

Nico Bauer



What are the potential
causes of incorrect
predictions of tropical
cyclone intensification in
medium-range ensemble
forecasts?

Masterarbeit

Bauer, Nico: What are the potential causes of incorrect predictions of tropical cyclone intensification in medium-range ensemble forecasts?, Hamburg, Bachelor + Master Publishing 2022

Originaltitel der Abschlussarbeit: What are the potential causes of incorrect predictions of tropical cyclone intensification in medium-range ensemble forecasts?

PDF-eBook-ISBN: 978-3-95993-613-2

Druck/Herstellung: Bachelor + Master Publishing, Hamburg, 2022

Zugl. Karlsruhe Institut für Technologie, Deutschland, Masterarbeit, 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und die Diplomica Verlag GmbH, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte vorbehalten

© Bachelor + Master Publishing, Imprint der Bedey & Thoms Media GmbH
Hermannstal 119k, 22119 Hamburg
<http://www.bachelor-master-publishing.de>, Hamburg 2022
Printed in Germany

Zusammenfassung

Tropische Wirbelstürme stellen eine erhebliche Gefahr für die Gesellschaft und die Wirtschaft dar. Fehlerhafte Prognosen führen zu einer falschen Beratung von Katastrophenmanagern und damit zu hohen wirtschaftlichen und sozioökonomischen Kosten. Während die Vorhersagequalität der Zugbahn in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat, stellen Intensitätsvorhersagen eine wesentlich größere Herausforderung dar. Aufgrund dieser Vorhersagebarrieren sind Verbesserungen bei den numerischen Wettervorhersagemodellen von großer Bedeutung. Die Vorhersagbarkeit der Intensität tropischer Wirbelstürme mithilfe von Ensemble-Vorhersagemodellen hängt von verschiedenen, dynamischen und thermodynamischen Umgebungsbedingungen ab. Diese Studie konzentriert sich auf die Ensemble-Vorhersagen des Modells des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF). Das Ensemble umfasst 51 Mitglieder, einen deterministischen hochauflösenden Lauf und 50 Vorhersagen, mit leicht veränderten Anfangsbedingungen.

In dieser Studie werden die Prozesse untersucht, die zur Vorhersageunsicherheit der Intensität tropischer Wirbelstürme über dem westlichen Nordpazifik beitragen. Ziel dieser Arbeit ist es, mögliche Ursachen für die fehlerhaften Intensitätsvorhersagen zu identifizieren und ihre Beiträge zur Vorhersage zu untersuchen. Zwei Fallstudien mit einer Überschätzung und einem Ereignis mit einer Unterschätzung der Intensität tropischer Wirbelstürme in verschiedenen Gebieten des westlichen Nordpazifiks bilden die Grundlage für diese Untersuchung. Die beiden 'over-forecasting' Fälle mit einer Überschätzung der Sturmintensität sind der tropische Zyklon Atsani, der sich am 28 Oktober 2020 im westlichen Teil bildete, und Kammuri, der sich am 24 November 2019 im zentralen Teil des Ozeanbeckens entwickelte. Der tropische Wirbelsturm Champi mit einer unterschätzten Intensität bildete sich am 13 Oktober 2015 über dem östlichen Teil des westlichen Nordpazifiks. Dieser Sturm wird in dieser Arbeit als ein 'over-forecasting' Fall definiert. Die Anwendung eines k-means Clustering auf die 50 verschiedenen Mitglieder ergibt eine klare Trennung zwischen Intensität und Ort der simulierten Stürme in Abhängigkeit von der Vorhersagezeit, mit dem ersten erheblichen mittleren Intensitätsfehler gegenüber der Beobachtung und der Divergenz im Ensemble. Zwei Cluster, ein intensives und ein schwaches mit den größten Druckunterschieden und den kleinsten Sturmzugbahnabweichungen, werden für die Analyse verwendet. Diese Methode dient der Untersuchung, der Umgebungsbedingungen und kleinskaligen internen Prozessen in tropischen Zyklonen für die beiden Cluster, die unterschiedliche Intensitäten und minimale Zugbahnabweichungen aufweisen.

Bei den drei Stürmen zeigt nur Kammuri einen Beitrag der vertikalen Windscherung zur fehlerhaft vorhergesagten Intensität. Eine höhere vertikale Windscherung führt zu einem intensiveren Eindringen trockener Luft mit niedriger Entropie aus der mittleren Troposphäre, was die Intensivie-

zung des tropischen Wirbelsturms mindert. Im Gegensatz dazu zeigen die beiden anderen Stürme zum kritischen Vorhersagezeitpunkt kurz vor der erhöhten Vorhersageunsicherheit keine offensichtlichen Auswirkungen und danach ein umgekehrtes Ergebnis. Relative Sturm-Komposite der vertikal integrierten Wasserdampf Flüsse zeigen einen Beitrag zu den Vorhersagefehlern für alle drei Stürme. Am deutlichsten ist dieser Beitrag bei dem Ereignis Champi, das ein 'under-forecasting' der Intensität aufweist. Das intensivere Cluster dieses Sturms simuliert einen verstärkten Wasserdampf flux über das gesamte Sturmgebiet, in einem Kreis mit einem Radius 5° vom Sturmzentrum, verglichen mit dem schwachen Cluster. Außerdem sind die Konvergenz der Winde in der unteren Troposphäre in 925 hPa und die Divergenz der Winde in der oberen Troposphäre in 200 hPa höher. Diese erhöhten Werte stehen im Zusammenhang mit den verstärkten Wasserdampf flüssen und der positiven Rückkopplung zwischen den nach innen gerichteten Wasserdampf flüssen und einem höheren Feuchtigkeitsangebot im inneren Kern. Die feuchte Schicht im Kernbereich impliziert eine intensive Freisetzung von latenter Wärme, die zu einer stärkeren Sekundärzirkulation beiträgt. Infolgedessen bieten die Ensemblemitglieder, die eine stärkere Intensivierung anzeigen, dem Einmischen von Luftmassen mit geringer Entropie eine ausgeprägtere Persistenz und intensivieren sich kontinuierlich.

Die positive Auswirkung der diabatischen Erwärmung auf die Intensivierung wird durch die verschiedenen Terme der Drucktendenz Gleichung demonstriert. Kammuri und Champi zeigen eine zwei- bis dreimal höhere diabatische Erwärmung für das intensive Cluster zur Intensivierung als für das schwache Cluster. Nur Atsani zeigt keinen offensichtlichen Unterschied. Die Umgebung dieses Sturms demonstriert einen verstärkten synoptischen Antrieb aufgrund einer nördlicheren Lage, was den diabatischen Heizterm über die Residuumsberechnung der Drucktendenz Gleichung beeinflusst. Atsani zeigt jedoch eine potenzielle Überprognose der Stärke der Wasserdampf flüsse, die durch einen Kaltluftausbruch über dem nordwestlichen Teil des westlichen Nordpazifiks begünstigt wurden. Diese verstärkten Flüsse sind eine Feuchtigkeitsquelle für das Zentrum des tropischen Wirbelsturms in der unteren Troposphäre. Darüber hinaus deutet das intensivere Cluster auf einen stärkeren, nach außen gerichteten Feuchtigkeitsgradienten in der mittleren Atmosphäre hin, was zu einem kleineren konvektiven Bereich im Inneren der tropischen Zyklone führt. Folglich erzwingen die erhöhten Strahlungsunterschiede in der höheren Troposphäre eine Konvergenz der Winde im inneren Kern in der unteren Troposphäre.

Contents

1	Introduction	1
2	State of Research	5
2.1	Tropical cyclones	5
2.1.1	Favorable environmental conditions	7
2.1.2	Genesis factors	10
2.1.3	Regional differences within the WNP	12
2.2	Uncertainties of intensity forecasts in ensemble prediction systems	14
2.3	Potential causes of errors in the prediction of TCI	16
2.3.1	Ventilation of low entropy air	16
2.3.2	Northerly cold surges	18
2.3.3	Water vapor fluxes	19
2.3.4	Convective heating	20
3	Research Questions	23
4	Data and Methods	25
4.1	Ensemble prediction system	25
4.2	Storm identification and case studies	26
4.3	Data organization and analysis	29
4.3.1	K-means clustering	30
4.3.2	Storm-relative composites and normalized differences	33
4.4	Storm-relative cold surge index	33
4.5	Pressure tendency equation	35
5	Case Studies: Over-forecasting	39
5.1	Tropical cyclone Atsani	39
5.1.1	Dynamic factors	40
5.1.2	Thermodynamic parameters	41
5.1.3	Ventilation of dry air	45
5.1.4	Cold surge	49
5.1.5	Water vapor fluxes	52
5.2	Tropical cyclone Kammuri	57
5.2.1	Dynamic factors	58
5.2.2	Thermodynamic Parameters	59
5.2.3	Ventilation of low-entropy air	62

5.2.4	Water vapor fluxes	63
6	Case Study: Under-forecasting	69
6.1	Tropical cyclone Champi	69
6.1.1	Dynamic parameters	69
6.1.2	Thermodynamic Parameters	71
6.1.3	Ventilation of low entropy air	73
6.1.4	Water vapor fluxes	75
7	Diabatic Heating	79
8	Conclusion and Outlook	83
	References	94

1 Introduction

Tropical cyclones (TCs) are the most destructive weather phenomena in the world (Longshore, 2008). These storm systems are common in large parts of highly populated tropics and subtropics with favorable atmospheric conditions. Society's vulnerability to them and the associated annual economic costs have risen steadily Bevere et al. (2020): mean worldwide insured losses averaged 75 billion USD per year in the 10 years between 2009 and 2019 (Bevere et al., 2020). Cinco et al. (2016) analyzed TC data and observed that in the period from 1951 to 2013, an average of 19.4 TCs entered the Philippine Area of Responsibility in the Western North Pacific (WNP), and nine TCs moved over the islands. Consequently, the Philippines have the highest number of landfalling storms and the highest rate of severe TC worldwide. In turn, the TCs that move over the islands into the South China Sea (SCS) frequently affect the coast of Vietnam. Through a spatial assessment of TC vulnerability, Nguyen et al. (2019) have demonstrated a high or very high susceptibility in most parts of coastal Vietnam. The most extreme event over the WNP in the last century was Typhoon Haiyan, which caused 6,300 deaths and widespread economic and socioeconomic damage (Lagmay et al., 2015). This significant susceptibility implies the high importance of improving weather forecast models for greater predictive capability. In recent decades, the quality of forecasting tropical cyclone tracks has increased steadily at the European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) and other numerical weather prediction centers (Yamaguchi et al., 2017). Nevertheless, intensity predictions still present more significant challenges (Rappaport et al., 2009; Cangialosi and Franklin, 2012; Bonavita et al., 2017).

Cyclones that affect the coasts of Southeast Asia are additionally influenced in their intensity by long-lasting cold surges from the Asian Continent (Takahashi et al., 2011). According to Chang et al. (2003), tropical cyclones that frequently develop in October or November over the WNP are strongly affected by the northerly wind surges over the SCS. In autumn, at the time of cold surge occurrence over the SCS, TCs formed over the WNP indicate a higher probability of straight westward movement over the Philippines than in other seasons (McBride, 1995). In summer, TCs more frequently demonstrate a recurvature to the north close to the Philippines. Therefore, the frequent cold surge occurrence period exhibits the highest TC impact for the Philippines and Vietnam. The induced pressure difference between the wind surge area outside the cyclone and the center leads to externally forced convergence in association with enhanced water vapor fluxes towards the storm center (Gray, 1998). Therefore, sub-monthly intense cold surges over the SCS enhance convective activity there (Compo et al., 1999). This convective activity is due to the higher amount of latent heat release that is an essential contributor to tropical cyclone intensification (TCI) (McBride, 1995).

The lower quality of intensity forecasts are mainly due to small-scale processes like random, chaotic moist convection at the beginning of a rapid intensification stage Tao and Zhang (2014) and differences in dynamical parameters, such as vertical wind shear in regimes with a strongly vertical and horizontal fluctuating wind field (Komaromi and Majumdar, 2014). These limitations are enhanced under increasing environmental vertical wind shear conditions, especially for onset time of rapid intensification (Zhang and Tao, 2013). Komaromi and Majumdar (2014) used several metrics to investigate quantification of predictability using the Ensemble Prediction System (EPS) at ECMWF. The study shows that 850–200hPa bulk environmental vertical wind shear is predictable one week prior, while 200hPa divergence and 850hPa vorticity are only predictable 24 hours prior. Komaromi and Majumdar (2015) also indicate a strong sensitivity of relative humidity at 700 hPa at the beginning and the end of the cyclogenesis due to the timing and location of dry air in the middle troposphere. Values under 60% are within a radius of 300km from the circulation center, a limiting factor for genesis. According to Emanuel (1986), deep column moisture and convective available potential energy cause much of the ensemble spread. These uncertainties are worsened by differences in convection-related latent heat fluxes and wind-induced surface heat exchange (WISHE) processes. These discrepancies cause minor moisture discrepancies in the boundary layer that are highly influential on moist convection (Van Sang et al., 2008). As a result, intensity forecasts are intrinsically limited.

In this thesis, TC track data from the The Observing system Research and Predictability Experiment (THORPEX) THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE) database from 2011 to 2020 is used to identify three case studies with the most substantial spread in predicting TC intensification. Vitart et al. (2012) used the mean absolute intensity and position error to compare the skill of intensity forecasts for two different cyclone tracking systems. A mean intensity error is computed in this study to determine whether a TC forecast is defined as an over-forecasting (OFC) event with an enormously increasing negative value or an under-forecasting (UFC) with a significantly growing positive value. Therefore, an OFC is a tropical cyclone event with a rapidly rising negative mean error in a forecast period up to 120 h. Additionally, the spread in the ensemble is considered to hold a clear separation in the intensity of the different clusters. Hamill et al. (2011) computed the mean spread for Hurricane Sandy in the global forecasting system ensemble forecast to analyze their track evolution. In this work, the formula is applied as the mean spread of intensity.

Gaining a better understanding of the processes behind this prediction error is the main target of this study. For this purpose, three events with the strongest OFC and UFC and the highest divergence in the ensemble after 120 h are selected. A k-mean clustering according to minimum pressure and location after lead time is used to organize the members and make them comparable (Hartigan and Wong, 1979). The calculation of normalized differences provides a better comparison between the different determined clusters of the atmospheric state variables at various vertical levels, fields, and times (Torn et al., 2015). The ventilation index Tang and Emanuel (2012) is computed to describe the thermodynamic and dynamic processes that are subject to tremendous possible uncertainties. This includes the relationship between the bulk environmental vertical wind shear, the maximum potential intensity Bister and Emanuel (2002), and the entropy deficit (Tang and Emanuel, 2010). Additionally, the calculation of the modified cold surge index from Chang et al. (2005) expresses

the sensitivity in the model regarding enhanced moisture fluxes and convective activity. Contributions to intensification by the corresponding latent heat release are evaluated by the (Fink et al., 2012, their pressure tendency equation (PTE)). This differential equation includes five different terms and relates their amounts to the pressure fall of an extratropical cyclone. In this study, the PTE is applied to storms with a warm core thermal structure for the first time.

The theoretical background of favorable atmospheric conditions, genesis, and indices used in Chapters 5 and 6 are explained in Chapter 2. Chapter 3 defines the research questions. The used data and applied methods are stated in Chapter 4. In Chapter 5, the case studies with over-forecasting are analyzed regarding their sensitive acting environmental conditions. The strongest under-forecasting event is studied in Chapter 6, followed by a discussion of the discrepancies between the different locations and case studies. Chapter 7 analyzes the findings from the PTE and their implications for predicting tropical cyclone intensity. In Chapter 8, the main points are summarized and discussed, recording results from previous studies, along with a brief outlook for future research.

2 State of Research

The first part of this chapter describes the general characteristics of TCs and their environmental and synoptical features that affect the development and intensification process. In the second part, their distinctions across different ocean basins are explained. Various uncertainty causes from ECMWF are characterized in (Sec.2.2), along with a comparison between the parts within the WNP since this is the central area of the case studies. This is followed by an introduction into forecast uncertainties in the EPS relating to TCI. Finally, indices for studies of primary error source-related variables are described based on their application reasons. Additionally, the important principle of convective heating in TCI is illustrated.

2.1 Tropical cyclones

TCs are defined as non-frontal synoptical low-pressure systems over warm water in the tropics or subtropics with a closed cyclonic surface wind circulation that includes organized deep convection (McBride, 1995). Maximum sustained wind speed and minimum central pressure are the main characteristics of their intensity. The maximum sustained wind speed over 1 or 10 min (dependent on their location) is commonly used to define different intensity stages (Longshore, 2008). The threshold value between a tropical depression and a tropical storm is 17 ms^{-1} . If wind speeds are between 18 and 32 ms^{-1} , they are classified as tropical storms. In contrast, storms with wind speeds above 32 ms^{-1} are called hurricanes in the Western North Atlantic or Eastern North Pacific, typhoons in the study area of the WNP, and severe tropical cyclones elsewhere (Emanuel, 2003).

The circulation of a mature TC with wind speed above 32 ms^{-1} is mainly characterized by its primary and secondary circulation. The primary circulation is equivalent to the tangential wind of a cyclone, which is given as a first approximation in gradient wind balance above the frictional forced boundary layer McBride (1995), defined as:

$$v_G = \frac{v_c}{\frac{1}{2R_c} + \sqrt{1 + \frac{1}{4R_c^2}}}, \quad (2.1)$$

where v_c is the cyclostrophic wind, which is approximately the wind in the inner core of the cyclone and

$$R_c = \frac{v_c}{f_r} \quad (2.2)$$

is the Rossby number with the Coriolis parameter f_r . R_c is large near the cyclone center and small in the outer areas of the TC, where the Coriolis force dominates and the winds are roughly in geostrophic balance. Several investigations have shown that the strength of the primary circulation