

Bachelorarbeit

Überprüfung des Advektions-Kondensations-Modells für eine exemplarische
Trockenzone anhand von Rückwärtstrajektorien

Nele Gärtner

nele.gaertner@studium.uni-hamburg.de
Studiengang Meteorologie
Matr.-Nr. 7144087

Erstgutachter: Prof. Stefan A. Bühler
Zweitgutachter: M.Sc. Theresa Lang

Abgabe: 05.10.2021

Bachelorarbeit im Fachbereich Erdsystemwissenschaften der Universität Hamburg.
Thema: Untersuchung einer Subsidenzzone in der freien Troposphäre anhand von Rückwärtstrajektorien.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Hintergrund: Advektions-Kondensations-Modell	3
3	Methodik	5
3.1	Auswahl eines Kontrollgebietes	5
3.2	Berechnung der Trajektorien mit Lagranto	7
3.3	Methode zur Berechnung der letzten Sättigungspunkte	8
4	Überprüfung des Advektion-Kondensations-Modells anhand einer tropischen Trockenzone	9
4.1	Verlauf der Rückwärtstrajektorien	9
4.2	Letzter Sättigungspunkt	11
4.3	Temperaturverlauf einzelner Trajektorien	13
4.4	Entwicklung der Feuchte nach dem letzten Sättigungspunkt	16
4.5	Verknüpfung von Feuchtesprüngen mit Niederschlags- und Wolkenkonden- satsdaten	18
5	Zusammenfassung	21

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung des Advektions-Kondensations-Modells zur Entstehung von Trockenzonen	3
2	Karten der relativen Feuchte am 8. September 2016 um 21.00 Uhr in einer Höhe von etwa 500hPa. In (a) ist der Bereich gekennzeichnet, der in (b) vergrößert dargestellt ist. In (b) ist das Kontrollgebiet markiert in dem die Rückwärtstrajektorien gestartet werden.	6
3	Horizontaler Verlauf innerhalb des betrachteten 15-Tage Zeitraums der Rückwärtstrajektorien, die im Kontrollgebiet gestartet wurden.	9
4	Vertikal integriertes Wolkeneis QI am 8. September 2016 um 21 Uhr.	9
5	Zeitlicher Verlauf (a) der Höhe und (b) der relativen Feuchte entlang der Trajektorien.	10
6	Rückwärtstrajektorien, die einen letzten Sättigungspunkt besitzen, sind ab diesem Punkt dargestellt.	11
7	Die letzten Sättigungspunkte eingefärbt nach (a) der Temperatur der Luftpakete am letzten Sättigungspunkt und (b) der zurückliegenden Zeit der letzten Sättigungspunkte	12
8	Histogramm der Temperaturen beim letzten Sättigungsereignis. Die schwarzen vertikalen Linien kennzeichnen Gruppen von Trajektorien, deren Verlauf in den Abbildungen 9 und 10 genauer betrachtet wird.	13
9	Temperaturverlauf einiger zufällig ausgewählter Trajektorien, deren Temperatur am letzten Sättigungspunkt zwischen 218 und 220 K liegen. Als vertikale Linien sind hier die Zeitpunkte der letzten Sättigungspunkte markiert.	14
10	Temperaturverläufe der Trajektorien mit Temperaturen (a) >250 K und (b) <205 K am letzten Sättigungspunkt.	15
11	Vergleich der wahren relativen Feuchte in der Zielregion mit der relativen Feuchte, die mit dem Advektions-Kondensations-Modell am letzten Sättigungspunkt vorhergesagt wird.	17
12	Zeitlicher Verlauf der spezifischen Feuchte, Niederschlags- und Wolkenkondensatsdaten entlang ausgewählter Trajektorien.	18

Abstract

Water vapor has – as the most important greenhouse gas – an impact on the outgoing longwave radiation (OLR) of the earth. Especially in the subtropical dry zones, where the water vapor concentration is low, its change can have significant influence, due to the approximately logarithmic dependence of OLR on water vapor concentration. Therefore the implementation of humidity models for dry zones has been focused on in many scientific areas.

This thesis will put the emphasis on the simplest model to explain the humidity in the free troposphere in the subtropics: The advection-condensation model. Many studies have already successfully reproduced humidity fields with this model, but it has not been reviewed for dry zones specifically. The model's main assumption consists in the constant specific humidity along an air parcel's trajectory, except for condensation events where the specific humidity decreases. In order to analyse the history of air parcels in dry zones, the course of back trajectories that are started within the dry zones are analysed. Furthermore their last saturation points are determined. This makes it possible to check the main assumption of the advection-condensation model by comparing the predicted relative humidity by the advection-condensation model with the actual relative humidity within the dry zones. This allows to quantify the effect of processes that are neglected in the advection-condensation model. A comparison of the development of the specific humidity with precipitation and cloud condensate data provides an indication of whether evaporation of cloud condensate or precipitation represents a possible cause for changes in the specific humidity after the last saturation point.

1 Einleitung

Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas der Erdatmosphäre. Es absorbiert Strahlung im infraroten Spektralbereich. Die Erde strahlt ebenfalls in diesem Wellenlängenbereich ab. Die ausgehende langwellige Strahlung (engl. outgoing longwave radiation; OLR) stammt in einem großen Wellenlängenbereich nicht vom Erdboden, sondern aus der Atmosphäre. Nach dem Stefan-Boltzmann Gesetz strahlt ein schwarzer Körper nach seiner Temperatur in vierter Potenz ab. Somit kann umgekehrt auch die Temperatur bestimmt werden, die ein schwarzer Körper haben müsste, um eine bestimmte Strahlungsflussdichte zu erzeugen. Diese wird als Helligkeitstemperatur bezeichnet. Übersetzt man die OLR in eine Helligkeitstemperatur, liegt das sogenannte effektive Emissionslevel dort, wo die Temperatur der Helligkeitstemperatur am Oberrand der Atmosphäre entspricht. Das effektive Emissionslevel gibt somit Aufschluss darüber, aus welchem Atmosphärenlevel ein Großteil der OLR stammt. Die Höhe dieses Levels hängt von der optischen Dicke der Atmosphäre ab. Je mehr Wasserdampf in der Atmosphäre ist, desto optisch dicker wird die Atmosphäre und der effektive Emissionspunkt verschiebt sich nach oben zu kälteren Temperaturen. Demnach wird die Abstrahlung geringer und die Atmosphäre erwärmt sich. Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre hat somit einen immensen Einfluss auf die OLR der Erde. Außerdem beeinflusst Wasserdampf das Klima durch das sogenannte Wasserdampf-Feedback (Held und Soden, 2000). Grundsätzlich beschreibt das Wasserdampf-Feedback, dass bei steigenden Temperaturen in der Atmosphäre die Wasserdampfkonzentration zunimmt. Dadurch sinkt die OLR und die Temperatur in der Atmosphäre muss im Sinne der Energiebilanz noch mehr zunehmen. Deshalb handelt es sich bei dem Wasserdampf-Feedback um ein positives Feedback, da es die Erwärmung der Erde durch externe Antriebe verstärkt.

Für den Strahlungshaushalt der Erde sowie das Wasserdampf-Feedback spielen die trockenen Regionen der Tropen und Subtropen eine besonders wichtige Rolle. In Trockenzone in der freien Troposphäre ist der Wasserdampfgehalt sehr gering, weshalb sie grundsätzlich effektiv abstrahlen können (Pierrehumbert, 1995)– der Emissionspunkt liegt niedriger und damit bei höheren Temperaturen, sodass mehr abgestrahlt wird. Dies geht mit einer besonderen Sensitivität gegenüber steigender Wasserdampfkonzentration einher, da der Einfluss dieser auf die OLR näherungsweise logarithmisch verläuft. Das bedeutet, dass kleinste Änderungen in der Wasserdampfkonzentrationen einen großen Effekt auf die OLR und damit auf das Wasserdampf-Feedback haben (Spencer und Braswell, 1997). Aufgrund dieses Verhaltens ist es wichtig zu verstehen, welche Prozesse die Feuchte in den tropischen Trockenzone bestimmen.

Da besonders die Vorgeschichten der trockenen Luftpakete von Interesse bei dieser Untersuchung sind, werden auf Grundlage von ICON-Simulationen von einer exemplarischen Trockenzone aus Rückwärtstrajektorien berechnet. Die einfachste mögliche Erklärung für die Feuchte in einer Trockenzone liefert das sogenannte Advektions-Kon-

densations Modell, das in Kapitel 2 genauer beschrieben wird. Die Kernannahme dieses Modells ist, dass die spezifische Feuchte eines Luftpakets nur durch Kondensation abnehmen kann und ansonsten erhalten bleibt. Unter dieser Annahme ist die spezifische Feuchte eines Luftpakets alleine durch den Ort, an dem das Luftpaket zuletzt gesättigt war, dem sogenannten letzten Sättigungspunkt, bestimmt. Denn wenn sich die spezifische Feuchte nur bei Kondensation ändert, müsste diese ab dem letzten Sättigungspunkt konstant bleiben und somit der spezifischen Feuchte in der Zielregion entsprechen. Bei der Überprüfung der Trajektorien auf diese Annahme wird die mit dem Advektions-Kondensations-Modell vorhergesagte relative Feuchte mit der wahren relativen Feuchte in der Zielregion verglichen.

Ein Prozess, der zu einer Änderung der Feuchte nach dem letzten Sättigungspunkt führen kann, ist die Evaporation von Wolkenkondensat. Um zu untersuchen, ob dies eine mögliche Ursache für Feuchtesprünge nach dem letzten Sättigungspunkt ist, wird die Menge an Wolkenkondensat und Niederschlag entlang ausgewählter Trajektorien betrachtet und mit der Entwicklung der spezifischen Feuchte verglichen.

2 Hintergrund: Advektions-Kondensations-Modell

Das Advektions-Kondensations-Modell liefert die einfachste Erklärung für die Verteilung der relativen Feuchte in der freien Troposphäre (Pierrehumbert et al., 2007).

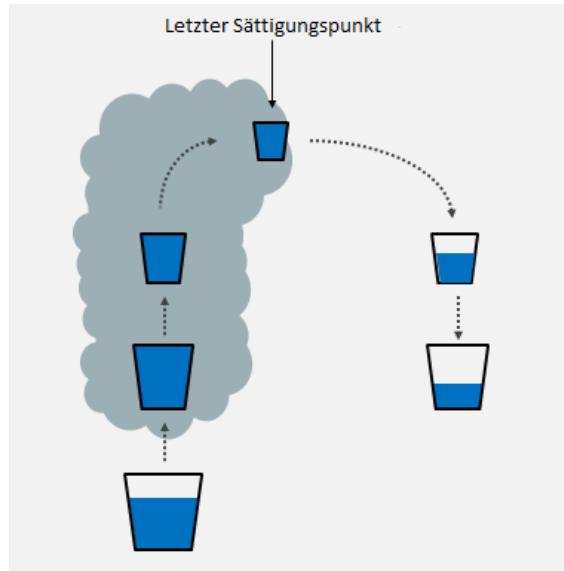


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Advektions-Kondensations-Modells zur Entstehung von Trockenzonen. Der Eimer steht für die sättigungs-spezifische Feuchte und der Inhalt des Eimers steht für die spezifische Feuchte. Abbildung von Theresa Lang nach Thorsten Mauritsen.

Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Advektions-Kondensations-Modells, als Erklärung für die Entstehung von Trockenzonen. Der Eimer in Abbildung 1 steht für die sättigungs-spezifische Feuchte und der Inhalt für die spezifische Feuchte des Luftpaketes.

Die größte Quelle für Feuchte in der Luft ist nach Sherwood et al. (2009) die Verdunstung von Wasser an der Meeresoberfläche, weshalb Luftpakete in Bodennähe häufig mit Feuchte angereichert sind. Die bodennahen Luftmassen werden als Nachströmbe-
 wegung in Richtung der ITCZ (engl. intertropical convergence zone) transportiert, da hier Luftmassen aufsteigen. Die ITCZ liegt bei etwa 5° nördlicher Breite und ist zentraler Bestandteil der großräumigen Zirkulation. Beim Aufsteigen kühlen sich die Luftpakete ab, wodurch die sättigungs-spezifische Feuchte abnimmt (Abbildung 1). Wenn die sättigungs-spezifische Feuchte der spezifischen Feuchte entspricht, somit der Eimer komplett mit Wasser gefüllt ist, kommt es zur Kondensation und damit zur Wolkenbildung. Nach dem Aufsteigen transportiert die großräumige Zirkulation die Luftmassen in der Höhe polwärts. Während dieses Transportes sinken die Luftmassen ab, werden komprimiert und erwärmen sich (Sherwood et al., 2009). Dies führt zu einer Zunahme der sättigungs-spezifischen Feuchte, während die spezifische Feuchte konstant bleibt (1). Dadurch sinkt die relative Feuchte des Luftpaketes. In der Absinkbewegung liegt somit

der Ursprung für Trockenzonen, auch Subsidenzzonen genannt (Sherwood et al., 2009). Das Advektions-Kondensations-Modell beschreibt jedoch nur eine idealisierte Vorstellung der Feuchteentwicklung.

Die wichtigste Annahme des Advektions-Kondensations-Modells ist, dass die spezifische Feuchte eines Luftpaketes entlang des Weges erhalten bleibt, es sei denn es tritt Kondensation auf. Demnach entspricht die spezifische Feuchte dem Wert der spezifischen Feuchte, die das Luftpaket hatte, nachdem es das letzte Mal gesättigt war. Dies ist ebenfalls in Abbildung 1 durch einen gleichbleibenden Wassergehalt im Eimer dargestellt. Nach dieser Annahme kann die relative Feuchte in einer bestimmten Zielregion mithilfe der spezifischen Feuchte des entsprechenden Luftpaketes am letzten Sättigungspunkt berechnet werden:

$$RH_{\text{wahr}} = \frac{q_{\text{Startpunkt}}}{q^*_{\text{Startpunkt}}} \approx \frac{q_{\text{LS}}}{q^*_{\text{Startpunkt}}} = RH_{\text{vorhergesagt}} \quad (1)$$

RH_{wahr}	:	Relative Feuchte im Kontrollgebiet
$q_{\text{Startpunkt}}$:	Spezifische Feuchte im Kontrollgebiet
$q^*_{\text{Startpunkt}}$:	Sättigungs-spezifische Feuchte im Kontrollgebiet
q_{LS}	:	Spezifische Feuchte am letzten Sättigungsereignis
$RH_{\text{vorhergesagt}}$:	Relative Feuchte von dem Advektions-Kondensations-Modell vorhergesagt

Alle weiteren Quellen oder Senken der Feuchte, die nach dem letzten Sättigungsereignis die Feuchte ändern könnten, werden vernachlässigt. Zu diesen Prozessen gehören Verdunstung von Niederschlag oder Wolkenkondensat sowie turbulentes Mischen mit Umgebungsluft (Sherwood et al., 2009). Die Verdunstung von Wolkenkondensat oder Niederschlag kann dabei nur dazu führen, dass Luftpakete mit der Zeit feuchter werden, während das turbulente Mischen mit Umgebungsluft abhängig von der Feuchte der Umgebungsluft ist und so das Luftpaket auch mit der Zeit austrocknen kann. Da wir aber sehr trockene Luftpakete betrachten, ist es wahrscheinlicher, dass die Feuchte der Luftpakete durch Mischung zunimmt. Eine Zunahme der spezifischen Feuchte des Luftpaketes nach dem letzten Sättigungspunkt führt dazu, dass die vorhergesagte relative Feuchte ($RH_{\text{vorhergesagt}}$) die wahre relative Feuchte (RH_{wahr}) zunehmend unterschätzt.

Das Advektions-Kondensations Modell wurde schon anhand vieler Studien untersucht (e.g. Salathé und Hartmann, 1997; Sherwood, 1996), in denen sich zeigte, dass dieses Modell die generelle Verteilung von feuchten und trockenen Regionen in den Tropen und Subtropen gut vorhersagen kann. Jedoch wurde dieses Modell noch nicht explizit für eine Trockenzone untersucht.

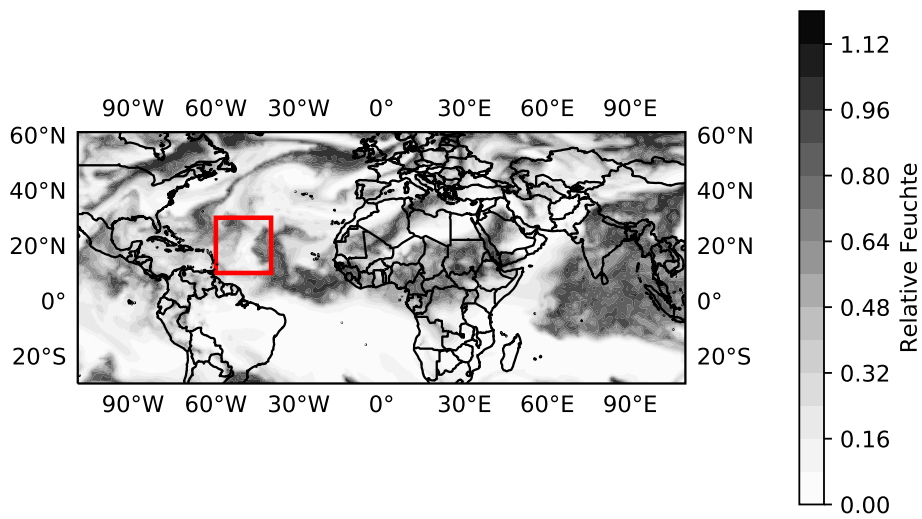
3 Methodik

Die Untersuchung der Trockenzone basiert auf einer Modellsimulation, die im Rahmen der DYAMOND Initiative (Stevens et al., 2019) mit dem ICON Modell (Zängl et al., 2014) durchgeführt wurden. Bei den DYAMOND Simulationen handelt es sich um globale Simulationen, die sich durch ihre hohe Auflösung auszeichnen. In dieser Simulation betrug die Gitterweite ca. 5 km, sodass diese ICON-Simulation auch konvektive Stürme auflösen kann. Aus dem ICON-DYAMOND-summer Lauf standen Daten des Zeitraums vom 10.08.2016 bis 08.09.2016 zur Verfügung. Dieser Modell Lauf wurde aufgrund der hohen Datenauflösung von 3-stündlichem Abstand ausgewählt. Eine höhere zeitliche Auflösung ermöglicht eine genauere Trajektorienrechnung.

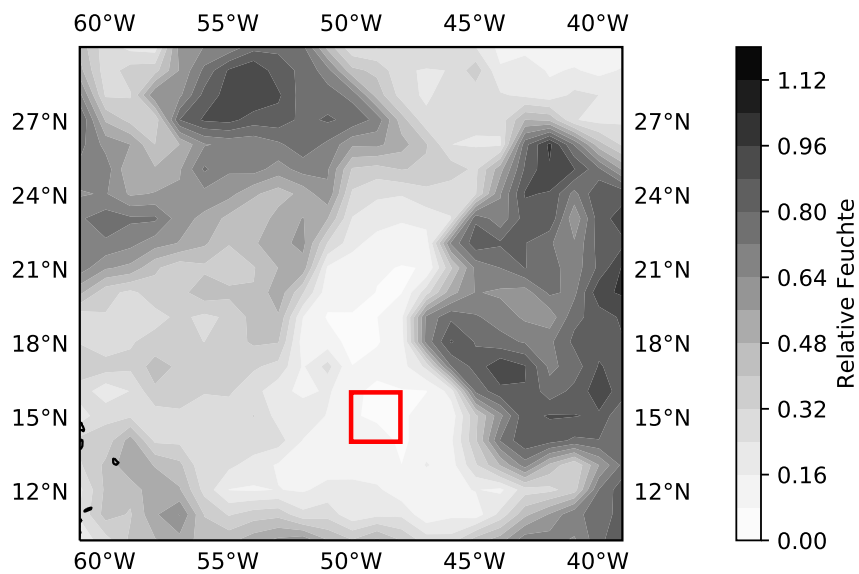
In dieser Arbeit soll das Trajektorien-Berechnungstool Lagranto benutzt werden (Sprenger und Wernli, 2015), weshalb die Daten noch vorprozessiert werden müssen. Das ICON-Modell beschreibt Daten in einer Gitterstruktur von Ikosaeder-Form (Dreiecksgitter). Für Lagranto werden Daten auf einem regulären Gitter von Längen- und Breitengraden benötigt. Mit dem konservativen Remapping Befehl des Climate Data Operators (CDO; SchulzeWeidner, 2019) `remap` wurden die Daten auf ein reguläres Gitter prozessiert. Dadurch wird die Gitterweite deutlich vergrößert. Auf dem regulären Gitter sind die Gitterweiten ca. 100 km. Dadurch kann es zu Ungenauigkeiten in der Trajektorienrechnung kommen, jedoch wird die Berechnung der Trajektorien und die Analyse durch dieses grobere Gitter vereinfacht.

3.1 Auswahl eines Kontrollgebietes

Der Startpunkt der Rückwärtstrajektorie ist der letzte Zeitschritt des Zeitraumes, in diesem Fall der 8. September 2016 um 21.00 Uhr. Aus den Daten dieses Zeitschrittes werden aus den Modelloutput-Daten der Temperatur T , des Druckes p und der spezifischen Feuchte q die relative Feuchte RH_{wahr} berechnet und analysiert. Zur Einschätzung der relativen Feuchte wird sie anhand ihrer geografischen Lage dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 2: Karten der relativen Feuchte am 8. September 2016 um 21.00 Uhr in einer Höhe von etwa 500hPa. In (a) ist der Bereich gekennzeichnet, der in (b) vergrößert dargestellt ist. In (b) ist das Kontrollgebiet markiert in dem die Rückwärtstrajektorien gestartet werden.

In Abbildung 2a ist die relative Feuchte auf einer globalen Skala in etwa 500 hPa Höhe dargestellt und es ist der Bereich markiert, der in Abbildung 2b vergrößert dargestellt ist. Es sind hier die vergleichsweise feuchten Regionen um die ITCZ sowie die vergleichsweise trockenen subtropischen Regionen zu erkennen.

In Abbildung 2b ist das Kontrollgebiet markiert, dieses befindet sich über dem tropischen Atlantik nordöstlich der Insel Barbados bei 14°-16° nördlicher Breite und 48°-50° westlicher Länge. Es wurde aus praktischen Gründen über einem Ozean ausgewählt. Die Vertikalkoordinate ist im ICON-Modell terrain-folgend, weshalb die unteren Modellschichten über Gebirgen dünner sind. Das bedeutet, dass die Modellschichten über einem Ozean global homogen sind.

Außerdem wurde das Kontrollgebiet aufgrund der geringen relativen Feuchte ausgewählt, da besonders die Vorgeschichten der trockenen Luftmassen von Bedeutung für diese Untersuchung sind. Aus diesem Grund werden dort Rückwärtstrajektorien gestartet.

3.2 Berechnung der Trajektorien mit Lagranto

In diesem Kontrollgebiet werden nun die Rückwärtstrajektorien gestartet. Zunächst müssen die Startpunkte der Trajektorien innerhalb des Kontrollgebiets festgelegt werden. Dafür wird die in Lagranto implementierte Methode `create_startf` verwendet, die das Festlegen von Startpunkten in äquidistanten Abständen innerhalb einer rechteckigen Box erlaubt:

```
create_startf startzeit startf 'box.eqd(-50,-48,14,16,10)@level(5600)@m'
```

Zur weiteren Erklärung dieses Befehls: Die hier aufgeführte Box entspricht dem Kontrollgebiet zwischen -50° und -48° östlicher und zwischen 14° und 16° nördlicher Breite. Hier ist ebenfalls angegeben, dass die Startpunkte in 10 km Abstand generiert werden sollen. Die Trajektorienstartpunkte liegen dabei in einer Höhe von 5600 m.

Insgesamt werden innerhalb des Kontrollgebietes 506 Trajektorienstartpunkte generiert. Zudem muss spezifiziert werden, welche Variablen neben der geografischen Position und der Höhe entlang der Trajektorien dokumentiert werden sollen. Die Feuchte ist für diese Untersuchung maßgeblich, dementsprechend wird die spezifische Feuchte, die Temperatur und der Druck entlang der Trajektorien dokumentiert. Des Weiteren werden die Größen des Niederschlags- und des Wolkenkondensats dokumentiert, da diese Daten weitere Informationen über die Veränderung der Feuchte durch Prozesse, die nicht im Advektions-Kondensations-Modell berücksichtigt sind, liefern können.

Mithilfe des `caltra` Befehls des Lagranto-Tools werden die Rückwärtstrajektorien von den festgelegten Startpunkten ausgehend berechnet. Der `trace` Befehl dokumentiert dann die ausgewählten Variablen entlang der Trajektorien.

```
caltra.icon startzeit endzeit startf trajectory.4 -j  
trace.icon trajectory.4 trajectory.4
```

3.3 Methode zur Berechnung der letzten Sättigungspunkte

Da in dieser Arbeit hauptsächlich das Advektions-Kondensations-Modell überprüft werden soll, werden dafür die letzten Sättigungspunkte berechnet. Für die Berechnung des letzten Sättigungs-Ereignisses wurde die Methode von Cau et al. (2007) verwendet. Diese Methode beruht – genau wie das Advektions-Kondensations-Modell selbst – auf der Annahme, dass sich die Feuchte des Luftpaketes entlang des Weges nicht ändert, es sei denn es kommt zu Kondensation. In einem Luftpaket, das zum Zeitpunkt t_0 startet, bleibt die spezifische Feuchte $q(t_0)$ so lange erhalten, bis Kondensation eintritt. Dies ist der Fall, wenn die sättigungs-spezifische Feuchte des Luftpaketes durch Abkühlung unter $q(t_0)$ fällt. Um den letzten Sättigungspunkt zu bestimmen, wird entlang des Weges das Minimum der sättigungs-spezifischen Feuchte gesucht, das diese Bedingung erfüllt.

Besonders für lange Zeiträume ist die Annahme von nicht vorhandenen Feuchtequellen nicht immer richtig. So kann es zu z.B. Evaporation an der Erdoberfläche und somit steigender Feuchte im Luftpaket kommen. Die Methode berücksichtigt dies, indem nicht immer das globale Minimum über den gesamten Zeitraum der sättigungs-spezifischen Feuchte ausschlaggebend ist, sondern dass auch lokale Minima das letzte Sättigungseignis beschreiben können. Um dies abzufangen, wird in dieser Methode die Zeitspanne, in der ein Minimum der sättigungs-spezifischen Feuchte gesucht wird, schrittweise vergrößert, sodass der Anfang des betrachteten Zeitraumes (t_0) immer weiter von der Ankunft in der Zielregion zurückliegt. Wird ein Ereignis gefunden, bei dem die sättigungs-spezifische Feuchte geringer ist als die spezifische Feuchte zum Zeitpunkt t_0 , so wird dieses als letztes Sättigungseignis bezeichnet.

Der drei-stündige Modelloutput kann hier zu einer Ungenauigkeit in der Bestimmung der letzten Sättigungspunkte führen. Denn wenn ein Sättigungseignis sehr kurz ist und genau zwischen zwei Modelloutputs-Zeitschritten liegt, kann dieser letzte Sättigungspunkt nicht gefunden werden.

4 Überprüfung des Advektion-Kondensations-Modells anhand einer tropischen Trockenzone

Mithilfe der in Kapitel 3.2 beschriebenen Methodik kann nun die Trajektorienrechnung gestartet und die Rückwärtstrajektorien im Anschluss analysiert werden.

4.1 Verlauf der Rückwärtstrajektorien

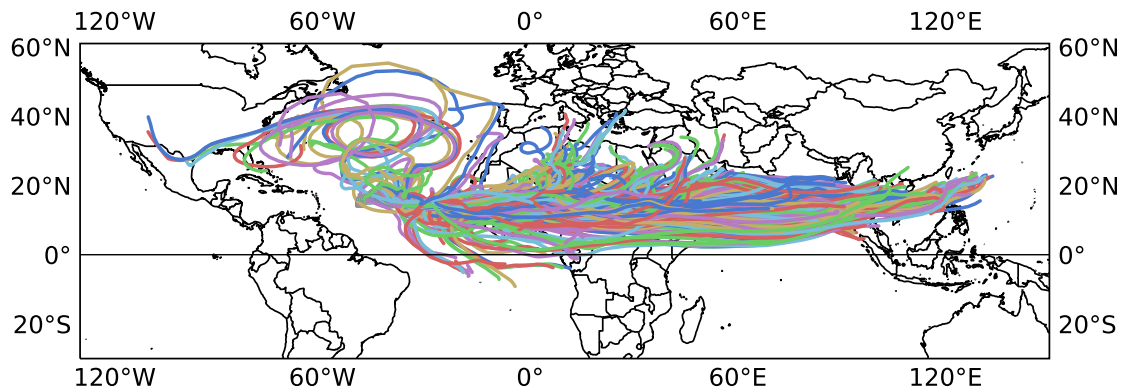


Abbildung 3: Horizontaler Verlauf innerhalb des betrachteten 15-Tage Zeitraums der Rückwärtstrajektorien, die im Kontrollgebiet gestartet wurden.

Abbildung 3 zeigt, dass ein Großteil der Luftpakete sich entlang der ITCZ von Ost nach West bewegt. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass nur wenige Trajektorien aus südlichen Breiten über den Äquator verlaufen sind. Die Mehrzahl der Trajektorien bewegt sich während des gesamten 15-Tage Zeitraums in höheren nördlichen Breiten und ist vor der Ankunft am Kontrollgebiet entlang der ITCZ verlaufen.

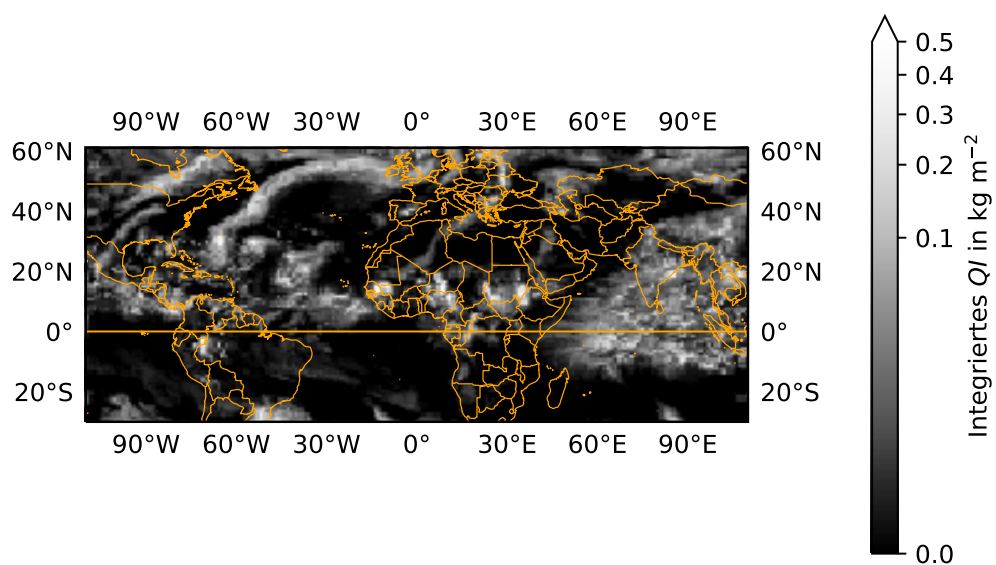
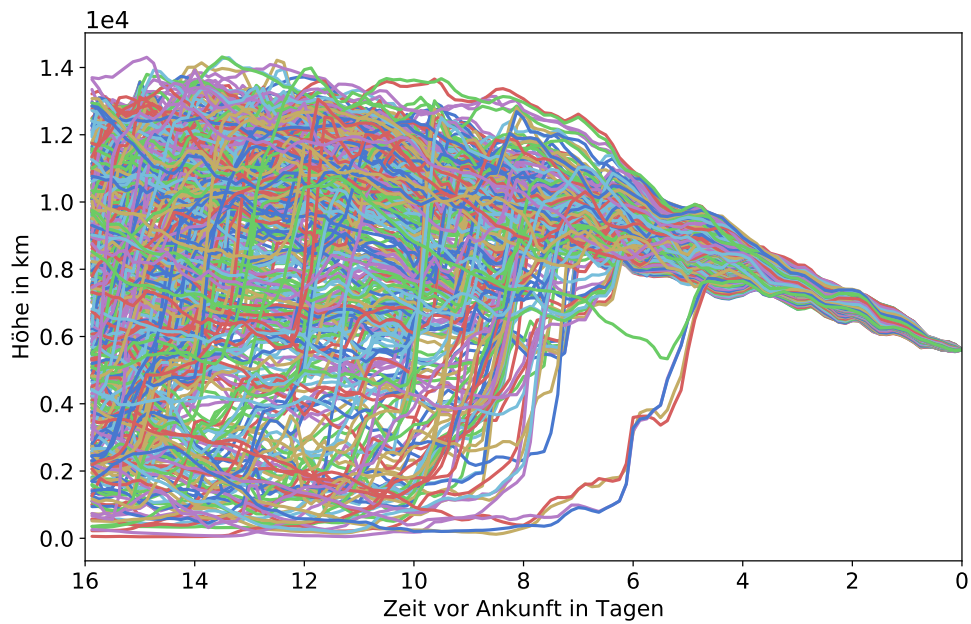
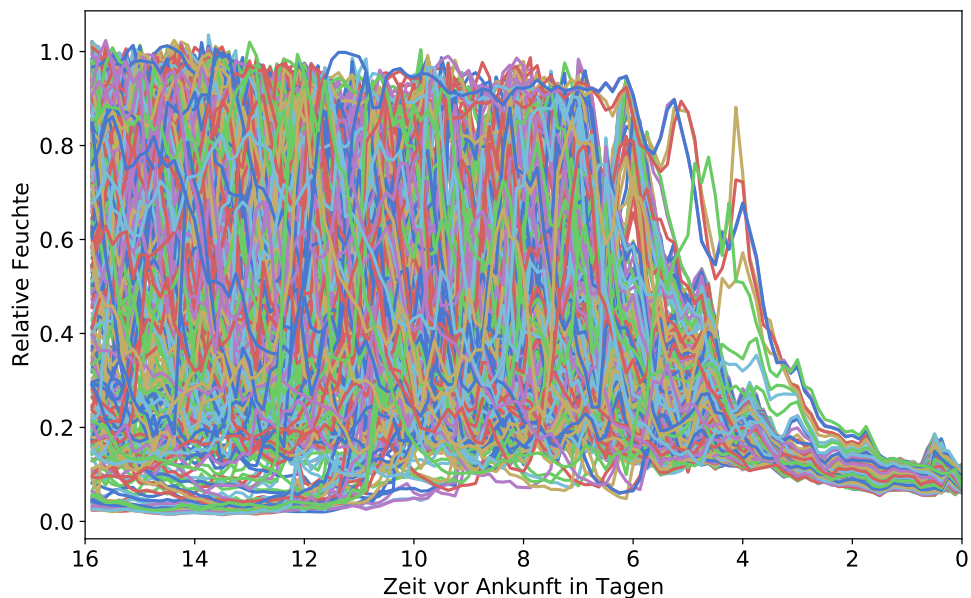


Abbildung 4: Vertikal integriertes Wolkeneis QI am 8. September 2016 um 21 Uhr.

Abbildung 4 zeigt vertikal integriertes Wolkeneis, was ein Indikator für hochreichende Konvektion ist. In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass besonders an der ITCZ ein Bereich zu erkennen ist, in dem viel Wolkeneis und somit hochreichende Konvektion vorhanden ist. Während der Erarbeitung wurde die Entwicklung der Wolkeneis-Verteilung über den gesamten 15-tägigen Zeitraum betrachtet. Dabei war auffällig, dass sich die genaue Position der hochreichenden Konvektion innerhalb der ITCZ über den Zeitraum zwar verändert hat, die Lage der ITCZ insgesamt jedoch nahezu unverändert blieb. Aus diesem Grund wird hier nur ein Zeitschritt abgebildet.



(a)



(b)

Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf (a) der Höhe und (b) der relativen Feuchte entlang der Trajektorien.

Es ist in Abbildung 5a zu erkennen, dass die Luftpakete im Zeitraum von 16-4 Tage vor Ankunft in der Zielregion teilweise rasch aufsteigen. Die Trajektorien befinden sich somit in einer größeren Höhe und gelangen im Zuge einer Absinkbewegung (ab circa 6-4 Tage vor Ankunft in der Zielregion) hin zur Trockenzone. Dies entspricht der Modellvorstellung, dass Luftpakete innerhalb von Konvektion rasch aufsteigen und dann zum Kontrollgebiet absinken.

Abbildung 5b zeigt außerdem, dass die relative Feuchte mit Annäherung an die Zielregion ab 4 Tagen vor Ankunft in der Zielregion kontinuierlich abnimmt. Davor liegen die relativen Feuchten deutlich höher bei nahe 100%. Dieses Verhalten der relativen Feuchte entspricht ebenfalls der Modellvorstellung, da die relative Feuchte zum einen innerhalb von Konvektion deutlich höher liegen muss und diese zum anderen durch die mit der Absinkbewegung einhergehenden Komprimierung und Erwärmung abnimmt.

4.2 Letzter Sättigungspunkt

Nun wurden die letzten Sättigungs-Ereignisse mithilfe der in Kapitel 3.3 beschriebenen Methode (Cau et al., 2007) bestimmt. Nach dieser Methode weist nicht jede Trajektorie einen letzten Sättigungspunkt in dem betrachteten Zeitraum auf. Demnach liegt der letzte Sättigungspunkt entweder mehr als 16 Tage zurück oder die Methode verpasst den letzten Sättigungspunkt dieser Trajektorien. Insgesamt wurde für 493 von den anfangs 506 Trajektorien ein Sättigungsereignis gefunden. Dies entspricht 97% der Trajektorien.

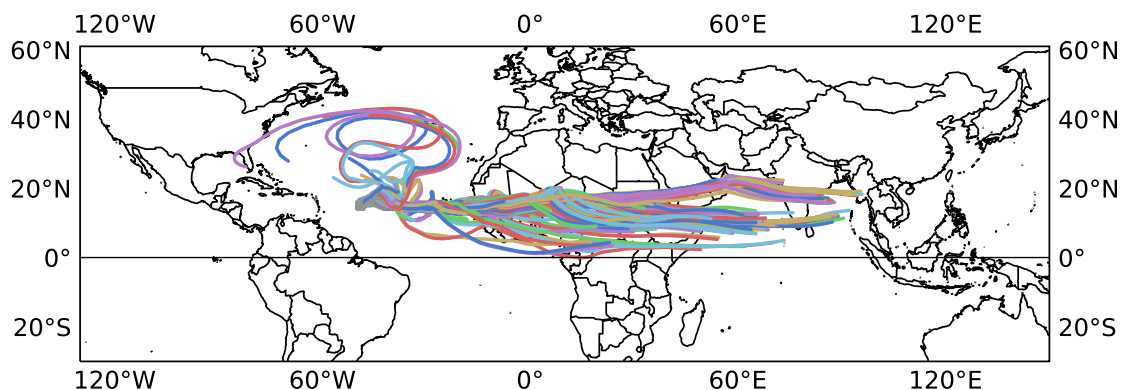


Abbildung 6: Rückwärtstrajektorien, die einen letzten Sättigungspunkt besitzen, sind ab diesem Punkt dargestellt.

In Abbildung 6 sind die Trajektorien, für die ein letztes Sättigungsereignis gefunden wurde, und deren Verlauf nach diesem letzten Sättigungspunkt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass viele Trajektorien ein letztes Sättigungsereignis besitzen, das in Äquator-Nähe liegt. Somit stammen die meisten Luftpakete aus der ITCZ-Region und waren hier das letzte Mal gesättigt, was sich mit der in Abbildung 4 zu erkennenden Konvektion verknüpfen lässt.

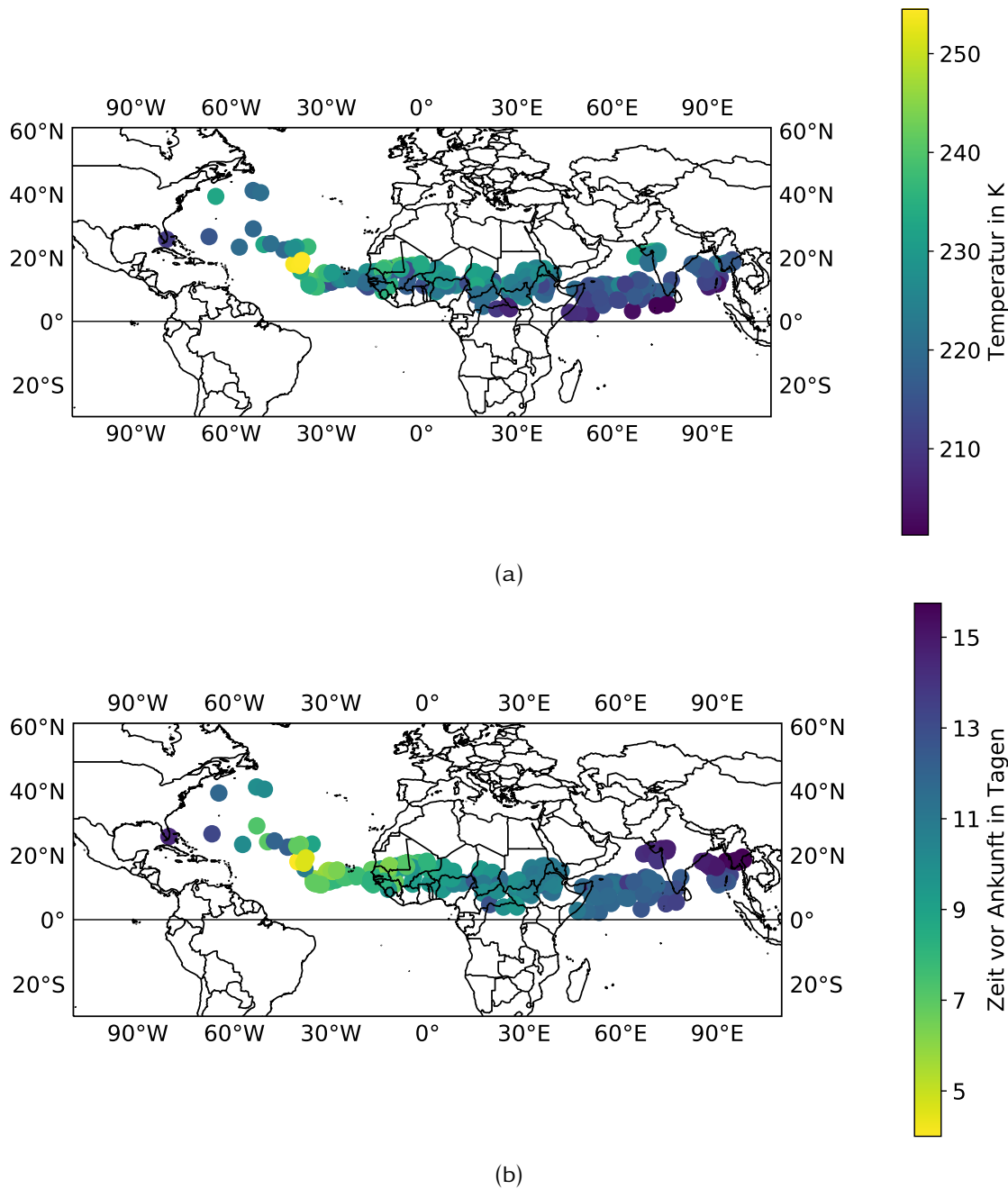


Abbildung 7: Die geografische Lage der letzten Sättigungsereignisse ist auf diesen Karten einmal mit der Temperatur und einmal mit der zurückliegenden Zeit als Farbskala eingefärbt.

Die Farbskala gibt in Abbildung 7a die Temperatur des Luftpaketes während des letzten Sättigungsereignisses an und verdeutlicht, dass je weiter diese von dem Kontrollgebiet entfernt liegen, desto geringer ist die Temperatur des Luftpaketes an dem letzten Sättigungspunkt.

In Abbildung 7b bezieht sich die Farbskala hingegen auf die Zeit, die das letzte Sättigungsereignis zurückliegt bevor das Luftpaket die Zielregion erreicht. Auffällig ist, dass

sich die beiden Abbildungen sehr ähnlich sind, sodass sich folgender Zusammenhang formulieren lässt: Je weiter das letzte Sättigungsereignis zeitlich zurückliegt, desto weiter ist der letzte Sättigungspunkt räumlich von dem Kontrollgebiet entfernt und desto geringer war die Temperatur des Luftpaketes als es gesättigt war. Die Temperatur des Luftpaketes ist wiederum direkt mit der Höhe verknüpft. Aus diesem Grund kann man die Absinkbewegung der Luftpakete nach dem letzten Sättigungspunkt erkennen. Je weiter der letzte Sättigungspunkt zeitlich zurückliegt, desto kälter war das Luftpaket zu diesem Zeitpunkt- und befand sich somit in einer größeren Höhe.

Nach dem Advektions-Kondensations-Modell wird erwartet, dass die Luftpakete, die eine geringere Temperatur am letzten Sättigungspunkt haben und somit aus einer größeren Höhe absinken, in der Zielregion eine geringere spezifische Feuchte und somit eine geringere relative Feuchte aufweisen. Diese Verhalten wird in Kapitel 4.4 untersucht.

4.3 Temperaturverlauf einzelner Trajektorien

Die Temperatur ist nach dem Advektions-Kondensations-Modell am letzten Sättigungspunkt ausschlaggebend für die Feuchte der Luftpakete im Kontrollgebiet (siehe Kapitel 2). Es werden im Folgenden Temperaturverläufe von einzelnen Trajektorien detaillierter betrachtet. Hierbei werden Gruppen von Trajektorien mit ähnlichen Temperaturen am letzten Sättigungspunkt betrachtet.

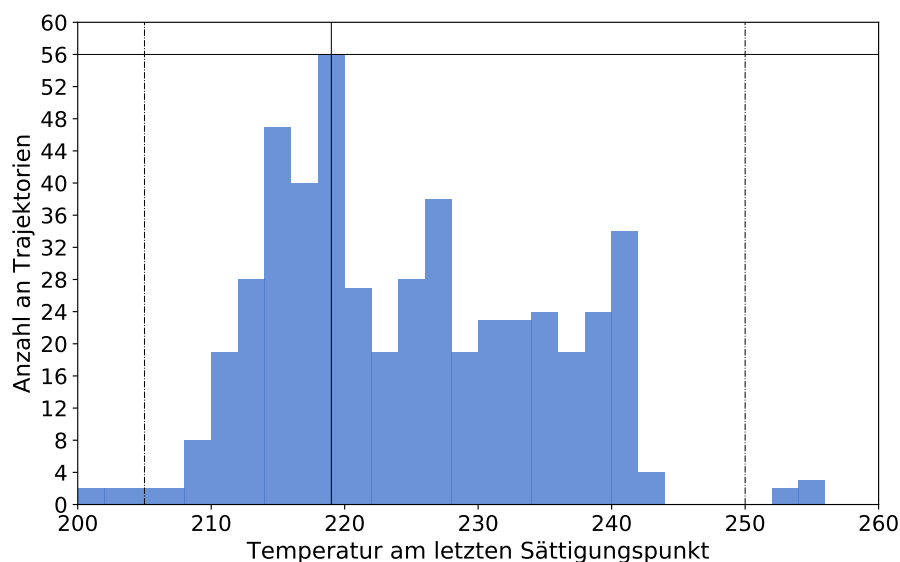


Abbildung 8: Histogramm der Temperaturen beim letzten Sättigungsereignis. Die schwarzen vertikalen Linien kennzeichnen Gruppen von Trajektorien, deren Verlauf in den Abbildungen 9 und 10 genauer betrachtet wird.

In Abbildung 8 ist die Verteilung der Temperaturen am letzten Sättigungspunkt dargestellt. Des weiteren ist zu erkennen, dass oberhalb von 250 K und unterhalb von 205 K nur wenige Sättigungspunkte liegen. Das Maximum dieser Verteilung liegt zwischen 218

und 220 K.

Im Folgenden werden die Temperaturverläufe in drei Gruppen von Trajektorien genauer betrachtet: Häufig vorkommende Trajektorien mit Temperaturen von 218-220 K am letzten Sättigungspunkt, sowie extreme Fälle mit Temperaturen über 250K bzw. unter 205K.

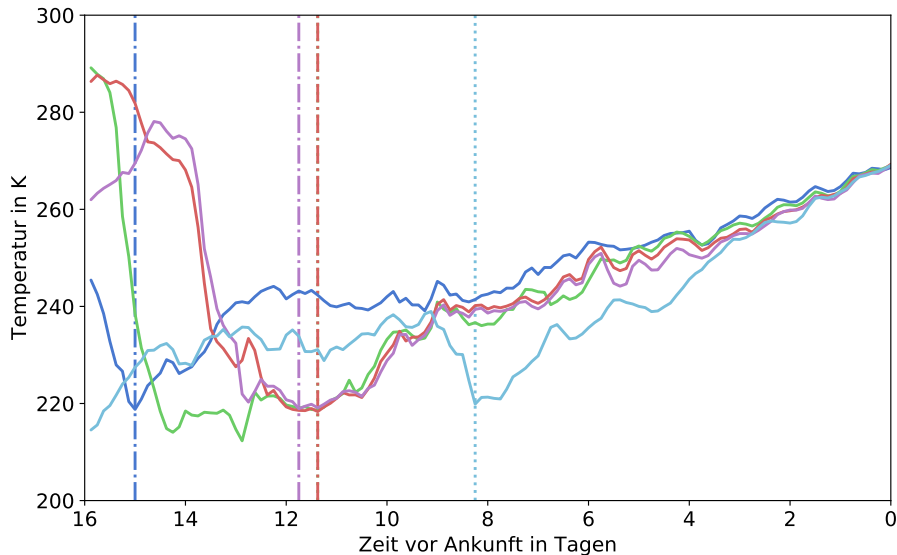
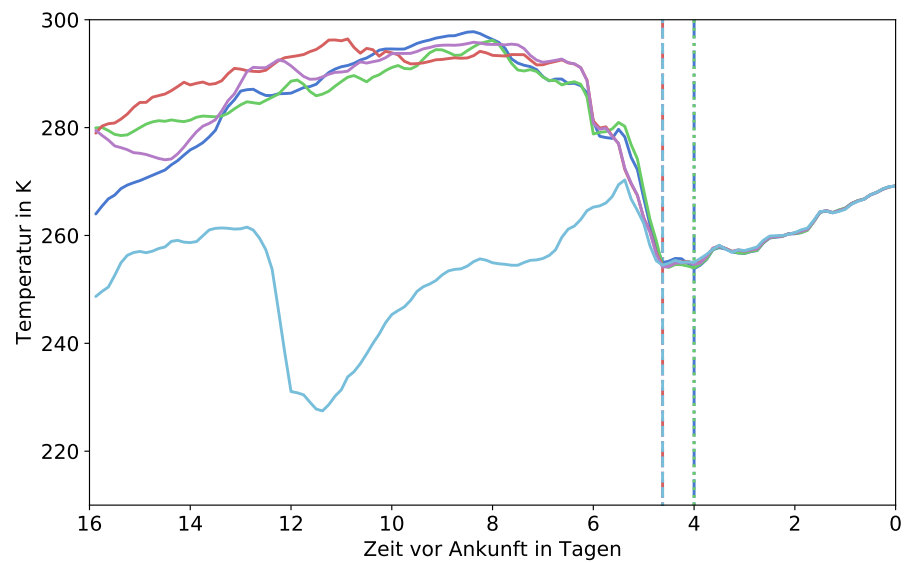


Abbildung 9: Temperaturverlauf einiger zufällig ausgewählter Trajektorien, deren Temperatur am letzten Sättigungspunkt zwischen 218 und 220 K liegen. Als vertikale Linien sind hier die Zeitpunkte der letzten Sättigungspunkte markiert.

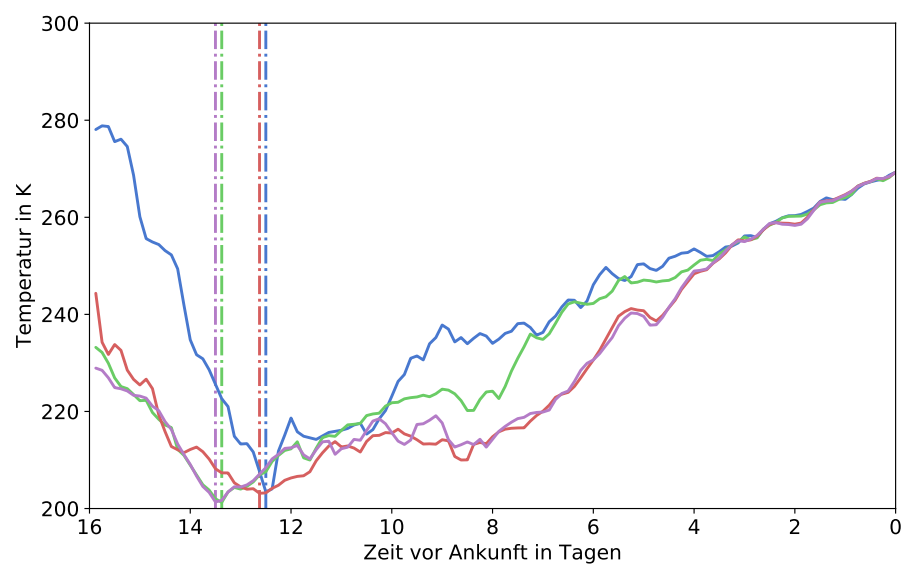
Die in Abbildung 9 abgebildeten Temperaturverläufe entsprechen denen von Trajektorien, die am letzten Sättigungspunkt eine Temperatur zwischen 218 und 220 K haben. Die beispielhaften Trajektorien wurden zufällig aus der Gruppe ausgewählt. Diese Temperaturverläufe unterscheiden sich, obwohl alle Trajektorien ähnliche Temperaturen am letzten Sättigungspunkt haben. Es lässt sich festhalten, dass die rot eingefärbte und die lila eingefärbte Trajektorie einen sehr ähnlichen Temperaturverlauf aufweisen. Diese beiden Trajektorien steigen 16-12 Tage vor Ankunft in der Zielregion rasch auf und kühlen sich dabei ab, bis sie den Sättigungspunkt erreichen. Von dort beginnen sie zum Kontrollgebiet abzusinken. Dabei sinken sie in den ersten zwei Tagen nach dem letzten Sättigungspunkt schneller ab, als im Zeitraum danach. Die dunkelblaue und grüne Trajektorie steigt ebenfalls im Zeitraum von 16-14 Tage vor Ankunft in der Zielregion rasch auf und sinken dann fast gleichmäßig ab. Die hellblaue Trajektorie, deren Sättigungspunkt etwa acht Tage vor Ankunft in der Zielregion liegt, zeigt im Zeitraum 16-14 Tage vor Ankunft in der Zielregion eine Abstiegsbewegung. Danach steigt das Luftpaket nur kurz vor dem letzten Sättigungspunkt noch einmal auf und sinkt dann zur Zielregion ab. Generell unterscheidet sich dieser Temperaturverlauf von den anderen, da die Aufstiegsbewegung bei der hellblauen Trajektorie nicht in der Grenzschicht beginnt, sondern in höheren Schichten. Alle Trajektorien in Abbildung 9 haben gemeinsam, dass sie alle vor dem letzten Sättigungsereignis rasch aufsteigen. Bei der Abkühlung, die mit der

anschließenden Absinkbewegung zur Zielregion einhergeht, unterscheiden sich die Trajektorien in einem gewissen Maß voneinander.

Beispielhaft werden nun die Temperaturverläufe von Trajektorien beleuchtet, die am letzten Sättigungspunkt eine Temperatur von mehr als 250 K oder eine Temperatur von weniger als 205 K haben. Besonders die Unterschiede in den Verläufen der beiden extremen Fälle sind hierbei interessant. Es wird erwartet, dass diese beiden verschiedenen Trajektoriengruppen zueinander einen sehr unterschiedlichen Verlauf aufweisen, während ein ähnlicher Verlauf innerhalb einer Trajektoriengruppe erwartet wird.



(a)



(b)

Abbildung 10: Wie Abbildung 9, für Trajektorien, deren Temperatur am letzten Sättigungspunkt (a) $> 250\text{K}$ und (b) $< 205\text{K}$.

Es ist in Abbildung 10a zu erkennen, dass vier der fünf Trajektorien vor dem letzten Sättigungsereignis eine deutlich höhere Temperatur haben (ca. 16-6 Tage vor Anunft in der Zielregion). Dies bedeutet, dass diese Trajektorien sich in diesem Zeitraum in Bodennähe befanden. Die fünfte Trajektorie (lila) hat zwar kurz vor dem letzten Sättigungspunkt auch eine höhere Temperatur als an diesem selbst, jedoch war das Luftpaket im Zeitraum 12-10 Tage vor Ankunft in der Zielregion kälter als die anderen Luftpakete. Die vier ähnlichen Trajektorien zeigen, dass die letzten Sättigungspunkte zeitlich sehr nah an der Ankunft in der Zielregion liegen. Des Weiteren endet die Aufstiegsbewegung der Luftpakete, die zur Sättigung führt, bei vergleichsweise hohen Temperaturen (also in geringen Höhen). Danach erwärmen sich die Luftpakete nur noch wenig, sinken somit nicht weit ab.

In Abbildung 10b ist der Temperaturverlauf der Trajektorien dargestellt, deren Temperatur während des letzten Sättigungsereignisses unter 205 K lagen. Die Verläufe der vier Trajektorien sind sehr ähnlich und es lässt sich eine nahezu kontinuierliche Temperaturabnahme nach dem letzten Sättigungsereignis erkennen, was sich der stetigen Absinkbewegung zuordnen lässt. Außerdem ist zu erkennen, dass die Sättigungsereignisse zeitlich weiter zurück liegen, als die Sättigungsereignisse in Abbildung 10a, was bereits aus Abbildung 7 hervorging.

4.4 Entwicklung der Feuchte nach dem letzten Sättigungspunkt

Es wird nun die Annahme, dass die spezifische Feuchte nach dem letzten Sättigungspunkt konstant ist, überprüft. Dafür werden die relativen Feuchten mithilfe der spezifischen Feuchte am letzten Sättigungspunkt bzw. der spezifischen Feuchte in der Zielregion berechnet und verglichen. Gleichung 1 beschreibt diesen Zusammenhang, wie in Kapitel 2 bereits erläutert, wird dieser Vergleich zeigen, wie gut das Advektions-Kondensations-Modell die Feuchte in Trockenzone vorhersagen kann.

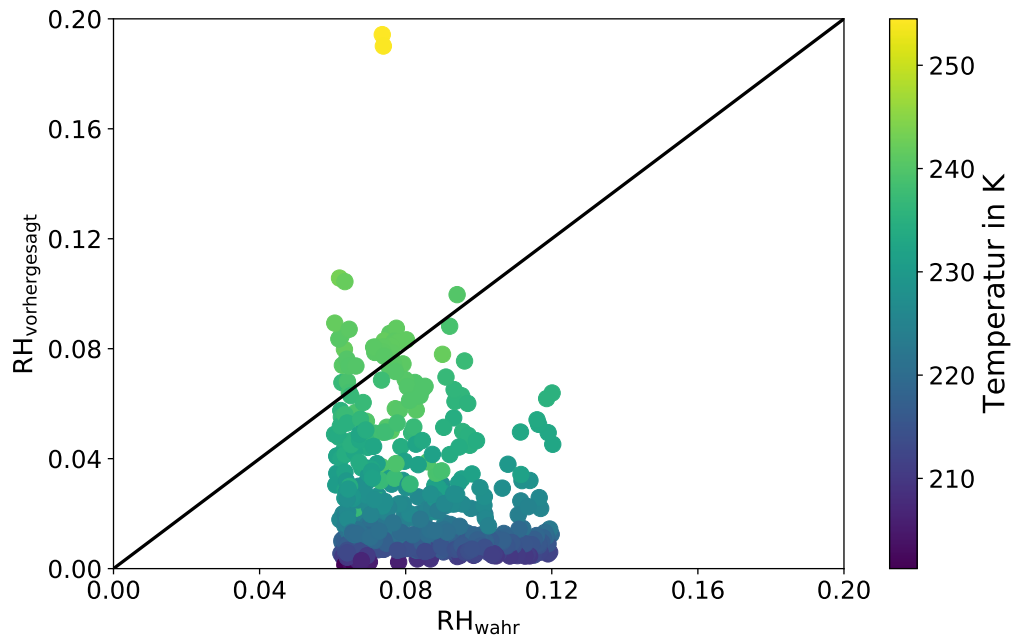


Abbildung 11: Mit dem Advektions-Kondensations-Modell vorhergesagte relative Feuchte ($RH_{\text{vorhergesagt}}$) und die tatsächliche relative Feuchte (RH_{wahr}) in der Zielregion. Diese Punkte sind nach Ihrer Temperatur am letzten Sättigungspunkt eingefärbt.

In Abbildung 11 ist die wahre relative Feuchte (RH_{wahr}) in der Zielregion und die am letzten Sättigungspunkt vorhergesagte relative Feuchte ($RH_{\text{vorhergesagt}}$) gegeneinander aufgetragen. Die schwarze Linie zeigt, wo die beiden relativen Feuchten gleich sind. Es ist zu erkennen, dass die meisten relativen Feuchten von dieser idealisierten Vorstellung einer gleichbleibenden Feuchte ab dem letzten Sättigungspunkt abweichen. Die vorhergesagte relative Feuchte liegt meist unter der wahren relativen Feuchte am Startpunkt der Rückwärtstrajektorien. Der Bias dieser Methode liegt bei -0.05 , somit wird die relative Feuchte im Mittel um 5% unterschätzt.

Qualitativ sagt das Advektions-Kondensations-Modell also das richtige Ergebnis, nämlich sehr geringe relative Feuchten voraus, jedoch überschätzt es im Mittel die Trockenheit dieser Gebiete.

Die letzten Sättigungspunkte in Abbildung 11 sind je nach ihrer Temperatur eingefärbt. Dadurch ist zu erkennen, dass besonders, wenn die Temperatur am letzten Sättigungseignis niedrig ist, die relative Feuchte unterschätzt wird. Dies kann man mit der vereinfachten Vorstellung erklären, dass wenn ein Paket aus größerer Höhe (bei niedrigeren Temperaturen) anfängt abzusinken, es einen längeren Weg bis zum Kontrollgebiet zurücklegen muss (angenommen, dass alle Trajektorien mit ähnlicher Geschwindigkeit absinken). Je länger der zurückgelegte Weg, desto wahrscheinlicher ist es, dass Prozesse wie Evaporation von Wolkenkondensat oder Niederschlag oder turbulentes Mischen mit Umgebungsluft, die Feuchte des Luftpaketes beeinflussen.

4.5 Verknüpfung von Feuchtesprüngen mit Niederschlags- und Wolkenkondensatsdaten

Eine mögliche Ursache für die Veränderung der spezifischen Feuchte nach dem letzten Sättigungspunkt ist die Verdunstung von Wolkenkondensat, das vom Luftpaket mitgeführt wird oder in das Luftpaket sedimentiert, sowie die Verdunstung von Niederschlag, der durch das Luftpaket fällt.

Hierbei nutzen wir die ebenfalls aus dem ICON-Modell gewonnenen Wolkenkondensats- und Niederschlagsdaten, da diese einen Anhaltspunkt für mögliche Evaporation von Wolkenkondensat oder Niederschlag darstellen. Das Wolkenkondensat setzt sich dabei aus Wolkeneis und Wolkenwasser zusammen, während sich der Niederschlag aus Regen, Graupel und Schnee zusammensetzt. Es ist hierbei nur möglich zu untersuchen, ob Wolkenkondensat oder Niederschlag zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhanden war, jedoch gibt es keine Möglichkeit zu überprüfen, ob diese wirklich verdunsteten. Des Weiteren muss beachtet werden, dass die Niederschlagsdaten nur als zwei-dimensionale und somit über die gesamte Luftsäule integrierte Größe vorliegen und somit nicht einer bestimmten Höhe zugeordnet werden können. Trotzdem werden im Folgenden Niederschlags- und Wolkenkondensatsdaten als Anhaltspunkt betrachtet.

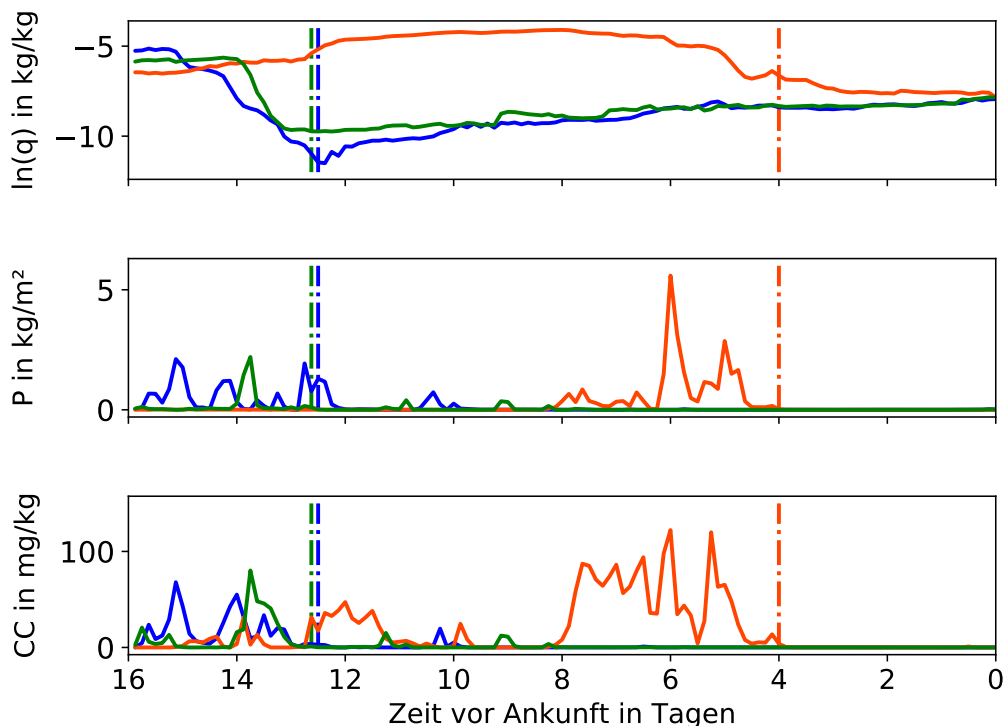


Abbildung 12: Spezifische Feuchte q , integrierte Niederschlagsgrößen P und Wolkenkondensate CC entlang dreier Trajektorien mit den jeweiligen letzten Sättigungsereignissen als gestrichelte Linien.

In Abbildung 12 sind die spezifische Feuchte q , die integrierten Niederschlagsgrößen P und das Wolkenkondensat CC dreier Trajektorien gegen die Zeit aufgetragen. Die Trajektorien wurden aufgrund ihrer unterschiedlichen Temperaturverläufe, die schon in Kapitel 4.3 behandelt wurden, ausgewählt. Dementsprechend stellen die blauen Linien eine Trajektorie mit einer Temperatur kleiner als 205 K am letzten Sättigungspunkt, die orangen Linien stellen eine Trajektorie mit einer Temperatur größer als 250 K am letzten Sättigungspunkt und die grünen Linien stellen eine Trajektorie mit einer Temperatur zwischen 218 K und 220 K am letzten Sättigungspunkt, dar. Außerdem sind die Positionen der jeweiligen letzten Sättigungsereignisse als gestrichelte Linien aufgetragen. In allen drei Fällen ist zu erkennen, dass zum Zeitpunkt der letzten Sättigung ebenfalls Niederschlag gefallen ist und Wolkenkondensat vorlag. Dies bestätigt, dass die letzten Sättigungsereignisse in konvektiven Regionen liegen. An den Verläufen der orangefarbenen Trajektorie ist deutlich zu erkennen, dass der letzte Sättigungspunkt sich einer Phase von viel vorhandenem Wolkenkondensat (8-4 Tage vor Ankunft in der Zielregion) und ausfallendem Niederschlag anschließt. Dies bedeutet, dass das Luftpaket hier länger gesättigt gewesen sein könnte. Dies könnte bestätigen, dass die angewandte Methode nur den letzten Punkt bestimmt, an dem das Luftpaket gesättigt war.

Bei der blauen Trajektorie ist zu erkennen, dass kurz nach dem letzten Sättigungspunkt noch Niederschlag ausfällt. Dies würde nach der Methode keinen Sinn ergeben. Eine mögliche Erklärung könnte die zweidimensionale Niederschlagsgröße sein, sodass der Niederschlag möglicherweise in einer anderen Höhe ausfällt. Trotzdem kann der Niederschlag dann noch durch das Luftpaket gefallen und verdunstet sein, sodass die Verdunstung des durch das Luftpaket fallenden Niederschlags eine mögliche Erklärung für den Anstieg der spezifischen Feuchte direkt nach dem letzten Sättigungspunkt darstellt. Danach steigt die spezifische Feuchte der Trajektorie fast stetig weiter an. Der Sprung zum Zeitpunkt von etwas früher als 10 Tage vor Ankunft in der Zielregion lässt sich möglicherweise mit Evaporation von Wolkenkondensat oder Niederschlag erklären, die sich in den beiden unteren Abbildungen ebenfalls zu diesem Zeitpunkt erkennen lassen. Alle darauf folgenden Sprünge lassen sich nicht auf diesen Prozess zurückführen.

Die orange Trajektorie zeigt den untypischsten Verlauf der spezifischen Feuchte, denn hier sinkt die spezifische Feuchte nach dem letzten Sättigungspunkt. Dies erklärt jedoch warum in Abbildung 11 die Trajektorien, bei denen die Temperatur am letzten Sättigungspunkt größer als 50 K ist, die relative Feuchte – anders als im Durchschnitt – überschätzt wird.

Die spezifische Feuchte entlang der grünen Trajektorie steigt – ähnlich wie bei der orangefarbenen Trajektorie – nach dem letzten Sättigungspunkt. Hier ist ein deutlicher Sprung in der spezifischen Feuchte zum Zeitpunkt von 9 Tagen vor Ankunft in der Zielregion zu erkennen. Zu diesem Zeitpunkt sind auch Niederschlag und Wolkenkondensat vorhanden,

sodass nahe liegt, dass deren Evaporation zu einer Zunahme der spezifischen Feuchte geführt haben könnte. Jedoch kann nicht jede Änderung der spezifischen Feuchte auf die hier betrachtete Evaporation des Niederschlags- oder Wolkenkondensats zurückgeführt werden. Demnach kann angenommen werden, dass ein überwiegender Prozess das turbulente Mischen ist.

5 Zusammenfassung

Die Entwicklung der Feuchte in den Trockenzone der freien Troposphäre ist aufgrund ihres großen Einflusses auf das Klima sehr wichtig zu verstehen. Darüber hinaus ist die Implementierung von dieser Feuchteentwicklung in Modellen eine andauernde Herausforderung, weshalb hier überprüft wurde, wie gut das Advektions-Kondensations-Modell die Feuchte in diesen Regionen vorhersagen kann. Es lässt sich festhalten, dass die generelle Vorstellung der Feuchteentwicklung in den Tropen deutlich aus den Modelldaten hervorgeht. So hat die Analyse der Rückwärtstrajektorien ergeben, dass ein Großteil dieser Trajektorien in der tiefen Konvektion an der ITCZ aufgestiegen und von dort zur Zielregion abgesunken sind. Die letzten Sättigungsereignisse haben dabei gezeigt, dass die meisten Luftpakete in dieser Konvektion das letzte Mal gesättigt waren. Außerdem haben die letzten Sättigungsereignisse ermöglicht, die wichtigste Annahme des Advektions-Kondensations-Modells zu überprüfen: die gleichbleibende spezifische Feuchte außer bei Kondensation. Dazu wurden die relativen Feuchten, die mit dem Modell basierend auf dem letzten Sättigungspunkt der Luftpakete vorhergesagt wurden mit den wahren relativen Feuchten in der Zielregion verglichen. Nach der Annahme einer konstanten spezifischen Feuchte nach dem letzten Sättigungsereignis, hätten diese relativen Feuchten übereinstimmen müssen. Es zeigte sich jedoch, dass das Modell die relative Feuchte in den Trockenzone unterschätzt.

Zudem wurden Niederschlags- und Wolkenkondensatsdaten herangezogen, um zu untersuchen, ob Evaporation von Niederschlag oder Wolkenkondensat eine signifikante Feuchtequelle darstellt. Es zeigte sich, dass manche Sprünge in der spezifischen Feuchte mit vorliegendem Wolkenkondensat bzw. Niederschlagsereignissen einhergehen, jedoch nicht alle. Das bedeutet, dass auch der zweite Prozess der in dem Modell nicht berücksichtigt wird, das turbulente Mischen mit Umgebungsluft, ebenfalls einen Einfluss auf die spezifische Feuchte der Luftpakete haben muss. Es ist zu beachten, dass die betrachteten Daten nur einen Anhaltspunkt für die Einschätzung der Evaporation bieten, denn über die genauen Phasenübergänge lagen keine Informationen vor.

Für weitere Untersuchungen wäre es sinnvoll, die Einflüsse von den im Advektions-Kondensations-Modell vernachlässigten Prozessen weiter zu quantifizieren, beispielsweise mit einer Größe, die die durchschnittliche Feuchteänderung nach dem letzten Sättigungspunkt angibt. Das würde das Verständnis der auftretenden Unterschiede in der Feuchte in verschiedenen Klima- und Wettervorhersage- Modellen unterstützen.

Literatur

- [1] P. Cau et al. „Origins of Dry Air in the Tropics and Subtropics“. In: *Journal of climate* 20 (2007). <https://doi.org/10.1175/JCLI4176.1>.
 - [2] I.M. Held und B.J. Soden. „Water Vapor feedback and global warming!“ In: *Annual Review of Energy and Environment* 25:441-475 (2000). <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.441>.
 - [3] R.T. Pierrehumbert. „Thermostats, Radiator Fins, and the Local Runaway Greenhouse“. In: *Journal of Atmospheric Sciences* 52 (1995). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<1784:TRFATL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<1784:TRFATL>2.0.CO;2).
 - [4] R.T. Pierrehumbert et al. „On the relative humidity in the atmosphere“. In: *The Global Circulation of the Atmosphere*. Hrsg. von Edward N. Lorenz. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1t1kg52.10>. Princeton University Press, 2007. Kap. 6, S. 143–185.
 - [5] E. P. Jr. Salathé und D. L. Hartmann. „A Trajectory Analysis of Tropical Upper-Tropospheric Moisture and Convection“. In: *Journal of Climate* 10 (1997). [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<2533:ATAOTU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2533:ATAOTU>2.0.CO;2), S. 2533–2547.
 - [6] Uwe Schulzweida. *CDO User Guide*. Okt. 2019. doi: 10.5281/zenodo.3539275. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3539275>.
 - [7] S.C. Sherwood. „Maintenance of the Free-Tropospheric Tropical Water Vapor Distribution. Part II: Simulation by Large-Scale Advection“. In: *Journal of Climate* 9 (1996). [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<2919:MOTFTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2919:MOTFTT>2.0.CO;2).
 - [8] S.C. Sherwood et al. „Tropospheric water vapor, convection, and climate“. In: *Reviews of Geophysics* 48 (2009). 10.1029/2009RG000301.
 - [9] R.W. Spencer und W.D. Braswell. „How Dry is the Tropical Free Troposphere? Implications for Global Warming Theory“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 (1997). [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1097:HDITTF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1097:HDITTF>2.0.CO;2).
 - [10] M. Sprenger und H. Wernli. „The LAGRANTO Lagrangian analysis tool – version 2.0“. In: *Geoscientific Model Development* 8 (2015). <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2569-2015>, S. 2569–2586.
 - [11] B. Stevens et al. „DYAMOND: the DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains“. In: *Progress in Earth and Planetary Science* 6.61 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0304-z>.
 - [12] G. Zängl et al. „The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core“. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141 (2014). <https://doi.org/10.1002/qj.2378>.
-

Danksagung

Das DYAMOND-Datenmanagement wurde vom Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) bereitgestellt und durch die Projekte ESiWACE und ESiWACE2 unterstützt. Die Projekte ESiWACE und ESiWACE2 wurden durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizont 2020 der Europäischen Union unter den Fördervereinbarungen Nr. 675191 und 823988 gefördert. Für diese Arbeit wurden Ressourcen des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) verwendet, die von dessen Wissenschaftlichem Lenkungsausschuss (WLA) unter den Projekt-IDs bk1040 und bb1153 bewilligt wurden.

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit im Studiengang Meteorologie selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel – insbesondere keine im Quellenverzeichnis nicht benannten Internet-Quellen – benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ich versichere weiterhin, dass ich die Arbeit vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht habe und die eingereichte schriftliche Fassung der auf dem elektronischen Speichermedium entspricht. Einer Veröffentlichung der vorliegenden Arbeit in der zuständigen Fachbibliothek des Fachbereichs stimme ich zu.

05.10.2021, Hamburg

Datum, Ort

Nele Färber

Unterschrift
