends of the major cyclone track regions, with some European regions showing the potential to face more extreme cyclone systems. Studies to the amount of precipitation from cyclones are less conclusive as opposing tendencies with respect to the number of cyclones (and thus frontal structures) and the amount of precipitation per system are diagnosed.

1 Einflussfaktoren auf Änderungen der Zyklonenhäufigkeit und -intensität

Ändern sich Häufigkeiten, Bahnen, Intensitäten oder Charakteristika der Zyklonen in den mittleren Breiten, wenn die globale Klimaänderung weiter fortschreitet? Die Frage kann man empirisch auf der Grundlage von Szenarienrechnungen mit numerischen Klimamodellen beantworten. Da aber auch Signale in Klimamodellen nicht ohne eine kritische Bewertung als Wahrheit genommen werden dürfen, soll hier vor dem Blick auf die Modellergebnisse auf die

physikalischen Mechanismen eingegangen werden, die solche Änderungen der Zyklonenhäufigkeit und -intensität bewirken können. Für die Erstellung dieses Beitrags wurde unter anderem ein im Jahr 2019 publizierter Artikel herangezogen, der die gegenwärtigen Kenntnisse über die zukünftige Entwicklung von Zyklonen zusammenfasst (CATTO et al. 2019).

Das Klimasignal zeichnet sich, den Berechnungen der Klimamodellen zufolge, insbesondere durch eine Zunahme der mittleren Temperaturen aus, wobei der steigende Treib-

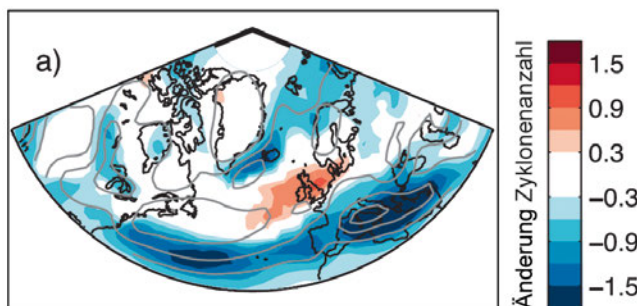


Abb. 10-1: Klimaänderungssignal der Zyklonenzugbahndichte im Nord-Winter (Dezember-Februar) gemäß 19 CMIP5-Modellsimulationen. Farblich: Anzahl Zyklonen pro Monat und Einheitsfläche. Nur Bereiche oberhalb des 95 %-Signifikanzniveaus sind gezeigt. Graue Isolinien: Ensemblemittel der historischen Simulationen (beobachtete Treibhausgaskonzentrationen). Aus ZAPPA et al. (2013), Abbildung 5a.

hausgasgehalt den wesentlichen Antrieb darstellt. Die Erwärmung ist dabei nicht überall in der Atmosphäre gleich groß. Vielmehr gibt es Unterschiede zwischen verschiedenen Regionen oberhalb der Erdoberfläche, und vor allem auch Unterschiede zwischen verschiedenen Höhenbereichen der Atmosphäre. Für die Entwicklung der Zyklonen der mittleren Breiten liegt der Fokus auf der Troposphäre. Hier kommt den Zyklonen (oder auch transienten, baroklinen Wellen) im Klimasystem die Aufgabe zu, einen wesentlichen Teil des Ausgleichs des globalen Energiebudgets zwischen hohen und niederen Breiten zu leisten, also (auf der Nordhalbkugel) wärmere Luft nach Norden und kältere Luft nach Süden zu transportieren. Nur im Winter der Nordhemisphäre leisten auch stationäre Wellen (räumlich und zeitlich konstante Wellen der mittleren Breiten) einen signifikanten Anteil an diesen Transporten.

Im Rahmen der globalen Klimaerwärmung ergibt sich als mittleres Signal in einem Breiten-Höhenschnitt gegenüber dem heutigen Klima ein Maximum der Erwärmung in der tropischen und subtropischen oberen Troposphäre bei etwa 300 hPa in Äquatornähe (IPCC 2013, Abbildung 12.12). Es führt zu einem vergrößerten meridionalen Temperaturgradienten, vor allem im Bereich zwischen etwa 30° und 50° Breite auf beiden Hemisphären. Ein weiteres Maximum der Erwärmung tritt in den hohen nördlichen Breiten in Bodennähe auf. Dieser Teil des Klimasignals, der mit der verstärkten Absorption von Strahlung im Ozean bei Verschwinden des Meereises zusammenhängt (*polar amplification*), reicht von seinem Maximum in Bodennähe bis in etwa 500 hPa, und führt zu einer Verringerung des meridionalen Temperaturgradienten zwischen 50° und 70° unterhalb des 500 hPa-Niveaus. In der horizontalen Verteilung weist das bodennahe Signal eine stärkere Erwärmung der Kontinente als der Ozeane auf. Im Bereich des Nordatlantik ergibt sich ein lokales deutliches Minimum der Erwärmung (IPCC 2013, Abbildung 12.10-12.11).

Hinsichtlich der Baroklinität in den mittleren Breiten als wichtigem Wachstumsfaktor für Zyklonen (HOSKINS und VALDES 1990) wirken die genannten Änderungen in Tropen und hohen Breiten in entgegengesetzter Richtung. Bei

Betrachtung der Baroklinität ist auch noch zu bedenken, dass die mit den Erwärmungen verbundene Modifikation der vertikalen (statischen) Stabilität in hohen Breiten eine Tendenz zur Erhöhung, in niederen eine zur Verringerung dieses Faktors für das Zyklonenwachstum zur Folge haben. Untersuchungen mit idealisierten Modellen zeigen, dass die Wirkung von Baroklinitätsanomalien von der spezifischen Konfiguration der Anomalien und der Rolle der Freisetzung latenter Wärme abhängt (RANTANEN et al. 2019).

Was die Rolle der Freisetzung latenter Wärme angeht, ergibt sich den Klimamodellen zufolge ebenfalls eine Veränderung aufgrund der Klimaerwärmung. Die wärmere Atmosphäre enthält mehr (absolute) Feuchte, wobei die relative Feuchte weitgehend unverändert bleibt. Bodennah zeigt sich eine leichte Abnahme über Land und eine leichte Erhöhung über den Ozeanen der mittleren Breiten (IPCC 2013, Abbildung 12.21). Global gesehen kommt es zu einer Zunahme der Niederschläge (und damit der Freisetzung latenter Wärme), die etwa linear mit der Temperatur verläuft. Diese ist aber in den Gebieten der typischen Zyklonenzugbahnen nicht besonders groß (IPCC 2013, Abbildung 12.22). Außertropische Zyklonen werden zwar durch die Freisetzung latenter Wärme tendenziell eher verstärkt, im Detail hängt die Wirkung der Umwandlung der latenten Wärme auf die Zyklonenentwicklung aber von Positionierung der entsprechenden Gebiete ab (PHIBBS und TOUMI 2016). Wichtig ist in diesem Kontext auch, dass außertropische Zyklonen selbst zum Transport von feuchtwarmer Luft beitragen und somit eine Änderung von räumlicher Struktur oder eine veränderte Zugbahn von Zyklonen unter Klimaänderungen einen weiteren Einflussfaktor auf die Wirkung dieser Einflussgröße darstellen kann.

2 Anthropogene Veränderungen des Auftretens von Zyklonen

Die Veränderung des Auftretens außertropischer Zyklonen wurde auf Grundlage der Ergebnisse der verschiedenen CMIP-Vergleichsrechnungen untersucht. Ein immer wieder zitiertes Ergebnis ist eine gegenüber dem heutigen Klima polwärts gerichtete Verschiebung der Zentren der Zyklonenaktivität, verbunden mit einer mittleren Verringerung der Anzahl von Zyklonen (IPCC 2013, Abbildung 12.20). Diese mittlere Tendenz bedeutet eine Zunahme der Aktivität in einem flächenmäßig deutlich kleineren Bereich (hauptsächlich Ostatlantik/Westeuropa), als in dem, wo eine Abnahme der Zyklonenaktivität simuliert wird (Abbildung 10-1). Sie ist aber deutlich nur auf der Südhemisphäre (Abbildung 10-2) und zu einem gewissen Grad im Bereich des Pazifik sichtbar, während im Bereich des Nordatlantik allein eine Verstärkung in der Auslaufregion des Aktivitätsmaximums auftritt (Abbildung 10-1 und z. B. SEILER und ZWIERS 2016; TAMARIN-BRODSKY und KASPI 2017).

Dieses Gesamtergebnis lässt allerdings eine ganze Reihe von Aspekten außer Acht, die im Detail ein recht komple-

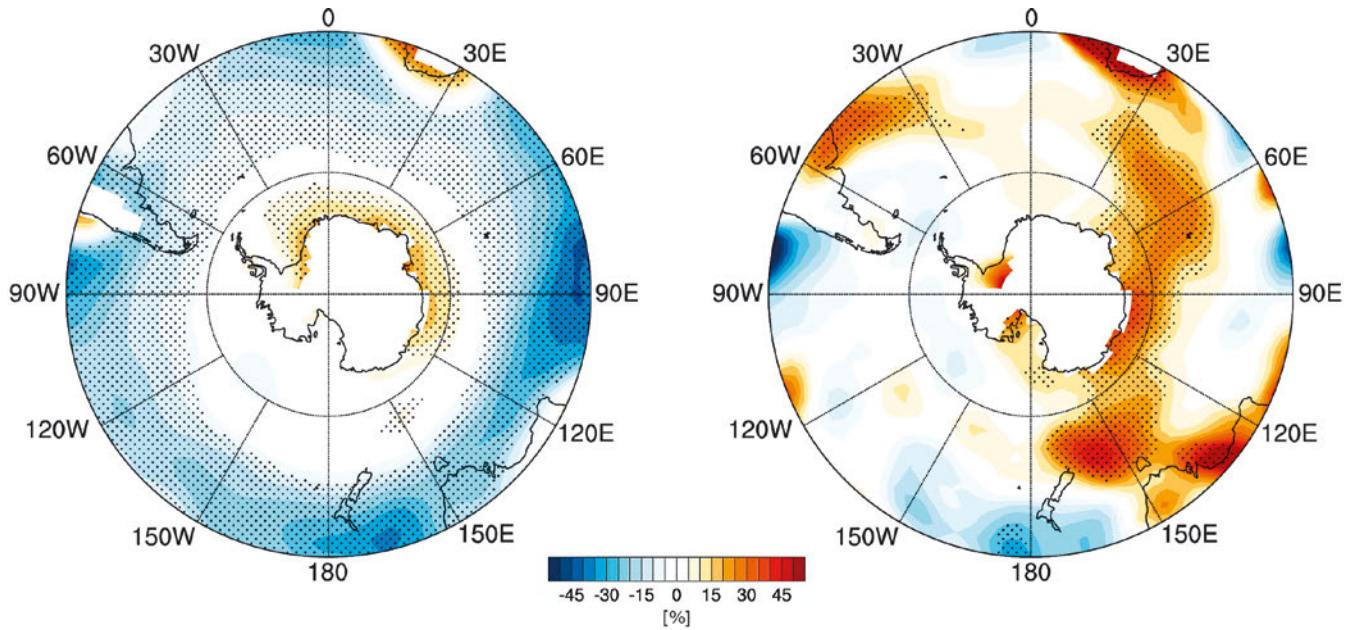


Abb. 10-2: Klimaänderungssignal der Zyklonenzugbahndichte im Winter der Südhemisphäre (April-September) in Prozent (%). Links: alle Zyklonen; rechts: starke Zyklonen (oberhalb des 95. Perzentils des Laplace-Operators des mittleren Bodendruckes oberhalb des 95. Perzentils aller Zyklonen). Regionen mit statistischer Signifikanz (>95 %) des Änderungssignal gemäß eines Student t-Tests sind gepunktet. Aus GRIEGER et al. (2014), Abbildung 4a,d.

xes Bild ergeben. So kann das Signal davon abhängen, wie die Zyklonenaktivität definiert ist. Die deutlichsten Unterschiede diesbezüglich ergeben sich zwischen Eulerschen Ansätzen (wie bei Betrachtung der kinetischen Energie von Störungen oder der Varianz der meridionalen Windgeschwindigkeit) und der Lagrangeschen Betrachtung von einzelnen Zyklonenbahnen. Erstere produzieren für das heutige Klima das Aktivitätsmaximum im Bereich um Neufundland, während letztere das Maximum der Zyklonenzahl bei Island identifizieren. Ein hybrides Verfahren nach HODGES (1999), das für eine Anzahl von Auswertungen verwendet wird, betrachtet zwar Zyklonenbahnen, ergibt durch eine vorgeschaltete Filterung aber mittlere Aktivitätsverteilungen, die denen der Eulerschen Verfahren recht ähnlich sind (ZAPPA et al. 2013). Hinsichtlich der kinetischen Energie als Maß für die Zyklonenaktivität zeigt sich am deutlichsten der Unterschied im Klimasignal für den Winter der Südhemisphäre: Während laut IPCC (2013, Abbildung 12.20 c,d) eine polwärtige Verschiebung bei dominanter Abnahme sichtbar ist, zeigen LEHMANN et al. (2014) einen deutlich weiter äquatorwärts reichenden Bereich zunehmender Aktivität. Nach GRIEGER et al. (2014) gilt dieses im Wesentlichen zirkumpolare Signal aber nicht für die besonders intensiven Zyklonen. Deren Häufigkeit nimmt in der überwiegenden Zahl der betrachteten Simulationen zu, vor allem im Bereich der östlichen Hemisphäre (einschränkend muss aber darauf hingewiesen werden, dass die meisten dieser Modelle zu einer Modellfamilie gehören).

Im Bereich Europa findet sich bei LEHMANN et al. (2014) ein ausgedehnter Bereich zunehmender wellenkinetischer Energie im Winter. Dagegen ist bei einer Betrachtung von Zyklonenbahnen dort nur ein relativ schwaches und regional auf den Bereich nahe der Britischen Inseln beschränktes

Signal zunehmender Zyklonenhäufigkeit zu finden (IPCC 2013, Abbildung 12.20 a,b; BENGTTSSON et al. 2006), insbesondere auch von solchen, die sich besonders stark intensivieren (SEILER und ZWIERS 2016). Multimodell-Untersuchungen zeigen für extrem starke Zyklonen allerdings eine statistisch signifikante Zunahme im Bereich der Britischen Inseln und Zentral-/Westeuropa (LECKEBUSCH et al. 2008; ZAPPA et al. 2013) für extreme CO₂-Szenarien und zum Ende dieses Jahrhunderts. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass gerade diese Regionen in Klimamodellen eine systematisch zu zonale Ausrichtung der Zyklonenzugbahnen zeigen. Studien anhand eines ausgewählten Modells aber mit multiplen Zyklonen-Identifikation-Algorithmen haben gezeigt, dass dieses positive Signal in der Region gerade für die intensiven Zyklonen deutlich ist, während sich bei Einbezug schwächerer Zyklonen nur ein schwaches Gesamtsignal ergibt (ULBRICH et al. 2013).

Sowohl auf der Süd- als auch auf der Nordhemisphäre scheint das Signal der Baroklinität eine Rolle zu spielen. Im Bereich um die Antarktis kommt es zu einer polwärtigen Verschiebung der Region mit bodennah starken Temperaturgradienten, über dem mittleren Nordatlantik nehmen sie auf der Südseite des Gebiets minimaler Erwärmungsraten zu. Gleichzeitig erfolgt in der oberen Troposphäre durchweg eine mittlere Erhöhung der Baroklinität aufgrund der Zunahme des meridionalen Temperaturgradienten. Geht man davon aus, dass die Baroklinität im Bereich der gesamten Troposphäre ein Faktor für intensives Zyklonenwachstum ist (PINTO et al. 2009), so ergibt sich ein konsistentes Bild. Im Detail sind aber viele weitere Faktoren am Wechselspiel zwischen Änderung des mittleren Klimas und der Veränderung der Zyklonenzahl und -stärke wichtig. Für einen Überblick über solche Faktoren, die sich zum Teil mithilfe idealisierter Modellexperimente darstellen lassen,

sei hier auf CATTO et al. (2019), TAMARIN-BRODSKY und KASPI (2017), SHAW et al. (2016) sowie SEILER und ZWIERS (2016) verwiesen.

3 Modellergebnisse: Veränderungen der Charakteristika und Wirkungen

Zyklonen sind ein zentrales Phänomen im Klima der mittleren Breiten. Sie sind mit ihren Fronten für einen erheblichen Teil der Niederschläge verantwortlich. Umgekehrt kann ihr Ausbleiben zu einer deutlich geringeren Niederschlagsmenge führen, selbst wenn der Feuchtegehalt der Atmosphäre hoch ist. Starkniederschläge sind nicht allein auf Luftmassengewitter zurückzuführen, sondern werden zu einem großen Anteil auch an Frontalzonen ausgelöst (PFAHL und WERNLI 2012). Dabei sind es nicht nur die lokalen Effekte der Fronten, die zu den Niederschlägen in den mittleren Breiten beitragen. Auch die induzierten Vertikalbewegungen in Zyklonen und die sogenannten *Atmospheric Rivers* – also langgestreckte Bänder maximalen Feuchtetransports aus den Subtropen in die Mittleren Breiten, welche direkt mit den Fronten der Zyklonen in Verbindung stehen – können eine Änderung der Niederschläge bewirken. Extreme Wetterphänomene wie Stürme oder Hitzewellen hängen zum Teil mit Zyklonen, mit deren Ausprägung und Wanderungsgeschwindigkeit oder eben mit deren Ausbleiben zusammen.

Simulationen von Klimaänderungen zeigen erwartungsgemäß eine Verlagerung der Frontalzonen, die mit der Verlagerung der Zyklonen konsistent ist. Auch die mittlere Abschwächung der Temperaturgegensätze in Frontalzonen (CATTO et al. 2014) ist konsistent mit der Abnahme der meridionalen Temperaturgegensätze in den unteren Luftschichten der mittleren Breiten. Im Bereich des nordöstlichen Atlantik bis Mitteleuropa, für den eine Zunahme zumindest der intensivsten Zyklonen simuliert wird, bleibt eine solche Abnahme der Fronten tendenziell aus.

Hinsichtlich des Niederschlags ergibt sich in den hohen Breiten eine deutliche Zunahme in den verschiedenen Jahreszeiten (IPCC 2013, Abbildung 12.22). Offenbar ist nicht eine verringerte Anzahl von Fronten die Ursache. Das Ergebnis einer signifikant höheren Niederschlagsrate im Zusammenhang mit Zyklonen im geänderten Klima fast des ganzen Nordatlantischen Bereichs (ZAPPA et al. 2013) könnte also zumindest regional mit anderen Prozessen, wie der verringerten statischen Stabilität und einem erhöhte Feuchtegehalt zusammenhängen. In mittleren Breiten ist das zeitlich gemittelte Niederschlagssignal so geartet, dass es unter stärkerem Treibhausgasantrieb zu einer leichten Zunahme in den meisten Teilregionen kommt. Eine deutliche Abnahme der Niederschläge wird dagegen vor allen in Teilbereichen der Subtropen und im Mittelmeerraum simuliert (IPCC 2013, Abbildung 12.23). LAVERS et al. (2013) zeigen in einem kleineren Ensemble von RCP8.5-Simulationen eine Verdopplung der Häufigkeiten und eine Zunahme der Intensität der stärksten *Atmospheric Rivers* bis

zum Ende des Jahrhunderts, die eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für länger anhaltende Starkniederschlagsperioden bedingen könnte. Insgesamt scheinen die Niederschlagssignale eher nicht konsistent mit dem Ergebnis von CATTO et al. (2014) verknüpft zu sein, demzufolge keine große Änderung der simulierten Frontenzahl und -intensität im Bereich Europa auftritt.

Was das Auftreten von Stürmen angeht, ist der Bereich Westeuropa besonders interessant und relevant. Die Simulationsergebnisse weisen in der Tat auf eine mit der zunehmenden Zahl besonders intensiver Zyklonen konsistente Zunahme der Sturmwahrscheinlichkeit hin (FESER et al. 2015). Verbunden damit ist eine potentielle Zunahme der Schäden (LECKEBUSCH et al. 2007); jedenfalls, wenn man gleichbleibende Verwundbarkeiten ansetzt. Geht man dagegen von einer Anpassung an das sich ändernde Windklima insgesamt aus, verringern sich die nach einem einfachen Modell berechneten Schadensänderungen deutlich (DONAT et al. 2011).

4 Diskussion und Ausblick

Üblicherweise geht man davon aus, dass die durch steigende Treibhausgaskonzentrationen induzierten Signale in Klimasimulationen direkt interpretierbar sind. Gerade die Betrachtung der Zyklonen zeigt, dass eine solche Vorgehensweise auch Risiken beinhaltet. Hier ist das Stichwort der „Zonalisierung“ besonders hervorzuheben, also die Tendenz in globalen Klimamodellen, Zyklonenzugbahnen deutlich zonal verlaufen zu lassen, als das in der Realität des heutigen Klimas der Fall ist (z. B. ZAPPA et al. 2013). Im Extremfall könnte das dazu führen, dass von den Modellen korrekt wiedergegebene Klimasignale hinsichtlich der Zyklonen und deren Wirkung auf andere Klimaparameter nicht exakt verortet werden. Andererseits ist eine Korrektur mithilfe von statistischen Zusammenhängen ebenfalls schwierig. So versuchen PARDING et al. (2019) eine statistische Abschätzung der Zyklonenbahndichten, die mit den Beziehungen unter heutigem Klima kalibriert ist, auf das anthropogen geänderte Klima zu übertragen. Sie finden aber für Bodendruck und 500 hPa Geopotential als Prädiktorvariablen unterschiedliche Ergebnisse. Dies weist darauf hin, dass sich die Beziehungen im geänderten Klima durchaus von den heutigen Verhältnissen unterscheiden können. Letztlich ist man also doch darauf angewiesen, die komplexen Klimamodelle exakt auszuwerten. Dabei werden aufgrund von Erfahrungen aus der Wettervorhersage und der dekadischen Klimavorhersage vor allem die Ergebnisse des Multimodell-Ensemblemittels betrachtet. Diese Vorhersagen weisen den größten *Skill* gegenüber einer Standardvorhersage (der jeweilige klimatologische Wert wird vorhergesagt) auf, was damit zusammenhängt, dass einerseits der Median des Vorhersage-Ensembles im Mittel am nächsten an der realen Wetter- beziehungsweise Klimaentwicklung liegt. Andererseits löschen sich verschiedene systematische Fehler der Prognosemodelle im Multimodell-Ensemblemittel aus.

Das Auftreten von Extrema kann aber bei diesem „Ensemble-Ansatz“ verschleiert werden. Bezogen auf Zyklonen im zukünftigen Klima kann ein Signal an leicht unterschiedlichen Orten dazu führen, dass letztendlich keine signifikante Änderung erkennbar ist. Die Idee, Sub-Ensembles aus den „besten“ Modellen zu bilden, scheitert aber noch an der Frage, wie man diese aus der Gesamtzahl der verfügbaren Modelle identifiziert. Denn eine besonders realitätsnahe Wiedergabe des heutigen Klimas ist offenbar kein ausreichendes Qualitätskriterium (DONAT et al. 2010). Experimente mit Klimamodellen mit höherer Auflösung haben gezeigt, dass sie speziell im Bereich des Nordatlantik einen weniger zonalen und damit realitätsnäheren Verlauf der Zyklonenbahnen erzeugen (CATTO et al. 2019). Die Frage, welche Mechanismen die Krümmung der Zyklonenbahn-Maxima verursachen, ist Gegenstand aktueller Forschung (beispielsweise TAMARIN-BRODSKY und KASPI 2017).

Literatur

- BENGTSSON, L., HODGES, K.I., ROECKNER, E., 2006: Storm tracks and climate change. *J. Clim.* **19**, 3518–3543.
- CATTO, J.L., NICHOLLS, N., JAKOB, C., SHELTON, K.L., 2014: Atmospheric fronts in current and future climates. *Geophys. Res. Lett.* **41**, 7642–7650, doi: 10.1002/2014GL061943.
- CATTO, J.L. et al., 2019: The Future of Midlatitude Cyclones. *Curr. Clim. Change Rep.* **5**, 407–420, doi: 10.1007/s40641-019-00149-4.
- DONAT, M.G., LECKEBUSCH, G.C., PINTO, J.G., ULBRICH, U., 2010: European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. *Climate Research* **42**, 27–43, doi: 10.3354/cr00853.
- DONAT, M.G., LECKEBUSCH, G.C., WILD, S., ULBRICH, U., 2011: Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **11**, 1351–1370, doi: 10.5194/nhess-11-1351-2011.
- FESER, F., BARCIKOWSKA, M., KRUEGER, O., SCHENK, F., WEISSE, R., XIA, L., 2015: Storminess over the North Atlantic and Northwestern Europe – A Review. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **141**, 350–382, doi: 10.1002/qj.2364.
- GRIEGER, J., LECKEBUSCH, G.C., DONAT, M.G., SCHUSTER, M., ULBRICH, U., 2014: Southern Hemisphere winter cyclone activity under recent and future climate conditions in multi-model AOGCM simulations. *Int. J. Climatology* **34**, 3400–3416, doi: 10.1002/joc.3917.
- HODGES, K.I., 1999: Adaptive constraints for feature tracking. *Mon. Weather. Rev.* **127**, 1362–1373.
- HOSKINS, B.J., VALDES, P.J., 1990: On the Existence of Storm-Tracks. *J. Atmos. Sci.* **47**, 1854–1864, doi: 10.1175/1520-0469(1990)047<1854:OTEOST>2.0.CO;2.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Cambridge University Press*, doi: 10.1017/CBO9781107415324.
- LAVERS, D.A., RALLAN, R.P., VILLARINI, G., LLOYD-HUGHES, B., BRAYSHAW, D.J., WADE, A.J., 2013: Future changes in atmospheric rivers and their implications for winter flooding in Britain. *Environ. Res. Lett.* **8**, doi: 10.1088/1748-9326/8/3/034010.
- LECKEBUSCH, G.C., ULBRICH, U., FRÖHLICH, L., PINTO, J.G., 2007: Property loss potentials for European midlatitude storms in a changing climate. *Geophys. Res. Letters* **34**, L05703, doi: 10.1029/2006GL027663.
- LECKEBUSCH, G.C., DONAT, M.G., ULBRICH, U., PINTO, J.G., 2008: Mid-latitude Cyclones and Storms in an Ensemble of European AOGCMs under Anthropogenic Climate Change. *CLIVAR Exchanges* **46**, Vol. 13 (No.3), 3–5.
- LEHMANN, J., COUMOU, D., FRIELER, K., ELISEEV, A.V., LEVERMANN, A., 2014: Future changes in extratropical storm tracks and baroclinicity under climate change. *Environ. Res. Lett.* **9**, 084002, doi: 10.1088/1748-9326/9/8/084002.
- PARDING, K.M., BENESTAD, R., MEZGHANI, A., ERLANDSEN, H.B., 2019: Statistical Projection of the North Atlantic Storm Tracks. *J. Appl. Meteor. Climatol.* **58**, 1509–1522, doi: 10.1175/JAMC-D-17-0348.1.
- PFAHL, S., WERNLI, H., 2012: Quantifying the relevance of cyclones for precipitation extremes. *J. Clim.* **25**, 6770–6780, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00705.1.
- PHIBBS, S., TOUMI, R., 2016: The dependence of precipitation and its footprint on atmospheric temperature in idealized extratropical cyclones. *J. Geophys. Res. Atmos.* **121** (15), 8743–54, doi: 10.1002/2015JD024286.
- PINTO, J.G., ZACHARIAS, S., FINK, A.H., LECKEBUSCH, G.C., ULBRICH, U., 2009: Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Climate Dynamics* **32**, 711–737, doi: 10.1007/s00382-008-0396-4.
- RANTANEN, M., RÄISÄNEN, J., SINCLAIR, V.A., JÄRVINEN, H., 2019: Sensitivity of idealised baroclinic waves to mean atmospheric temperature and meridional temperature gradient changes. *Climate Dynamics* **52**, 2703–2719, doi 10.1007/s00382-018-4283-3.
- SEILER, C., ZWIERS, F.W., 2016: How will climate change affect explosive cyclones in the extratropics of the Northern Hemisphere? *Clim. Dyn.* **46**, 3633–3644. doi: 10.1007/s00382-015-2791-y.
- SHAW, T.A. et al., 2016: Storm track processes and the opposing influences of climate change. *Nat. Geosci.* **9**, 656–64, doi: 10.1038/NGEO2783.
- TAMARIN-BRODSKY, T., KASPI, Y., 2017: Enhanced poleward propagation of storms under climate change. *Nature Geosci.* **10**, 908–913. doi: 10.1038/s41561-017-0001-8.
- ULBRICH, U. et al., 2013: Are Greenhouse Gas Signals of Northern Hemisphere winter extra-tropical cyclone activity dependent on the identification and tracking algorithm? *Meteorol. Z.* **22** (1), 61–68, doi: 10.1127/0941-2948/2013/0420.

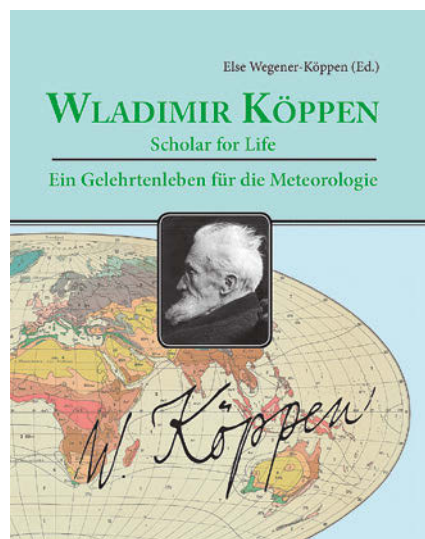
ZAPPA, G., SHAFFREY L.C., HODGES, K.I., SANSOM, P.G., STEPHENSON, D.B., 2013: A multimodel assessment of future projections of North Atlantic and European extratropical cyclones in the CMIP5 climate models. *J. Clim.* **26**, 5846-62, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00573.1.

Autoren

PROF. DR. UWE ULBRICH
Freie Universität Berlin
Institut für Meteorologie
Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10
12165 Berlin
ulbrich@met.fu-berlin.de

PROF. DR. GREGOR C. LECKEBUSCH
University of Birmingham
School of Geography, Earth and Environmental Sciences
Edgbaston
Birmingham B15 2TT
United Kingdom
g.c.leckebusch@bham.ac.uk

Buchbesprechung



WEGENER-KÖPPEN, E., THIEDE, J. (Ed.), 2018: *Wladimir Köppen – Scholar for Life/Ein Gelehrtenleben für die Meteorologie. Original German edition and complete English translation with updated bibliography. Borntraeger Science Publishers, Stuttgart, 313 pages, 34,80 €, ISBN 978-3-443-01100-0.*

The original German text, reproduced in the present book, was first edited in 1955 by Köppen's daughter, Else Köppen-Wegener. The booklet consisted of two parts, Köppen's autobiography, preceded by an introduction to his reminiscences, and a description of Köppen's scientific activities, indited with Erich Kühlbrodt's assistance, whose name appears on the title page of the German original but not on that of the present English edition. Part one is based on Köppen's own remembrances up to 1903, while part two had to be composed of the material that survived the vicissitudes of the Second World War. Needless to say, Wladimir Köppen's name is known to every student of climatology. He was an influential voice and pen in Germany during the "Wilhelminian" era and afterwards. An astonishing trait of Köppen's life was his steady output of writings, until an unusually protracted last breath in 1940, at almost 94 years of age.

The present publication, edited by Jörn Thiede, presents us with Walter Obermiller's English translation of the

original text. It encloses a "Preface by the Köppen family", signed by "Dr. Günther Schönharting (for the Köppen family)", and an introductory essay by Thiede. Both prefaces are rendered in German. The book includes a list of Köppen's publications, enlarged by 34 items against the original, totalling now 560 items.

This new edition with translation is a most welcome addition to the bibliography of meteorology, interesting in itself and as a portrait of one of the most renowned meteorologists of the pre-computer era. Transposing the writing of this maverick and original thinker into English is a daunting task I would not have dared to undertake. Hence, any translation must be greeted as a commendable deed, and the publisher is to be congratulated for making this work available in both English and the original German, especially as the latter has been out of print for decades.

The presswork of the book is good, though the white glossy paper has too high an albedo, creating at certain reading angles an annoying "sun glint" under artificial lamplight, which is not the case with the original matte paper. The heavy paper makes the book less than comfortable for human hands to hold, preventing it from becoming a bedtime reading. The book has pictorial boards, a ribbon as page marker, is decently bound with its pages sewn, allowing for the book to lay flat on your desk. The color photographs on pages 7 to 23, accompanying the new text (and doubled on pp. 175–191) are good, and the black-and-white pictures from the original are mainly good, except for Figures 19 and 20, which are darker than the archetypes, and also larger. On the other hand, Figure 18 gives a far better view of the Deutsche Seewarte (German Marine Observatory) before its destruction in World War II than the original photograph.

As this book is mainly a translation of a text published in 1955, it behooves me to say some words about the quality of the result. I feel a review ought to be written in English, for the book

is aimed mainly at an English-speaking audience. The translation certainly succeeds in conveying Köppen's loose style. At some places, however, it is rather uncouth, lacking autonomy and fluency. The translator would have gained by allowing himself more freedom of syntax, because literally transposing German syntax makes always for clumsiness. I shall make a few comments on text and style, pointing out a few downright faults of translation, but the allotted space does not suffice to list the slips and occasional errors in grammar and spelling I was able to spot.

The German subtitle "Ein Gelehrtenleben für die Meteorologie" means a life of scholarly work in meteorology. The translator chose as its equivalent "Scholar for life", which is not quite the sense of the original. For want of the most suitable rendering, "A life-long scholar in meteorology" serves as a substitute.

Thiede's Preface arbitrarily sets three nouns in capital letters, one in lower case. This kind of arbitrariness happens throughout the text, as if a coin was flipped to decide a randomized usage. In the Abstract to his introductory essay we find the following characterization: "His methodical work (e.g. kite launches) and scholarly review papers also contributed much to the development of meteorological sciences". Kite launches may be work, and hard work at that, but they are not "methodical work". And what exactly is meant by "scholarly review papers" having "contributed much to the development of meteorological sciences"? Which meteorological sciences? What exactly did the reviews do to further meteorology? On the same page 13, towards the end, Thiede asserts that Köppen "by his most creative contributions to the fields of plant geography, meteorology and paleoclimatology has developed full-fledged and novel theories in these fields of sciences." Claims of that sort reveal little insight into how meteorological knowledge is fashioned. And how are we to imagine the development of "full-fledged" fields? Köppen himself would have protested

at that way of looking upon the evolution of meteorology. At the end of the page, a sentence begins: “As a naturalized Russian, who as the son of parents with a German background, he was born in St. Petersburg in 1846 ...” He could not have been born elsewhere or otherwise? On the next page, we learn that “Köppen grew up in a multilingual environment. Most likely for that reason, he later developed a keen interest in the international language Esperanto.” By this kind of logical inference, Gustav Hellmann, the great Prussian meteorologist competing for excellence in research and literary craft with Köppen, would also have developed a keen interest in Esperanto. He did not. On page 15, we are told that the “Russian Geographical Society was founded on Aug. 6, 1845, the first secretary of which was Wladimir Köppen”. One wonders whether our hero presided the society shortly before growing within the womb of his mother. In all likelihood, it is his father Peter von Köppen who is meant.

Misspellings of names of German meteorologists I find very annoying. They are not to be found in the carefully edited German original, but they occur often throughout the English text. Of Wegener (misspelled as Wegner on p. 16), we are told in parenthesis that he was Köppen’s “son in law”; it should, of course, read “son-in-law”; likewise, how can on p. 45 “down-to-earth” become “down to Earth”? The fear of hyphenation can also be sensed on page 78, where the adverb “fainthearted” is split to become “faint hearted”. In the legends of Figure 10 and 12 (and on p. 23), we find an unexplained abbreviation BSH. What does it stand for? An inflationary abuse of an adjective is particularly loathsome: “Köppen’s scholarly success stories ...”; “able to pursue his scholarly interests” (p. 19); “he was concerned with complex scholarly problems ...” (p. 26).

In the Introduction to the main text containing biographical information about Köppen’s life and work, we encounter on page 25 the assertion that synoptic meteorology was “effectively invented in Germany” by Köppen and not, as the original has it, “introduced”.

On the next page, translation of an important statement of Köppen’s about facts is anything but faithful: “without inflicting injustice on the data by premature generalization”, while “without doing violence to the facts by too soon a generalization” is closer to the original. On page 27, a paragraph begins as: “The omnipresent, latent competition of routine work and research proper at larger institutions ...” The pompous word combination “omnipresent, latent” (“immer latenten Wettstreit”) is chosen instead of the plain expression “always latent”. On page 31, where Köppen’s pen is giving expression to his thoughts and feelings, we find the sentence: “I was lucky particularly because I was able to attend to my greatest lust, productive scientific work...”, and shortly afterward “... and without the envious delight of the importance of other people, and things which were ... of true importance”. First, “to attend” a “greatest lust” sounds odd (not to mention the unsuitable connotation of the noun), and secondly, “without the envious delight” is not at all what Köppen wrote himself. What he said is that he had been given the gift of enjoying the importance of other people, or enjoying the truly significant, without envy. On page 37 we shall hear again of Köppen’s lust, “lust of reading”, in word fidelity for “desire for reading”. It may be fitting to state at this point that Köppen’s German is markedly colloquial in his notes, making it difficult to translate his thoughts and idioms into contemporary colloquial English. On the same page, we have Köppen’s confession: “The great joy of insights and scientific production, coupled with the faculty of critical thought, that is the urge for proving the truth.” This sentence must be unlocked with a secret key to reveal its meaning. The German original has no secret to offer at all: “Decisive for my life was the great joy at insights and scientific production, combined with a critical disposition, that is, a need for proving the truth.” I may add that generally the English translation would have profited by being less literal at times: “Telling the untruth” does not sound as awkward in German as in the literal translation, where “lying” would have been my choice. On the second half of the page, we read: “My inability

to purposely tell the untruth goes as far that ...” Besides the fact that the split infinitive is unnecessary, “goes so far that” is the sense of the original. But the opposite is also true, literalness being more natural at times.

Sometimes the task of translation is particularly tough, as when Köppen quotes a poem by Theodor Storm. Still, inconsistencies could have been easily avoided. On page 38, we have another instance of “random capitalization” together with a starving gerund: “Beginning of August my Brother...”. On page 39, we have one of the three or four instances of misuse of a pronoun: “My only contacts ... were Mr. and Mrs. Brückner, which I visited”. On page 47, a German territory by the name of “Palatinate” is substituted by the unheard-of “Palatia”, a fanciful translation confirmed on page 78. Ranks are jumbled on page 49, where the scientific staff consisted, among others, of an “adjunct”, not an “adjutant”, a navy officer. On this very page, we see one of the many fickle uses of the possessive of a person, reflecting the Teutonic rule to glue the “s” at the end of the name: “Wilds successor”, instead of “Wild’s successor”. More instances are to be found on pages 51, 56, 58, 60, 68, 70, 84, 118, 132.

On page 50, Köppen reveals an interesting insight, which before reading the translation I rendered as follows: “There I saw with awe the mighty high and low pressure systems passing by, and how the seemingly capricious winds arranged themselves around them.” The translation has “I observed with admiration as the enormous high- and low pressure areas moved by and the moody winds that developed around them.” Besides the Germanic hyphen left dangling in mid-air and the equally Germanic mark before the conjunction, Köppen did not characterize the winds as moody! In a quotation in which Köppen characterizes director Heinrich Wild of the Petersburg Central Observatory, the sentence on the deflection of winds has a totally different sense in the translation than in the original; changing a single preposition restores the right meaning (p. 50): “... by the different velocities of different lati-

tudes ...”, not “at different latitudes”! With this wrong preposition, Wild’s explanation makes little sense.

Leafing many pages ahead, on page 119 we are told of the suicide of one of Köppen’s sons. The father received a letter that gave notice of where the son’s body “could be found”, instead of “was to be found”. After alluding to a letter found by the corpse, the following sentence is entirely omitted in the translation: “It was a dreadful blow to my parents”. Five pages later, a long excerpt about Köppen’s philosophical views provides us with a rare insight into his outlook on life. However, before the quote we must bear the ill-chosen objective case of a pronoun: “remarked that us daughters should continue his memoirs”. The long passage is a text whose translation

is particularly difficult, but here the translator succeeds in transposing their meaning into English.

In one of the last sections of the book about Köppen’s editorial activities for a handbook of climatology, the co-editor Rudolf Geiger of the famous encyclopedia narrates that Köppen and he worked on a world map “from dusk to dawn”, whereas in the German original they did sleep during the night, so dusk and dawn must be swapped. On page 132 (as well as in the bibliography on p. 169) we find the word “shipment” misused for “installment”. On page 133, a piece of text concerning the last months in Köppen’s life has been accidentally omitted in the translation, making a newborn a fellow worker of his: “In December he

witnessed the birth of his great grandchild, the son of my youngest daughter and conducted numerous experiments with him”, whereas “In December he witnessed the birth of his great grandchild, the son of my youngest daughter, and he made in the spring of 1940 many trials on him” sets the original straight.

Slips and minor faults notwithstanding, I find the translation by and large meritorious (or “meritous” as on p. 134?) and the subject matter interesting to all those who would like to have a firsthand account of Köppen’s life circumstances and of his scientific goals. The book provides much information for anyone who would care to write a biography of one of the most stalwart climatologists history has ever seen.

Joachim Pelkowski

Examina im Jahr 2019

Bachelor-, Diplom- und Masterarbeiten, Dissertationen und Habilitationen in der Meteorologie und verwandten Fächern aus dem deutschsprachigen Raum

Universität Basel

Bachelorarbeiten

- BURGER, Martina: Eine Analyse zeitlicher und räumlicher Dynamik von Stratus und Nebel in der Namib anhand von bodengestützten meteorologischen Messgrößen.
FESSLER, Elias: Accuracy and variability of six global temperature model forecasts in 2018.

Masterarbeit

- ALBER, Kathrin: Prediction and predictability of the North Atlantic Oscillation and its impacts on climate and weather.

Universität Bayreuth

Bachelorarbeit

- URBANEK, Anna-Lena: Spatial distribution of microplastic particles on a riverbank measured in a wind tunnel.

Masterarbeiten

- HEINZELMANN, Valentin: Carbon and energy exchange at a submontane grassland site in an extremely dry year.
SPIES, Isabel: The Urban Heat Island in Bayreuth.

Dissertation

- PFISTER, Lena: Erweiterung unseres Wissens über die atmosphärische Schwachwindgrenzschicht durch räumlich explizite Beobachtungen in Bodennähe.

Freie Universität Berlin

Bachelorarbeiten

5 Bachelorarbeiten

Masterarbeiten

13 Masterarbeiten

Dissertationen

- KADOW, Christopher: Improving decadal climate predictions by ocean ensemble dispersion filtering and an efficient systematic evaluation.

- KIRSCH, Catrin (geb. Gellhorn): Untersuchung zur Kopplung von Stratosphäre und Troposphäre durch Strahlungsflussänderungen mit dem Klima-Chemie-Modell EMAC.

- KUIK, Friderike: Modelling NO_x concentrations at urban scales: model sensitivity, emissions and applications.

- ZHUO, Zhihong: The hydrological effects of explosive volcanic eruptions in the Asian monsoon region.

Universität Bonn

Bachelorarbeiten

- STEINMAIER, Laurin: Visualisierung von Modelldaten tropischer Wirbelstürme mit Hilfe eines neuronalen Netzwerks am Beispiel von Hurrikan Florence.

- WEICHSELBAUM, Falco: Validierung von Clausius-Clapeyron-Scaling in COSMO-REA6 und DWD-SYNOP-Stationen.

Masterarbeiten

- JÖRSS, Anna-Marie: Evidence of climate change signals in the free atmosphere over Germany.

- MOSS, Philipp: Stochastic atmospheric downscaling using multi-objective genetic programming.

- NAWRATH, Franka: Scoring rules basierend auf Variogrammen und Lorelogrammen für die Verifikation von Niederschlagsvorhersagen.

- RAUSCH, Christopher: PV- und Warm-Conveyor-Belt-Analyse einer nordatlantischen Zyklone.

- RITZHAUPT, Nicole: A diagnostic mass-consistent wind model.

- WAGNER, Niklas: Ensemble flood nowcasting using the physics-based integrated hydrological model ParFlow.

Dissertationen

- BEEKMANS, Christoph: 3-D cloud morphology and evolution derived from hemispheric stereo cameras.

- WEITZEL, Nils: Climate field reconstructions from pollen and macrofossil syntheses using Bayesian hierarchical models.

Universität Bremen

Bachelorarbeiten

- BOCK, David: Atmosphärische In-situ Treibhausgasmessung in Kuching/Malaysia.

- FECHTMANN, Katharina: Untersuchung der pH-Abhängigkeit der Respiration anhand von Messungen des organischen Kohlenstoffs.

- KIPP, Stephanie: Kohlenstofftransport im Amazonas.

- WOYNOWSKI, Gian-Luca: In-situ Messung atmosphärischer Treibhausgase mit Fokus auf Methan in Bremen.

Masterarbeiten

- ALAM, Mohammad Ashraf: Detection and Statistical Analysis of Air-bubble Inclusions in Arctic Sea Ice.

- MAKKOR, Jamal: Dissolved Organic Carbon Measurements using UV-visible Spectroscopy.

Technische Universität Dresden

Bachelorarbeiten

- ARBOLEDA GÁLVEZ, André Sebastián: Comparison of wind LIDAR data and numerical simulations of the low-level jet at the site Braunschweig.

- BÖRNER, Franziska: Wissenschaftliche proof-of-principle Analyse zur räumlich expliziten Ermittlung der Restfeuchte landwirtschaftlicher Nutzpflanzen mittels abbildender satellitengestützter Spektrometerdaten.

- GIEBEL, Franziska: Wildabfließendes Wasser: Ursachen, Folgen und Anpassungsmaßnahmen im Ortsteil Skäßchen der Gemeinde Großenhain.

- SCHUCHARD, Malte: Standort- und skalenabhängiger Vergleich statistischer Maßzahlen von Windklimatologien in Höhen über 100 m.

- SEMMLING, Aaron: Soil moisture simulations and validations in ungauged catchments in the Free State of Saxony.

- VALPFAHL, Hans: Analyse des Kohlenstoffvorrates landwirtschaftlich genutzter Flächen auf Basis verschiedener Messmethoden.

Masterarbeiten

- FEISTEL, Holger: Berechnung und statistische Analyse von Gesamtatmung und Bruttopräzipitation verschiedener Landnutzungen auf Basis des gemessenen Netto-CO₂-Austausches an vier Eddy-Kovarianz-Messstationen in Sachsen.
- GARCIA, Natalia: Evaluation of rainfall runoff modelling using BROOK90 in R in a case study of a catchment area in Colombia.
- IBEBUCHI, Chibuiké Chiedozi: Synoptic Classification of Circulation Types in Southern Africa and Linkages to the Local Climate in Free State.

 Universität Frankfurt

Bachelorarbeiten

- BRAUN, Luca Charlotte: Investigation of the Atmosphere Temperature Profile for (Super-Earth) Exoplanets with PlaSim.
- CZAKAY, Christian: Bromierte Kohlenwasserstoffe an der Forschungsstation Mace Head.
- DEISTLER, Therese: Anwendung der Trajektorienberechnung für die meteorologische Unterstützung der Ballonfahrt.
- GROMBALL, Mirko: Evaluation des Strömungssystems des Mittelmeers anhand von Simulationsdaten.
- HIRTH, Felix: Charakterisierung und Kalibrierung von vier Kondensationskernzählern zur Messung von ultrafeinen Aerosolpartikeln.
- KISTNER, Irina: Höhenzuordnung bei Air-Core Messung: Pulsing Experimente.

Masterarbeiten

- ARNDT, Elias: Vergleich von Strahlungsvorhersagen (Nowcasting) mit Vorhersagen aus numerischen Wettermodellen im Kontext der nahtlosen Strahlungsvorhersage.
- DRÜCKE, Jaqueline: Climatological Analysis of the Potential of Solar and Wind Energy in Germany and Europe.
- FREUND, Jannis Michael: Einfluss von Flugzeugemissionen auf die bodennahe Konzentration von Ultrafeinstaubpartikeln.
- GRANZIN, Manuel: Charakterisierung und Optimierung eines Massenspektrometers zur effizienteren Detektion von geladenen Schwefelsäureclustern.
- PANGERT, Johanna: Die Eisnukleationseigenschaften von natürlichem Aerosol und Bodenstaub.
- RISTO, Danny Stefan: Downscaling an Ensemble-based Reanalysis for the Danube Flood 1899.

- USEDLY, Tim: Bromierte Kohlenwasserstoffe am Taunus Observatorium und im TOMCAT-Modell.
- WEINKAEMMERER, Jan: Orographische Schwerewellen in einem Lagrange-WKB-Modell.

Dissertationen

- AKHTAR, Naveed (2019): Climate Modeling over the Mediterranean Sea: Impact of Atmosphere-Ocean Coupling and Atmospheric Grid Resolution on Sea Surface Heat Fluxes, Medicanes, and Vb-Cyclones.
- PIEROTH, Martin: On the Climate Dependence of Subgrid-Scale Parameterizations.
- VAN PHAM, Trang: The consideration of North and Baltic Seas in regional climate modelling with the coupled atmosphere-ocean-ice model COSMO-CLM/NEMO.
- WAGNER, Andrea Christine: Atmospheric Nanoaerosols: from Instrumentation to Organic New Particle Formation.
- WEBER, Daniel: Eisnukleation von Aerosolen: Laborexperimente und Messungen im Feld.
- ZACHARUK, Matthias: Stochastische Subgitterskalen-Parametrisierung der Flachwasserdynamik mittels stochastischer Modenreduktion.

 Technische Universität
 Bergakademie Freiberg

Bachelorarbeiten

- ADAM, Séan: Bodenatmung auf konservierend versus konventionell bearbeiteten Ackerböden (Lüttewitz).
- GEBHARD, Hannah: Winter ozone in the Erzgebirge (Germany).

 Universität Freiburg

Bachelorarbeiten

- BÄTZ, Alina: Heat Prevention in the Region Freiburg – Developing a Heat Action Plan for Employers.
- BERGNER, Nora: Long-term effects of changing forest structure and drought-damage on the radiation balance of a Scots Pine forest.
- BÜTTNER, Simon: Analyzing the Seasonal Variability of Onshore Potential in Germany.
- FLÜGEL, Raquel: Evaluating modelled precipitation against ground-based observation and satellite data above the Tibetan Plateau.

- HÄUSER, Brigitte: Analysis of global radiation in Germany using satellite imagery.
- HAIDER, Fritz: Langfristige Analyse der Entwicklung von Komponenten der Globalstrahlung auf der Grundlage von Satellitendaten für Deutschland.
- LUDWIG, Svenja: Einfluss von Vegetation und unterschiedlich orientierter Stadtstrukturen auf das thermische Bioklima von Menschen in der Karlsruher Innenstadt.
- POURIAN, Tim Nike: Auswirkungen von Oberflächeneigenschaften auf das Klima in Städten.
- REIMERS, Steffen: The expected future temperature and precipitation regime affecting global population and cities, considering climate change and population growth models.
- RUISWIJK, Sarah Elisabeth van: Umgang mit Hitze und Hitzewellen in Europa am Beispiel vom Extremwetterereignis 2018.
- SCHWARZ, Frederic: Technical Wind Energy Potential on the Iberian Peninsula.
- SEITZ, Julia: Untersuchung der städtischen Wärmeinseln in deutschen Städten.
- STÄUBLE, Juliane: Zukünftige Entwicklung von Winterstürmen über Deutschland bis 2100.
- STEPHAN, Vincent: Kleinskalige Modellierung des Windenergieertrages in China unter Berücksichtigung der interannuellen Variabilität.

Masterarbeiten

- BUCHBERGER, Benedict: Zukünftige Entwicklung von Trockenheit in Deutschland.
- BRIEGEL, Ferdinand: Modeling ecosystem respiration and gross primary production of a Douglas fir stand with an artificial neural network approach.
- GRAU, Leonie: The Effect of Repowering on the Technical Wind Energy Potential in Germany.
- KOLBE, Sven: Distributed low cost system for measuring wind-induced tree response.
- PLEIN, Marvin Raphael: Predicting mortality from coronary heart disease using spatially interpolated meteorological data and artificial intelligence.
- REUSCH, Kerstin: Breitengradabhängige Analyse von idealen Straßenschluchten hinsichtlich ihrer mikroklimatischen Verhältnisse.
- SCHWARZ, Philipp: Inhaltsstoffanalyse von Feinstaub im Großraum Stuttgart.

Universität Göttingen

Bachelorarbeit

PAULMANN, Daphne: Measuring CO₂ and CH₄ fluxes with the true eddy accumulation above a pine dominated forest.

Dissertation

SUNG-BIN PARK, Sung-Bin: An investigation of temporal variability of CO₂ fluxes in a boreal coniferous forest and a bog in central Siberia: from local to regional scale.

Universität Graz

Bachelorarbeiten

- BARDEL, Franziska: Extremniederschläge in Graz.
- DIM, Theresa: Räumliche Gradienten der Gesamtschneehöhe in der Steiermark.
- HOLZER, Leah Anna Maria: Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von Wintersportgebieten im Klimawandel am Beispiel Schladming und Ramsau.
- MACHEK, Rosemarie: Räumliche Gradienten der Neuschneehöhe in der Steiermark.
- PLÖJ, Marcel: Climate Change in the Andes.
- PÖMMER, Theresa: Veränderung der Trockenheit im oberen Waldviertel.
- PRASCH, Matthias: Einfluss des Klimawandels auf die Übergangsjahreszeiten.
- SIGURJONSDOTTIR, Viborg Vala: Halos
- THALASSINOS, Georgios: Analyse saisonaler Atmosphärenklimatologien mittels Radio-Okkultationsdaten.

Diplomarbeiten

- RABENSTEINER, Michael: Hochwasserrisiko in der Region Reichenfels in Vergangenheit und Zukunft.
- STERNAT, Florian: Corioliskraft: Eine Betrachtung über die Auswirkungen in Bezug auf meteorologische/ozeanographische Effekte und im Sport, sowie eine Darstellung des Effekts mittels visueller Unterstützung.
- ZEILINGER, Laura: Von Wettergötter bis ALARO – Die Entwicklung der Meteorologie in Hinblick auf Prognostik.

Masterarbeiten

- BINNINGER, Liz Marlen: Eignungstest neuartiger kapazitiver Gesteinsfeuchtesensoren – Entwicklung, Referenzierung und Praxistest.
- FEICHTINGER, Maria Christina: Raum-Zeitliche Interpolation meteorologischer Daten im Gebirge – Beispiel: Einzugs-

gebiet des Schöttlbachs (Steiermark, Österreich).

- JOSTEN, Ines: Impact of a Changing Climate on Late Frost Risk for Apple Blossoms in Austria.
- OPPENEIGER, Lucas Stephan: Observing Atmospheric Rivers with Radio Occultation Data.
- ORTBAUER, Martin: Characterization of the agreement of different pyranometer types and potential misalignment effects.
- PETER, Patrick: Arctic Amplification in atmospheric observations – Equator-to-pole gradients and their connection to storm tracks.
- PLIEMON, Thomas: Klimasimulationen zum 1.5°C-Ziel in Europa.
- PLÖSCH, Simon: Meteorologische Ursachen der veränderten Feinstaubbelastung in Graz.
- STÄHLE, Christoph: Future changes in surface ozone air quality in Europe: insights from chemistry-climate model simulations.
- STROHMAIER, Manuel: Lokale Temperaturanalyse und Entwicklung eines Frostrisikomodelles im Raum Feldbach unter Berücksichtigung von Kaltluftseen und dessen Gefahrenpotentiale für den steirischen Obstbau.

Habilitation

RIEDER, Harald: The role of ozone and well-mixed greenhouse gases in chemistry-climate connections.

Universität Hamburg

Bachelorarbeiten

- MEINKING, Annika: Analyse einer hochaufgelösten tropischen Niederschlagszeitreihe und deren multifraktale Modellierung.
- PILS, Alena: Tropische Trends.
- REINCK, Kevin: Einfluss der Schornsteinhöhen von Schiffen auf die Schadstoffausbreitung in Hafengebieten.
- RÖMER, Florian: Extreme Value Analysis of Daily Precipitation in Svalbard.
- SCHIRMACHER, Imke: Liquid water content from airborne radar and radiometer measurements.
- STANKOVIC, Milica: Vegetationsdynamik der letzten 25.000 Jahre in Nordafrika – Auswertung einer Klimasimulation.
- SZYSZKA, Theresa: Vergleich eines Ein- und Zweimomentenmikrophysikschemas im ICON-Modell unter dem Gesichtspunkt der Hydrometeore.

WEDEMANN, Ralf: Der Beitrag verschiedener Fahrzeugklassen zu den Bremsabriebs-Emissionen in Deutschland sowie der zeitliche Verlauf resultierender atmosphärischer Partikelkonzentrationen in urbanen Räumen.

Masterarbeiten

- ASMUS, Christina: Parameterization development for assessing the impact of solar parks on meteorology.
- BAIER, Katharina: Meteorologischer Einfluss auf Feinstaub in Hamburg.
- BÄR, Frederieke: Observational Evidence for High Cloud Changes with Changing Surface Temperature.
- BECKERT, Andreas: Studying the Atmospheric Cloud Radiative Effect in Realistic High-Resolution Model Simulations.
- CHENG, Ge: Urban ventilation for heatwave events and typical summer in Hong Kong.
- DECKWART, Sonja: Modelling and evaluation of weather effects of offshore wind farms.
- DIETRICH, Laura: A new Perspective on the Evolution of Water Vapor Channel Brightness Temperatures in a Warming Climate.
- DIEZEL, Jan Markus: The influence of v-shaped valleys on near-surface winds.
- DÖRR, Jakob: Evolution of Internal Variability of Arctic Sea Ice in the MPI Grand Ensemble.
- EISELT, Kai Uwe: Nakajima-King Retrievals in Mixed-Phase Clouds. A Model-Only Approach.
- FINKE, Kathrin: Joint Influence of the Stratospheric Polar Vortex and the Madden-Julian Oscillation on Rossby Wave Breaking in the Mid-Latitudes.
- HELLMICH, Lara: The Northern Hemisphere Winter Polar Jet Stream and its Connection to the Seasonal Prediction Skill of Weather Regimes over Europe.
- HOF, Verena: The influence of varying freezing temperature on light transfer in thin sea ice.
- LANG, Theresa: A new Climate Data Record of Upper Tropospheric Humidity.
- LATSCH, Miriam: Wind fields of the Atmospheric Boundary Layer dynamically downscaled by high-resolution mesoscale Simulations.
- LUEVANO DE LA CRUZ, Ana: Characterization of the urban heat island for current and adapted land cover in Mexico City.
- MACHNITZKI, Tobias: A Deep Learning Approach for Processing Radar Data.
- MARSCHALL, Julia: Windtrends über Europa.

- MICHEL, Simon: Probabilistic Radar-Based Precipitation Nowcasting.
- PRANGE, Marc: Application and Comparison of Inter-Calibration Methods for Satellite Microwave Humidity Sounders.
- RADTKE, Jule: Shallow Cumulus Cloud Feedback in ICON Large Eddy Simulations – Bridging the Gap to Storm Resolving Models.
- RAFIQ-DOST, Timorsha: Entwicklung qualitativ hochwertiger Windgrenzschichten im kleinen Grenzschichtwindkanal.
- RÖHLING, Helena: The Feasibility of Modelling Natural Fire Plume Buoyancy Effects within an Urban Area in a Small Boundary Layer Wind Tunnel.
- SAUTER, Christoph: A case study of frontal cloud microphysics in model and observations.
- STRICKER, Helen: Untersuchung transientser Ausbreitungsprozesse von störfallartig freigesetztem Biogas im Nahfeld einer Biogasanlage.
- THIELKE, Linda: Vertical momentum flux measurements at a Boundary Layer Tower and its parameterization in numerical atmospheric models.
- VOSS, Vivien: Bestimmung der Repräsentativität von Konzentrationswerten mit Hilfe hindernisauflösender Modellierung.
- WACHSMANN, Rike: Untersuchung des Einflusses von Stadtgrün auf die Ventilation einer städtischen Bebauungsstruktur am Beispiel von Berlin-Steglitz.
- Dissertationen*
- ARNDT, Jan Alexander: On the effect of reactive oxidized nitrogen emissions from natural sources on air concentrations and deposition of nitrogen compounds in European coastal areas.
- GRAWE, David: High resolution assessment of concentrations in the urban canopy layer.
- GUGOLE, Federica: Numerical study of an energy consistent stochastic parameterization for climate models.
- HAUFSCHILD, Tobias: Stratospheric Controls on Northern Hemispheric Storm Tracks.
- HU, Guannan: Data Assimilation and Extremes in a Conceptual Atmospheric Model.
- KALIDINDI, Sirisha: Multiple climate states and bifurcations on Earth-like terra-planets.
- LEE, Marguerite: The Role of Convective Available Potential Energy (CAPE) in Tropical Cyclone Intensification.
- LI, Wing Yi: Atmospheric Chemistry Reactions in a Turbulent Flow: Application to an Urban Environment.
- UPHOFF, Malte: Optimierung der Photolyse-Rate-Berechnung in einem Meteorologie-Chemie-Modell.
- WINKLER, Alexander: The Response of Global Terrestrial Photosynthesis to Rising CO₂ – A Synthesis of Models and Observations.
-
- Universität Hannover
-
- Bachelorarbeiten*
- KALLA, Juliane Marie: Ableitung des Gesamt-O₃ mit Hilfe eines Array-Spektrometers für wolkenlose und bewölkte Situationen.
- LUCAS, Tom: Bodenfeuchte und Trockenperioden im Klimawandel – dargestellt am Beispiel Braunschweig.
- RAHLVES, Charlotte: Climatological characterization of reconstructed daily UV Index at two European sites from 1958 to 2001.
- REINECKE, Jan Niklas: Windbestimmung abgeleitet aus Hexacoptermessungen.
- STOCK, Annika Dorothea: Untersuchung zur Wassertemperatur von Still- und Fließgewässern.
- WAGNER, Felix Sebastian: Investigation on collisional growth in Lagrangian Cloud Models: Validation on Multi-Box approach.
- WEISS, Tobias: Langzeitkorrektur von Kurzzeitwindmessungen.
-
- Masterarbeiten*
- HEINZEL, Jan Wilko: Optimierung der Kalibration für spektralradiometrische Messungen.
- MAAS, Oliver: Detaillierte Vermessung der atmosphärischen Grenzschicht im Einfluss von Windenergieanlagen.
- ROSIN, Mike: Einfluss der Wetterlage auf die physikalischen Stromflüsse Deutschlands mit den Nachbarländern.
- VANSELOW, Steffen: Klimawandel in Niedersachsen mit Bezug zur Landwirtschaft.
- Dissertation*
- HOFMANN, Martin: Analysis and improvement of irradiance modeling algorithms for the simulation of photovoltaic systems.
-
- Universität Hohenheim
-
- Masterarbeiten*
- BURZYNSKI, Natasha: Amino acid racemization in an asteroid-like mineral matrix.
- LAM, Keen Han Andrew: To what extent does the thickness of the mineral soil layer covering a fen peat affect soil respiration?
- WOLF, Isabell: Parametrization of the plant growth models XN-Gecros and XN-Spass for catch crops.
-
- Universität Innsbruck
-
- Bachelorarbeiten*
- BERGERWEISS, Florian: Klassifikation von Föhn an drei Luftgütemessstellen in Tirol.
- DOUVEN, Andreas: Untersuchung von VOC Faktorenprofilen mittels PMF im Raum Innsbruck.
- GERSTGRASSER, Daniel: Dokumentation Südföhn Schweiz.
- HANGL, Patrick: Der Einfluss von Föhn auf die Konzentration von Luftschadstoffen.
- HEDENIG, Alexander: Analyse der Wintertemperaturen in Tirol mit Mann-Kendall-Dreiecken.
- HELL, Stella: Nocturnal winds on a steep slope in Tirol.
- Masterarbeiten*
- ACKERMANN, Jürg: Orographic and atmospheric factors governing localized heavy snowfall south of the Swiss Jura: Numerical case study and sensitivity experiments.
- FERREIRA DA SILVA, Tiago: Synoptic influences on low tropospheric temperature and humidity inversions.
- GIORDANI, Antonio: Estimating ensemble flood forecasts uncertainty: development of a novel “Peak-box” approach for detecting multiple peak-flow events, and quantification of the ensemble size impact.
- GRAF, Sarah: Urbane NMVOC Messungen mittel NO_x Ionisationsmethode.
- GREGOR, Philipp: Inversion of glacier bed from surface observations by cost minimization – Introducing the Open Source Model COMBINE.
- HATVAN, Veronika: Evaluation of the physical SNOWPACK model under Arctic conditions.
- MARCHIO, Mattia: Climatology of ingredients for convection with ERA5.
- MUSCHINSKI, Thomas: Spatial Heterogeneity of the pre-foehn Inn Valley cold air pool and a relationship to Froude number: observations from an array of temperature loggers during PIANO.
- POSCH, Tobias: Weather Patterns leading to thunderstorms in the Eastern Alps.

RAFFLER, Philipp: Atmospheric Boundary Layer – Structure in the Inn Valley: A Performance Evaluation of the Numerical Weather Prediction Model COSMO.
 STICHANER, Michael: Urbane NOx/CO2 Enhancement Ratio Messungen mit Hilfe von Instrumenten geringer zeitlicher Auflösung.

Dissertationen

DIETZ, Sebastian: Probabilistic Forecasting of Low-Visibility Procedure States.
 GÖGER, Brigitta: Evaluation of a High-Resolution Numerical Weather Prediction Model in Complex Terrain,

Karlsruher Institut für Technologie

Bachelorarbeiten

BAUER, Nico: Analyse der Umgebungsbedingungen während Hagelereignissen auf verschiedenen Kontinenten.
 SIEGMANN, Fabian: Saisonaler Verlauf der Eisaktivität von atmosphärischen Aerosolen im Iran.

Masterarbeiten

BECKER, Florian: Analyse von Definitionen von Hitze- und Kältewellen in Europa.
 DECK, Kathrin: Predictability of Landfalling Tropical Cyclones in Vietnam.
 KAUFMANN, Julia: Long-term Measurements of Ice Nucleating Particles in a Boreal Forest during the Winter to Spring Transition.
 KRÜGER, Konstantin: Analysis of satellite-based Temperature Profiles using six-hourly Radiosonde Data at Neumayer Station, Antarctica.
 KUNTZE, Patrick: Sensitivity of Mixed-Phase Low-Level Clouds to Secondary Ice Formation Processes.
 KYTZIA, Felix: Impact of model resolution and model physics on clouds and their radiative effects in regional ICON simulations.
 LATT, Christian: Relativer Einfluss von Aerosolgehalt und atmosphärischen Parametern auf Wolkenbildung und hochreichende Konvektion.
 MUTH, Lisa Janina: Simulation of primary and secondary aerosols of the Mt. Pinatubo eruption 1991 and their radiative effects.
 SAUTER, Tanja: Modellstudie einer Zyklone mit tropischen Eigenschaften über der Biskaya.
 SCHITTKO, Nadine: Verification of tropical cyclone tracks in deterministic ICON forecasts.

WITTKAMP, Niklas: Wind profiles from dual-Doppler lidar in the complex terrain around Stuttgart.

Dissertationen

BAHAGA, Titike Kassa: Interannual to Decadal Rainfall Variability over Greater Horn of Africa: Non-Stationary Teleconnections, Physical Mechanisms, and Predictability.
 BRECHT, Benedict: Die urbane Wärmebelastung unter Einfluss lokaler Faktoren und zukünftiger Klimaänderungen.
 CALDAS-ALVAREZ, Alberto: Atmospheric Moisture Effects on Deep Convection in the Western Mediterranean.
 DIMUZIO, Enrico: Predictability of Medicanes in the ECMWF ensemble forecast system.
 HELGERT, Sebastian: Impact of soil moisture-atmosphere interactions on the development of extreme weather in the Western Mediterranean.
 JOHANSSON, Sören: Analysis of the unusually cold Arctic winter 2015/16 lowermost stratosphere by airborne and satellite observations and atmospheric models.
 LAUBE, Nathalie: Predictability of European Heat Waves.
 MARANAN, Marlon: Rainfall types over southern West Africa: diagnosis, synoptic environments and representation in satellite retrievals.
 NJERI, Joseph: Synoptic-scale dynamics and modeling of extreme precipitation events in Kenya.
 REICHARDT, Isabelle: Numerische Analyse der Parametrisierung des Immersionsgefrierens sowie der Aerosolprozessierung in orographischen Mischphasenwolken.
 SCHLÜTER, Andreas: Tropical waves and rainfall over Africa: Variability, mechanisms and potential for forecasting.
 TU, Qiansi: Observation of atmospheric greenhouse gas abundances on regional scales in boreal areas using portable FTIR Spectrometers.
 VOGEL, Peter: Assessing Predictive Performance: From Precipitation Forecasts over the Tropics to Receiver Operating Characteristic Curves and Back.
 WEIMER, Michael: Towards Seamless Simulations of Polar Stratospheric Clouds and Ozone in the Polar Stratosphere with ICON-ART.
 WANG, Shaoyin: Modelling of the dynamical and ozone interactions in the polar stratosphere with ICON-ART.
 WELLMANN, Constanze: Using Statistical Emulation for Sensitivity Studies of Deep Convective Clouds.

ZARBOO, Amirmahdi: Investigating the variability of O2 dayglow and temperatures in the mesosphere and lower thermosphere using satellite data.

Universität Kiel

Bachelorarbeiten

BIELKE, Inken: Der Einfluss des Windantriebs auf die Variabilität des Nordatlantiks im Kiel Climate Model.
 RAHM, Tabea: Der Einfluss von plötzlichen Stratosphärenwärmungen auf die Troposphäre.
 RAPPAT, Berinike: Klimavariabilität im Südlichen Ozean aus Beobachtungen.
 RÜHMKORFF, Sarah: The impact of heatwaves and upwelling events on the predator Asterias rubens within the Baltic Sea.
 WILL, Benjamin: Einfluss von Rossby-Wellenpaketen auf den Niederschlag in Schleswig-Holstein.

Masterarbeiten

BEOBIDE, Goratz: Decadal Variability of El Niño/Southern Oscillation in the GFDL-ESM2M pre-industrial control simulation.
 BRUCKERT, Julia R.: The unusual Winter 2017/18 and its Predictability.

Dissertation

HAASE, Sabine: The importance of the representation of stratospheric dynamics and chemistry for surface climate variability.

Universität Köln

Bachelorarbeit

WEDEMEYER, Christian: Kleinskalige Wasserdampfvariabilität in Beobachtungen und Modellen an der Zugspitze.

Masterarbeiten

BERGMANN, Philipp: Sensitivity Analysis of an Energy Market Model Using Spatial and Temporal Clustering of Wind & Solar Energy.
 BETANCOURT, Clara: Lagrangian particle dispersion modeling of stable carbon isotope ratios to track the chemical aging of biomass burning aerosol.
 SCHEELE, Robert Constantin: Potential of high resolution ICON-LEM simulations for wind power forecasts.
 SCHOGER, Sybille Yvonne: Snowfall rate retrieval from ground-based in situ and radar measurements.

- VIETEN, Johannes: Development of an automatic radar-based storm identification, tracking, and nowcasting algorithm.
- VON TERZI, Leonie Jana: How does the snowflake structure affect its scattering properties?

Dissertationen

- HENCKES, Philipp: Impact of renewable energies to European energy systems under historical and future climate conditions.
- MARKE, Tobias: Identification of patterns in long-term observations of the cloudy boundary layer.
- PARSAKHOO, Zahra Sadat: Modelling Multi-Scale Atmosphere and Land-Surface Interactions – A Large-Ensemble Approach.
- SIEDERSLEBEN, Simon: Numerical Analysis of Offshore Wind Farm Wakes and their Impact on the Marine Boundary Layer.
- VAN LAAR, Thirza Willemijn: Spatial patterns in shallow cumulus cloud populations over a heterogeneous surface.
- VOURLIOTI, Paraskevi: Evaluation of observation network benefits on short-term weather forecasts for energy-meteorology applications.

Universität Leipzig

Bachelorarbeiten

- ENGELHARDT, Henry: The relationship between arctic amplification and climate in mid-latitudes in an aqua-planet model.
- GAST, Benedikt: Ableitung der Schneecalbedo und der Schneekorngroße aus flugzeuggetragenen Messungen in bewölkten und unbewölkten Bedingungen.
- JÄGER, Eric: Die 27-Tage-Schwingung in der mittleren Atmosphäre.
- KRAULICH, Florian: Impact of Regional Climate Engineering on Global Circulation.
- MARTIN, Anna: Einfluss von Pollen auf die Vereisung von Wolken.
- RITTER, Oscar: Charakterisierung der Eigenschaften von mariner Stratocumulus-Bewölkung über den Azoren.
- SCHAEFER, Jonas: Systematischer Fehler im Wasserdampffeedback in Klimamodellen?
- SEIDEL, Johanna: Abhängigkeit der arktischen Oberflächenalbedo vom Meereseisanteil.
- SEIDEL, Clara: Statistische Analyse der jährlichen Verteilung von Wind und Wolken für energiemeteorologische Anwendungen an der Cloudnet-Station Lindenberg.

Masterarbeiten

- BECKER, Sebastian: Messung der richtungsabhängigen Reflektivität (BRDF) von arktischem Meereis.
- HERZOG, Alina: Validierung von Wind- und Aerosolprodukten aus AEOLUS Satelliten Lidar Daten mittels bodengebundenen und schiffsgetragenen Lidarmessungen und Radiosondenaufstiegen.
- OHNEISER, Kevin: Relationship between Aerosol Properties and Characteristics of Supercooled Clouds Using Lidar.
- SCHREINER, Yannik: Solar edge and long-term trend effects in the middle atmosphere.

Dissertationen

- ASSMANN, Denise: On the spatio-temporal distribution of aerosol particles in the upper troposphere and lowermost stratosphere.
- GATZSCHE, Kathrin: Investigation of gasSOA formation by parcel and 3-D modeling.
- GRAWE, Sarah: Coal fly ash: How sample properties and methodology influence immersion freezing results.
- HALLBAUER, Eva: Das hygroskopische Verhalten biogener sekundärer organischer Aerosolpartikel.
- HERENZ, Paul: Physical Properties of Arctic and Antarctic Aerosol Particles and Cloud Condensation Nuclei.
- KRISNA, Trismono Candra: Airborne Passive Remote Sensing of Optical Thickness and Particle Effective Radius of Cirrus and Deep Convective Clouds.
- LILIENTHAL, Friederike: Analysis of the Forcing Mechanisms of the Terdiurnal Solar Tide in the Middle Atmosphere.

Universität Mainz

Bachelorarbeiten

- AL MARHOobi, Moza: Exploring different types or relaxation in the barotropic model.
- BÄR, Franziska: Einfluss der Meteorologie auf die Feinstaubbelastung in Mainz.
- DEBERTSHÄUSER, Michael: Synergetische Studie vom Immersionsgefrieren in einem Windkanal und in einem akustischen Levitator.
- JOPPE, Philipp: Charakterisierung des QCL-Absorptionsspektrometers für den Einsatz auf HALO.
- LACKNER, Christian: Untersuchung zum Immersionsgefrieren von Wüstenstaub in einem akustischen Levitator.
- LAUSTER, Bianca: Estimating real dri-

ving emissions from MAX-DOAS measurements at the A60 motorway near Mainz.

- SCHALAMON, Florina: Thermographic Observation of the Onset Conditions for Melting of Hail in the Vertical Wind Tunnel Mainz.
- WILLIMZIK, Laura: Eine Windkanalstudie zur Aerodynamik von modellhaften Hageleinkörnern.

Masterarbeiten

- CELIK, Siddika: Untersuchung der Gas- und Partikelphase von Schiffsemissionen im Mittelmeer und um die Arabische Halbinsel.
- LUDWIG, Anna: Characterization and further development of an aerosol mass spectrometer for routine measurements in IAGOS-CARIBIC.

Dissertationen

- BACER, Sara: Global numerical simulations of atmospheric ice crystals.
- BENSE, Vera: Modifikation von Schwebewellen bei Propagation durch die Tropopause – Idealierte Modellstudien.
- DINGER, Florian: On long-term variations in the BrO/SO₂ molar ratios in volcanic gas plumes.
- EGER, Philipp: A Chemical Ionisation Mass Spectrometer for Atmospheric Trace Gas Measurement: Characterisation and Development in Field Studies.
- FRAGKOUlidis, Georgios: Rossby Wave Packets and Their Role in Temperature Extremes.
- SCHNEIDER, Steven: Simulation of a Permian climate and analysis of atmospheric transport and mixing processes.
- SCHULZ, Christiane: Secondary Organic Aerosol in the pristine Amazonian atmosphere: Chemical properties, formation pathways, and interactions with clouds.
- WEITZEL, Max: Application of holography and automated image processing for laboratory experiments on mass and fall speed of small cloud ice crystals.

Universität München

Bachelorarbeiten

- BERNÖCKER, Simon: Analyse numerischer Simulationen der Alterszusammensetzung von Luftmassen in Abgasfahnen von Waldbränden.
- FIEDLER, Thomas: Untersuchung zum Zusammenhang zwischen arktischer Meeresdecke und Temperatur.

HOFER, Sina: Einfluss von Wasserdampf in der Umgebung inhomogener Wolken auf thermische Erwärmungs- und Abkühlungsraten.
 HUFNAGL, Leonhard: Troposphärische Blockierungen und ihre potentielle Relation zur Stratosphäre.
 KÖNIGL, Tobias: Definition von plötzlichen Stratosphärenerwärmungen.
 MUJKANOVIC, Max: Initial Conditions Sensitivity on Heavy Precipitation during Cyclone Sanchez.
 PFEUFFER, Maximilian: Modellierung von konvektionsgetriebenem Ozontransport an der tropischen Tropopause.
 SIRBESCU, Marco: Untersuchung der Gauß-Verteilung in einem konvektionsauflösenden 1000-member Ensemble.
 VEY, Richard: Vergleich der Bewölkung in Wettermodell und Wolkenradar.
 WEBER, Anna: Retrieval of cloud droplet size distribution from polarised aircraft observations of the cloudbow.

Masterarbeiten

GRASSL, Sandra: Properties of arctic aerosols based on photometer long-term measurements in Ny-Alesund.
 HAHN, Valerian: Entwicklung eines Kalibrationsstandes für Wolkenpektrometer und In-situ Messungen in tiefen Wolken über Westafrika.
 MANEV, Mihail: Die Erde in Polarisation: Modell-Simulationen und Analyse von Beobachtungen.
 NEGWER, Felix: An Analysis of the Scale Dependence of 3D Radiative Transfer in High-Resolution Numerical Weather Prediction Models.
 PECHENOVA, Elisaveta: Drought Prediction and Analysis Using ClimEx Large Ensemble.
 PÖRTGE, Veronika: Cloud Droplet Size Distributions from Observations of Glory and Cloudbow.
 STADLER, Sebastian: Anwendung des neuen Stadt-Klimamodells PALM-4U für die Bewertung des Neubaus der Fakultät für Physik und den Einfluss auf Gebäudesimulationen.
 STECHER, Laura: Auswirkung stark erhöhter atmosphärischer Methankonzentrationen in einem vollständig gekoppelten Klima-Chemie-Modell.

Dissertationen

BACHMANN, Kevin: Sources of Predictability for Deep Convection: Radar Data Assimilation, Orography and Weather Regime.

BAUR, Florian: Soil moisture-precipitation coupling over Central Europe: Relative impact of surface heterogeneity on deep convection.
 HAVERMANN, Felix: Biogenic volatile organic compound emissions from bioenergy plants and potential impacts on air chemistry.
 HUPE, Patrick: Global infrasound observations and their relation to atmospheric tides and mountain waves.
 NECKER, Tobias: The impact of observations in convective-scale numerical weather prediction.
 RASP, Stephan: Statistical methods and machine learning in weather and climate modeling.
 RUCKSTUHL, Yvonne: Joint state and parameter estimation to address model error in convective scale numerical weather prediction systems.
 SENFTLEBEN, Daniel: Arctic sea ice in Earth system models: decadal hindcast skill and constraints of long-term projections.

Technische Universität München

Bachelorarbeiten

SCHWARZFISCHER, Florian: Zweigmethode: Auswertung von Birken- und Erlenpollen.
 BURKE, Ian: Optimierung der UAV gestützten Orthofotografie mit Hilfe eines integrierten PKK GPS.

Masterarbeiten

DORJEDEREM, Bolor: Evaluation of groundwater geochemistry and processes in Principal Lagunera aquifer, Mexico.
 KRAMMER, Regine: Influence of Extreme Weather Conditions on the Production and Allergenicity of Grass Pollen.
 KWOK, Ching Yin: Assessing the potential of characterising hydrological extremes in China by analysing citizen generated data from social media platforms.
 PATEL, Tarun: Socio-technical transitions to sustainability in agriculture (within the United States) – Comparing cultures meat and plant-based meat.
 KHANOM, Tanzinia: Impact of Climate Change on Wildboar (*sus scrofa*) population in Bavaria.
 YOSHIDY, Natsumi: Multinational analysis on flowering responses to Climate Change.

Universität Trier

Bachelorarbeit

STOLTZ, Manuel: Regentropfenspektren von Starkniederschlägen und ihre Relevanz für die Bodenerosion.

Universität Wien

Bachelorarbeiten

AL HASHMI, Manal: Impact of the Indian Ocean Dipole on Tropical systems in the Arabian Sea and the teleconnection with El Nino – Southern Oscillation.
 GEORGIEV, Stoyan: Examination of a 3D-printed in-house developed automatic weather station compared with different weather stations based on statistical analysis.
 HUBER, Manuel: Der Einfluss der Luftmasse auf die Minimumtemperatur von Kaltluftseen: Ein Vergleich.
 KREMSNER, Julia: Downbursts und ihre Auswirkungen in final approach des Flughafens Wien-Schwechat mit besonderem Schwerpunkt auf Radardetektion.
 ROSENBERGER, Markus: Feuchtestrom in der globalen Atmosphäre.
 SCHMOLL, David: Vergleich der beiden Mikroregenradare MRR-Pro und MRR-2 des Herstellers METEK GmbH durch die Auswertung einer Kurzzeitmessung.

Masterarbeiten

FRANK, Fabian: Ensembles of flooding occurrences driven by different pathways of mankind until 2100 and decision theory for forward-planning sustainable protection.
 LEHNER, Sebastian: Detection and attribution of anthropogenic impacts on phenological phases.
 MANSBERGER, Andreas: Coupling of large-scale atmospheric processes to regional-scale weather development with focus on extreme events over complex terrain.
 RESSL, Hans: Beobachtung phänologischer Phasen aus dem All.
 VOGGENBERGER, Ulrich: Vergleich arktischer Erwärmung in Satellitenprodukt und Reanalyse.
 ZOLLES, Anita: Parameterizing tree growth with standard meteorological data.

Dissertation

SHARIFI, Ehsan: Comprehensive Study of Satellite Precipitation Products.

 Universität Würzburg

Bachelorarbeit

WEISSENBACHER, Verena: Die Wasserversorgung Unterfrankens im Zeichen des Klimawandels.

Masterarbeiten

BAUMANN, Miriam: Veränderungen in beobachteten Wetter- und Witterungsextremen in Deutschland.

KLEMM, Jennifer: Remote sensing and dendrochronology based quantification of vitality decline of Black Pine stands in the Vinschgau region, Italy.

ONKELS, Fabian: Erstellung und Auswertung einer Meinungsumfrage zur stadtklimatischen Situation.

POHL, Felix: Future climate analog regions of the Steigerwald.

NERINI, Daniele: Ensemble precipitation nowcasting: limits to prediction, localization and seamless blending.

PANOSETTI, Davide: Resolution sensitivity and convergence behavior at convection-resolving scales in simulations of summertime moist convection over land.

RÜDISÜHLI, Stefan: Attribution of Rain to Cyclones and Fronts Over Europe in a Kilometer-Scale Regional Climate Simulation.

SCHWARZ, Matthias: Towards an Improved Understanding of the global Energy balance: Temporal Variations of Solar Radiation in the Climate System.

STEINFELD, Daniel: The role of latent heating in atmospheric blocking: climatology and numerical experiments.

VOGEL, Martha: Temperature extremes in a changing climate – Processes, emergent constraints and impacts.

 Fachhochschule Zürich

Bachelorarbeiten

BOLLIGER, Micha und HOFMANN, Nando: Ursachenforschung von wetterbedingten Flugunfällen – Eine Analyse des MeteorBriefings der Schweizer Luftfahrt im Sichtflugbereich.

GIOVANELLI, Davide und WAGNER, Len: LORAPIR2: Miniaturisierung und Professionalisierung eines Tools zur LORA Übertragung von Wettererscheinungen.

JOCHEMS, Sophie und NAUER, Manuel: HEATPORT: Auswirkung des Klimawandels auf die Luftfahrt – Ausweiten und Automatisieren des Vorhersageprinzips.

 Universität Zürich

Dissertationen

DOU, Jing: Photochemical Aging Processes in Iron Containing Aerosols.

FRIEBEL, Franz: Cloud droplet activity of soot particles after exposure to ozone at atmospheric conditions.

GILGEN, Anina: Aerosol-Cloud Interactions: From the Future to the Past.

MAHRT, Fabian: A burning issue – Soot particles acting as ice cloud seeds.

MONHART, Samuel: Towards operational subseasonal hydrometeorological ensemble predications mountainous catchments.

MOON, Heewon: Precipitation and drought persistence in global climate models and observations.

Examina im Jahr 2018

Bachelor-, Diplom- und Masterarbeiten, Dissertationen und Habilitationen in der Meteorologie und verwandten Fächern aus dem deutschsprachigen Raum

Universität Basel

Masterarbeit

ALBER, Kathrin: Prediction and predictability of the North Atlantic Oscillation and its impacts on climate and weather.

Dissertationen

SCHMUTZ, Michael: Turbulent exchange of carbon dioxide in a complex urban environment: Results from long-term eddy covariance measurements.
WICKI, Andi: The Urban Climate of Basel/Switzerland: Analysis, Investigation and Perspectives Using Remote Sensing and GIS Techniques.

Universität Bayreuth

Bachelorarbeiten

LINDENBERGER, Anna: Seasonality of climate change mitigation potential in the understory of a tropical dry forest.
STEINMEIER, Leon: Uncertainty of temperature estimates from fiber-optic distributed temperature sensing: Comparison of calibration methods.
STÖCKHARDT, Marie: Influence of disturbance history of climate change mitigation potential in a tropical dry forest.

Masterarbeiten

SIGMUND, Armin: Proof of concept for real-time air mass discrimination at the Schneefernerhaus, Zugspitze.
SKUPIN, Elisabeth: Der Ausgangszustandsbericht gem. §10aBlmSchG: Inhalt, Funktion, Folgen, Haftung & Kritik.

Freie Universität Berlin

Bachelorarbeiten

JUNG, Alexander: Analyse der Niederschlagszeiten in Abhängigkeit von der räumlichen und zeitlichen Skala am Beispiel von Berlin.
LINSE, Anna Katharina: Influence of the Central American Seaway Closure on Pliocene Ocean Circulation.
KRUSCHWITZ, Verena: Das solare Signal

im tropischen Pazifik in Abhängigkeit von der Intensität des 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus.

SCHARPING, Stefanie: Untersuchung der Beziehung zwischen den planetarischen Wellen und der nordatlantischen Oszillation.
THOMAS, Michael: Der Einfluss von Kalibrierung auf die Güteeigenschaften eines Ensembles von Sturmvorhersagen.

Masterarbeiten

BÖTTCHER, Dustin: Einfluss von meteorologischen Bedingungen auf die Dynamik und Struktur von Mesozyklonen.
FISCHER, Jannick: Von konvektiver zu stratiformer Struktur: Eigenschaften von Niederschlag in COSMO-REA2.
HANDSCHUH, Jana: Die Häufigkeit von Starkhagel und Tornados in den USA und ihr Zusammenhang zur Dynamik auf der synoptischen Skala.
ULRICH, Jana: Theoretische und numerische Aspekte der Turbulenz mit Anwendungen in der atmosphärischen Dynamik.

Dissertationen

MÜLLER, Annette: On algebraic and geometric aspects of fluid dynamics: New perspectives based on Nambu mechanics and its applications to atmospheric dynamics.
OTERO, Noelia: Influence of synoptic and local meteorological conditions on surface ozone concentrations over Europe.
PASTERNAK, Alexander: Der dynamische Zustandsindex: Erweiterung des theoretischen Konzeptes und Anwendung auf mittelfristige Klimaprognosen.

Universität Bonn

Masterarbeiten

EMMERICH, Tamara: Role of dry deposition in the meteorology-ozone nexus.
KLEINERT, Felix: Near surface ozone predictions based on convolutional neural networks.
STEINHEUER, Julian: Estimation of vertical wind gust profiles from regional reanalysis using extreme value theory.
SZEMKUS, Svenja: Stochastische Model-

lierung von Nicht-Gaußischem Verhalten im PlaSim-Modell mittels CAM-Noise.

Dissertationen

BACH, Liselotte: Towards a probabilistic regional reanalysis for Europe.
HEWER, Rüdiger: Stochastic physical models for wind fields and precipitation extremes.
KAFFASHZADEH, Najmeh: A statistical analysis of surface ozone variability over the Mediterranean region during summer.
KEUNE, Jessica: Integrated terrestrial simulations at the continental scale.
KNIST, Sebastian: Land-atmosphere interactions in multiscale regional climate change simulations over Europe.
LU, Yen-Sen: Propagation of land surface model uncertainties in simulated terrestrial system states.
STADTLER, Scarlet: Isoprene secondary organic aerosol in a global chemistry climate model.
THIELE-EICH, Insa: Flooding in Dhaka, Bangladesh, and the challenge of climate change.

Universität Bremen

Bachelorarbeiten

HOFFMANN, Jan: Hydrologie des Amazonas Becken.
KRETZ, Kristina: Korrelation zwischen Gravitationsanomalien und Konzentration des atmosphärischen Methans im Gebiet Ganges-Brahmaputra-Meghna.
ROHDE, Steffen: Bestimmung von Kohlenstoff-Isotopenverhältnissen in Pflanzenmaterial mittels FTIR-Spektrometrie.
RUHE, Lukas: Klassifikation von Wolken anhand bodengestützter Hemisphärenbilder unter Verwendung von Methoden maschinellen Lernens.
WEISSBACH, Anna: Quellen des atmosphärischen Methananstiegs nach 2006: Quantifizierung der Beiträge mit Hilfe eines Isotopenmodells.

Masterarbeiten

BILAVEL RAZA ALI, Muhammad: Validation of Sea Ice Concentration by the ASI algorithm with MODIS and SAR imagery.
CHIARELLA HOYLE-COX, Rafaella: Tro-

pical tropospheric ozone column anomalies during ENSO events.

Dissertation

SCARLAT, Raul: Improving an Optimal Estimation algorithm for Surface and Atmospheric Parameter Retrieval Using Passive Microwave data in the Arctic.

Technische Universität Dresden

Bachelorarbeiten

SEIDEL, Ronny: Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur durch Messung und Simulation im Campusbereich der TU Berlin.

WÜRFEL, Henriette: Modellierung der thermischen Belastung von Fußgängern im Campusbereich der TU Berlin.

Masterarbeiten

JASKULSKI, Matthias: Vergleich gemessener und modellierter vertikaler Profile der Windgeschwindigkeit auf einer Waldlichtung und in einem Altlichtenbestand.

QUESADA CHACÓN, Dánnell: Statistical Downscaling of CMIP5 Projections for Costa Rica.

Dissertation

WESTPHAL, Michael: Radon als Tracer in der Luftqualitätsüberwachung.

Universität Frankfurt

Bachelorarbeiten

DZIOBAKA, Matthias J.: Analyse von Tornadoereignissen mittels Zusammenschau verschiedener Datenquellen.

GOEDECKE, Julia: Ammoniak- (NH₃) und Ammonium- (NH₄⁺) Konzentrationen über dem Atlantik im Rahmen der Polarstern Expedition PS 83.

JOSIPOVIC, Lukas: Die Bora an der kroatischen Adria - Schwerewellenbrechen und Strömungskanalisationen in Messwerten und Modellsimulationen.

KLEIN, Nancy: Automatisierte Flugplatzwettervorhersagen (TAF) mittels MOS Verfahren - Statistische Analyse zur Optimierung und Verifikation.

LOHMANN, Richard: Hochwasser durch Schneeschmelze - ein seltener werdendes Phänomen?

MÜLLER, Tatjana: Auswertung von Ammoniak und Dimethylamin - Messdaten während der CLOUD12-Kampagne am CERN.

NEUMANN, Oliver Niklas: Analyse von Radiosondenaufstiegen in Frankfurt am Main.

PFANNKUCH, Kevin: Sensitivität der Strahlungsbilanz auf Wolkeneigenschaften.

PROSKE, Jana Ulrike: Comparison of model-predicted and measured ice-nucleating particle concentrations in a boreal forest environment.

RAHMAN, Mishal: Radiosondenaufstiege - Entwurf eines Praktikumsversuchs.

REDEKER, Ragna: Auswirkungen von Feinstaub auf die Gesundheit des Menschen.

REICHEL, Christopher: Zusammenhang von lokalen Windsystemen im Mittelmeerraum.

STEHR, Alina: Aufbau und Charakterisierung einer Schwefelsäurequelle.

THOMAS, Marius Levin: Konvektiver Niederschlag im Taunus: Vergleich zwischen COSMO-CLM und Radarbeobachtungen.

WITT, Jan Moritz: Eine Untersuchung der Hamiltonschen Struktur von Strahlungsgleichungen und ihre Auswirkungen auf die Diskretisierung für ein WKB-Schwerewellenmodell.

Diplomarbeit

KOSSMANN, Jens: Faktorenanalyse von Langzeitmessungen der Eiskeimkonzentration an Reinluftstationen.

Masterarbeiten

AMMON, Dennis: Kontruktionsbezogene Weiterentwicklung des Kondensationskernzählers VIPER zu einem Tieftemperatur-CPC.

BRAUNER, Philipp: Charakterisierung des Eiskeimzählers FINCH und Feldmessungen mit FINCH.

GESSNER, Claudia: The Structure of Atmospheric Blocking in the German Climate Forecast System.

HARTICK, Carl: VSLs in the EMAC-Model: Variabilities, Distributions and Inter-comparisons.

JESSWEIN, Markus: Variability of the Fourth Generation Synthetic Halocarbons at the Taunus Observatorium.

KUSÁKOVÁ, Katerina: Biologischer Anteil eisnukleierender Substanzen.

LAUER, Melanie: Der vertikale Temperaturgradient in der Arktis - Die lokalen und globalen Einflüsse.

LORENZ, Verena: Evaluation of Etesian Simulations with the Regional Climate Model COSMO-CLM.

NOWATZKI, Eva: Evaporation of Simulated Convective Precipitation over the High Atlas Mountains.

PFEIFER, Joschka: Messung von Ammoniak, Aminen und Diaminen: Entwicklung, Charakterisierung und erster Feldeinsatz eines Chemischen Ionisations-Massenspektrometers mit neu konzipierter Ionenquelle.

PHILIPP, Daniel: Analysing the Climatological Effect of Arctic Sea Ice on the Cloud Radiative Forcing with Satellite Data.

RINGSDORF, Monika Akima: Observation on Seasonal and Latitudinal Distribution of Short Lived Bromine Substances in the UT/LS.

SCHMID, Fabienne: Verdunstung von konvektivem Niederschlag.

SCHNEIDER, Sten: Forecasting Fresh Snow Amounts Under Cooling by Melting Conditions.

SCHOHL, Nils: Einfluss von verschiedenen Quellregionen auf Brom in der UTLS.

SPITZER, Arne: Do Urban Areas enhance Convective Activity?

TOK, Anna: Generierung und Messung von negativ geladenen Schwefelsäureclustern: Charakterisierung eines hochauflösenden differentiellen Mobilitätsanalysators.

Dissertationen

HEINRITZI, Martin: Mass spectrometric measurements of highly oxygenated organic molecules contributing to atmospheric new particle formation.

HIEN, Steffen: Mechanismus der spontanen Schwerewellenabstrahlung im differentiell geheizten rotierenden Annulus und in einem doppeltperiodischen, kartesischen Modellsystem.

OSTERMÖLLER, Jennifer: Wechselwirkungen zwischen stratosphärischem Transport, Chemie und Spurengastrends.

Technische Universität
Bergakademie Freiberg

Bachelorarbeiten

DRECHSLER, Lisa: Respiration von Seenkörpern - eine Annäherung.

PRÜSS, Pascal: Treibhausgas-Winteremissionen urbaner Böden.

RÖDER, Eric: Ökosystematmung eines Hochmoorstandortes.

Masterarbeiten

KLEEBERG, Tanja: Direkte Emissionen verschiedener Reinigungsstufen einer städtischen Kläranlage.

MÜHLNER, Jenny Maria: Atmosphärische Ausbreitung von Emissionen typischer Tierhaltungsanlagen.

Universität Freiburg

Bachelorarbeiten

- DUMBERGER, Stephanie: Akklimatisati-
on des Menschen bei unterschiedlichen
thematischen und klimatischen Umge-
bungsbedingungen.
- KÖSTER, Mareike: Spektrale Eigenschaften
von Luftdruckschwankungen und de-
ren Abhängigkeit von meteorologischen
Größen an drei verschiedenen Standorten.
- KRAMER, Lukas: Mikroklimatische Gestal-
tung von urbanen Plätzen – am Beispiel
des Platzes der alten Synagoge.
- LEYSCHULTE, Theo: Raumzeitliche Varia-
bilität der NO_x- NO₂- und O₃ Konzen-
tration in Baden-Württemberg.
- NAGEL, Linda: Abschätzung des Reduk-
tionspotentials fossiler Kraftstoffe im
Straßenverkehr durch Wasserstoff aus
Windenergie in Deutschland.
- PFAU, Jonas: Kleinräumige Abschätzung
des Windenergiepotentials in Kanada.
- PFISTER, Sara: Der CO₂ Austausch zwi-
schen einem Graslandökosystem und
der Atmosphäre.
- RISSE, Nils: Land-See-Windzirkulation und
Windenergie: Statistische Modellierung
und Ermittlung des Windenergieertrages
in Norddeutschland.
- VOSS, Jannis: Räumliche Modellierung
von Extremniederschlägen in Baden-
Württemberg.
- WEHRLE, Jonas: Instationäre statistische
Analyse von Windgeschwindigkeitszeit-
reihen in Deutschland.
- WOLF, Niklas: Risikoabschätzungen von
Spätfrösten anhand des Forstindex CFI
in Raum Baden-Württemberg.

Masterarbeiten

- BEHRENS, Jochen: Einfluss des UHI-Effekts
auf den zukünftigen Heiz- und Kühl-
energiebedarf im urbanen Kontext und
das daraus resultierende Energieversor-
gungssystem.
- CHAN, Katrina: The potential of bioenergy
to buffer the volatility of wind energy in
Germany.
- COLMORGEN, Felix: Kleinscalige Model-
lierung des Jahrganges des Windenergie-
ertrages in Deutschland mit dem Wind
Speed-Wind Shear-Modell.
- DELGADO, Alberto: Development of a labo-
ratory test sample and cost optimization
of solar thermal ventian blinds.
- GANGWISCH, Marcel: Quantification of la-
tent heat fluxes of urban Vegetation modi-
fied by urban morphological surroundings
for implementation in Micro-scale models.

- HERMANN, Floris: Kleinscalige Model-
lierung bodennaher Windgeschwindig-
keitsfelder über Deutschland.
- MUSTAFA, Ahmed: Development of a regi-
onal maturity scale aiming to standardize
wind energy readiness levels.
- TAUBERT, Diana: Langfristige Entwicklung
des globalen Windenergiepotenzials seit
1900.

Dissertation

- JUNG, Christopher: Statistical wind Speed
modeling on a high spatical resolution
scale for applications in environmental
scienes.

Universität Göttingen

Bachelorarbeit

- THURM, Sinziana: Matter and energy fluxes
above the Hainich forest: Assessing the
performance of eddy covariance inst-
ruments.

Masterarbeit

- PARAJULI, Arun: Greenhouse gas budgets
in oil palm plantations: environmental
controls and oil palm age.

Dissertation

- BRADEN-BEHRENS, Jelka: The isotopic
composition of CO₂ and H₂O fluxes in a
managed beech forest – Instrument tests
and ecological application of two laser-
based absorption spectrometers.

Universität Graz

Bachelorarbeiten

- HOLZER, Leah Anna Maria: Entstehung und
Kategorisierung von Schneekristallen.
- KRAML, Erik: Meteorological Observations
in the Grätzer Zeitung from the years
1816 to 1837.
- KROISSENBRUNNER, Thomas: Extrem-
niederschläge aufgrund von Atmospheric
Rivers and Medicanes.
- LEITGEB, Thomas: Orkane in den Ektropen.
- LICHTENEGGER, Tobias: Simulationen
mit dem Portable University Model of the
Atmosphere und dem Planet Simulator.
- MAGER, Philipp: Die Energiebilanz der
Erde, Treibhauseffekt und der Beitrag
anthropogener Kohlendioxidemissionen.
- PREM, Eva-Maria: Die stratosphärische
Ozonschicht und die Auswirkungen des
antarktischen Ozonloches auf troposphä-
rische Klimavariablen.

- SCHAFFER, Armin: Computerunterstütz-
te Simulation einer Kelvin-Helmholtz-
Instabilität
- STELZER, Alexander: Auswirkungen des
Klimawandels auf den Grundwasser-
pegel und die Grundwassertemperatur
von ausgewählten Messstationen der
Stadtgemeinde Spielberg.
- VESZY, Christina: El Nino-Southern Oscil-
lation – Zusammenspiel von Ozean und
Atmosphäre.

Diplomarbeiten

- KOLMAN, Kevin: Himmelserscheinungen -
Atmosphärische Optik.
- KOTHGASSER, Michael: Frostabwehr im
Obst- und Weinbau. Die Vielfalt der
Methoden und ihre Wirksamkeit unter
besonderer Berücksichtigung der Be-
windung.

Masterarbeiten

- BALKO, Robert: Stadtklima Nürnberg:
Fernerkundungsbasierte Analyse von
nächtlichen Wärmeinselstrukturen.
- BULLMANN, Katharina: Die Niederschlags-
verteilung des Inneren Salzkammer-
gutes.
- FÖDERMAYER, Martin: Temperaturinver-
sionen und ihre Darstellung in regionalen
Klimamodellen in den Ostalpen.
- KARGL, Linda: Hitzebelastung in Graz -
Maßnahmen zur Reduktion von urbanem
Hitzestress durch Begrünungen.
- KOHLFÜRST, David: Soil moisture – tempe-
rature interaction and feedback – strenght
in GCM's and RCM's under changing
climate conditions.
- KOWEINDL, Verena: Hitzestress in Graz –
Maßnahmen zur Reduktion von urbanem
Hitzestress durch Begrünungen.
- KULMER, Philipp: Klimatische Untersu-
chung der Reininghausgründe.
- LASSER, Martin: Evaluation of GPM-DPR
precipitation estimates with WegenerNet
gauge data.
- LICHTENSTERN, Matthias: Extremnieder-
schläge in der Südoststeiermark – Auf-
finden der Quellregionen der Feuchte.
- MANESSINGER, Florian: Räumliche und
zeitliche Veränderungen der Trockenheit
in der Steiermark.
- MARIACHER, Armin: Klimatologische
Betrachtung der Windenergienutzung
in der Steiermark.
- MOCHART, Michael: Multi-mission GPS
radio occultation observations from dif-
ferent processing centers – consistency
and structural uncertainty.
- MUELLER, Christian: Eignungstest und

Kalibrierung von neu entwickelten Ge-
steinsfeuchte-Sensoren an Bauwerken
und am natürlichen Fels.

- POSCH, Martina: Auswirkungen des Kli-
mawandels auf die Häufigkeit der Win-
terstürme in Mitteleuropa.
RESCH, Gernot: Quantifying the influence
of refreezing meltwater on the mass bal-
ance and runoff of Freya Glacier, North-
East Greenland.
SCHACHNER, Christian: Klimawandel
und FSME in Österreich. Ein Vergleich
inneralpiner Täler.
WACHMANN, Tamara: Der Einfluss des
Klimawandels auf sozioökonomische
Schneeparameter in Österreich.

Dissertationen

- BEVACQUA, Emanuele: Multivariate statisti-
cal modelling and analysis of compound
events.
BRUNNER, Lukas: A new perspective on
atmospheric blocking – detection, ana-
lysis, and impacts.
HIEBL, Johann: Spatial climate analysis
in complex terrain – Generation, eval-
uation and interpretation of gridded
temperature and precipitation datasets
for Austria.
O, Sungmin: Toward more accurate and re-
liable precipitation data.
RIECKH, Therese: Investigating the value
of GPS radio occultation water vapor
data using in-situ and remote sensing
techniques and models.
SCHRÖER, Katharina: An integrative per-
spective on extreme convective precipi-
tation events in the southeastern Alpine
forelands: Scaling relationships and da-
mage contribution.

Universität Hamburg

Bachelorarbeiten

- BURGEMEISTER, Finn: Kalibration eines
Radar-Netzwerks mit Hilfe der Sonne.
DUNKE, Hannah: Validation of a new sche-
me for the calculation of absorption by
CFC gases.
FRANK, Lukas: Lidar investigations of the
thermal structure of the lower tropical
troposphere.
FRANKE, Henning: Wolkenkorrelationen
in tropischer Konvektion.
PODEIN, Philine: Duala (Kamerun): Ent-
wicklung des Niederschlags und der
Lufttemperatur vom 19. bis ins 21. Jahr-
hundert.
RADTKE, Jule: Evaluierung der Variabi-

lilität solarer Strahlung in Large Eddy
Simulation mit ICON.

Masterarbeiten

- BECKEBANZE, Lutz: The exchange of
carbon dioxide between waterbodies in
the Siberian tundra and the atmosphere.
BÜCHAU, Yann: Modelling Shielded Tem-
perature Sensors - An Assessment of the
Netatmo Citizen Weather Station.
DUSCHA, Christiane: Impact of Cloud Par-
ticle Habit on Cloud Radar Retrieval.
EHRETSMANN, Emilie: Assessment of the
impact of offshore wind farms on local
and regional wind fields, temperatures and
precipitation patterns in central Taiwan.
FERNER, Karolin: Trends of Northern He-
mispheric Storm Track.
FIECKEL, Lena: Evaluation of the Wind
Energy Assessment using Reanalysis
Data and Production Indices at a Tall
Boundary Layer Tower.
HOSGEL, Sinan: Simulation of North Atlantic
winter sea level pressure anomalies with
a reduced-order stochastic-dynamical
model.
KÄHNERT, Marvin: Validation of the ARO-
ME Arctic Numerical Weather Prediction
Model – A case-based study.
KAISER, Jan Moritz: Influence of Sea Surface
Temperature, Cloud Radiative Effects and
Convection on ENSO Feedbacks.
KEIL, Paul: On the Origin of the North At-
lantic Warming Hole.
KOCK, Paula: Investigation of Gas Disper-
sion Processes at the Facility of CERN.
MÖLLER, Gregor: The Impact of Wind Drift
on Radar-Derived Rainfall Estimates.
MRZIGLOD, John: Using Collocated Satellite
Data for Ice Water Path Retrieval – A
Reimplementation of SPARE-ICE.
NÜRENBERG, Hannah: Evaluierung des
Niederschlags aus ICON-LES mit Ra-
darmessungen.
REH, Sebastian: Impact of large-scale and
local covariates on the extreme value
statistics of hourly station precipitation.
REIMANN, Lucas: The evolution of climate
under an increasing atmospheric CO₂-
concentration – a case study focusing on
the atmospheric general circulation based
on a grand ensemble.
RETSCH, Matthias: Feedbacks of ICON-A
for Explicit and Parametrised Convection
across Resolutions.
SCHAPER, Maximilian: Sub-/Millimeter
Profile Retrieval with EOF and Neural Net.
SUH, Sangik: Climatological analysis of
high-speed surface wind (wind gusts)
in Germany.

Dissertationen

- ABIS, Beniamino: Multiple Tree-Cover States
in the Earth System.
CIONI, Guido: Large-eddy simulations of
land-atmosphere interactions and mid-
latitude storms: from conceptual models
to realistic cases.
FISCHEREIT, Jana: Influence of urban wa-
ter surfaces on human thermal environ-
ments – an obstacle resolving modelling
approach.
GALFI, Vera Melinda: Mathematics of ext-
reme events in atmospheric models.
HANS, Imke Kerstin: Towards a new funda-
mental climate data record for microwave
humidity sounders based on metrological
best practice.
OLONSCHECK, Dirk: Understanding in-
ternal variability of sea ice and surface
air temperature.
PLESCA, Elina: The tropical circulation in
a changing climate.
VISSIO, Gabriele: Statistical Mechanical
Methods for Parametrization in Geophy-
sical Fluid Dynamics.

Universität Hannover

Bachelorarbeiten

- MÜLLER, Raffael: Synthetische Generierung
von dreidimensionalen Blattflächendich-
ten zur Berücksichtigung von hoher Ve-
getation in Simulationsmodellen.
SCHMIDT, Felix: LES einer Windenergie-
anlagen-Parametrisierung im komplexen
Gelände.
SEEHAUSEN, Laila: Effects of climate
change on air pollution in Nepal.
URBACH, Erika: Turbulence effects on the
initiation of warm rain: A box-model
study with particle-based microphysics.
WEISE, Niklas: Auswertung von Nieder-
schlagsextremen anhand von Zeitreihen
regionaler Klimaszenarienrechnungen.
WESTBRINK, Alexandra: Numerische Un-
tersuchung zum Einfluss von fahrendem
Verkehr auf die Schadstoffbelastung in
der Umgebung von Straßen.

Masterarbeiten

- DUFFERT, Jens: Entwicklung und Verbesse-
rung der Klimatisierung für Messungen
mit dem MUDIS.
KRAUSE, Jens: Large-Eddy Simulation der
konvektiven Grenzschicht während dem
LITFASS-2003-Experiment mit gekoppel-
tem Land-Oberflächen-Transfermodell.
KRAUSS, Christian: Meteorologische Mes-
sungen mit Hexacopter.

THUNS, Nadine: Estimation of irradiance derived from hemispherical sky images.

Dissertationen

FRICKE, Jens: Untersuchungen zum Einfluss erzwungener atmosphärischer Rollenkonvektion in Kaltluftausbrüchen auf den vertikalen turbulenten Transport in der atmosphärischen und der ozeanischen Grenzschicht mittels Large-Eddy-Simulationen.
 SCHREMPF, Michael: Development of methods to determine biologically-weighted UV exposure of humans in different environments.

Universität Hohenheim

Masterarbeiten

ENGELHART, Stefan Oliver: Representation of the evolution and investigation of processes/characteristics of a supercell thunderstorm in southwestern Germany in high-resolution WRF simulation.
 KLEINE, Simon Paul: Characterization of the Atmospheric Boundary Layer Height with Scanning Water Vapor DIAL and Rotational Raman Lidar during the Land-Atmosphere Feedback Experiment (LAFE).
 MUNNI, Maharunessa: Analysing the influence of land use on the Ecosystem Service (ES) of Groundwater Recharge (GWR) and quantifying the vulnerability of karst groundwater pollution in the Biosphere Reserve Swabian Alb.
 NEUMANN, Anja: Footprintanalyse der Eddy-Kovarianz-Messungen während SABLE, CAOS 2015 und in den Vereinigten Arabischen Emiraten.
 RUMMEL, Lisa: Modelling land use change in the Ecuadorian Amazon under alternative scenarios of future land use trends and governance enforcement.
 STROHBACH, Jens: Analysis of Four Months of Doppler Lidar Measurements on Al Farfar Mountain, AUE, Within the OCAL Project.

Dissertationen

METZENDORF, Simon: A high-power laser transmitter for ground-based and airborne water-vapor measurements in troposphere.
 YOUSEF, Latifa A.: Cloud Cover Climatology over the Arabian Peninsula.

Universität Innsbruck

Bachelorarbeiten

BOGENSPERGER, Kathrin: Gewitter in Europa durch Advektion hochreichend durchmischter Luftmassen.
 FOLLI, Thomas, HOFMANN, Marie: Jahresverlauf konvektiver Kennzahlen in unterschiedlichen Klimaregionen.
 GRÜNBACHER, Daniel Martin: Untersuchung der Anisotropie turbulenter Wirbel an einem urbanen Standort im alpinen Raum.
 HOFER, Jörg: Berechnung von Feuchte- und Temperaturprofilen in komplexer Topographie mittels Monin-Obukhov Theorie.
 ISIDORI, Dabhi: Comparison of Nocturnal Cooling during Clear Sky Conditions over a Snow-Covered vs. a Snow-Free Surface: A First Case Study at Station Innsbruck Airport.
 MAYER, Christian: Evaluierung von Auswirkungen der thermischen Stabilität auf das vertikale Windprofil.
 MÜHLSTEIGER, Sandra: Der Beitrag der Holzverbrennung zur Feinstaubbelastung (PM10).
 PFEIFFENBERGER, Michael: Ausbreitungsklassen im Inntal.
 RAUCHÖCKER, Andreas: Bestimmung von Temperaturprofilen mittels Fernerkundung – Vergleich zweier Verfahren.
 RESCH, Christian: Modellierung von BVOC-Emissionen und deren Einfluss auf die Atmosphärenchemie.
 RZEHAK, Sandra: Städtische Wärmeinsel in Innsbruck im Sommer.
 SCHMITT, Patrick: Städtische Wärmeinsel in Innsbruck im Winter – Untersucht im Zeitraum Dezember 2017 bis Februar 2018.
 STÄRZ, Maximilian Amadeus: Analyse der Windverhältnisse am Arbeser Kogel – Klimatologien der Jahre 2015 bis 2017 sowie Analyse der Windrichtungsverteilung unter bestimmten meteorologischen Bedingungen.
 WÖCKINGER, Simon: Berechnung von Windprofilen im Inntal mittels Monin-Obukhov Theorie.

Masterarbeiten

AICHINGER-ROSENBERGER, Matthias: Usability of high-resolution GNSS-ZTD data in the AROME model.
 BAUMANN, Veronika: Interpretation of NMVOC concentration measurements by PTR-QiTOFMS using non-negative matrix factorization.
 BÄR, Julius: Boundary Layer Structure in the Inn Valley - Exploration Possibilities

with a Passive Microwave Radiometer.
 CERNY, Michaela: Lake-level changes on the Tibetan Plateau and their Relation to Glacial Melt.
 DUSCH, Matthias: Influence of thermal and gravity driven flows on an Arctic fjord wind regime – A case study with numerical simulations.
 EMPRECHTINGER, Markus: Turbulence in Complex Topographie - Characterization of the Site Terfens.
 GÖBEL, Matthias: Statistical post-processing of a numerical weather prediction model with neural networks.
 GOLLER, Markus: Satellitenmessungen von Niederschlag: Räumliche und Zeitliche Repräsentativität von Niederschlag.
 HAMMERER, Lukas: Influence of Atmospheric Parameters on the Mass Balance of Intercepted Snow in Forested Areas.
 HERLA, Florian: A Universal Particle Dispersion Parametrization for Ground-Level Concentration Distributions.
 KILIAN, Markus: Impact of the Eruption of Mt. Pinatubo on the chemical composition of the tropical atmosphere as simulated with EMAC.
 LAIMINGER, Eva: Scaling of Turbulent Kinetic Energy in an Alpine Valley.
 NASCHBERGER, Daniel: Flächenhafte Vorhersagen von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Flachland.
 RAPARELLI, Edoardo: Snow metamorphism and densification: Comparison of measured, parametrised and modelled data.
 SCHMIDT, Adrian: Weather Type Classifications in Statistically Postprocessed Temperature and Precipitation Forecasts.
 SCHÜSSLING, Carmen: Types of Extratropical Cyclones – Comparison of Well-Known Concepts and Case Study Cyclones.
 STRUDL, Markus: Globale Sensitivitätsanalyse und Kalibrierung eines hydrologischen Modells für das vergletscherte Einzugsgebiet Riffelsee.
 TOLLINGER, Mathias: Unravelling the March 1972 northwest Greenland windstorm – Numerical case study and sensitivity experiments.

Dissertationen

GALOS, Stephan: Innovative Perspectives in Studying the Mass Balance of Mountain Glaciers.
 GEBETSBERGER, Manuel: Automated Probabilistic Forecasts for Precipitation and Temperature at Alpine Sites.
 MALLAUN, Christian: Dynamics of shallow convection over land: Airborne measu-

rements of wind, temperature, humidity and pressure in small cumulus clouds.

Karlsruher Institut für Technologie

Bachelorarbeiten

- BERGMANN, Sören: Untersuchungen physikalischer und chemischer Eigenschaften in Bezug auf die Eisaktivität natürlichen Feldspats.
- BOGERT, Pia: AIDA Experimente zur direkten Messung des Wassersättigungsdampfdrucks in unterkühlten Wolken bis -30°C.
- FRANK, Laura: Elektrostatische Aufladung von Wassermikrotropfen durch Influenz.
- KÖNIG, Nils: Analyse zum Einfluss der vertikalen Auflösung des Temperaturprofils auf die thermische Tropopausehöhe.
- KÖRLIN, Melissa: Fallstudien zur Nebelbildung in der Namib-Region auf der Basis von Satellitenbildern.
- KÖRNER, Benjamin: Case Study: An African Cold Air Surge in July 2005.
- WIEBER, Corina: Influence of Antifreeze Proteins on the Growth of ice Crystal.

Masterarbeiten

- GRAMLICH, Yvette: Characterization of Anthropogenic Fractions in Secondary Organic Aerosol.
- KARRER, Markus: Ice growth processes in two bulk microphysics schemes compared to radar observations.
- KEINERT, Alice: Secondary Ice Production upon Freezing of Supercooled Water Droplets in Air-flow.
- KUMAR, Divya: Application of Conical Refraction for Detection of Aerosol Particles.
- NEUBAUER, Anna Maria: Prognose der deutschen Windleistung für den Folgetag: Evaluierung und Verbesserung mittels Ensemble-Postprocessing.
- REINBOLD, Alexander: Modellbasierte Charakterisierung von Zyklonen nahe Westeuropa während des letzten glazialen Maximums.
- SCHMUCK, Paul: Niederschlag unterhalb des Radarstrahls. Kleinräumige Messungen mit einem X-Band Radar.
- SCHULZ, Sebastian: Bestimmung von Wasserkonzentrations- und Temperaturprofilen in Methan-Sauerstoffflammen mittels Diodenlaserspektroskopie.
- VASSEL, Maiken: Artic Multilayer Clouds.
- VOGEL, Franziska: First field application of a mobile expansion chamber to measure ice nucleating particles.
- WERCHNER, Sven: Einfluss von Pollenfragmenten auf die Eisbildung in Wolken.

Dissertationen

- FREY, Mathias: Characterisation and application of portable solar absorption spectrometers for the detection of greenhouse gas emissions from regional anthropogenic sources.
- GRUBER, Simon: Contrails and Climate Engineering - Process Studies on Natural and Artificial High-Level Clouds and Their Impact on Radiative Fluxes.
- NACHBAR, Mario: The microphysics of mesospheric cloud formation on Earth and Mars – Laboratory experiments.
- SCHMIDBERGER, Manuel: Hagelgefährdung und Hagelrisiko in Deutschland basierend auf einer Kombination von Radardaten und Versicherungsdaten.
- SCHNEIDER, Linda: Relative Impact of Surface and Aerosol Heterogeneities on Deep Convection.
- WALTER, C. Th.: Simulationen der Ausbreitung von Vulkanasche unter expliziter Berücksichtigung der optischen Eigenschaften der Aschepartikel.

Universität Kiel

Bachelorarbeiten

- DETLING, Nicolas: Das solare Signal im Nordatlantikraum und die Variabilität seiner räumlichen Struktur.
- GOLDE, Sandra: Polynjas im antarktischen Meereis im Kieler Klima Modell.
- JACKSOHN, Christoph: Vergleich der Variabilität im Nordatlantik in Klimasimulationen mit und ohne Flusskorrektur.
- KOSSMANN, Moritz: Unsicherheiten von atmosphärischen Indizes in Klimasimulationen.
- REHBERG, Maya: Einfluss der subdekadischen NAO Variabilität auf die Temperatur im Nordatlantik.
- VARCHMIN, Leonie: Measurement of evaporation from sands saturated with salt-solutions of varying composition and concentration.
- WINDMÜLLER, Melina: Untersuchung des Bio-Wetters in Kiel anhand meteorologischer Messungen am GEOMAR.

Masterarbeit

- METCALFE, Megan: Evaluating the forecast skill for offshore wind farms taking into account processes in the planetary boundary layer.

Dissertation

- WENGEL, Christian: Equatorial Pacific Variability in Climate Models.

Universität Köln

Bachelorarbeiten

- BÖCK, Tobias: Analyse von verschiedenen Kalibrationsmethoden für das HATPRO Mikrowellenradiometer.
- JENTZSCH, Katharina: Strahlungseffekt von Wolken in Ny Ålesund anhand von Fallstudien.
- KONJARI, Patrick: Langzeittrends des arktischen Wasserdampfgehalts.
- KREMER, Arthur: Nebelcharakterisierung mithilfe von JOYCE-Sensoren.
- SCHMERLING, Hendrik: Frontale Bewölkung in ICON-LEM.
- WALBRÖL, Andreas: Untersuchung der Abschwächung einer Multizelle über den Mittelgebirgen – Simulation mit WRF.
- WEISS, Cornelius: Lässt sich die Subsiding Shell um Cumuluswolken mittels bodengebundener Messgeräte beobachten?

Masterarbeiten

- AFZAL, Muhammad Arsalan: Determination of CBL height using ground based MWR & Radiosonde over one site in Jülich, Germany.
- KLIESCH, Leif-Leonard: Cloud Liquid Water Path Observations within the Trade Wind Environment on Barbados.
- MATHIAS, Luca: Synoptic-Mesoscale Analysis and Numerical Modeling of a Cold-Season Derecho on 3 January 2014 in Western Europe.

Dissertationen

- BERNDT, Jonas: On the predictability of exceptional error events in wind power forecasting: an ultra large ensemble approach.
- GATZEN, Christoph: Climatology and large-scale Dynamics of Derechos in Germany.
- KÜCHLER, Nils: Ground-based remote sensing of warm low-level stratified clouds – new perspectives and applications.
- LANGE, Anne Caroline: Observability of Sudden Aerosol Injections by Ensemble-Based Four-Dimensional Assimilation of Remote Sensing Data.
- SCHAFFERNICHT, Erik Jan: Linkage between Dust Cycle and European Loess in the Last Glacial Maximum Determined by Atmospheric Model Simulations.
- XIA, Qian: Development and Application of a Coupled Atmospheric and Hydrological Modelling System.

Universität Leipzig

Bachelorarbeiten

- LÖFFELMANN, Jana: Analyse von Trends solarer Gezeiten in der mittleren Atmosphäre.
 MOHR, Max: Trends in Windzeitreihen: Terrestrial Stilling oder Konsequenz steigender Windenergieausnutzung.

Masterarbeiten

- CHEVALIER SANTOS BULHOES, Karine: Aerosol processes in the marine boundary layer and free troposphere over the Eastern North Atlantic Ocean during July 2017.
 LEMME, Anneline: Der Vergleich von beobachteten und simulierten Wolkeigenschaften tropischer Konvektion über dem Atlantik unter Einfluss von Saharaluft.
 LOCHMANN, Moritz: Dynamik der atmosphärischen Grenzschicht über der Stadt.
 LÖFFLER, Mareike: Ice Nucleating Particles in the Atlantic Boundary Layer and around Antarctica.
 LUBITZ, Jasmin: Untersuchungen zur Immersionsgefriereffizienz von Flugaschepartikeln.
 METZNER, Enrico: Role of ‚Atlantification‘ in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean on Arctic Amplification.
 MEWES, Silke: Characterization of aerosol properties by lidar measurements at Haifa, Israel.
 MOHAMDEEN, Abdelrhman: Patterns Identification in Micrometeorological Simulations using EOFs Analysis.
 STAMMER, Peter: Water vapor Retrieval in the upper troposphere and lower stratosphere using airborne spectral solar measurements of Spectral Solar Irradiance.
 STREHL, Pit: Ist ein Einfluss auf Wolkeigenschaften im Luv und Lee von großen urbanen Gebieten in Satellitendaten erkennbar?
 URBANNECK, Claudia: Retrieval of aerosol optical and microphysical properties in Cyprus during A-LIFE and CyCARE by lidar and closure studies with airborne in-situ measurements – Towards aerosol-cloud interaction investigations (CCNIIN).
 VOGL, Teresa: Mix state of the arctic sub aerosol.
 WEGER, Michael: The impact of Saharan desert dust on cloud formation: A regional modelling study.
 WENKE, Marius: Veränderung der klimatischen Bedingungen auf der Grundlage phänologischer Jahreszeiten.

Dissertationen

- BLOCK, Karoline: Aerosol-Cloud-Radiation interactions in regimes of liquid water clouds.
 CARLSEN, Tim: Influence of snow properties on directional surface reflectance in Antarctica.
 FINGER, Fanny: Spectral Optical Layer Properties of Cirrus – Collocated Airborne Measurements and Radiative Transfer Simulations.
 NAIR, Aswathy Vijayan: Learning about marine cloud brightening: detectability of field experiments, benefits and risks of implementation.
 SCHMEISSNER, Tina: Exploring Mechanisms of Large Droplet Production in Trade Wind Cumuli.
 UNGLAUB, Claudia: Cloud regime based analysis of adjustments to aerosol-cloud interactions using spaceborne measurements.

Universität Mainz

Bachelorarbeiten

- LENSCH, Anna Maria: Eine statistische Analyse zur Wetterabhängigkeit bei der Nutzung der MVG-Leihfahrräder.
 REIFENBERG, Simon: Analyse von Luftmassenzusammensetzung und Transportregimen während der Messkampagne RACEPAC 2014.
 URBANEK, Moritz: Abschwächung einer tropischen Zyklone in vertikaler Scherströmung anhand ihres absoluten Drehimpulses.

Masterarbeiten

- KLUG, Birte: Numerical simulations of turbulence at a vertical wind tunnel.
 MAYER, Amelie: Transport und statistische Stabilität in der UTLS – Datenanalyse zu flugzeuggetragenen Messkampagnen.

Dissertationen

- GLIENKE, Susanne: Aircraft-borne In-Situ measurements of Microphysical Properties of Marine Stratocumulus Clouds.
 MAHNKE, Christoph Oliver: Untersuchungen zu Wolkenbildung und Aerosolmikrophysik in der tropischen Troposphäre und UT/LS: Messtechnik und flugzeuggetragene In-situ-Beobachtungen.
 OCTAVIANI, Mega: Investigation of atmospheric transport and chemistry of semivolatile organic pollutants using earth system models.
 PRESTEL, Isabelle: Dynamik von Banner-

wolken: Theoriebildung und Simulationen mit realistischer Orografie.

- RYBKA, Harald: Einfluss von aufgelösten subgridskaligen Prozessen: Implementierung und Analyse einer Superparametrisierung im Klimamodell EMAC.
 SCHLENCZEK, Oliver: Airborne and ground-based holographic measurement of hydrometeors in liquid-phase, mixed-phase and ice clouds.
 TEUBLER, Franziska: Dynamik von Rossbywellenpaketen aus einer quantitativen PV-Perspektive.
 TOMSCHE, Laura: Spurengastransport aus dem indischen Sommermonsun.
 VRIES, Andries-Jan de: Tropical-extratropical interactions and extreme precipitation events in the Middle East.

Universität München

Bachelorarbeiten

- BAUER, Magdalena: Vorhersagbarkeit von Niederschlag während der Hymex Periode.
 BERTHE, Daniel: Wirbelstrukturen in der turbulenten atmosphärischen Grenzschicht.
 MAIER, Richard: Bestimmung der Sichtweite aus Bildsequenzen.
 MÜLLER, Marcus: Untersuchung des Einflusses von Luftströmungen auf Multi-Kopter-basierte Spurengasmessungen.
 OCKENFUß, Paul: Simulation of Solar Irradiance During a Total Eclipse.
 PAVICIC, Sabrina: Der Wolkenbedeckungsgrad während der Messkampagne NARVAL-2.
 REUSCH, Arne: Untersuchung und Vergleich der Höhenzuordnung von model best-fit und CALIPSO korrigierten Meteosat-10 AMVs.
 SCHÄFER, Janik: On the Influence of 1D and 3D Radiative Transfer on the Evolution of Clouds in Complex Terrain.
 SPÄTH, Jonas: Untersuchung von NO₂-Immissionen auf verschiedenen Messhöhen in München.
 VOSS, Dominik: Wolkenparametrisierung für ein Ein-Säulen-Strahlungs- und Konvektionsgleichgewichtsmodell.

Masterarbeiten

- ALBERTI ARROYO, Carlos: Intercomparison of MAX-DOAS Measurements during the CINDI 2 Campaign using a 2-D MAX-DOAS Instrument.
 BOLL, Johannes: Measuring vertical NO₂ profiles by combining the DOAS-method with an UAV.

- EIRENSCHMALZ, Lisa: Flugzeuggetragene Schwefeldioxidmessungen in Emissionsfahnen urbaner Ballungsräume in Europa.
- FORSTER, Hermann: Bestimmung der nächtlichen Aerosol-optischen Dicke mit Hilfe eines CE318-T Sun Sky Lunar Photometers.
- GÖDDE, Felix: Detecting clouds in the presence of sunglint: An approach using spectral water vapor absorption.
- MÖBIUS, Matthias: Automatised measurement of traffic emissions, traffic flow and vehicle speeds.
- REINHARDT, Konrad V.: Zum Einfluss von Luftfeuchtigkeit, Temperaturgradienten und Wind auf die Schallausbreitung von Fluglärm am Beispiel typischer An- und Abflugverfahren des Münchner Flughafens.
- STEENKAMP, Sian: Die Bildung tropischer Wirbelstürme in der Nähe des Äquators.
- STRASSER, Nina: Optical In-Situ Monitoring of Small-Size Debris Particles.
- WEBER, Ines: Interaction of Mountain Waves with the Tropopause Jet: Case Study of a Turbulence Event.
- WOLFF, Sebastian: Bestimmung der Emissionsraten von CH₄- und CO₂-Punktquellen mit flugzeuggetragenen Lidar.

Dissertationen

- FRANK, Franziska: Atmospheric methane and its isotopic composition in a changing climate: A modeling study.
- GISINGER, Sonja: Gravity Waves in the Lower Atmosphere in Mountainous Regions and the Role of the Tropopause.
- HEIMERL, Katherina: Characterizing North American Biomass Burning Layers in the Free Troposphere with a Single Particle Soot Photometer.
- HELLER, Romy: Einfluss von Gebirgswellen auf die Wasserdampfverteilung in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre.
- RÄDLER, Anja: Modeling of convective storm hazard occurrence, taking convective initiation explicitly into account.
- SIRCH, Tobias: Multi-resolution nowcasting of clouds and DNI with MSG/SEVIRI for an optimized operation of concentrating solar power plants.
- STRANDGREN, Johan: The life cycle of anvil cirrus clouds from a combination of passive and active satellite remote sensing.
- ZHU, Ying: Citywide Measurements of Nitrogen Dioxide (NO₂) using a Combination of Remote Sensing and In-situ Measurement Techniques.

Technische Universität München

Bachelorarbeit

- BECKERT, Lisa: Test der Zweigmethode zur Erfassung der Pollenphänologie anhand der Baumarten Birke (*Betula pendula*) und Erle (*Alnus glutinosa*).

Masterarbeiten

- BENJAMIN, Caryl: Comparison of wood formation dynamics of different species at an elevational gradient in the Bavarian Alps.
- BISHWA, Ale Magar: Crop Monitoring Using Satellite Data.
- EWALD, Franziska: Auswirkungen erhöhter Temperatur und Trockenheit auf die Allergenität und Produktion von Gräserpollen.
- GEIGER, Alexandra: Assessing Future Climate Risks 2020 - 2050 for the USA.
- GRÖSCHL-GRASSL, Kaja: Climate growth relationships of Norway spruce along an elevational gradient underneath „Zugspitze“.
- KLOCKOW, Felicitas: Influence of stand structure on air temperature in mixed stands along altitudinal gradients in the Werdenfelser Land.
- ROBRA, Sina: The Impacts of Strong Winds and Heavy Rainfalls on the Assets of Rural Subsistence Livelihoods in Northern Tanzania. An Analysis Done with Questionnaires.

- SCHRÖCKER, Lena: Evaluierung von Hobo-Loggern nach 7 Jahren Nutzung und Analyse des Temperaturgradienten und der Reaktionsgeschwindigkeit des Pflanzenwachstums in den Bayerischen Alpen.
- UTZ, Christina: Assessing the Exposure to Temperature and Wind Extremes for European Cities in the Nearby Future from 2021–2050.

- WEBER, Timo: Association between heatwaves and mortality using the Universal Thermal Climate Index.

Dissertation

- BHUYAN-ERHARDT, Upasana: Drought quantification by multivariate indices and their validation against environmental data.

Universität Trier

Bachelorarbeit

- SCHMITZ, Maximilian: Auswirkungen des Klimawandels auf den Weinbau in der Region Mosel.

Masterarbeit

- GLAW, Lukas: Thermal Signatures over Polar Ice Sheets – A Study using MODIS Data.

Universität Wien

Bachelorarbeiten

- BAUER, Clemens: GCAPE-Analyse im östlichen Alpenraum.
- EYBL, Caroline: Periodische tageszeitliche Schwankungen von Temperatur und Wind an Strahlungstagen im Aichfeld.
- FALTL, Gloria: Vergleich der Ceilometerdaten am Flughafen Salzburg.
- FERNSEBNER, Marcel: Vorhersagbarkeit von Downburst-Ereignissen.
- HAHOFER, Judith: Vergleich von LiDAR-Windmessungen und Anemometermessungen an einer Windkraftanlage im Windpark Ellern, Deutschland.
- HASEL, Kristofer: Wechselwirkung zwischen Wind in Kammhöhe und Inversionswetterlage am Beispiel Aichfeld.
- HEBENSTREIT, Kevin: Berechnung der Schneeschmelze mittels vereinfachter Energiebilanz.
- HINGER, David: Qualitäts- und Standortanalyse staatlicher und privater Wetterstationen im Wiener Raum für Feuchtigkeit, Wind und Niederschlag.
- KOGLER, Martha: Untersuchung von Föhnlagern im Aichfeld.
- KÖHLER, Chantal: Vergleich von Zeitreihen der Abweichung zwischen Radiosonden- und Reanalysen.
- KÖTTL, Alexander: Comparison of different weather stations based in statistical analysis.
- KRAINER, Peter: Meteorologische Effekte zur Bildung von Kaltluftseen am Beispiel Grünloch.
- MADJDI, Nikta: Entscheidungsbaum: Methoden in der Meteorologie.
- PRUCKNER, Viktoria: Einfluss von Messunsicherheiten in den Verifikationsergebnissen.
- RUPNIG, Thomas: Vergleich von verschiedenen Total Column Water Vapor Abschätzungen auf einem einheitlichen Gitter.
- SEITNER, Vanessa: Plausibilitätsprüfung und Qualitätskontrolle wissenschaftlicher Daten im Aichfeld.
- STOLZ, Stephan: Potentiale von Gleichstrommessungen im österreichischen Hochspannungsnetz als Indikator für eine Blitzprognose.
- SUPPAN, Nikolaus: Hochauflösende Analyse von Kaltfrontdurchgängen im alpinen Becken am Beispiel Aichfeld.

TASCH, Raphael: Evaluierung zweier Testpyranometer mit der ARAD/BSRN Standardmessung am Sonnblick Observatorium im Hinblick auf thermische Offsets.

UNGER, Bettina: Fallstudie zur Untersuchung der Anwendbarkeit des Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) bei Waldbrandereignissen in Österreich.

VOLLGRUBER, Doris: Bestimmung von Hydrometeor-Messereignissen am Sonnblick Observatorium.

WINKELBAUER, Susanna: Vertikaler Impulstransport in der Grenzschicht.

ZINKL, Anna: Strahlungsintensitätsverteilung in La Gamba (Costa Rica): Vergleich unterschiedlicher Bedeckungsgrade durch Vegetation.

Masterarbeiten

AUER, Isabel: Statistical evaluation of the relation between the precipitation process and $\delta^{18}O$ measurements in Vienna.

HORNBOGNER, Martin: Case studies of isotope measurements during precipitation events in Vienna.

MARTIN SANTOS, Ignacio: Ensemble Generator of Radar Precipitation Estimates.

WEBER, Manuel: Untersuchung des Blitzschlagverhaltens am Gaisberg.

WEISS, Clemens: Quantifying the uncertainty of empirical models for the icing on structures and wind turbine blades.

Dissertation

NABAVI, Seyed Omid: Characterization of dust storms in West Asia.

Universität Würzburg

Bachelorarbeiten

HETTERICH, Alexandra: Meteorologische Einflussfaktoren für Wachstumsparameter von Stadtbäumen in Würzburg.

SCHARF, Lisa: Herausforderungen bei der Erfüllung des Monitorings des Sendai Rahmenwerks für Katastrophenvorsorge in Deutschland.

Masterarbeiten

CHI, Mengjie: Niederschlagsmuster und atmosphärische Zirkulation in Ostasien.

POHL, Felix: Future climate analog regions for the Steigerwald.

Fachhochschule Zürich

Diplomarbeit

FLUCK, Stefan: Turbulenzmodellierung in der Nähe von Flugplätzen – Konzeptstudie.

Universität Zürich

Dissertationen

BRUNAMONTI, Simone: Balloon-borne measurements of temperature, water vapor, ozone and aerosol backscatter on the southern slopes of the Himalayas during StratoClim 2016-2017.

DAVID, Robert O.: An Investigation of Ice Nucleation: From Pores to the Outdoors.

DIETLICHER, Remo: Ice clouds: from ice crystals to their response in a warming climate.

GRAF, Pascal: The effect of below-cloud processes on short-term variations of stable water isotopes in surface precipitation.

HUANG, Wan Ting Katty: Aerosol Effects on Climate, with an Emphasis on the Arctic.

HUMPHREY, Vincent: Terrestrial water storage: large-scale variability and impacts on the global carbon cycle.

IMAMOVIC, Adel: Theoretical and Numerical Studies of Deep Convection over Orography and Soil-Moisture Heterogeneities.

KUMAR, Anand: Enhanced Ice Nucleation Efficiency of Mineral Dust Particles in Ammonia/Ammonium Solution Droplets.

LACHER, Larissa: Measurements of Ice Nucleating Particles at the High Altitude Research Station Jungfraujoch.

MEYER, Bettina: Boundary-Layer Turbulence and Clouds in the Atmosphere: Prospects for Closures.

OIKONOMAKIS, Emmanouil: Investigation of changes in surface ozone concentrations in Europe since the 1990s with an air quality model.

RIBOLDI, Jacopo: Modulation of the downstream impact of extratropical transition by the midlatitude flow configuration: revisiting the phasing problem.

SCHWINGSHACKL, Clemens: Quantifying Effects of Land-Climate Interactions on Spatiotemporal Variations of Near-Surface Air Temperature.

STOLPE, Martin B.: Dependence of Climate Change on the Climatological Base State and Internal Variability.

Nachträge für das Jahr 2017

Universität Bonn

Bachelorarbeiten

NEUSCHÄFER, Timo; TRÖMEL, Silke: Statistische Analyse von Zugbahnen konvektiver Zellen.

VIRBOM, Matthias: Analyse eines Hagelunwetters vom 05.07.2015 mit Hilfe eines polarimetrischen X-Band Radars.

Masterarbeiten

BUSCHOW, Sebastian: Estimating the local dimension of fractal attractors from extreme recurrences.

LOSCH, Florian: Evaluation of the COSMO- and WRF-Model by application of the initial tendency method.

Universität Frankfurt

Bachelorarbeit

MASCUS, Elena Luise: Mountain waves over The Pyrenees – Analysis of a case study during the campaign La Cerdanya 2017 using numerical simulations and meteorological observations.

Masterarbeiten

KOBAK, Robert: Untersuchungen zur Auswertung von Aircore-Daten.

WOLF, Jennifer: Atmosphärische Eiskeimkonzentrationen auf dem Jungfraujoch während der INUIT/CLACE Kampagne 2017.

Nachträge für das Jahr 2016

Universität Bonn

Bachelorarbeit

KLEINERT, Felix: Strahlungseffekte und Transport von vulkanischem Aerosol am Beispiel des Eyjafjallajökull.

Masterarbeit

POLL, Stefan: Modeling convectively induced secondary circulations in the Terra Incognita with TerrSys MP.

promet

Vorschau auf die nächsten Hefte

- Regionale Klimamodellierung II – Anwendungen
- Grundlagen des Kohlenstoffkreislaufs
- Neues aus der „Radarmeteorologie“

