

Der Einfluss von stratosphärischen Wellen auf die Zyklonogenese im nordhemisphärischen Winter

The influence of stratospheric waves on cyclogenesis in
northern hemispheric winter

Masterarbeit im Fach Meteorologie
von

Jasmin Hofgärtner

Oktober 2016



INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMAFORSCHUNG
KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

Referent:
Korreferent:

Prof. Dr. Peter Knippertz
Prof. Dr. Peter Braesicke

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung | 5 |
| 2 | Grundlagen | 8 |
| 2.1 | Winterstürme..... | 8 |
| 2.2 | Stratosphäre..... | 11 |
| 2.3 | Interaktionen | 13 |
| 3 | Daten und Methoden | 17 |
| 3.1 | Daten | 17 |
| 3.1.1 | ERA-Interim Datenset / Reanalysedaten | 17 |
| 3.1.2 | Stürme..... | 18 |
| 3.2 | NCL und CDO | 19 |
| 3.3 | Drucktendenzgleichung..... | 19 |
| 3.4 | Synoptische Situation der jeweiligen Stürme | 22 |
| 3.5 | Hovmöller-Diagramme | 23 |
| 4 | Ergebnisse..... | 30 |
| 4.1 | Auswahl der Stürme..... | 30 |
| 4.2 | Die Familie der mobilen Wellen..... | 34 |
| 4.2.1 | Stürme 10, 13 und 68..... | 39 |
| 4.2.2 | Stürme 45 und 64..... | 48 |
| 4.2.3 | Stürme 43, 48 und 72..... | 55 |
| 4.2.4 | Sturm 96..... | 65 |
| 4.2.5 | Interpretation..... | 69 |
| 4.3 | Die Familie der stationären Wellen..... | 71 |
| 4.3.1 | Stürme 60 und 81 | 75 |

| | | |
|-------|------------------------------------|-----|
| 4.3.2 | Sturm 58..... | 81 |
| 4.3.3 | Interpretation..... | 85 |
| 4.4 | Familie „Rückläufige Wellen“ | 87 |
| 4.4.1 | Interpretation..... | 90 |
| 5 | Zusammenfassung | 92 |
| | Literaturverzeichnis | 97 |
| | Abbildungsverzeichnis..... | 100 |
| | Formelverzeichnis..... | 116 |
| | Tabellenverzeichnis | 117 |
| | Anhang..... | I |
| | Erklärung | II |
| | Danksagung | III |

1 Einleitung

Anfang Januar 1993 bildete sich östlich der USA der Braer Sturm. Dieser wanderte nach Nordosten, wo er am 10. Januar mit einem Kerndruck von 914 hPa zum tiefsten Sturm wurde, der jemals im Bereich des Nordatlantiks gemessen wurde. Abbildung 1a zeigt in einem Satellitenbild die Ausmaße des Braer Sturms. Abbildung 1b stellt die genaue geographische Lage des Sturms sowie die Druckverteilung in einer Bodenwetterkarte vom 10. Januar 1993, 18 UTC dar.

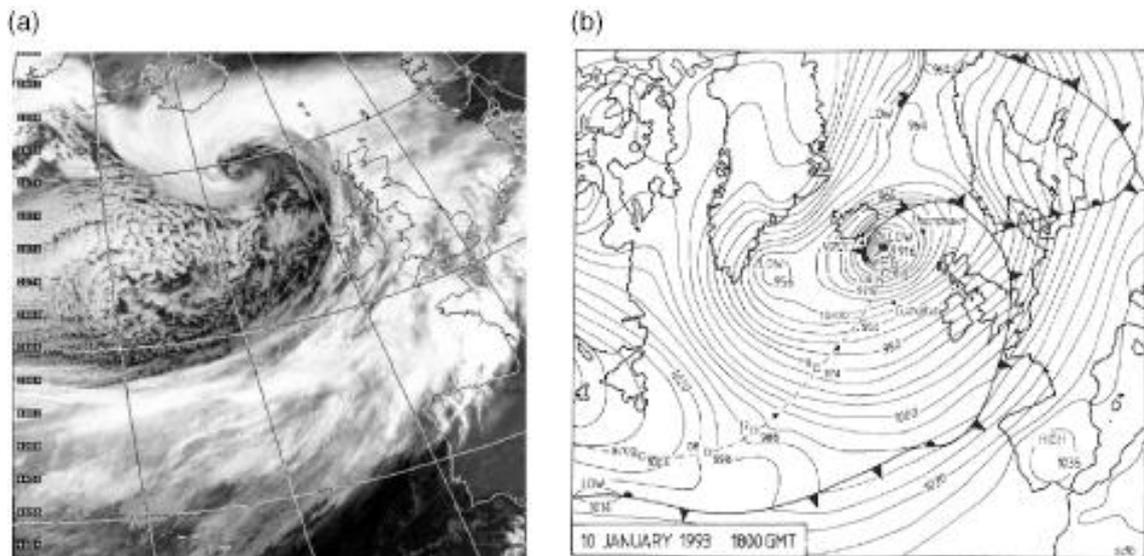


Abbildung 1 Braer Sturm am 10. Januar 1993. a) Infrarotbild des AVHRR Satellit um 9:20 UTC, b) Bodenanalysekarte um 18 UTC (Odell, et al., 2013).

Der Braer Sturm wies während seiner Entwicklungszeit eine Rekordvertiefung mit 78 hPa in 24 Stunden auf. Dennoch entstand kaum Schaden, abgesehen von einem dadurch kenternenden Öltanker, nach welchem der Sturm auch benannt wurde. Aber selbst die Besatzung des Schiffs blieb unversehrt. Großer Schaden blieb zum einen aus, da der Sturm in einem unbewohnten Gebiet aktiv war. Zum anderen war der Braer Sturm von solcher Größe, dass die Druckgradienten im Vergleich zu anderen, auch schadensträchtigen Stürmen, nicht so stark waren.

In den mittleren Breiten der Nordhemisphäre sind Stürme ähnlichen Ausmaßes im Winter, vor allem im Bereich des Nordatlantiks, keine Seltenheit. Diese oft sehr intensiven Zyklonen können bei Erreichen des europäischen Festlandes großen Schaden anrichten. Es gilt daher, die Vorhersagbarkeit solcher Stürme stets zu verbessern, indem sämtliche zur Entstehung, weiteren Entwicklung und Auflösung beitragenden Faktoren noch genauer untersucht und neue Aspekte hinzugezogen werden, welche anschließend in die Modellierung und Vorhersage mit einfließen.

Die Stratosphäre, eine Atmosphärenschicht in etwa zehn bis 50 km Höhe, galt in der Vergangenheit stets als relativ passiver Teil des Klimasystems. In den 1960er Jahren wurden zwar erste Mutmaßungen einer Kopplung zwischen Stratosphäre und Troposphäre angenommen (Muench, 1965), im Allgemeinen nahm man jedoch an, dass diese lediglich auf von Wettersystemen der Troposphäre ausgehende Wellen und Energieflüsse reagiert, selbst aber keinen nennenswerten Beitrag zum Klimawandel und auch zum Wettergeschehen in der Troposphäre aufbringt (Baldwin, et al., 2003). Erst in den letzten Jahrzehnten konnte die Wissenschaft die der Stratosphäre zugeschriebene Passivität vollständig widerlegen und durch eine Vielzahl an Untersuchungen, wie beispielsweise Untersuchungen zu Zusammenhängen zwischen stratosphärischem Polarwirbel und der Nordatlantischen Oszillation, zeigen, dass nicht nur die Stratosphäre von troposphärischen Wellen angeregt wird, sondern auch, dass dynamische Prozesse der Stratosphäre Einfluss auf Variabilitäten der Troposphäre nehmen (Black, 2002; Hartley, et al., 1998).

Untersuchungen zum Braer Sturm ergaben, dass die Stratosphäre tatsächlich während der raschen Vertiefung Einfluss auf den Sturm gehabt haben könnte. Winterstürme werden hinsichtlich ihrer Zugbahn sowie der Häufigkeit ihres Auftretens von bisherigen Studien aber zumeist nur in Verbindung mit Variationen in der Stärke des stratosphärischen Polarwirbels gebracht. Ein direkter Einfluss der Stratosphäre auf einzelne Zyklonen wurde bisher jedoch wenig untersucht.

In dieser Arbeit soll nun der direkte Einfluss der Stratosphäre auf Zyklonen während ihrer Entwicklungsphase untersucht werden. Innerhalb dieser Studie werden die 100 intensivsten Zyklonen, welche im Zeitraum von 1979 bis 2015 im Bereich des Nordatlantiks auftraten, betrachtet. Anhand der gefundenen Ergebnisse sollen Schlüsse gezogen werden hinsichtlich der Verallgemeinerung dieser Ergebnisse auf Kopplungen

zwischen stratosphärischen Wellen und Bodenzyclonen, in welchem Umfang diese Kopplung stattfinden kann und wie dieser Beitrag zeitlich und räumlich verteilt ist. Das Ziel ist es also, den Einfluss der Stratosphäre auf Winterstürme zu quantifizieren.

2 Grundlagen

2.1 Winterstürme

Das mitteleuropäische Wetter wird hauptsächlich durch Hoch- und Tiefdruckgebiete bestimmt. Dabei spielen intensive, nordatlantische Zyklonen, welche hauptsächlich im Winterhalbjahr auftreten, eine wichtige Rolle. Wenn in dieser Zeit in einem baroklin geprägten Gebiet warme Subtropenluft auf kalte Polarluft trifft, die dann die sogenannte Polarfront bilden, stehen die Chancen für die Bildung von Winterstürmen gut (Pinto, et al., 2009). Durch Störungen bilden sich Wellen entlang der vormals geraden Front. Dadurch steigt, aufgrund von Dichteunterschieden, die warme Luft über die Kalte. Durch den Hebungsantrieb entstehen die für Tiefdruckgebiete typischen Wettererscheinungen wie beispielsweise Niederschlag. Die Gegebenheiten für Zyklonogenese sind besonders gut im Lee von Gebirgen und an östlichen Küstenrändern, so zum Beispiel an der Ostküste der USA. Der Temperaturunterschied zwischen Landmasse und Ozean ist besonders im Winter groß. Aufgrund dessen kommt es zu einer Störung mit Wellenbildung in der atmosphärischen Strömung. Auch beim Überströmen der Luft über Gebirgsketten, wie den Rocky Mountains, kommt es zu solchen Störungen. Aus der daraus hervorgehenden Wellenbildung können sich schließlich Tiefdruckgebiete entwickeln.

Die Entwicklung von Zyklonen hängt eng zusammen mit der lokalzeitlichen Entwicklung des bodennahen Luftdrucks. Die Drucktendenzgleichung (Gleichung (1)) beschreibt die Prozesse, die zu dieser Druckänderung führen können.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -g \underbrace{\int_z^\infty \rho \nabla_h \cdot \mathbf{v}_h dz}_2 - \underbrace{g \int_z^\infty \mathbf{v}_h \cdot \nabla_h \rho dz}_3 + \underbrace{g \rho w}_4 \quad (1)$$

Term 1 auf der linken Seite der Gleichung steht für die bodennahe Luftdruckentwicklung. Term 2 beschreibt horizontale Vergenzen. Darunter sind horizontale Massedivergenzen und Massekonvergenzen zu verstehen. Ab einem Niveau

z führen diese Vergenzen zu bodennahem Druckfall durch aus betrachteter Luftsäule ausfließender Masse, zu Druckanstieg durch Massezufluss. Term 3 steht für Warmluft- und Kaltluftadvektion. Dabei werden im Niveau z Luftmassen unterschiedlicher Dichte transportiert. Warmluftadvektion wird dabei mit einem bodennahen Druckfall in Verbindung gebracht, Kaltluftadvektion mit einem Druckanstieg. Term 4 geht auf Luftdruckänderungen durch vertikale Massenbewegungen zurück. Bei einem Hebungsantrieb wird so Masse von bodennahen Luftschichten in das Niveau z transportiert, wodurch am Boden schließlich der Druck fällt. Absinkbewegungen der Luft haben einen umgekehrten Effekt.

In der bekanntesten Form der Drucktendenzgleichung werden Luftdruckänderungen und damit auch die Zyklonenentwicklung von drei Prozessen bestimmt. Können aber auch andere, noch nicht genau untersuchte Effekte Einfluss auf die Entwicklung von Tiefdruckgebieten haben Knippertz (2008) und Fink (2012) haben die Drucktendenzgleichung moduliert und neu formuliert und dabei der Stratosphäre mehr Beachtung geschenkt. Auf diese Art der Gleichung wird in Kapitel 3.3 näher eingegangen.

Die Terme auf der rechten Seite der Drucktendenzgleichung haben unterschiedlich starke Auswirkungen auf die lokalzeitliche Druckänderung. Es gilt als gesichert, dass zyklonenetische Entwicklungen stark von Divergenzen sowie Konvergenzen in höheren Druckniveaus beeinflusst wird. Diese Vergenzen wiederum werden beeinflusst durch den Breiten-, den Krümmungs- und den Diffluenzeffekt. Der Breiteneffekt ignoriert die eigentliche Krümmung der Isohypsen, die Luftpartikel bewegen sich mit dem geostrophischen Wind. Durch die Zunahme des Coriolisparameters mit der geographischen Breite, müssen Isohypsen nach Norden hin dichter gedrängt sein als im Süden, damit die Strömungsgeschwindigkeit konstant bleibt. Beim Krümmungseffekt gilt umgekehrt der Coriolisparameter als konstant und die Isohypsenkrümmung wird beachtet. Der Wind weht nun nach dem Prinzip des Gradientwinds. Trogvorderseitige Richtungsdivergenz und trogrückseitige Richtungskonvergenz sind die Folge. Durch Konfluenz- und Diffluenzeffekte entsteht in der Konfluenzzone eines Jetstreaks eine ageostrophische Komponente in Richtung tiefen Druck. Umgekehrt ist es in der Diffluenzzone. In Abbildung 2 ist ein solcher Jetstreak dargestellt.

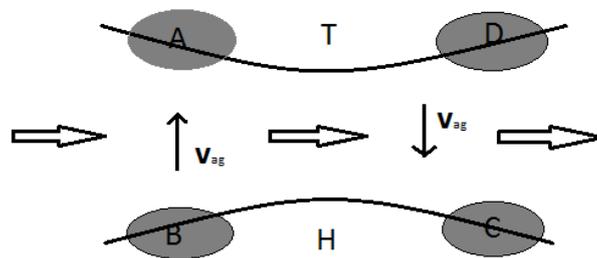


Abbildung 2: Jetstreak mit Konfluenz- und Diffluenzeffekt

Auf der linken Seite der Abbildung befindet sich der Eingang des Jetstreaks und auf der rechten Seite der Ausgang. Im Eingangsbereich des Jetstreaks wird auf der antizyklonalen Seite Divergenz erzeugt (A) und auf der zyklonalen Seite Konvergenz (B). Im Ausgangsbereich wird dagegen im antizyklonalen Bereich Konvergenz erzeugt (C) und im zyklonalen Bereich Divergenz (D). Diese Vergenzen sorgen für Auf- und Absinkbewegungen. Durch diese Bewegung sowie durch ageostrophische Komponenten vom hohen zum tiefen Druck, bilden sich beidseitig Zirkulationen aus. Eine thermisch direkte Zirkulation zwischen A und B sowie eine thermisch indirekte Zirkulation zwischen C und D.

Zyklogenese setzt bevorzugt im antizyklonalen Bereich des Eingangsgebiets (A) ein. Aber auch auf der zyklonalen Seite des Ausgangsgebiets kann Zyklogenese einsetzen, die unter Umständen sogar sehr intensiv vonstattengehen kann.

Ebenfalls unabdingbar für Zyklogenese ist die barokline Instabilität. Bei Baroklinität ist ein horizontaler Temperaturgradient vorhanden, der durch die unterschiedlich starke Sonneneinstrahlung entsteht. Baroklinität ist also der Normalzustand. Ein kritischer und infolgedessen anfälliger Ort für Instabilitäten und damit auch Zyklogenese ist die Polarfront, an welcher warme Subtropenluft auf kalte Polarluft trifft.

Die typische Zugbahn eines Wintersturms der Mittelbreiten ist vom Nordatlantik über die Britischen Inseln hinweg über die Nordsee nach Skandinavien (Donat, et al., 2010). Auf ihrem Weg beeinflussen sie das europäische Wetter. Sie bringen oft Wind, Regen und rasche Temperaturänderungen (Ulbrich, et al., 2009). Nur wenige aber erreichen tatsächlich das europäische Festland und nur ein geringer Anteil entwickeln sich zu ausgeprägten Stürmen mit orkanartigen Winden (Leckebusch, et al., 2007). In diesen Fällen ist eine sichere Vorhersage von großer Bedeutung, um größere Schäden zu vermeiden. Aus diesem Grund ist es entscheidend, alle auf die zyklogenetische Entwicklung Einfluss nehmenden Effekte zu untersuchen.

2.2 Stratosphäre

Ein kurzer Überblick über die Klimatologie der Stratosphäre soll beim späteren Interpretieren der Ergebnisse helfen.

In der stabilen Stratosphäre, welche sich in einer Höhe von etwa 10 bis 50 km befindet, sind die Strömungsverhältnisse aufgrund der Temperaturzunahme annähernd turbulenzfrei und durch große Wellen geprägt. Änderungen der Zirkulation geschehen auf einer Zeitskala von Wochen bis Monaten und fast ausschließlich durch Strahlungsprozesse oder Interaktionen mit troposphärischen Wellen. Die stratosphärischen Wellen bewegen sich also im Allgemeinen nur langsam und werden, im Vergleich zur kurzen Zeitskala der Winterstürme, oft als stationär betrachtet.

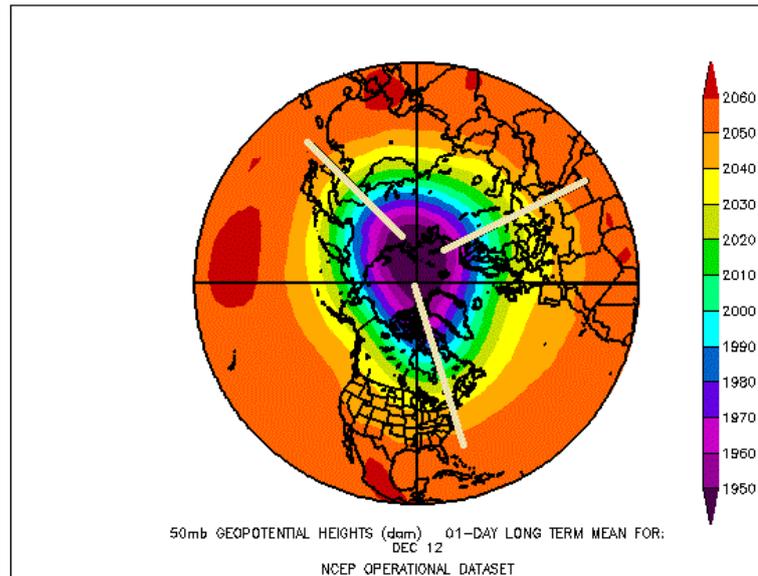


Abbildung 3: NCEP Reanalyse des langzeitlichen Mittels, gebildet aus einem Fünf-Tages-Fenster um den 12.12. (Quelle: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/histdata/>)

Abbildung 3 zeigt eine NCEP Reanalyse eines langzeitlichen Mittels des Geopotentials in 50 hPa. Berechnet wird das klimatologische Mittel durch Einbeziehung eines Fünf-Tage-Fensters, in diesem Fall vom 10. bis 15. Dezember. Diese Abbildung zeigt die klimatologischen Gegebenheiten in der Stratosphäre. Typisch sind die großen Wellen mit Wellenzahlen zwischen 1 und 3. In dieser Abbildung liegt die Wellenzahl 3 vor, was durch die in beige eingezeichneten Trogachsen sichtbar gemacht wird. Typisch für die stratosphärische Klimatologie ist auch der stärker ausgeprägte Trog im Lee der Rocky-Mountains sowie der Polarwirbel in den Wintermonaten. Dies ist ein großes Tiefdruckgebiet in der Polregion, welches auf der Nordhemisphäre durch die sich abwechselnden Wasserflächen und Kontinente geprägt ist. Durch die unterschiedliche Wärmeeinwirkung variiert der Polarwirbel, im Vergleich zu dem auf der Südhemisphäre, in seiner Stärke und Ausprägung.

In der Troposphäre fällt die Temperatur vom Äquator zu den Polen hin. In der Stratosphäre ist es genau umgekehrt. Dort sind im Bereich des Äquators die tiefsten Temperaturen zu finden und bei den Polen höhere. Bodennahe Winde mit nördlicher Komponente führen demnach warme, tropische Luft zu uns. In der Höhe jedoch transportieren diese Winde kältere Luft heran. In der Stratosphäre gibt es gegenüber der Troposphäre also eine thermische Kompensation. Zum einen kann der Herantransport unterschiedlich temperierter Luftmassen am Boden und in der Höhe einen dämpfenden

Effekt auf Luftdruckänderungen haben, da dieser laut barometrischer Höhenformel sensibel auf vertikale thermische Effekte reagiert (Reuter, 1978). Zum anderen hat dies Einfluss auf die Lage der Tropopause. Befindet sich in der Troposphäre eine Säule kalter Luft, darüber in der Stratosphäre jedoch warme Luft. So zieht sich die mit kalter Luft gefüllte Luftsäule zusammen, diejenige mit warmer Luft dehnt sich aus. Dadurch sinkt die Tropopause ab. Dies wiederum kann Einfluss nehmen auf den bodennahen Luftdruck und somit auf die Entwicklung von Zyklonen. Es ist also nicht auszuschließen, dass thermische und thermodynamische Effekte der Stratosphäre den troposphärischen Beiträgen zur Sturmentwicklung entgegenwirken können (Colucci, 2010). Weitere Interaktionen zwischen Stratosphäre und Troposphäre werden in Kapitel 2.3 diskutiert. Darüber hinaus wird das Verhalten des absoluten Geopotentials in einer bestimmten Höhe in der Stratosphäre durch die Geopotentialtendenzen der darunter befindlichen Level beeinflusst. Dies gilt es bei Interpretationen der Phasenbeziehungen zwischen Welle und Sturm zu beachten.

2.3 Interaktionen

Untersuchungen von Interaktionen zwischen Troposphäre und Stratosphäre sind noch recht jung. In der Vergangenheit gab es vereinzelte Thesen dazu, wie beispielsweise von Muench (1965). Munch stellte eine vertikale Konsistenz fest. Bei ausreichend großen Wellenlängen beobachtete er ähnliche Muster in Troposphäre und Stratosphäre. Dennoch wurde die Stratosphäre im Allgemeinen als eher passiver Teil des Klimasystems betrachtet. Es wurde angenommen, dass diese lediglich auf von troposphärischen Wettersystemen ausgehende Wellen und Energieflüsse reagiert, selbst jedoch keinen nennenswerten Beitrag zu Klimawandel und Wettergeschehen in der Troposphäre liefert.

Erst in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten konnte die Wissenschaft die bis dahin angenommene Passivität der Stratosphäre widerlegen und durch eine Vielzahl an Untersuchungen zeigen, dass die Stratosphäre nicht nur von troposphärischen Wellen angeregt wird, sondern ebenfalls Einfluss auf die Troposphäre nehmen kann.

So zum Beispiel stellte Black (2002) fest, dass Variationen in der Stärke des Polarwirbels einen direkten Einfluss auf bodennahe Klimasysteme haben und diese

dann wiederum auf das troposphärische Wettergeschehen. Auf diese Aussage wird im Folgenden näher eingegangen.

Die Nordhemisphäre ist durch alternierende Druck- und Variabilitätsmuster, die Nordatlantische und die Arktische Oszillation (NAO, AO), geprägt. Unter der NAO sind Schwankungen in den Luftdruckunterschieden zwischen dem Islandtief und dem Azorenhoch zu verstehen. So tritt beispielsweise während einer positiven NAO-Phase ein stärkerer Luftdruckgegensatz zwischen den beiden Druckgebilden als im Mittel auf. Die Folge davon sind stärker ausgeprägte Westwinde, was eine erhöhte Sturmaktivität und auch –intensität über dem Nordatlantik mit sich bringt. Die Zyklonen haben eine längere Lebenszeit und werden mit verstärkten Westwinden Richtung Europa gelenkt.

Während sich die NAO auf den Nordatlantikraum beschränkt, beschreibt die AO Luftdruckanomalien auf nahezu der gesamten Nordhemisphäre. Diese großräumige Schwankung ist durch drei Aktionszentren charakterisiert: eines über der Biskaya, eines über Island und eines über den Aleuten. In der positiven Phase sind über der Biskaya und den Aleuten Hochdruckgebiete zu finden sowie ein Tief über Island. In der negativen Phase sind die Druckgebilde entgegengesetzt. Die positive Phase beispielsweise ist gekennzeichnet durch eine Verstärkung des Polarwirbels vom Boden bis in die Stratosphäre und nordatlantische Stürme transportieren Regen und mildere Temperaturen nach Nordeuropa.

Sowohl NAO als auch AO haben also großen Einfluss auf das Wettergeschehen in der Troposphäre und stehen in unmittelbarer Verbindung mit nordatlantischen Zyklonen.

Nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen stehen NAO und AO auch mit Anomalien in der Stärke des Polarwirbels in Verbindung. Nach Baldwin und Dunkerton (2001) wird ein starker, stabiler Polarwirbel mit einem positiven NAO-Index assoziiert, eine positive AO-Phase mit einer Verstärkung des Polarwirbels. Dies ist jedoch kein einseitiger Mechanismus. Variationen in der Stärke des Polarwirbels, AO und NAO beeinflussen sich gegenseitig, reagieren also mit einem Feedback. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 4 verdeutlicht. Nun stellt sich die Frage, ob es auch einen direkten Einfluss des Polarwirbels auf einzelne Zyklonen gibt.

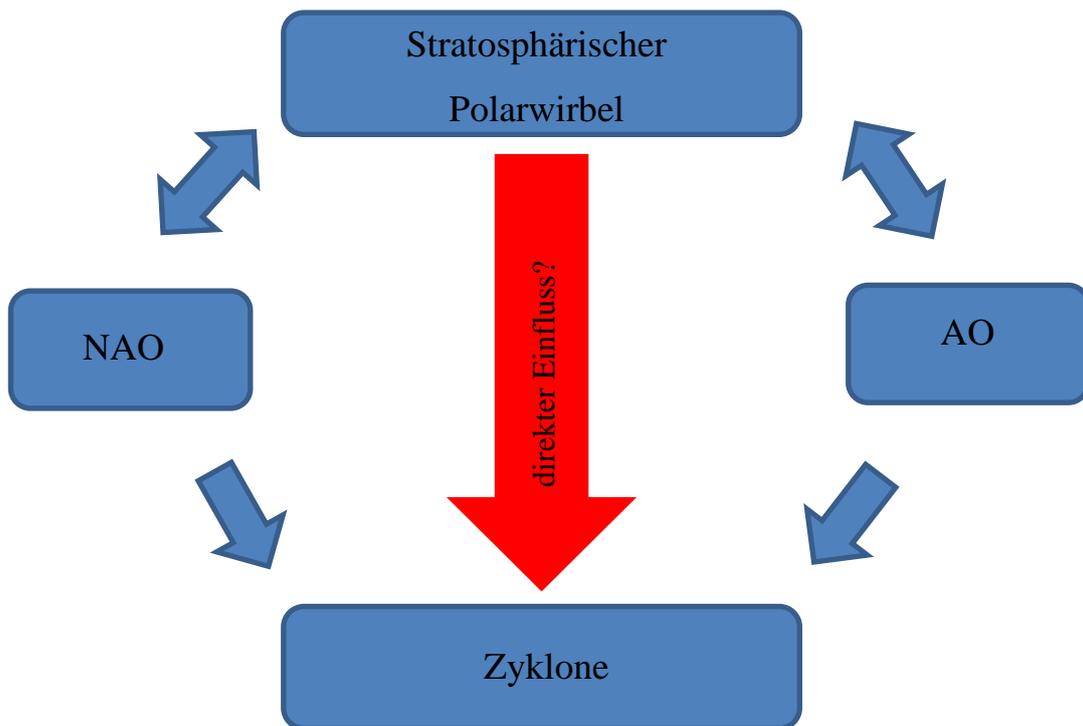


Abbildung 4: Zusammenhänge zwischen stratosphärischem Polarwirbel, NAO, AO und Zyklonen

Eine weitere Interaktion zwischen Troposphäre und Stratosphäre sind propagierende Rossby-Wellen, entstanden durch orographische Hindernisse oder Land-See-Temperaturkontraste. Wandern diese in die Stratosphäre und bauen dort Energie ab, bremst dies die zonale Strömung. Eine Störung oder gar Umkehr der Strömung verändert den meridionalen Temperaturgradienten, wodurch sich die Polarregion rasch erwärmen kann. Eine lokale Verschiebung des Polarwirbels erfolgt und ein arktisches Hoch bildet sich. Dieser Vorgang wird *Sudden Stratospheric Warming* (SSW) genannt. Aus der Abschwächung des Polarwirbels ergeben sich die vorher genannten indirekten Auswirkungen auf Winterstürme

Ein Zusammenhang zwischen Stratosphäre und Troposphäre zeigt sich auch nach Vulkaneruptionen sowie bei Änderungen des stratosphärischen Ozongehalts in außertropischen Breiten (Langematz, et al., 2008). In der Ozonschicht wird UV-Strahlung absorbiert und trägt so zur Erwärmung der Stratosphäre bei. Einer Abnahme des Ozongehalts, ob aus natürlicher oder anthropogener Herkunft, folgt eine Abkühlung der Stratosphäre, was wiederum zu einer Verstärkung des Polarwirbels führt.

Bisher zeigen Literatur und Forschung einen indirekten Einfluss der Stratosphäre auf troposphärische Zyklonen auf. Dabei wird nicht auf einzelne Zyklonen eingegangen,

sondern lediglich auf so genannte „stormtracks“. Dies beschreibt die Zugbahnen aller in einem Winterhalbjahr auftretenden Zyklonen. Ziel dieser Arbeit ist es, einen direkten Einfluss des Polarwirbels auf einzelne Zyklonen zu quantifizieren.

3 Daten und Methoden

In diesem Kapitel soll das verwendete ERA-Interim Datenset vorgestellt werden. Anschließend werden Methoden aufgezeigt, die gegebenen Daten sinnvoll darzustellen. Dazu werden die Programme NCL und CDO sowie die Drucktendenzgleichung näher erläutert. Durch die Anwendung dieser Gleichung können verschiedene Stürme kategorisiert werden. Schließlich werden verschiedene Arten von Hovmöller-Diagrammen vorgestellt und deren Interpretationsmöglichkeiten näher gebracht.

3.1 Daten

In dieser Arbeit werden hochaufgelöste Reanalysedaten des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) verwendet.

Der Untersuchungszeitraum bezieht sich auf die Jahre von 1979 bis 2015, beschränkt sich jedoch jeweils auf die Winterhalbjahre, da sich dann die betrachteten intensiven Winterzyklonen im Bereich des Nordatlantiks bilden. Das Untersuchungsgebiet bezieht sich auf die Nordhemisphäre mit einer geographischen Länge von 100° W bis 20° O und einer geographischen Breite von 40° N bis 70° N. Für die genauere Betrachtung einzelner Stürme wird das geographische Gebiet an die jeweiligen Zugbahnen angepasst.

3.1.1 ERA-Interim Datenset / Reanalysedaten

Reanalysedaten beschreiben das Wetter- und Klimageschehen der Vergangenheit. Diese werden mit numerischen Wettervorhersagemodellen unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Beobachtungen, Messungen sowie bekannten Unsicherheiten für die Vergangenheit simuliert. Sie liefern, im Gegensatz zu einzelnen Messungen,

großflächige, konsistente und realitätsnahe Informationen über den atmosphärischen Zustand, was sie für die Forschung bedeutend macht.

Das ECMWF betreibt das globale Reanalyseprojekt ERA-Interim (Dee, et al., 2011), welches aus den Datensätzen des ERA-40 Projekts hervorgeht. Diese globalen Reanalysen gehen bis 1979 zurück und werden kontinuierlich erweitert.

Die ERA-Interim Daten werden mit dem spektralen Modell IFS (Integrated Forecast System) mittels einer 4D-Variationsanalyse berechnet. Sie haben eine räumliche Auflösung von $0,7^\circ$, was etwa 80 km entspricht sowie eine zeitliche Auflösung von 6 Stunden. Das Modell teilt die Atmosphäre vom Boden bis etwa 0,1 hPa in 60 Schichten auf.

Die in dieser Arbeit verwendeten ERA-Interim Daten liegen 6-stündig für die Winterhalbjahre von 1979 bis 2015, jeweils vom 30.09. bis 30.04. vor. Darin enthalten sind Informationen über das absolute Geopotential sowie die u- und v- Komponenten des Windes zu jedem Zeitpunkt des genannten Intervalls für die gesamte Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0° N bis 90° N.

3.1.2 Stürme

Innerhalb dieser Studie werden die 100 intensivsten Zyklonen, welche im Zeitraum von 1979 bis 2015 im Bereich des Nordatlantiks auftraten, betrachtet. Intensiv bedeutet hier nicht, dass die Stürme besonders schadensträchtig waren. Die intensivsten Zyklonen sind die tiefsten Zyklonen, welche in diesem Zeitraum auftraten. Ein Merkmal der ausgesuchten Winterstürme ist dabei auch der rasche Druckfall innerhalb kurzer Zeit.

Die Datensätze zu diesen 100 Zyklonen beinhalten den Zeitraum von der Entstehung bis zur Auflösung, den Kerndruck sowie die Koordinaten zum jeweiligen Aufenthaltsort. Da diese Stürme keine besonders schadensträchtigen Stürme sind, unter anderem da sie das Europäische Festland in den meisten Fällen nicht erreichen, können ihnen keine Namen zugeordnet werden. Die Stürme werden daher in dieser Arbeit als die Stürme 01 bis 99 bezeichnet.

3.2 NCL und CDO

Zur Berechnung der Anomalien und auch zur Erstellung der Hovmöller-Diagramme wird das Programm NCL verwendet. NCL, NCAR Command Language, ist ein Produkt des National Center for Atmospheric Research (NCAR, <http://www.ncl.ucar.edu/>) und wurde speziell für die naturwissenschaftliche Datenverarbeitung entwickelt. Zuvor werden die Daten sowohl räumlich auf eine geographische Breite von 40° N bis 70° N, in manchen Fällen auch auf eine geographische Länge von 100° W bis 20° O, mittels Climate Data Operators (CDO, <https://code.zmaw.de/projects/cdo>) als auch zeitlich auf die jeweilige Lebensdauer der Stürme eingegrenzt. CDO ist ein durch das Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickeltes Kommandozeilen-Programm, welches im Bereich der Klimaforschung weit verbreitet ist.

3.3 Drucktendenzgleichung

In dieser Arbeit soll der direkte Einfluss der Stratosphäre auf Zyklone während ihrer Entwicklungsphase untersucht werden. Innerhalb dieser Studie werden dazu die in Kapitel 2.1 näher erläuterten Winterstürme betrachtet.

Eine Vertiefung von Zyklonen erfolgt unter Einfluss von diabatischen Effekten wie Strahlungseffekte, freiwerdende latente Wärme oder Diffusion sowie barokline Effekte. Aber wird die Druckentwicklung auch von der Stratosphäre beeinflusst?

Um herauszufinden, welche Effekte im Laufe der Entwicklungsphase der Stürme in welchem Maße auf die explosive Vertiefung des Bodendrucks haben, eignet sich eine Anwendung der nach Knippertz et al. (2008) und Fink et al. (2012) modulierten Drucktendenzgleichung (*Pressure Tendency Equation*, PTE) auf die ausgewählten Zyklone. Die PTE folgt nachstehender Formulierung

$$\frac{\partial p_{sfc}}{\partial t} = \rho_{sfc} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho_{sfc} R_d \frac{\int_{sfc}^{p_2} \partial T_v}{\partial t} d \ln p + g(E - P) + RES_{PTE} \quad (2)$$

$$Dp = D\Phi + ITT + EP + RES_{PTE} \quad (3)$$

wobei p_{sfc} der Bodendruck, ρ_{sfc} die bodennahe Luftdichte, Φ das Geopotential in Niveau p_2 , hier auf 100 hPa gesetzt, T_v die virtuelle Temperatur, R_d die Gaskonstante trockener Luft und g die Gravitationsgeschwindigkeit ist.

Die Benennung der einzelnen Terme aus Gleichung (2) ist in Gleichung (3) dargestellt. Dabei ist Dp die Drucktendenz am Boden. $D\Phi$ auf der rechten Seite der Gleichung stellt die Geopotentialänderung im Drucklevel p_2 dar. Dieser Term ist ein Indikator für einen möglichen Beitrag der Stratosphäre zur Druckentwicklung am Boden. Setzte man in einem Gedankenexperiment alle anderen Terme der oben genannten Gleichung Null, so kann man sich den Beitrag der Stratosphäre zum Druckfall durch eine Verringerung des Geopotentials vorstellen. Denn wenn die troposphärische Luftsäule durch darüber stattfindende Prozesse zusammengedrückt wird, muss aufgrund der Kontinuität Masse entweichen, was einen Druckfall zur Folge hat; und andersherum. Die sich ausdehnende stratosphärische Luftmasse und die komprimierte troposphärische Luftmasse würden jedoch in der Realität mit Temperaturadvektionen und daraus folgenden anderen Faktoren einhergehen, sodass ein Beitrag durch die Stratosphäre zur Bodendruckentwicklung nicht in Isolation auftritt.

ITT entspricht der vertikal integrierten Tendenz der virtuellen Temperatur. Durch Erwärmung der Luftsäule trägt dieser Term zum Druckfall bei, da die Luft sich ausdehnt und zu den Seiten ausströmt. Dieser Term lässt sich weiter aufspalten in einen Anteil aus horizontaler Temperaturadvektion, einen Anteil aus Vertikalbewegungen sowie den Einfluss diabatischer Effekte. Hinter dem Ausdruck EP steckt die Massenänderung durch Evaporation und Niederschlagsprozesse, RES_{PTE} ist ein Residuum, welches sich aus Diskretisierungsfehlern ergibt.

Um die Anteile der oben genannten Faktoren auf die Bodendrucktendenz darstellen zu können, wird die PTE auf die Stürme angewandt. In die Berechnung fließen 6-stündige Tracks der Stürme ein. Betrachtet wird dabei, wie sich die Gegebenheiten in einer $3^\circ \times 3^\circ$ Box ändern, sodass sich das Druckminimum des Sturms gerade in dieser Box neu bilden wird (s. Abbildung 5). Dabei muss beachtet werden, dass DP nicht der Kerndruck des betrachteten Sturms ist, sondern die 6-stündige Änderung des Drucks. Des Weiteren erfolgt die Betrachtung in eulerscher Form, wie auch aus Gleichung (2)

ersichtlich. Es wird also nicht der Sturm in seiner Zugbahn verfolgt, sondern man „sitzt“ in der Box, der Sturm kommt auf die Box zu. In die Interpretation muss mit einfließen, dass durch die PTE stratosphärische Systeme und deren Einfluss erfasst werden, welche vertikal über den Zyklonen auftreten. Wichtig ist aber zu beachten, dass Wellen, welche sich von der Stratosphäre in die Troposphäre bis zum Boden hin durchsetzen, eine mit der Höhe nach Westen geneigte Achse zwischen den jeweiligen Druckzentren aufweisen. Ein starker Trog in der Troposphäre geht demnach mit einem deutlich westlicher gelegenen stratosphärischen Trog einher.

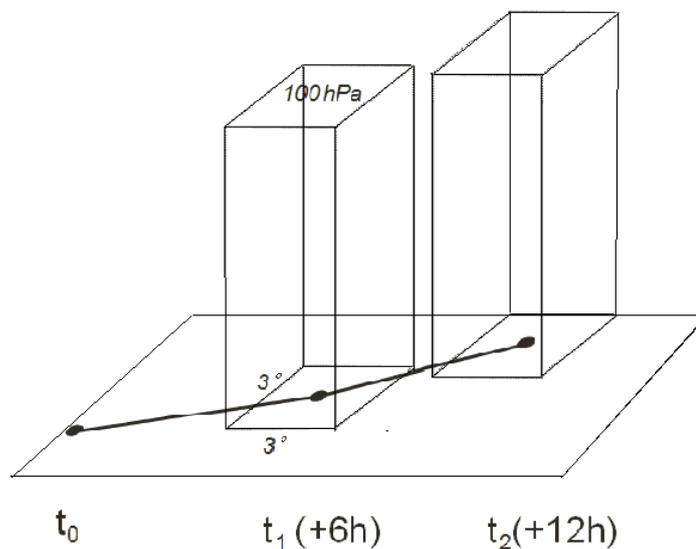


Abbildung 5: PTE Diagnostik (Fink, et al., 2012)

In Abbildung 6 ist ein Diagramm dargestellt, welches man durch die Anwendung der PTE auf die Stürme erhält. Die Balken stellen die jeweiligen Anteile der oben genannten Faktoren auf die Bodendrucktendenz dar. Ein möglicher Beitrag zur Druckentwicklung durch die Stratosphäre wird durch die grünen Balken ersichtlich. Die Bodendrucktendenz wird durch die schwarze Linie gezeigt. In diesem Beispiel weist $D\Phi$ im Bereich negativer Drucktendenz, also während des Druckfalls, einen negativen Beitrag auf. Dies bedeutet, dass die Stratosphäre möglicherweise zur Vertiefung des Sturms beiträgt. Ein positiver Beitrag durch $D\Phi$ würde bedeuten, dass die Stratosphäre dem Druckfall entgegen wirkt.

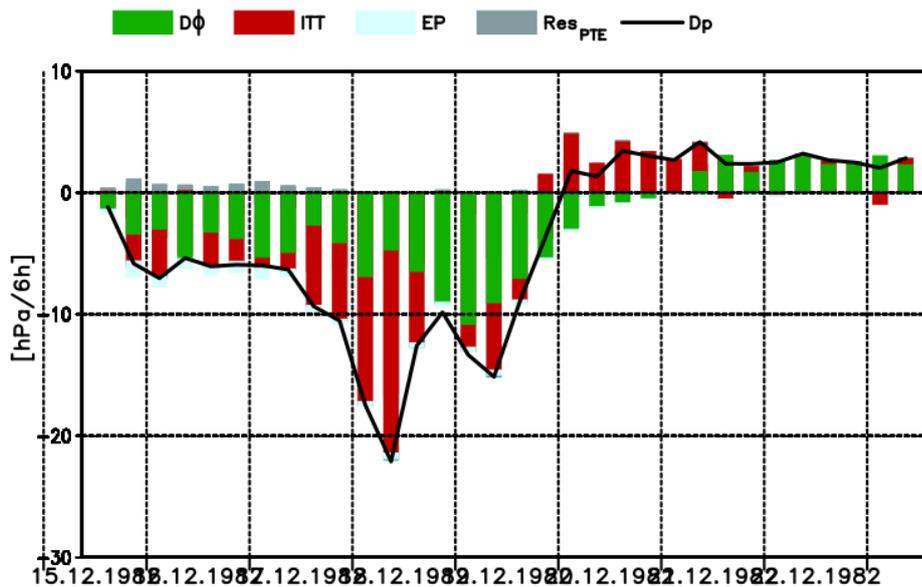


Abbildung 6: Ergebnis der PTE Analyse von Sturm 13 vom 15.12.1982 - 23.12.1982. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (3) auf die Bodendruckentwicklung des Sturms

Durch Aufsummieren dieser Balken über die Periode mit negativem DP , lässt sich deren prozentualer Beitrag errechnen. Dies wurde für alle Stürme durchgeführt und der jeweilige prozentuale Beitrag von $D\Phi$ auf die Druckentwicklung bestimmt. Die Werte sind in Tabelle 1 in Kapitel 4.1 angegeben.

3.4 Synoptische Situation der jeweiligen Stürme

Ein weiterer Schritt besteht darin, die Tracks der einzelnen Stürme zu plotten und die jeweilige synoptische Situation darzustellen. Die Zugbahnen der ausgewählten Stürme werden dabei in Verbindung mit dem absoluten Geopotential sowie der 24-stündigen Geopotentialtendenz zu einem bestimmten Zeitraum gebracht. Die Geopotentialtendenz wird aus den gegebenen ERA-Interim Daten wie folgt berechnet:

$$\Delta Z_n = \frac{Z_n - Z_{n-1}}{24 \text{ h}} \quad (4)$$

Dadurch kann der Sturm in seine geographische Umgebung und seine dynamische Situation sowohl in Troposphäre als auch in Stratosphäre eingeordnet werden, die Phasenbeziehung zwischen Sturm und stratosphärischer Welle wird betrachtet. Damit können Differenzen und auch Gemeinsamkeiten der ausgewählten Stürme aufgezeigt

werden. Bei der Interpretation gilt es zu beachten, dass stratosphärische Tröge und Rücken von den Geopotentialtendenzen aus darunter liegenden Level gesteuert werden.

3.5 Hovmöller-Diagramme

Um nun Wellen in der Stratosphäre überhaupt identifizieren zu können, werden Hovmöller-Diagramme erstellt.

Hovmöller-Diagramme sind eine in der Meteorologie gern genutzte Möglichkeit zur Darstellung von mehrdimensionalen, zeitlich abhängigen Daten. Durch eine Mittelung über einen ausgewählten Breitengürtel werden die Daten auf eine Dimension reduziert. Diese so ermittelten Daten werden gegenüber der Zeit in einem Raum-Zeit-Diagramm dargestellt. Dabei wird typischerweise auf der Ordinate die Zeit, auf der Abszisse die räumliche Koordinate aufgetragen. Durch diese Art der Darstellung lassen sich auf einen Blick wichtige vonstatten laufende Entwicklungen erkennen. Insbesondere Rossby- oder planetare Wellen, welche in dreidimensionaler Darstellung sehr komplex erscheinen, lassen sich damit gut identifizieren.

In dieser Arbeit wird, nach Mittelung über einen Breitengürtel, auf der Ordinate die Lebenszeit des jeweiligen betrachteten Sturms aufgetragen, auf der Abszisse die geographische Länge.

Für eine ganzheitliche Identifizierung und Betrachtung des Verhaltens stratosphärischer Wellen ist es sinnvoll, verschiedene Arten von Hovmöller-Diagrammen zu erstellen und miteinander zu vergleichen, da jedes Stärken und Schwächen aufweist. In dieser Arbeit werden fünf unterschiedliche Arten erstellt, Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials, des Meridionalwinds, der Geopotentialtendenz sowie klimatologische Anomalien des absoluten Geopotentials und des Meridionalwinds.

Es wurde in einem ersten Schritt das absolute Geopotential in einem Hovmöller-Diagramm bezüglich der Lebenszeit eines Sturmes gegenüber dem ausgewählten Breitengürtel von 40° N bis 70° N dargestellt. Dabei können zwei idealisierte Fälle unterschieden werden. Der erste Fall beinhaltet eine zeitliche Konstanz. So lassen sich, wie in Abbildung 7, stehende Tröge und Rücken identifizieren. Das „+“ in der

Abbildung beschreibt einen Trog, das „-“ einen Rücken. Die Pfeile stellen den Meridionalwind dar, welcher sich aus der räumlichen Ableitung des Geopotentials ergibt. Eine stationäre Welle ist im Hovmöller-Diagramm also durch einen der Ordinate parallelen Verlauf des Geopotentials zu erkennen.

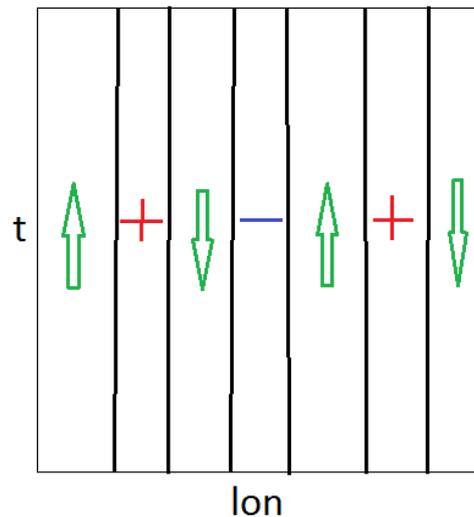


Abbildung 7: zeitlich konstantes absolutes Geopotential, "+" steht für Trog, "-" für Rücken; Meridionalwind durch grüne Pfeile dargestellt

Mit der Geopotentialtendenz lassen sich Aussagen über die lokalzeitliche Änderung, also eine Prognose, des Geopotentialfelds machen. Die Berechnung der 24-stündigen Geopotentialtendenzen wurde bereits in Kapitel 3.4 erläutert.

Hier wird auch die Beziehung zur Drucktendenzgleichung (PTE) bezüglich der darin enthaltenen Geopotentialänderung ($d\Phi/dt$) deutlich. Dieser Term kann als möglicher Einfluss der Stratosphäre auf die Bodendrucktendenz gesehen werden.

Da das absolute Geopotential im hier besprochenen ersten idealisierten Fall zeitlich konstant ist, ist die Ableitung und somit die Geopotentialtendenz überall Null.

Der zweite idealisierte Fall beinhaltet eine zeitliche Variabilität. Dabei wird wiederum unterschieden zwischen einer linearen räumlichen Intensivierung/Abschwächung und einer propagierenden Welle. Abbildung 8 zeigt die lineare räumliche Änderung mit einer Intensivierung links und einer Abschwächung rechts. In Abbildung 9 ist die dazugehörige Geopotentialtendenz dargestellt. Diese weist eine zeitliche und räumliche

Konstanz auf mit links, entsprechend der Intensivierung des Geopotentials, eine konstante positive Tendenz, rechts eine konstante negative Tendenz in Anlehnung an die Abschwächung des Geopotentials.

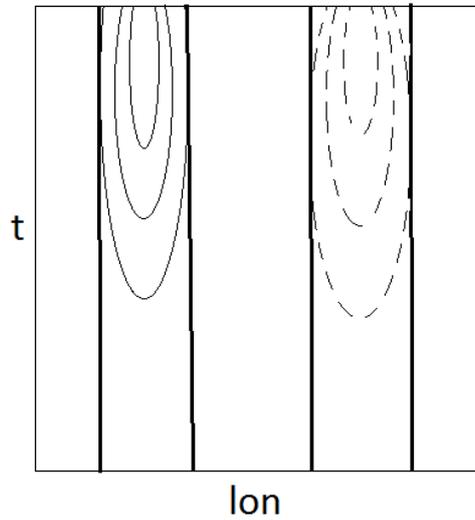


Abbildung 8: zeitlich variables absolutes Geopotential; lineare räumliche Zunahme (links) und Abnahme (rechts)

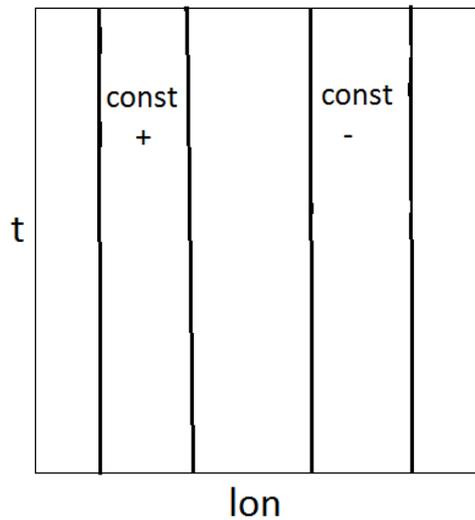


Abbildung 9: räumlich konstante Geopotentialtendenz, links passend zu lineare räumliche Zunahme des Geopotentials, rechts passend zur Abnahme des Geopotentials

Eine Propagation der Tröge und Rücken wird in Abbildung 10 aufgezeigt. Eine mobile Welle ist durch eine schräge Achse durch gleichwertige Geopotentialwerte im Zeitverlauf zu erkennen. Im Beispielbild wandern die Wellen von West nach Ost. Legt man nun eine Gerade durch ein Wellenpaket, dann lässt sich anhand der Steigung die Propagationsgeschwindigkeit der Welle bestimmen. Diese wird wie folgt mit der Formel für Geschwindigkeit berechnet:

$$v = \frac{s}{t} \quad (5)$$

mit s in km, abgeleitet aus der geographischen Länge in 55° N, und t in Tagen. Eine typische Geschwindigkeit von Zyklonen beträgt 80 km/h. So können Lage und Verhalten des Sturms relativ zur Welle betrachtet werden.

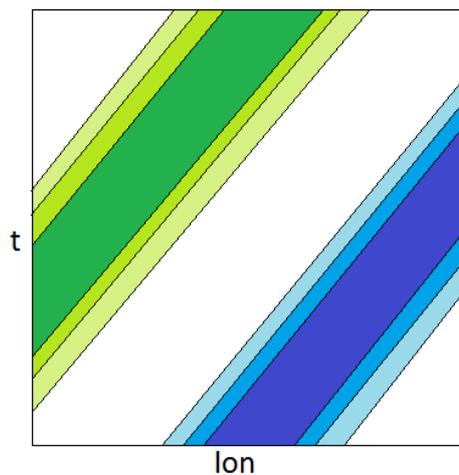


Abbildung 10: Propagation der Geopotentialwellen, blau steht für Trog, grün für Rücken

Die Geopotentialtendenz weist ein ähnliches Muster auf (s. Abbildung 11), da durch die differentielle Beziehung von Geopotential und dessen Tendenz nun auch letztere zeitlich und räumlich propagiert. Bei Betrachtungen in der Stratosphäre muss allerdings darauf geachtet werden, dass das absolute Geopotential zumeist mit der Geopotentialtendenz aus darunter liegenden Höhenlevel beeinflusst wird. Die größten Tendenzen sind in Bereichen größter Gradienten des Geopotentials zu finden. Aus diesem Grund ist die Geopotentialtendenz um etwa eine Viertel Wellenlänge gegenüber des Geopotentials phasenverschoben.

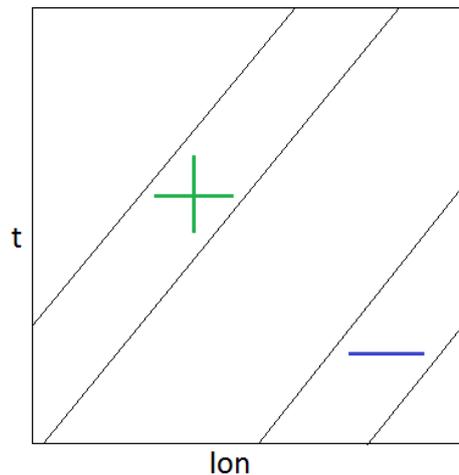


Abbildung 11: Geopotentialtendenz zu einer propagierenden Geopotentialwelle

Ein reiner Blick auf die Geopotentialtendenz liefert also noch keine Information über die tatsächliche Wellenstruktur. Dafür ist eine gleichzeitige Betrachtung des absoluten Geopotentials nötig.

In einem zweiten Schritt wurden Anomalien erstellt. Diese beziehen sich auf die gleichen räumlich gemittelten Daten eines Sturmes, wie beim absoluten Geopotential. Die Abweichung wird jedoch aus einer Klimatologie der Daten von 1979 bis 2015 berechnet. Dazu werden die Daten dem gewählten geographischen Gebiet von 40° N bis 70° N angepasst und zeitlich gemittelt. Diese Klimatologie wird nun von den Sturmdaten subtrahiert. Anomalien werden angewendet, um stationäre Systeme zu entfernen und unnatürliche, nicht dauerhaft auftretende Situationen sichtbar zu machen.

Oftmals wird zur Identifizierung von Wellenzügen in der oberen Troposphäre und auch unteren Stratosphäre der Meridionalwind anstelle des Geopotentials genutzt. Der Meridionalwind ist eine abgeleitete Größe und bietet so den Vorteil, kleinere Strukturen, die den Skalengrößen der Wellenzüge oft näher kommen, sichtbarer zu machen. Welle und Meridionalwind sind durch eine differenzielle Beziehung zueinander um eine Viertel Wellenlänge phasenverschoben.

Absolutes Geopotential und Meridionalwind weisen eine geostrophisch balancierte Proportionalität zwischen einander auf. So kann mit dem Meridionalwind eine Nord-

Süd-Mäandrierung der Welle untersucht werden. Da sich sowohl Geopotential als auch Wind aufteilen lassen in einen klimatologischen Anteil und eine Anomalie, lässt sich auch die Beziehung beider in die jeweiligen Anteile aufspalten. Aufgrund der geostrophischen Balance kann man von einem geostrophischen Wind ausgehen und diesen in der Berechnung nutzen. Der Vorteil eines Hovmöller-Diagramms des Meridionalwinds ist eine erneute und in manchen Fällen auch ergänzende Darstellung der Geopotentialtendenzen. Aufgrund der differentiellen Beziehung und der daraus folgenden Phasenverschiebung, liegen die Geopotentialtendenzanomalien auf den Gradienten des Meridionalwinds. Auch hiervon werden Anomalien bezüglich der Klimatologie berechnet und in einem Hovmöller-Diagramm dargestellt. So können auch hier stationäre Systeme gefiltert werden.

Um die betrachteten Systeme in die großräumige Wellenstruktur einordnen zu können, werden Geopotential, Anomalien des Geopotentials und Geopotentialtendenzen für die gesamte Nordhemisphäre berechnet und in Hovmöller-Diagrammen dargestellt. Durch einen 10-Tages-Tiefpassfilter, aufbauend auf dem Lanczos-Filter, kann die Einhüllende der Welle veranschaulicht werden. Der Lanczos-Filter ist ein nichtrekursiver Rekonstruktionsfilter und beruht auf der Sinc-Funktion, multipliziert mit einer Fensterfunktion. Die Sinc-Funktion, auch sinus cardinalis, ist eine mathematische Funktion, die nachstehender Gleichung folgt (nicht normiert):

$$si(x) = \frac{\sin(x)}{x} \quad (6)$$

Die Fensterfunktion legt fest, mit welcher Gewichtung die Abtastwerte nach Abtastung eines Signals in Berechnungen eingehen. Dabei werden Werte unterhalb eines bestimmten Schwellenwertes auf null gesetzt und so hochfrequente Strukturen unterdrückt.

Schlussendlich ist es sinnvoll, für eine ganzheitliche Identifizierung und Betrachtung des Verhaltens stratosphärischer Wellen, verschiedene Arten von Hovmöller-Diagrammen zu erstellen und miteinander zu vergleichen, da jedes Stärken und Schwächen aufweist. Diese wären, noch einmal zusammengefasst, ein Diagramm des absoluten Geopotentials, um die tatsächliche Wellenstruktur zu erkennen. Des Weiteren ein Diagramm der Geopotentialtendenz sowie des Meridionalwinds. Um stationäre Strukturen zu entfernen, werden Hovmöller-Diagramme von der klimatologischen

Anomalie des absoluten Geopotentials erstellt sowie, als ergänzende Betrachtungsmöglichkeit, Anomalien des Meridionalwinds. Die Betrachtung und Interpretation dieser Hovmöller-Diagramme erfolgt subjektiv.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erhaltenen Ergebnisse vorgestellt und nachfolgend auch analysiert und interpretiert. Zu Beginn werden die Ergebnisse der Anwendung der PTE auf die Stürme zusammengefasst dargestellt und anhand dessen erläutert, wonach sich die Stürme in definierte Familien eingliedern lassen und welche Stürme im weiteren Verlauf näher betrachtet werden.

Am Schluss dieses Kapitels soll eine Aussage getroffen werden bezüglich des Eingangs formulierten Ziels, ob die Stratosphäre Einfluss auf die Entwicklung von Winterstürmen hat.

4.1 Auswahl der Stürme

In Kapitel 3.3 wurde anhand von Abbildung 6 erläutert, welche Diagramme die Anwendung der PTE auf die Stürme liefert. Zur Erinnerung noch einmal: die Balken stellen die jeweiligen Anteile der in die PTE mit einfließenden Faktoren, welche auf die Entwicklung der Bodendrucktendenz Einfluss nehmen, dar. Es gilt herauszufinden, ob und in welchem Maße die Stratosphäre auf die Druckentwicklung am Boden wirkt. Dazu werden die Balken über die Periode mit negativem DP aufsummiert. So kann der jeweilige prozentuale Anteil der Terme der PTE festgestellt werden. In Abbildung 12 ist in einem Histogramm der prozentuale Anteil von $D\Phi$ dargestellt. Die Anwendung der PTE zeigt für einige Stürme einen erheblichen Beitrag durch die Stratosphäre. So können nun aus den 99 gegebenen Stürmen diejenigen herausgefiltert werden, welche die größten sowohl positiven als auch negativen Beiträge durch $D\Phi$ aufweisen (durch schwarzen Kasten markiert) und in ihrer Entwicklung näher betrachtet werden.

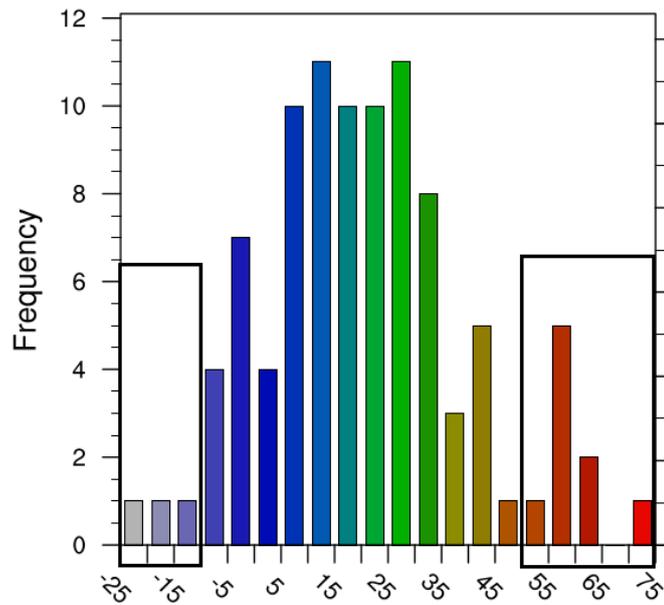


Abbildung 12: Histogramm über die Beiträge von $D\Phi$ zur Druckentwicklung aller 100 Stürme

Tabelle 1 zeigt den genauen Anteil von $D\Phi$ auf jeden einzelnen Sturm. Die Stürme 01, 12, 18, 28 und 61 treten außerhalb des betrachteten Winterhalbjahresintervalls vom 30. September bis zum 30. April auf und werden somit nicht weiter beachtet. Somit reduziert sich die Anzahl der in dieser Studie betrachteten Stürme auf 94. In dieser Tabelle wird auch der NAO-Index angegeben, welcher zum Zeitpunkt des Auftretens jedes Sturms herrscht. Was dabei ein positiver und negativer NAO-Index bedeuten und dass positive Indices bei der Entwicklung eines intensiven Sturms diese begünstigen, wurde bereits in Kapitel 2.3 erläutert. Es gibt 80 Stürme, bei welchen der Beitrag der Stratosphäre zum Druckfall positiv ist. Davon treten 21 bei positivem, 4 bei negativem NAO-Index auf. Bei 14 Stürmen ist der Beitrag der Stratosphäre negativ. Die Stratosphäre wirkt damit dem Druckfall entgegen. Davon treten 12 bei positivem NAO-Index auf, 2 bei negativem.

Tabelle 1: Prozentualer Anteil von $D\Phi$ an der Bodendruckentwicklung auf Grundlage der Anwendung der PTE auf die Stürme sowie der NAO-Index. Die fünf außerhalb des Winterhalbjahrs auftretenden Stürme wurden in dieser Tabelle außer Acht gelassen.

| Sturm | Anteil von $D\Phi$ an Dp [%] | NAO-Index |
|-------|--------------------------------|-----------|
| 02 | 41,58 | + |
| 03 | 13,82 | + |
| 04 | 16,17 | - |
| 05 | - 6,92 | - |
| 06 | 22,53 | + |
| 07 | 15,53 | + |
| 08 | 21,02 | + |
| 09 | 44,90 | + |
| 10 | 58,19 | + |
| 11 | 0,47 | - |
| 13 | 60,15 | + |
| 14 | - 7,08 | + |
| 15 | 34,94 | 0 |
| 16 | 10,31 | - |
| 17 | - 0,68 | + |
| 19 | 20,82 | + |
| 20 | 12,94 | + |
| 21 | 14,48 | + |
| 22 | 33,55 | + |
| 23 | 29,94 | + |
| 24 | 25,09 | + |
| 25 | 24,27 | + |

| Sturm | Anteil von $D\Phi$ an Dp [%] | NAO-Index |
|-------|--------------------------------|-----------|
| 26 | 44,95 | + |
| 27 | 29,95 | + |
| 29 | 6,79 | - |
| 30 | 27,25 | + |
| 31 | 36,24 | + |
| 32 | 26,72 | + |
| 33 | 16,66 | + |
| 34 | 32,21 | + |
| 35 | 31,60 | + |
| 36 | - 6,44 | + |
| 37 | - 0,38 | + |
| 38 | 16,71 | - |
| 39 | 7,11 | - |
| 40 | 15,53 | - |
| 41 | 9,88 | + |
| 42 | 8,70 | + |
| 43 | 52,52 | + |
| 44 | 11,67 | + |
| 45 | 62,02 | + |
| 46 | 20,69 | + |
| 47 | 34,37 | - |
| 48 | 57,72 | + |

| Sturm | Anteil von <i>DΦ</i> an <i>Dp</i> [%] | NAO- Index |
|--------------|--|-----------------------|
| 49 | 7,70 | + |
| 50 | 40,53 | + |
| 51 | 8,28 | + |
| 52 | 37,45 | + |
| 53 | 2,27 | + |
| 54 | 12,52 | + |
| 55 | 27,84 | + |
| 56 | 32,63 | + |
| 57 | 10,29 | + |
| 58 | 58,17 | + |
| 59 | - 2,50 | + |
| 60 | - 16,52 | + |
| 62 | 32,42 | - |
| 63 | 21,37 | - |
| 64 | 73,32 | - |
| 65 | 25,76 | - |
| 66 | - 4,57 | + |
| 67 | 2,19 | + |
| 68 | 58,31 | + |
| 69 | 29,58 | + |
| 70 | 25,85 | + |
| 71 | 32,43 | + |
| 72 | 55,44 | + |
| 73 | 28,75 | + |
| 74 | 8,41 | - |

| Sturm | Anteil von <i>DΦ</i> an <i>Dp</i> [%] | NAO- Index |
|--------------|--|-----------------------|
| 75 | 18,87 | - |
| 76 | - 1,08 | + |
| 77 | 13,85 | + |
| 78 | - 5,79 | + |
| 79 | 18,07 | + |
| 80 | 16,16 | + |
| 81 | - 21,97 | + |
| 82 | - 1,75 | + |
| 83 | 25,93 | - |
| 84 | 14,03 | + |
| 85 | 19,60 | + |
| 86 | 22,43 | - |
| 87 | 22,54 | - |
| 88 | 19,01 | + |
| 89 | 45,86 | - |
| 90 | - 0,38 | + |
| 91 | 44,19 | + |
| 92 | 12,54 | + |
| 93 | 9,06 | + |
| 94 | 10,73 | - |
| 95 | 3,90 | - |
| 96 | - 10,70 | - |
| 97 | 21,69 | + |
| 98 | 7,58 | - |
| 99 | 20,82 | - |

Zwölf Stürme weisen besonders auffällige Beiträge der Stratosphäre auf. Neun davon einen positiven Beitrag von mehr als 50%. Die Stratosphäre trägt laut Ergebnis der Anwendung der PTE deutlich zum Druckfall im Entwicklungsverlauf dieser Stürme bei. Dies sind die Stürme 10, 13, 43, 45, 48, 58, 64, 68 und 72. Bei drei Stürmen wirkt die Stratosphäre dem Druckfall entgegen. Dies wird durch einen negativen Beitrag von $D\Phi$ verdeutlicht. Alle drei Stürme, das sind die Stürme 60, 81 und 96, erfahren einen Beitrag von $D\Phi$ kleiner als -10%.

Es sollen aber nicht ausschließlich diese zwölf Stürme näher betrachtet werden. Nachfolgend werden sogenannte Familien definiert, die gleiche oder ähnliche stratosphärische und troposphärische Situationen aufweisen. Unterschieden wird dabei zwischen den drei Familien der mobilen Wellen, der stationären Wellen und der retrograden Wellen. Die Einteilung erfolgt subjektiv über die Betrachtung der Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Zeitintervalle der jeweiligen Stürme.

4.2 Die Familie der mobilen Wellen

In diese Familie fallen mobile Geopotentialwellen. Mobil deutet nachfolgend auf eine ostwärts gerichtete Bewegung der Welle hin. Zu dieser Familie können 56 der 94 Stürme gezählt werden. Sie stellt mit 59,36% die Mehrheit dar.

Abbildung 13a und b zeigen zwei Geopotentialwellen dieser Familie. Dargestellt sind Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit der Stürme 15 und 11. Die schwarzen Linien in den Abbildungen zeigen die jeweilige Zugbahn der Stürme. Die Hovmöller-Diagramme der anderen Stürme dieser Familie sind im Anhang beigefügt.

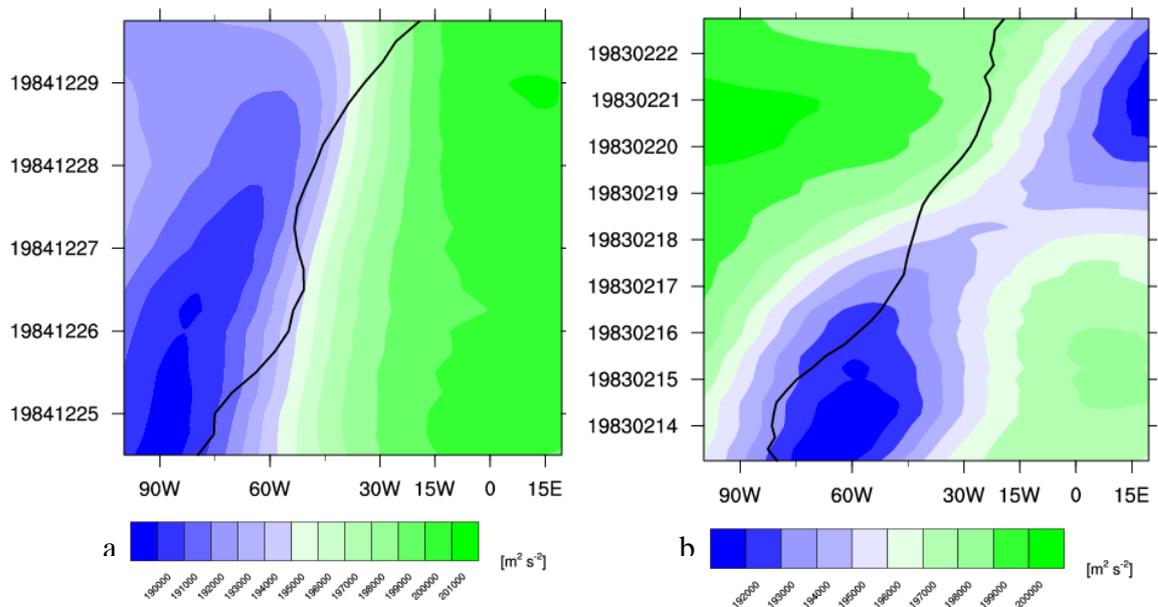


Abbildung 13: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die jeweilige Lebenszeit von a) Sturm 15 und b) Sturm 11

Die 56 Stürme der Familie der mobilen Wellen weisen alle ähnliche stratosphärische und troposphärische Eigenschaften auf. Zwei unterschiedliche Situationen lassen sich spezifizieren. Die erste wird durch Abbildung 13a dargestellt. Dabei befindet sich der Sturm vorderseitig eines stratosphärischen Troges in 50 hPa. Der Sturm bewegt sich im Bereich des Tiefs mit der Welle mit und befindet sich zum Zeitpunkt der Auflösung in einem Bereich höheren stratosphärischen Geopotentials. In der zweiten Situation (Abbildung 13b) befindet sich der Sturm während Entstehungs- und Entwicklungsphase vorderseitig eines stratosphärischen Rückens in 50 hPa. Auch hier bewegt sich Sturm unter dem Bereich tieferen Geopotentials mit und verlässt diesen erst in der Auflösungsphase in einen Bereich höheren Geopotentials

Alle Stürme dieser Familie folgen einer dieser beiden erläuterten Situationen. Eine kleine Mehrzahl weist die Eigenschaften der ersten Situation auf. Sie entwickeln sich also vorderseitig eines stratosphärischen Troges. Alle 56 Stürme haben gemeinsam, dass sie annähernd in Phase mit der stratosphärischen Welle sind. Sie bewegen sich alle in etwa in der Bewegungsrichtung der Welle mit der Welle mit. Des Weiteren entstehen und entwickeln sich alle Stürme dieser Familie in einem Bereich niedrigeren Geopotentials. Zum Zeitpunkt der Auflösung befinden sich fast alle Stürme in einem Bereich höheren Geopotentials. Manche geraten dabei in einen stratosphärischen Rücken, andere wiederum lösen sich dann auf, wenn auch der stratosphärische Trog

schwächer wird. Bilden sich die Stürme vorderseitig eines stratosphärischen Rückens, so weisen sie oftmals eine zonalere Bewegungsrichtung und eine höhere Bewegungsgeschwindigkeit auf als Stürme, die trogvorderseitig entstehen.

Um den Einfluss der Stratosphäre auf die Stürme quantifizieren zu können, ist es wichtig, nicht nur die stratosphärische synoptische Situation um den Aufenthaltsort des Sturms zu betrachten. Wichtig sind dabei auch die Vorgänge stromauf. Die Geopotentialwellen setzen sich von höheren Level in tiefer liegende fort. So auch von der Stratosphäre in die Troposphäre. Dabei befindet sich ein höher liegender Trog westlicher als der sich darunter befindliche. Somit kann hier die Vermutung aufgestellt werden, dass die von Westen herannahenden Tröge einen Einfluss auf den stromab gelegenen Sturm haben können. Befindet sich der Sturm vorderseitig eines stratosphärischen Rückens, wie es bei Sturm 15 der Fall ist, dann befindet sich der Sturm mit großer Wahrscheinlichkeit vorderseitig eines troposphärischen Troges. Dieser hängt zusammen mit dem stratosphärischen Trog westlich des betrachteten Rückens sowie mit der in Kapitel 2.3 erläuterten thermischen Kompensation. Die trogvorderseitige Position in der Troposphäre begünstigt die Entwicklung intensiver Zyklonen.

Bei der Betrachtung der Geopotentialtendenz in Abbildung 15a und b, bezogen auf die beiden Stürme 15 und 11, wird deutlich, was bereits in Kapitel 3.5 erläutert wurde. Die Geopotentialtendenz ist um eine Viertel Wellenlänge phasenverschoben, bezugnehmend auf das absolute Geopotential.

Nach Anwendung der PTE auf die Stürme, erlangt Sturm 15 einen möglichen Einfluss der Stratosphäre von 34,94% (Abbildung 14a). Die Stratosphäre trägt folglich recht deutlich zur Druckentwicklung am Boden bei. Allerdings ist der Einfluss unmittelbar nach der stärksten Vertiefungsphase am 25.12.1984 am größten. Dennoch wird erwartet, dass sich Sturm 15 mit einem Bereich negativer Geopotentialtendenzen in 50 hPa bewegt. Die Betrachtung von Abbildung 15a bestätigt diese Vermutung. Sturm 15 befindet sich während der Entstehungsphasen und der weiteren Entwicklung inklusive rascher Vertiefung in Bereichen negativer Geopotentialtendenz. Erst während der Auflösungsphase ab dem 29.12.1984 gelangt der Sturm in positivere Tendenzgebiete.

Abbildung 15b stellt das Hovmöller-Diagramm der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 11 dar. Nach Anwendung der PTE, ist bei diesem Sturm ein Einfluss der Stratosphäre auf die bodennahe Druckentwicklung von lediglich 0,47% zu erwarten (Abbildung 14b). Die Stratosphäre hat demnach einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Bodendruckentwicklung und wirkt dem Druckfall sogar während der Vertiefungsphase vom 13.02. – 16.02.1983 immer wieder entgegen. Dies wird bei Betrachtung der Geopotentialtendenzen deutlicher als bei Betrachtung des absoluten Geopotentials in Abbildung 13b. Sturm 11 durchläuft bis zum 17.12.1983 abwechselnd Bereiche positiver und negativer Geopotentialtendenzen. Anschließend gerät der Sturm in einen Bereich positiver Tendenzen, welche bis zur Auflösung überwiegen. Die positiven Tendenzen steuern einem weiteren Druckfall entgegen.

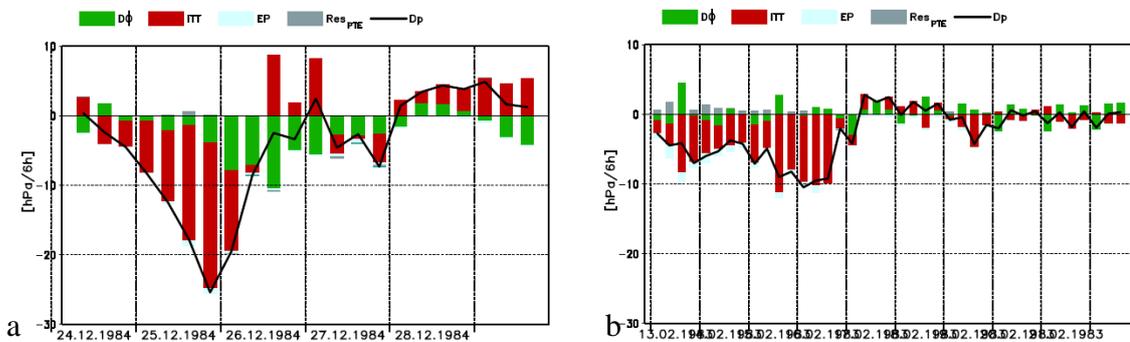


Abbildung 14: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 15 vom 24.12.1984 – 29.12.1984 und b) 11 vom 13.02.1983 – 22.02.1983. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (3) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme

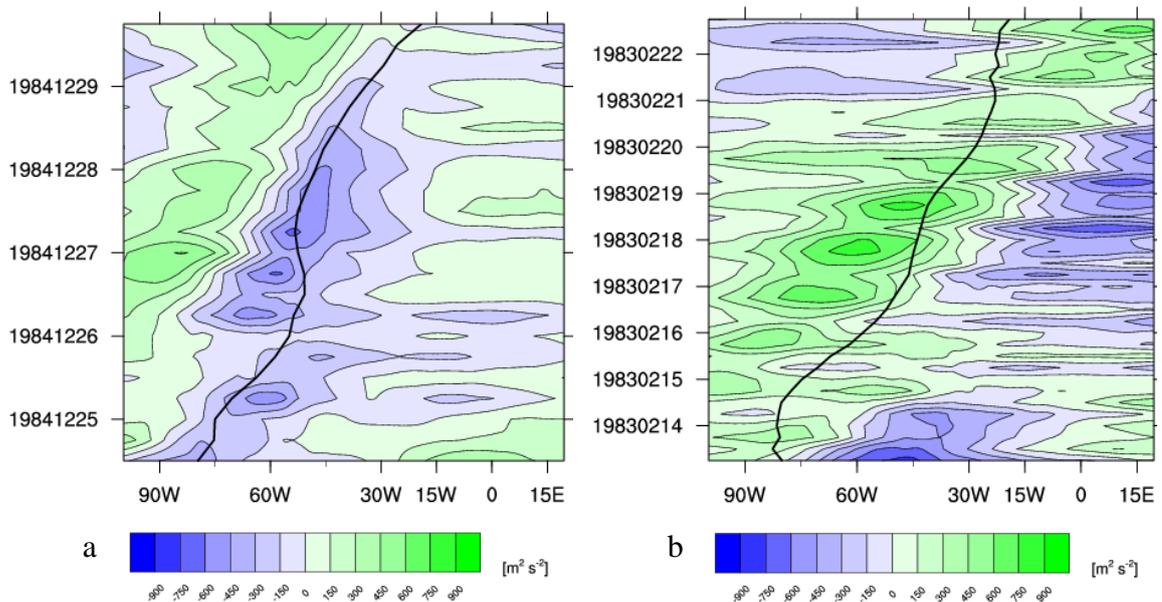


Abbildung 15: Hovmöller-Diagramme der Geopotentialtendenz in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 15 und b) Sturm 11. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms.

Mit Anomalien des Geopotentials, berechnet bezüglich der Klimatologie von 1979 bis 2015, lassen sich stationäre Systeme rausfiltern. Des Weiteren wird das dominierende Hintergrundmuster, welches durch die Klimatologie beschrieben wird, entfernt. So werden außergewöhnliche, nicht dauerhaft auftretende Situationen in der Stratosphäre sichtbar. Die Anomalien bestehen also aus Abweichungen des Geopotentials von der Klimatologie. Abbildung 16a und b stellen solche Anomalien bezüglich der Stürme 15 und 11 dar. Beide Bilder sehen den Abbildungen des absoluten Geopotentials (Abbildung 13a und b) ähnlich. Bereiche tieferen Geopotentials korrelieren mit negativen Anomalien, hohes Geopotential mit positiven Anomalien. Dort, wo sich in den Abbildungen die negativen Anomalien befinden, liegt das absolute Geopotential unterhalb des klimatologischen Werts. Bei positiven Anomalien weist das Geopotential höhere Werte als in der Klimatologie auf. Die positiven Anomalien sind in diesen beiden Abbildungen jedoch nur schwach. Auffällig sind die stark ausgeprägten negativen Anomalien. In der Klimatologie der Stratosphäre treten große und stationäre Wellen auf. Diese Wellen sind mobil und weichen daher von der Klimatologie ab.

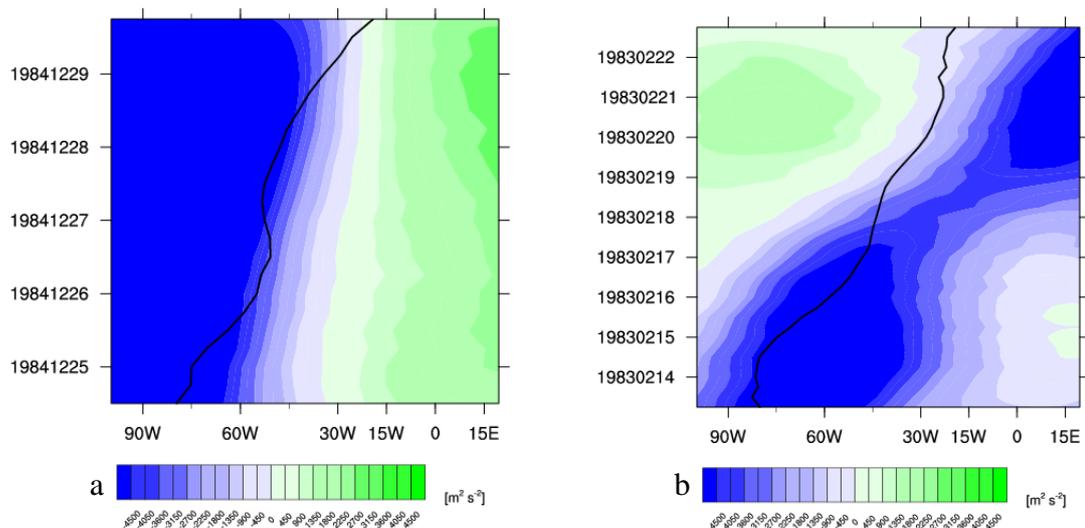


Abbildung 16: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 15 und b) Sturm 11. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms.

Von den 9 Stürmen, die nach Anwendung der PTE einen stratosphärischen Beitrag zur Druckentwicklung von mehr als 50% erfahren, werden 8 zu dieser Familie gezählt. Von den 3 Stürmen, auf welche ein stratosphärischer Beitrag kleiner – 10% wirkt, wird 1 Sturm zu dieser Familie gezählt. Auf diese wird nachfolgend näher eingegangen.

4.2.1 Stürme 10, 13 und 68

Die Stürme 10, 13 und 68 weisen ähnliche Eigenschaften auf und werden daher in der Betrachtung zusammengefasst. Dem Ergebnis der Anwendung der PTE auf die Stürme folgt ein möglicher Einfluss der Stratosphäre auf die Druckentwicklung von 58,19% für Sturm 10, 60,15% für Sturm 13 und 58,31% für Sturm 68 folgt, also ein Beitrag der Stratosphäre zum Druckfall. Das Ergebnis der Analyse ist in Abbildung 17a bis c dargestellt. Bei den Stürmen 11 und 13 ist im Bereich der größten Vertiefung auch der größte Beitrag von $D\Phi$ zu finden. Bei Sturm 68 ist der Beitrag von $D\Phi$ in diesem Bereich ebenfalls groß, doch der stärkste Einfluss findet unmittelbar nach der explosiven Vertiefung statt.

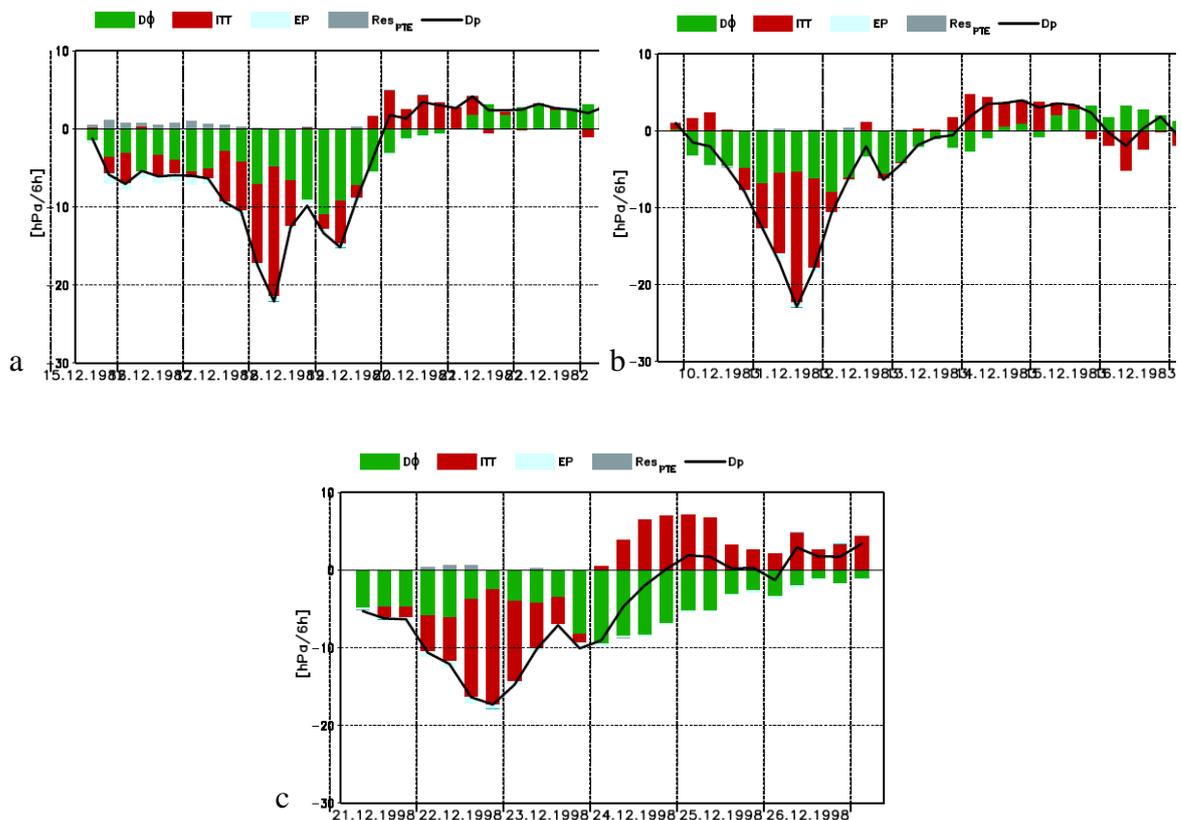


Abbildung 17: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 10 vom 15.12. – 23.12.1982, b) 13 vom 10.12. – 17.12.1983 und c) 68 vom 21.12. – 27.12.1998. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme.

Um die Stürme in die Strömungsbedingungen der Stratosphäre während ihrer jeweiligen Lebenszeit einordnen zu können, wird zunächst die synoptische Situation betrachtet. Diese ist in Abbildung 18a bis f dargestellt und bezieht sich auf den Zeitraum der stärksten Vertiefung. Im Falle von Sturm 10 sind dies drei Tage (17.12. - 19.12.1982),

vier Tage bei Sturm 13 (10.12. – 13.12.1983) und ebenfalls vier Tage bei Sturm 68 (21.12. – 24.12.1998). Dabei stehen die schwarzen Linien für das absolute Geopotential und die farbige Schraffur für die Geopotentialtendenz. Dabei sind blaue Farben negative Geopotentialtendenzen, grüne Farben positive. Die rote Linie jeder Abbildung zeigt den Verlauf der Zugbahn des jeweiligen Sturms. Der gelbe Punkt markiert die Position des Sturms an jenem Tag, für welchen das Bild erstellt wurde, jeweils um 12 UTC.

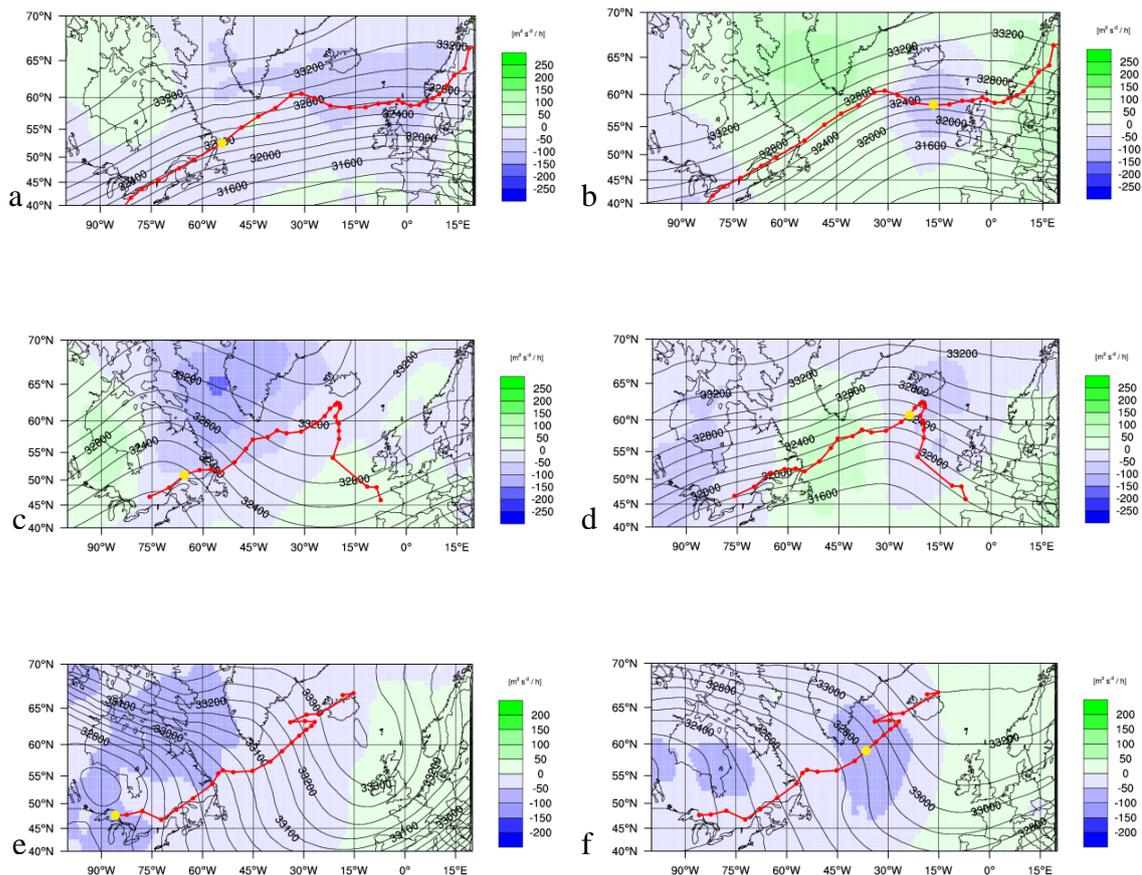


Abbildung 18: Synoptische Entwicklung von a, b) Sturm 10, c, d) Sturm 13 und e, f) Sturm 68 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbige ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 17.12.1982, b: 19.12.1982 c: 10.12.1983, d: 13.12.1983, e: 21.12.1998 und f: 24.12.1998, jeweils 12 UTC

Die drei Stürme weisen eine zonal geprägte Bewegung auf. Alle drei entstehen im Bereich der Westküste der USA und ziehen nordostwärts auf den Nordatlantik. Sie erfahren südlich, beziehungsweise südwestlich von Island eine Änderung in ihrer Bewegungsrichtung. Sturm 10 (Abbildung 18a und b) zieht dann zonal gen Osten, nördlich der Britischen Inseln vorbei bis nach Skandinavien. Dort zieht der Sturm nach Norden und löst sich auf. Sturm 13 (Abbildung 18c und d) schlägt ab dem Wendepunkt nahe Island eine meridionale Richtung gen Süden ein. Nach einer südöstlichen Drift

Richtung Frankreich, löst sich der Sturm noch auf dem Atlantik auf. Sturm 68 (Abbildung 18e und f) bewegt sich ab dem Wendepunkt erst wieder zurück nach Westen, ehe er erneut eine nordöstliche Bewegungsrichtung einschlägt und sich schließlich bei Island auflöst. Die Phase der stärksten Vertiefung, deren Beginn und Ende jeweils durch die gelben Punkte angedeutet ist, erleben alle drei Stürme über dem Nordatlantik.

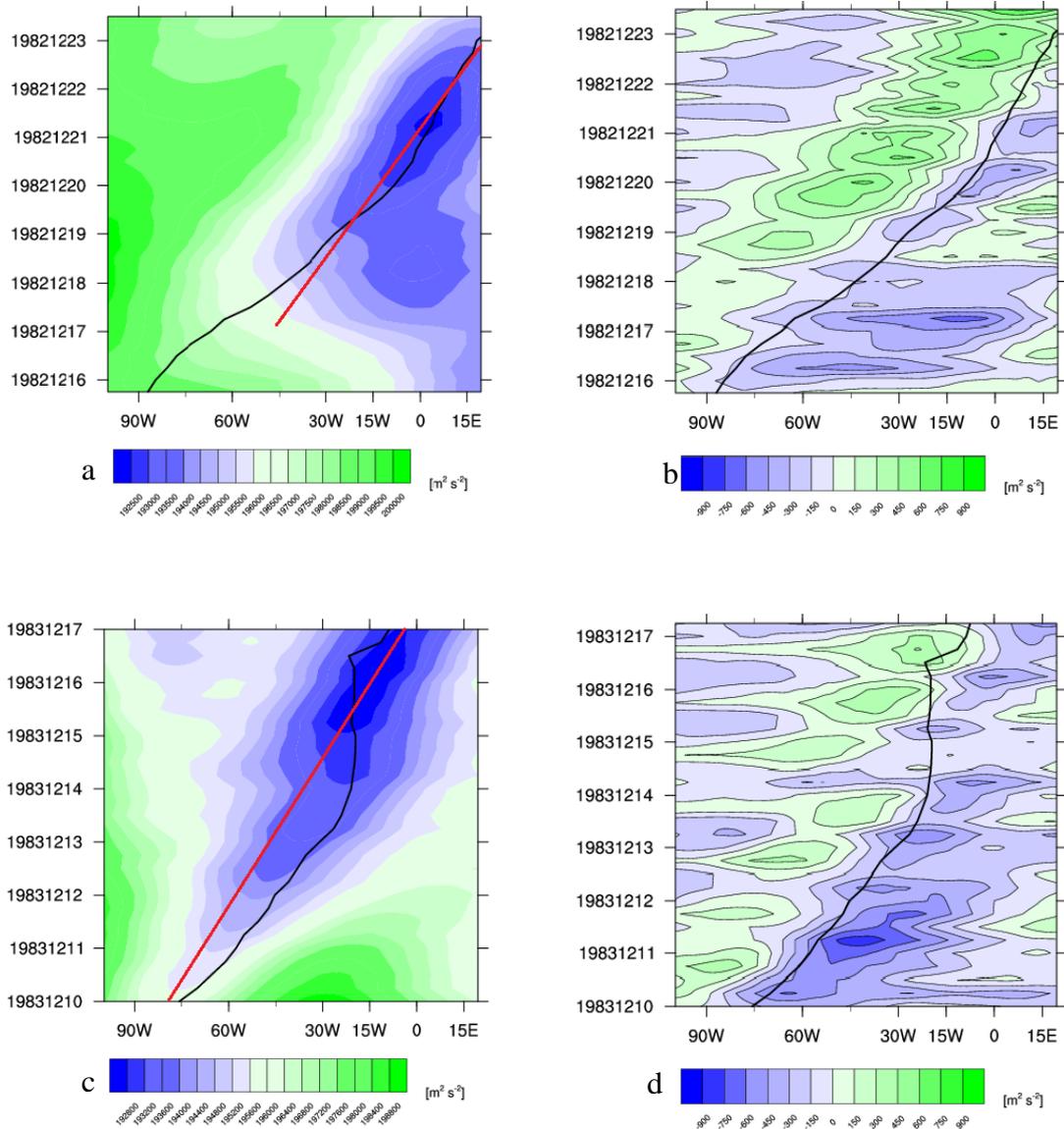
Die Stürme befinden sich während ihrer Vertiefungsphase vorderseitig stratosphärischer Rücken in 50 hPa. In der Stratosphäre jedoch gilt zum einen die bereits angesprochene thermische Kompensation. Zum anderen wird das absolute Geopotential von den Tendenzen der darunter liegenden Level beeinflusst. Dies ist auch der Grund dafür, dass sich in den Abbildungen rückenvorderseitig ein Feld negativer Geopotentialtendenz befindet. Die negativen Tendenzen können jedoch auch aufgrund einer Hebung der Tropopause im Bereich des Warmsektors des Sturms entstehen. Dieses Feld negativer Geopotentialtendenzen ist nicht dafür verantwortlich, dass der Rücken gen Osten wandert. In der Troposphäre ist dagegen die Position der Stürme vorderseitig eines starken Trogs zu erwarten, der die intensive Entwicklung begünstigt. Diese Situation wurde auch für die anderen Level auf 1, 10, 20 und 100 hPa erstellt. Auch auf 100 hPa befinden sich die Stürme rückenvorderseitig. Jedoch nicht in den darüber liegenden Level. Dort befinden sie sich trogvorderseitig.

Da nach Anwendung der PTE auf die Stürme die Stratosphäre bei allen drei deutlich mit mehr als 50% zum Druckfall beiträgt, ist die Position der Stürme in einem Feld negativer Tendenz zu erwarten. Dies trifft in allen Höhen sowie für alle drei Stürme zu. Sie bewegen sich jeweils mit dem stärksten Feld negativer Geopotentialtendenzen, welche sich in 50 hPa rückenvorderseitig befinden.

Um den Einfluss der Stratosphäre auf die Stürme quantifizieren zu können, ist auch hier wieder der Blick stromauf nicht zu vernachlässigen.

Um die stratosphärischen Wellen, die Einfluss auf die Stürme 10, 13 und 68 nehmen können, näher identifizieren zu können, werden im Folgenden Hovmöller-Diagramme betrachtet.

Abbildung 19a, c und e zeigen Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die jeweiligen Lebenszeiten der Stürme 10, 13 und 68. Die schwarze Linie stellt die Zugbahnen der Stürme dar.



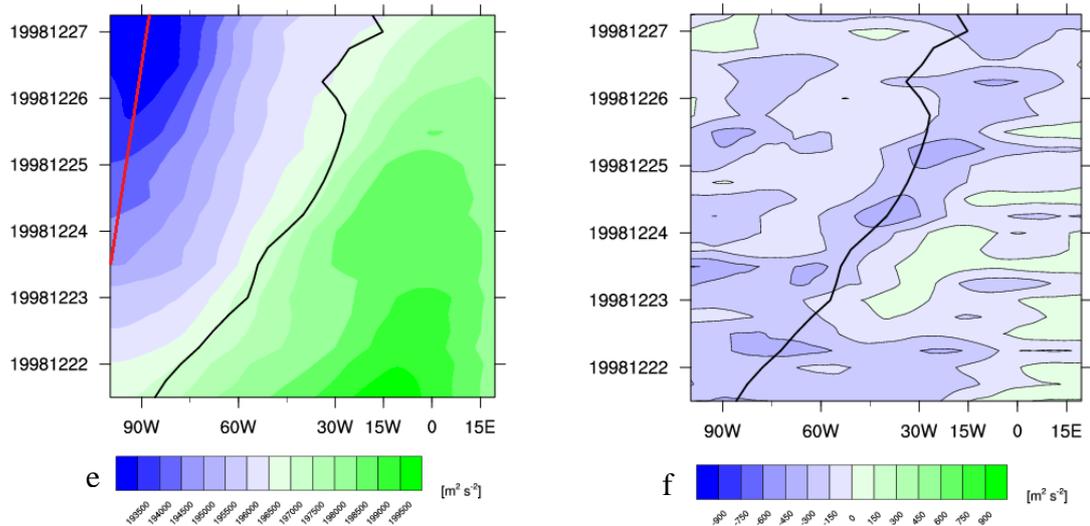


Abbildung 19: Hovmöller-Diagramme a, c und e) des absoluten Geopotentials und b, d und f) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von a, b) Sturm 10, c, d) Sturm 13 und e, f) Sturm 68. Die Zugbahn der Stürme wird durch die schwarzen Linien dargestellt, die der Welle durch die rote Linie.

Die grünen Farben deuten auf ein höheres Geopotential, also auf höheren Druck hin, die blauen Farben auf einen tieferen Druck. Während der Entstehungsphase befinden sich die drei Stürme in Bereichen höheren stratosphärischen Drucks. Im Laufe der Entwicklung gelangen die Stürme 10 und 13 immer weiter in einen Bereich tieferen stratosphärischen Drucks. Der Beginn der explosiven Vertiefung fällt mit dem Beginn des Einflusses niedrigeren Geopotentials zusammen. Sturm 68 bewegt sich während seiner gesamten Lebenszeit entlang des Gradienten zwischen niedrigerem und höherem Geopotential.

Stürme und Wellen sind annähernd in Phase. Sie bewegen sich in die gleiche Richtung. Bei Sturm 10 ist besonders deutlich zu sehen, dass zum Zeitpunkt der Auflösung des Sturms auch die Höhe des stratosphärischen Geopotentials nachlässt.

Der stratosphärische Trog in Abbildung 19a bewegt sich in sechs Tagen um etwa 65° von 45° W bis 20° O. Dies wird durch die rote Linie in der Abbildung angedeutet. Nach Berechnung mit Formel (5) aus Kapitel 3.5 und mit 64 km pro Grad, bezogen auf 55° N, bewegt sich die Welle mit einer Phasengeschwindigkeit von etwa 29 km/h. Sturm 10 bewegt sich in sechs Tagen um etwa 95° von 75° W nach 20° O. Der Sturm ist mit 42 km/h etwas schneller als die Welle. Der Trog in Abbildung 19b wandert in sieben Tagen etwa 75° von 78° W bis 3° W. Dies entspricht einer Phasengeschwindigkeit von

29 km/h. Sturm 13 bewegt sich in der gleichen Zeit um nur etwa 65° von 75° W bis 10° W. Mit 25 km/h ist der Sturm in diesem Fall etwas langsamer als die Welle. Deutlich schneller dagegen ist Sturm 68 mit 22 km/h gegenüber der Phasengeschwindigkeit der Welle von 8 km/h (Abbildung 19c). Die Welle bewegt sich in vier Tagen um etwa 12° von 100° W bis 88° W, der Sturm bewegt sich in gleicher Zeit um etwa 33° von 50° W bis 17° W.

Abbildung 19b, d und f zeigen Hovmöller-Diagramme der Geopotentialtendenzen in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeiten der Stürme 10, 13 und 68. Im direkten Vergleich beider Abbildungen ist die in Kapitel 3.5 erwähnte Phasenverschiebung um eine Viertel Wellenlänge gut sichtbar. Die stärksten Tendenzen tauchen wie erwartet im Bereich der größten Gradienten des Geopotentials auf.

Die erwartete Lage der Stürme in Gebieten negativer Geopotentialtendenzen wird hier erneut bestätigt. Erst zum Zeitpunkt der Auflösung geraten die Stürme in Bereiche positiver beziehungsweise weniger negativer Tendenzen. Auch die Mobilität der Wellen wird hier noch einmal deutlich.

Mit Anomalien des Geopotentials werden außergewöhnliche Situationen sichtbar gemacht. Abbildung 20a bis c stellen Anomalien des absoluten Geopotentials bezüglich der Stürme 10, 13 und 68 dar. Die Bewegungsrichtung sowie die Form der Geopotentialwellen aus Abbildung 19a und b sind auch hier nachvollziehbar. Bereiche tieferen Geopotentials korrelieren auch hier mit negativen Anomalien, hohes Geopotential mit positiven Anomalien. Die stark ausgeprägten negativen Anomalien in allen drei Bildern machen die Abweichung von der Klimatologie und damit auch die Mobilität der Geopotentialwellen deutlich. Die positiven Anomalien sind in allen drei Abbildungen sehr schwach ausgeprägt. Höheres Geopotential weicht demnach nur gering von Klimatologie ab und stellt damit, im Vergleich zum tiefen Geopotential, keine so außergewöhnliche Situation der Stratosphäre dar. Beim Vergleich mit den Bildern des absoluten Geopotentials fällt auf, dass die Wellen höheren Geopotentials auch nicht so mobil sind wie die tieferen Geopotentials. Sie weisen stattdessen sogar auch stationäre Eigenschaften auf.

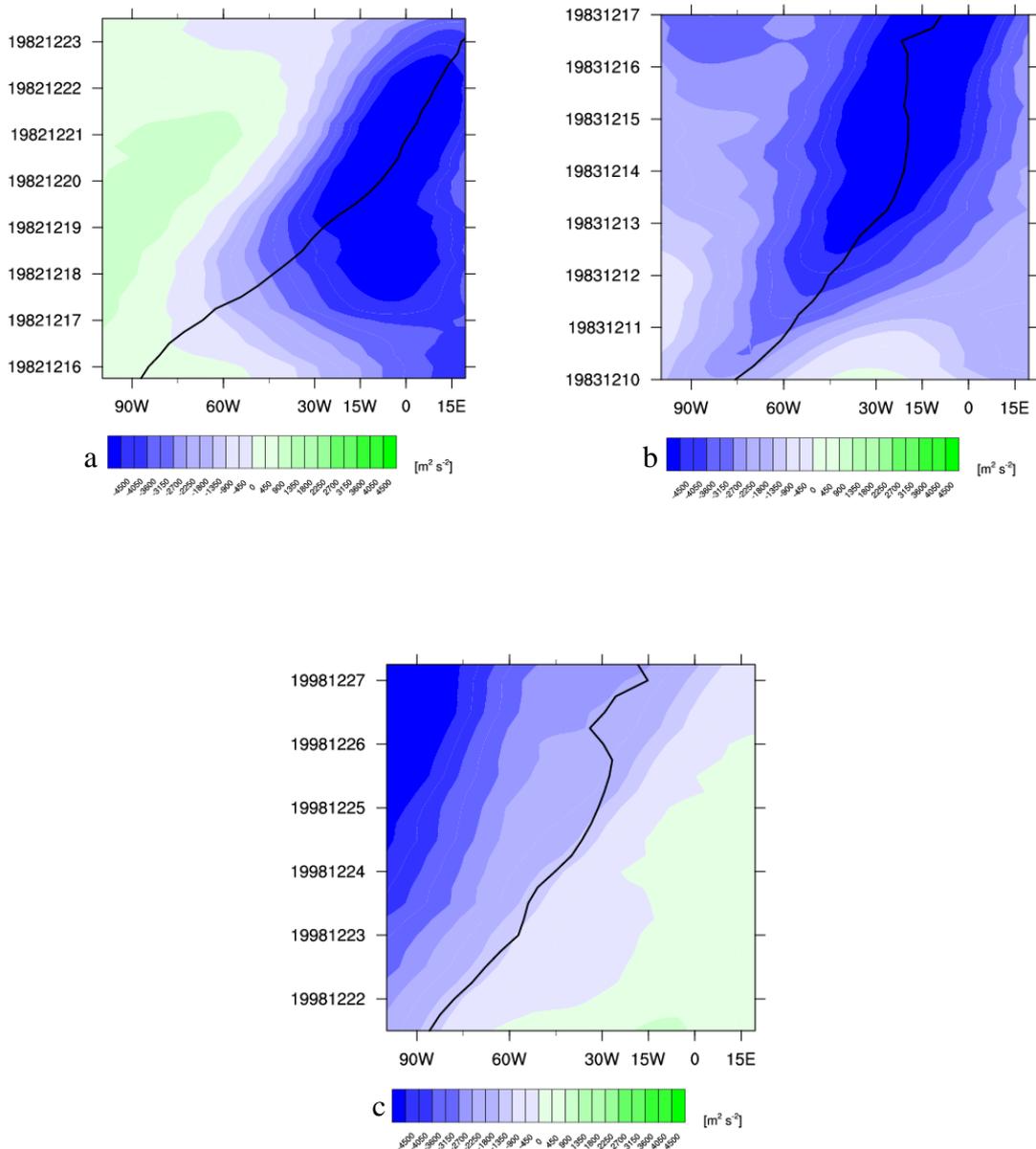
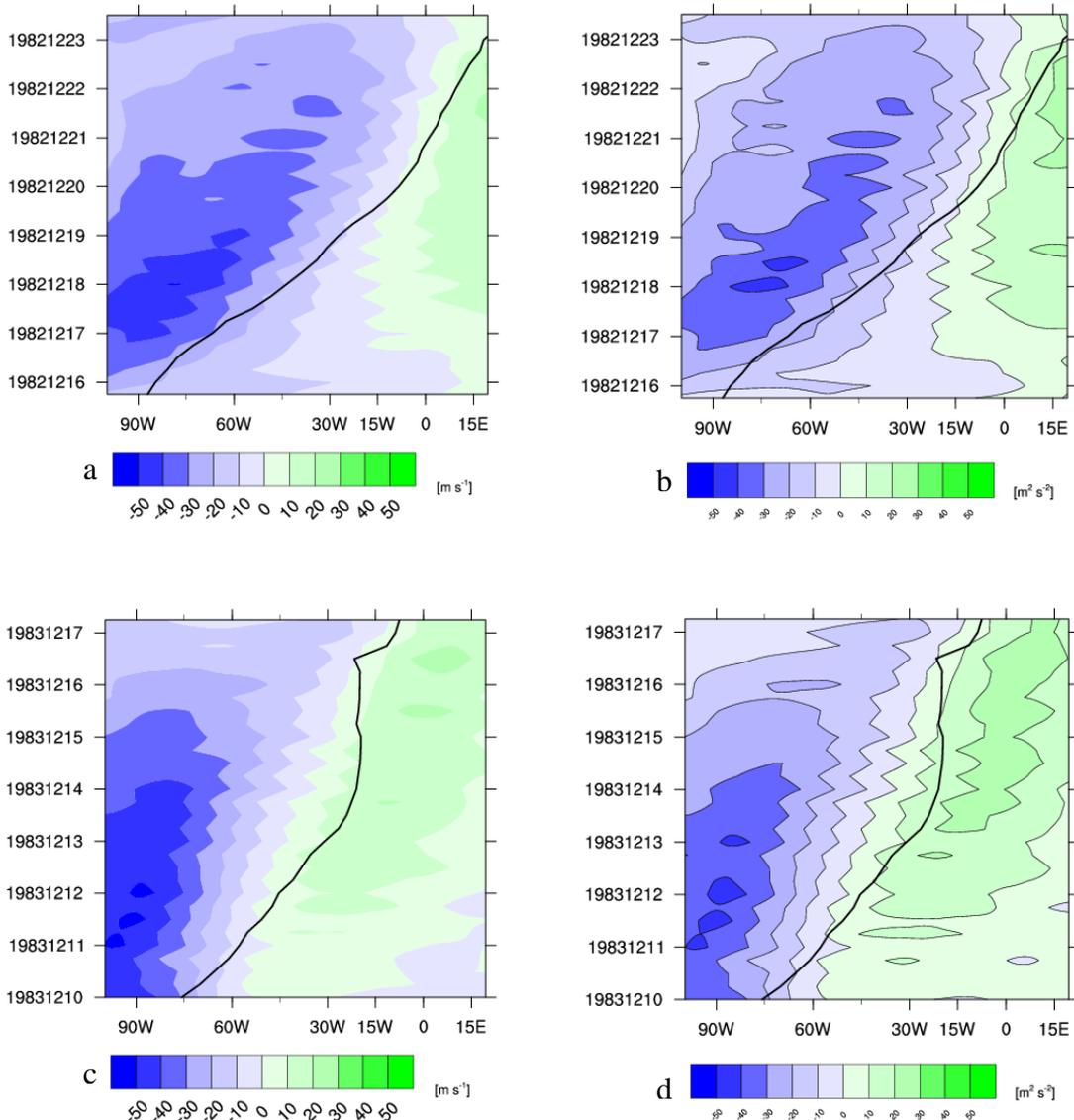


Abbildung 20: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 10, b) Sturm 13 und c) Sturm 68. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms.

Eine ergänzende Darstellung zu den Geopotentialtendenzen bietet der Meridionalwind. Dieser ist für die drei Stürme in Abbildung 21a, c und e zu finden. Negative Werte (blau) symbolisieren einen Nordwind, positive Werte (grün) einen Südwind. Auch hier ist die mobile Welle erkennbar. Die Struktur von Trog und Rücken wird durch die Windrichtung gezeigt. Der in Abbildung 21a und c deutlich zu erkennende Nordwind weht trogrück- beziehungsweise rückenvorderseitig. Die Struktur stimmt bei einem Vergleich mit Abbildung 19 mit diesem überein. Die Geopotentialtendenzen liegen aufgrund der differentiellen Phasenbeziehung auf den Gradienten des Meridionalwinds. Somit ist auch hier einsehbar, dass sich die Stürme 10 und 13 im Bereich negativer

Tendenzen bewegen. Da in der Stratosphäre die kältesten Temperaturen im Bereich des Äquators und wärmere Temperaturen im Bereich der Pole auftreten, transportiert ein Nordwind, anders als in der Troposphäre, wärmere Luft heran. Dadurch dehnt sich die stratosphärische Luftsäule aus und sorgt für ein Absinken der Tropopause und damit wiederum für ein Zusammendrücken der troposphärischen Luftsäule. Die Stratosphäre kann also auch durch thermische Effekte zum Druckfall am Boden beitragen. Bezüglich Sturm 68 sind Abbildung 21e Südwinde zu erkennen. Diese transportieren kältere Luft heran, was nach gerade beschriebenem Prinzip dem Druckfall entgegen wirken kann. Die Winde in diesem Fall sind jedoch so schwach, dass der bodennahe Druckfall wohl nicht durch thermische Effekte der Stratosphäre beeinflusst wird. Die Betrachtung des Meridionalwinds liefert im Falle von Sturm 68 keine neuen Erkenntnisse. Für dieses Konturintervall sind die Werte zu gering, um deutliche Aussagen treffen zu können.



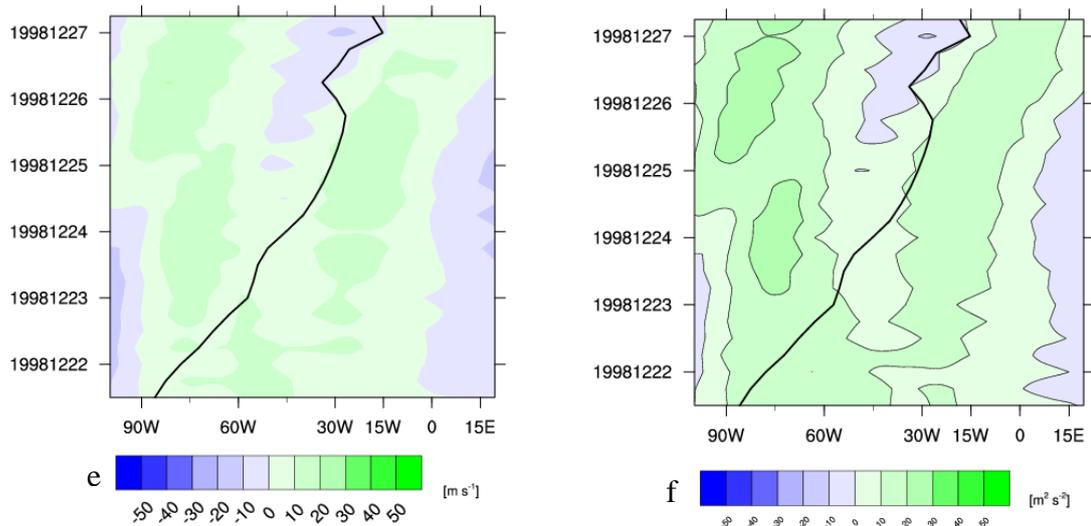


Abbildung 21: Hovmöller-Diagramme des Meridionalwinds von a) Sturm 10, c) Sturm 13 und e) Sturm 68 und der Anomalie des Meridionalwinds von b) Sturm 10, d) Sturm 13 und f) Sturm 68 in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit der Stürme. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen.

Die Abbildung 21b, d und f zeigen die Anomalie des Meridionalwinds in 50 hPa für die Stürme 10, 13 und 68. Ein Vergleich mit Abbildung 21a, c und e zeigt auf, dass der Unterschied zwischen Meridionalwind und dessen Anomalie in diesen Fällen nicht sehr groß ist. Wie bei den Anomalien des absoluten Geopotentials, sind hier die negativen Anomalien stärker ausgeprägt. Die Nordwinde weisen bezüglich der Stürme 10 und 13 relativ hohe Geschwindigkeiten bis 50 m/s auf. Die Abweichungen von der Klimatologie sind dabei größer als die der schwächeren Südwinde. Die Anomalien bezüglich Sturm 68 sind schwach ausgeprägt. Die Meridionalwinde sind ebenfalls schwächer und weichen nicht besonders von der Klimatologie ab.

Für die Einordnung der Systeme in die großräumige Wellenstruktur, wird abschließend noch ein Blick auf die gesamte Nordhemisphäre geworfen. Die Hovmöller-Diagramme des Geopotentials für diesen Bereich in 50 hPa und bezüglich der Stürme 10, 13 und 68 ist in Abbildung 22a bis c dargestellt. Durch die Anwendung des in Kapitel 3.5 näher erläuterten Lanczos-Filters, werden hochfrequente Strukturen unterdrückt. Hier wird noch einmal die Lage des Sturmes im Vergleich zu Geopotentialwelle deutlich. Die Stürme 10 und 13 (Abbildung 22a und b) bewegen sich mit Wellen tiefen Geopotentials mit. Sie sind in Phase mit diesen Wellen. Sturm 68 (Abbildung 22c) ist ebenfalls in Phase mit den Geopotentialwellen, bewegt sich jedoch im Bereich der Gradienten zwischen zwei Wellen höheren und tieferen Geopotentials. Auffällig ist, dass sich die Stürme am Anfang einer Phase niedrigen Geopotentials befinden.

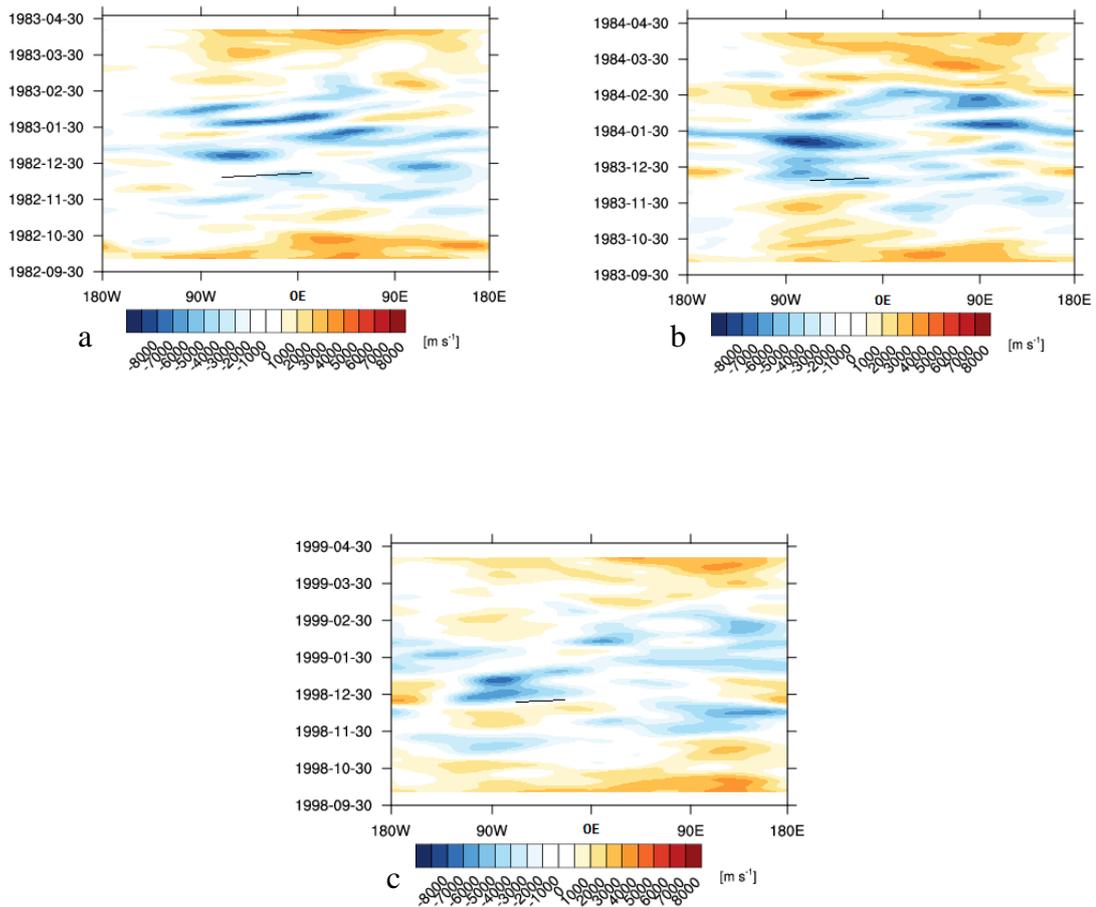


Abbildung 22: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0°N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen der jeweiligen Stürme 10, 13 und 68.

4.2.2 Stürme 45 und 64

Die PTE-Analyse ergibt für Sturm 45 einen Beitrag der Stratosphäre zum Druckfall von 62,02%. Für Sturm 64 sind es 73,32%. Die PTE-Analyse der beiden Stürme ist in Abbildung 23a und b dargestellt.

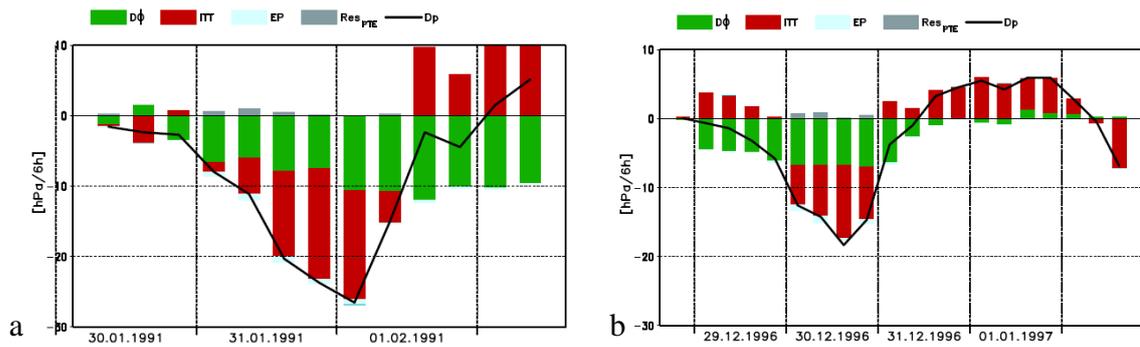


Abbildung 23: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 45 vom 30.01. – 02.02.1991 und b) 64 vom 29.12.1996 – 02.01.1997. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme.

Bei Sturm 45 ist der größte Beitrag von $D\Phi$ zwar unmittelbar nach der stärksten Vertiefung zu finden, der Beitrag während der Vertiefung ist dennoch groß. Bei Sturm 64 ist der Beitrag von $D\Phi$ kurz vor und während der stärksten Vertiefung in etwa gleich groß.

Die Stürme 45 und 64 weisen ähnliche Eigenschaften sowohl untereinander als auch mit den drei zuvor betrachteten Stürmen 10, 13 und 68 auf. Allerdings ist deren Zugbahn deutlich meridionaler als die der drei bisherigen Stürme. Diese ist in Abbildung 24a bis d zu erkennen. Dort ist die synoptische Situation der Stratosphäre abgebildet. Die Situation ist, wie bereits zuvor beschrieben, bezogen auf die Zeit der stärksten Vertiefung der beiden Stürme. Für Sturm 45 sind das drei Tage (30.01. – 01.02.1991), ebenso wie für Sturm 64 (29.12. – 31.12.1996).

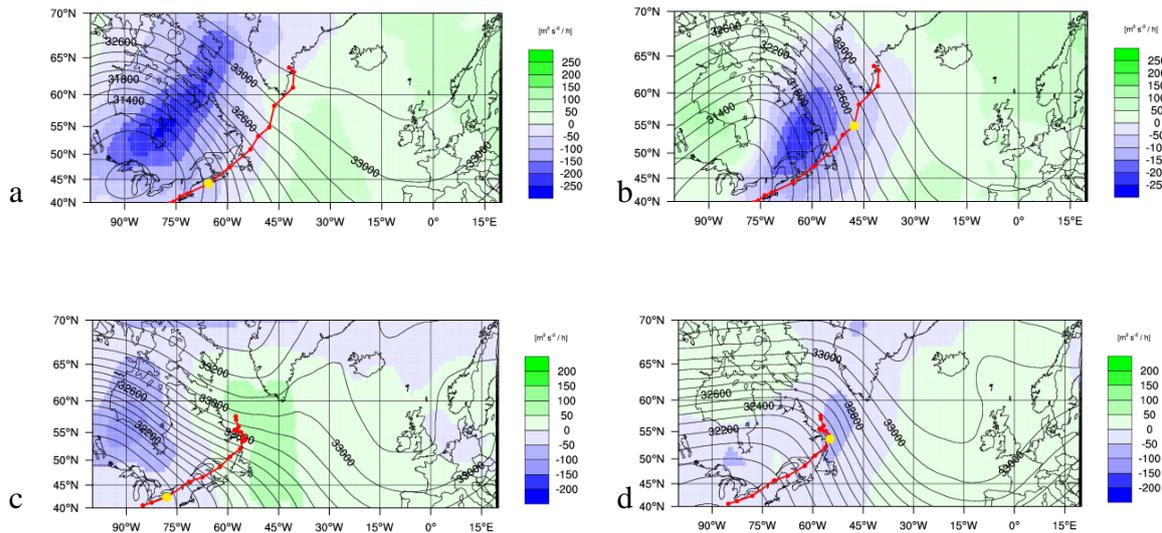


Abbildung 24: Synoptische Entwicklung von a) Sturm 45 und b) Sturm 64 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbig ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 30.01.1991, b: 01.02.1991 c: 29.12.1996, d: 31.12.1996, jeweils 12 UTC

Die Stürme 45 und 64 entstehen im Osten der USA. Beide nehmen eine nordöstliche Bewegungsrichtung an und ziehen auf den Nordatlantik Richtung Grönland. Sturm 45 erreicht die südöstliche Küste Grönlands und löst sich dort auf. Sturm 64 wandert an der kanadischen Ostküste entlang und löst sich schließlich bei etwa 57° N auf. Während der starken Vertiefungsphase befinden sich die drei Stürme zuerst nahe des Kontinents beziehungsweise über dem Kontinent, später aber über dem Nordatlantik. Die Stürme 45 und 64 entstehen und entwickeln sich vorderseitig stratosphärischer Rücken in 50 hPa. In der Troposphäre befindet sich aller Wahrscheinlichkeit nach an der Stelle der Stratosphärenrücken jeweils ein starker Trog. Dieser begünstigt die Entwicklung der Zyklonen bis hin zu intensiven Winterstürmen.

Da die Stratosphäre bei beiden Stürmen nach der PTE-Analyse deutlich zum Druckfall beiträgt, wird demnach die Position der Stürme in einem Feld negativer Tendenz erwartet. Diese Erwartung trifft auch zu. Sie bewegen sich mit dem stärksten Feld negativer Geopotentialtendenzen vorderseitig der stratosphärischen Rücken mit.

Abbildung 25a und c zeigen Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeiten der Stürme 45 und 64. Abbildung 25b und d zeigen Hovmöller-Diagramme der Geopotentialtendenzen in 50 hPa. Die Stürme 45 und 64 weisen in den Hovmöller-Diagrammen des absoluten Geopotentials (Abbildung 25a und c) sehr ähnliche Situationen auf. Beide entstehen und verlaufen im Bereich der

Gradienten zwischen höherem und niedrigerem Geopotential. Beide tendieren aber zur Seite des niedrigeren Geopotentials. Beide weisen, wie auch aus der synoptischen Situation bekannt, eine meridionale, eher nach Norden gerichtete Zugbahn auf.

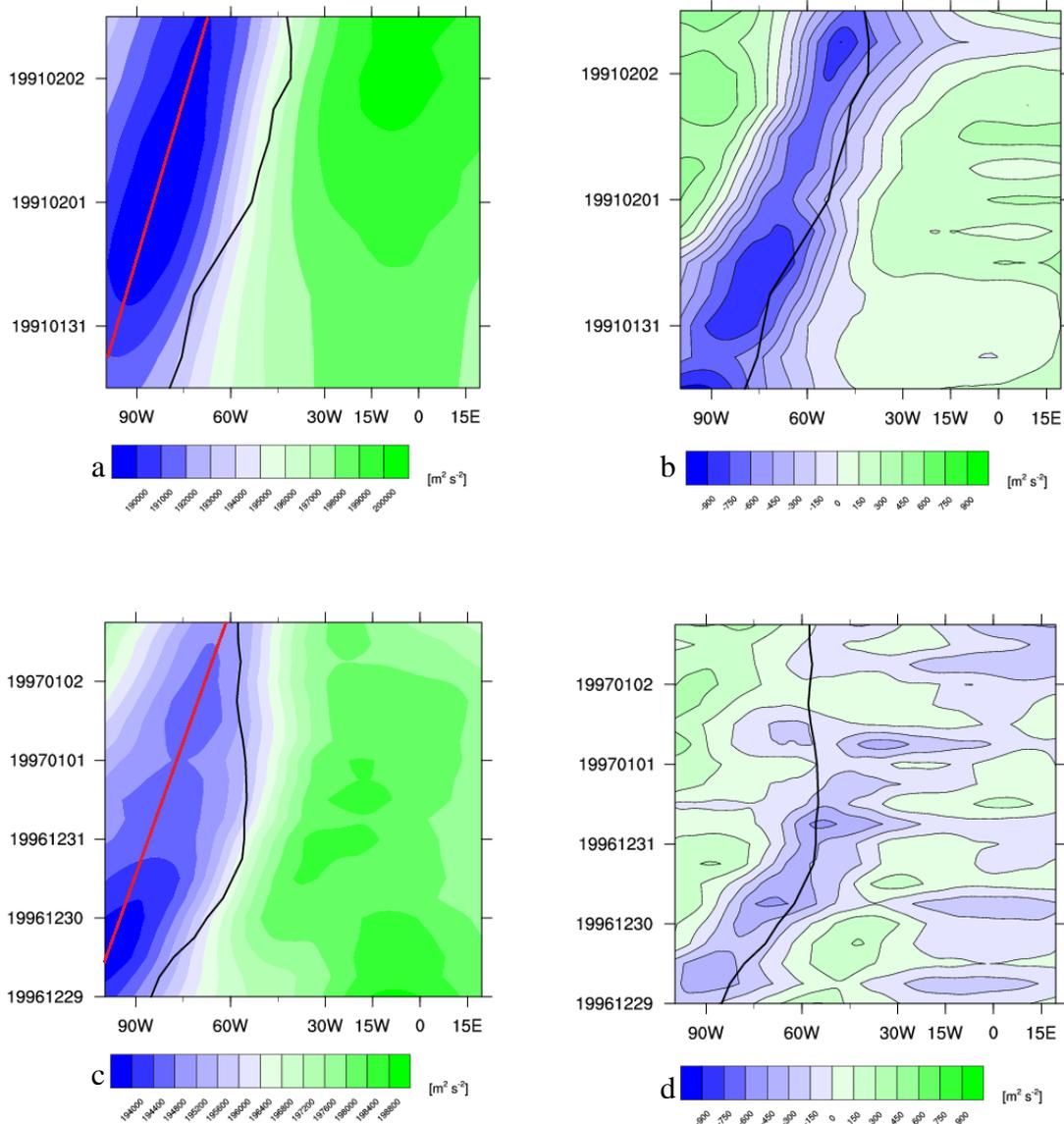


Abbildung 25: Hovmöller-Diagramme a und c) des absoluten Geopotentials sowie b und d) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von a, b) Sturm 45 und c, d) Sturm 64. Die Zugbahn der Stürme wird durch die schwarzen Linien dargestellt, die Phasengeschwindigkeit der Welle durch die rote Linie.

Der stratosphärische Trog in Abbildung 25a bewegt sich in drei Tagen um etwa 35° von 100° W bis 65° W und weist somit eine Phasengeschwindigkeit von etwa 31 km/h auf. Sturm 45 bewegt sich in den drei Tagen um etwa 36° von 75° W nach 44° W. Der Sturm ist mit 32 km/h etwa gleich schnell wie die Welle. Sturm und Welle sind also in Phase. Der Trog in Abbildung 25b wandert in vier Tagen etwa 39° von 100° W bis 61° W. Dies entspricht einer Phasengeschwindigkeit von 26 km/h. Sturm 64 bewegt

sich in der gleichen Zeit um nur etwa 16° von 75° W bis 59° W. Mit 11 km/h ist der Sturm in diesem Fall deutlich langsamer als die Welle. Diese mittlere Geschwindigkeit nimmt jedoch nur einen solchen geringen Wert an, da der Sturm ab 59° W eine meridionale Richtung gen Norden einschlägt. Sturm und Welle sind dennoch annähernd in Phase.

Bei einem Vergleich dieser Abbildungen mit den Hovmöller-Diagrammen der Geopotentialtendenzen (Abbildung 25b und d), wird wieder die Phasenverschiebung um eine Viertel Wellenlänge deutlich. Die stärksten Tendenzen tauchen wieder im Bereich der größten Gradienten des Geopotentials auf. Auch die erwartete Lage der Stürme in Gebieten negativer Geopotentialtendenzen wird hier erneut bestätigt. Erst zum Zeitpunkt der Auflösung geraten die Stürme in Bereiche positiver beziehungsweise weniger negativer Tendenzen.

Abbildung 26a und b weisen mittels Anomalien des absoluten Geopotentials bezüglich der Stürme 45 und 64 auf außergewöhnliche Situationen in der Stratosphäre hin. Auch hier gehen Bereiche tieferen Geopotentials mit negativen Anomalien einher, hohes Geopotential mit positiven Anomalien. Und auch hier sind in beiden Abbildungen die negativen Anomalien stark ausgeprägt. Dies verdeutlicht erneut das außergewöhnliche Muster mobiler Wellen tieferen Geopotentials. Wellen höheren Geopotentials weisen hier ebenfalls stationäre Eigenschaften auf. Die positiven Anomalien sind demnach in beiden Abbildungen schwach ausgeprägt.

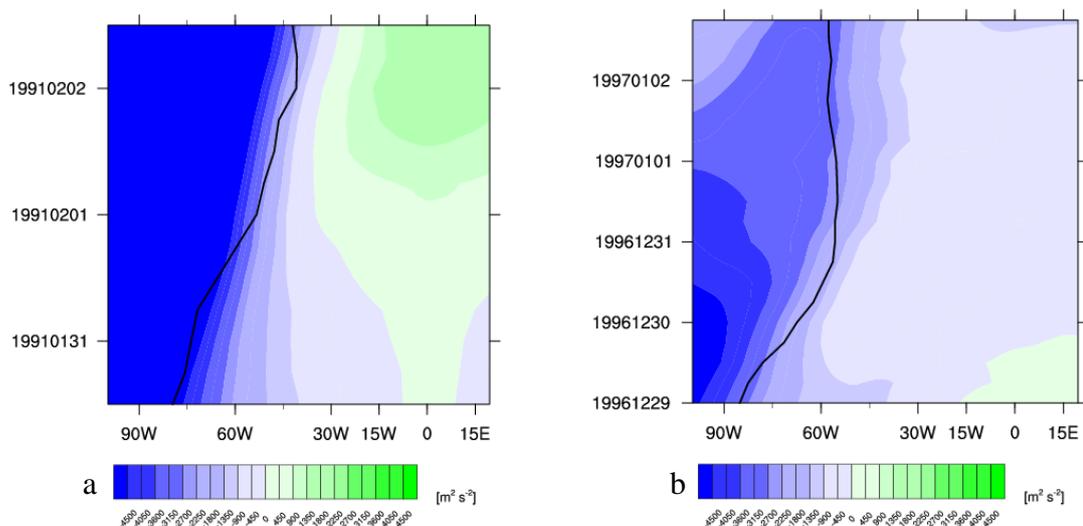
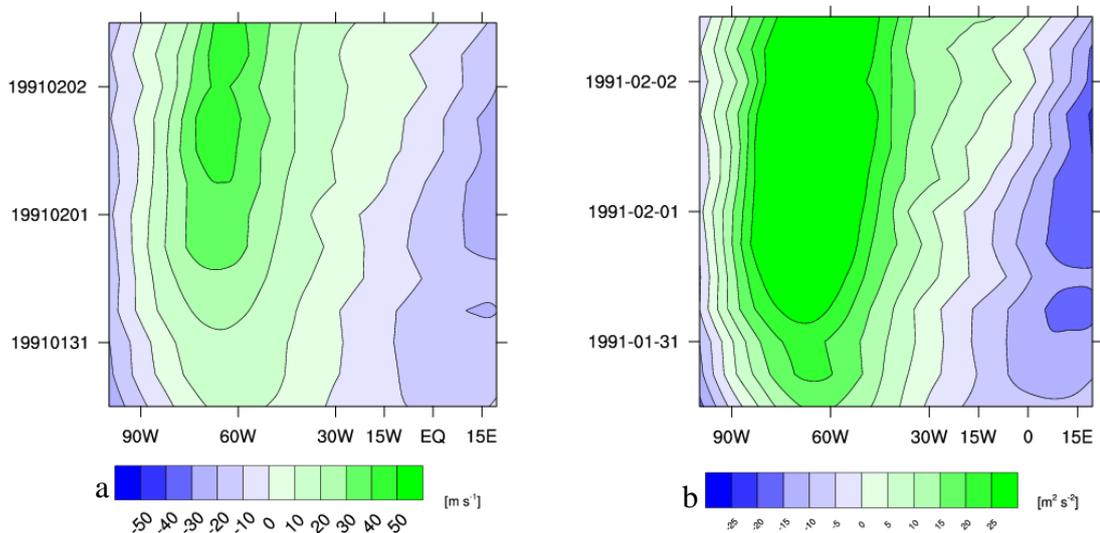


Abbildung 26: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 45 und b) Sturm 64. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms.

Als ergänzende Darstellung zu den Geopotentialtendenzen wird wieder der Meridionalwind betrachtet. Dieser ist für die beiden Stürme in Abbildung 27a und c zu finden. Hier wirkt die Welle zu Sturm 45 nicht mehr so mobil wie noch in den Abbildungen zuvor. Die Struktur der Tröge und Rücken ist in beiden wiederum erkennbar. In Abbildung 27a ist der Südwind (positive Werte, grün) deutlicher zu sehen als in Abbildung 27c. Der Südwind ist auch hier der Trog-Rücken-Konstellation geschuldet. Bei etwa 70 bis 75° W naht in der synoptischen Situation beider Stürme ein Rücken heran, welcher für den Südwind verantwortlich ist. Der stratosphärische Südwind transportiert kältere Luft aus der kalten Äquatorregion heran. Dies sorgt dafür, dass die stratosphärische Luftsäule zusammengedrückt und die Tropopause gehoben wird. Dies wirkt einem Druckfall am Boden jedoch eigentlich entgegen. Stratosphärischer Nordwind transportiert hingegen wärmere Polarluft heran, was durch eine Ausdehnung in der Folge eine sinkende Tropopause zum Druckfall beiträgt. Im Falle von Sturm 45 dominiert jedoch der Südwind. Die Stratosphäre trägt zwar zum Druckfall bei, jedoch nicht durch thermische Effekte. Bezüglich Sturm 64 ist zwar ebenfalls ein Südwind im Bereich des Sturms zu finden, dieser ist jedoch schwach ausgeprägt. Auch hier trägt die Stratosphäre nicht durch thermische Effekte zum Druckfall bei.



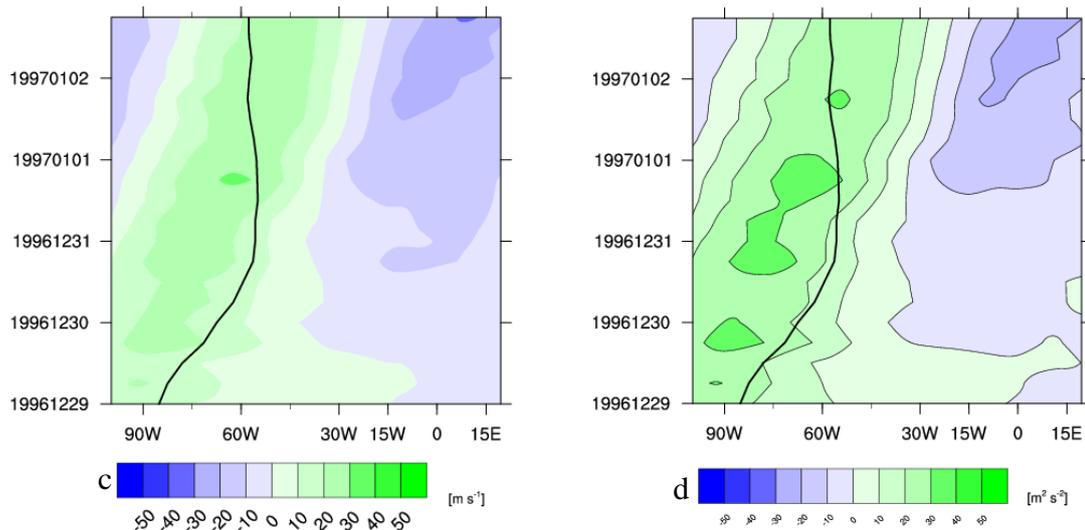


Abbildung 27: Hovmöller-Diagramme des Meridionalwinds von a) Sturm 45 und c) Sturm 64 und der Anomalie des Meridionalwinds von b) Sturm 45 und d) Sturm 64 in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit der Stürme. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen.

Sowohl die Südwinde als auch die Nordwinde sind bezüglich Sturm 45 relativ stark mit Geschwindigkeiten von 50 m/s oder mehr. Dies stellt eine größere Abweichung zur Klimatologie dar, weshalb auch die Anomalien (Abbildung 27b) stark ausgeprägt sind. Die Winde bezüglich Sturm 64 sind mit Geschwindigkeiten von maximal 40 m/s schwächer. Dies entspricht eher der stratosphärischen Klimatologie, weshalb die Anomalien des Meridionalwinds, bezogen auf Sturm 64 (Abbildung 27d) ebenfalls schwächer ausgeprägt sind.

Der Blick auf die 10-Tages-Tiefpass gefilterten Hovmöller-Diagramme des Geopotentials in 50 hPa für die gesamte Nordhemisphäre (Abbildung 28a und b) der Stürme 45 und 64 zeigen noch einmal die Lage beider Stürme im Bereich der Gradienten zwischen Trog und Rücken. Beide tendieren eher zu den Wellen niedrigen Geopotentials und sind mit diesen in Phase.

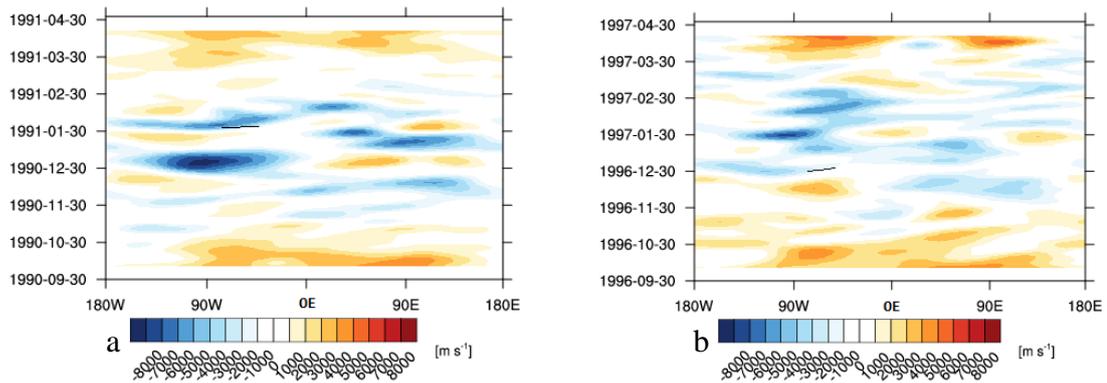
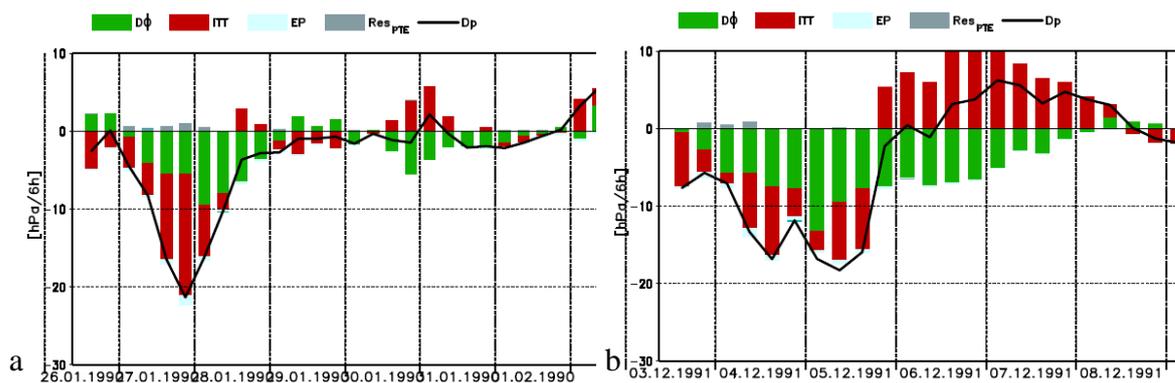


Abbildung 28: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0°N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen der jeweiligen Stürme 45 und 64.

4.2.3 Stürme 43, 48 und 72

Die Stürme 43, 48 und 72 weisen ähnliche Strukturen und Eigenschaften wie die bisher betrachteten Stürme dieser Familie auf, setzen sich jedoch durch Besonderheiten etwas ab. Die Stratosphäre hat einen Einfluss von 52,52% auf Sturm 43, 57,72% auf Sturm 48 und 55,44% auf Sturm 72 (siehe Abbildung 29a bis c). Bei allen drei Stürmen hat $D\Phi$ die größten Anteile im Bereich der stärksten Vertiefungen. Bei den Stürmen 48 und 72 ist der Beitrag von $D\Phi$ dabei kurz vor Erreichen des tiefsten Drucks zu finden. Bei Sturm 43 jedoch kurz danach.



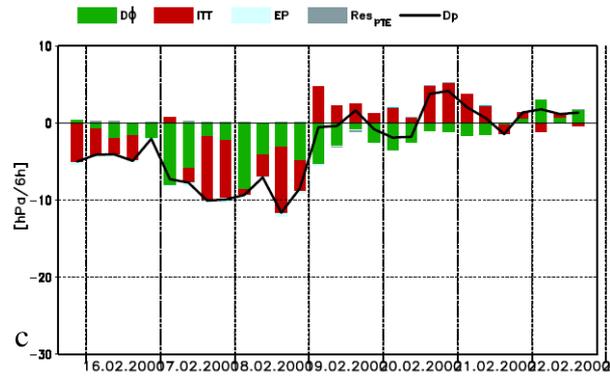


Abbildung 29: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 43 vom 26.01. – 01.02.1990, b) 48 vom 03.12. – 09.12.1991 und c) 72 vom 16.02. – 22.02.2000. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme.

Sturm 43 entsteht als einziger der 8 näher betrachteten Stürme mit einem Beitrag von $D\Phi$ größer als 50% vorderseitig eines stratosphärischen Trog. Dies ist in der synoptischen Situation in Abbildung 30a und b zu erkennen. Diese bezieht sich wieder auf den Zeitraum der stärksten Vertiefung. Bezüglich Sturm 43 sind dies drei Tage (27.01. - 29.01.1990). Bei Sturm 48 (Abbildung 30c und d) sind es zwei Tage (04.12. - 05.12.1991), ebenfalls bei Sturm 72 (17.02. - 18.02.2000, Abbildung 30e und f).

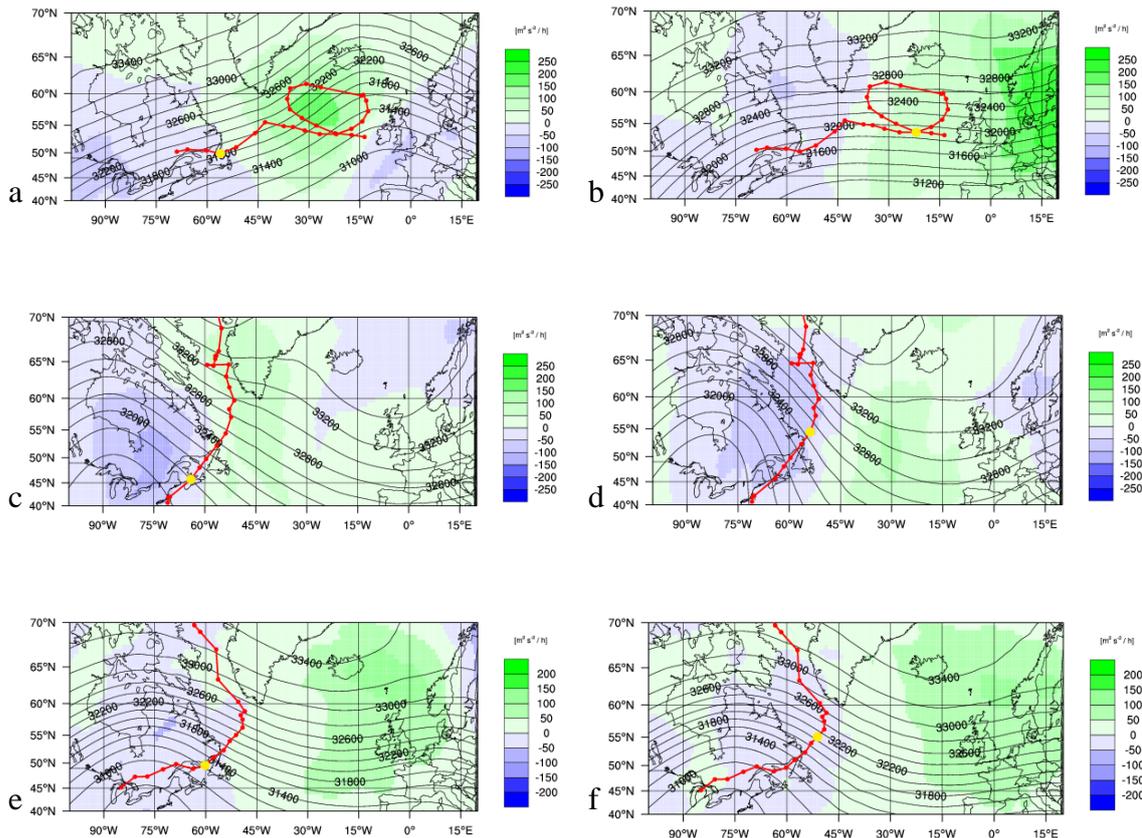


Abbildung 30: Synoptische Entwicklung von a, b) Sturm 43, c, d) Sturm 48 und e, f) Sturm 72 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbig ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 27.01.1990, b: 29.01.1990 c: 04.12.1991, d: 05.12.1991, e: 17.02.2000 und f: 18.02.2000, jeweils 12 UTC

Sturm 43 bildet sich an der südöstlichen Küste Kanadas und zieht mit nordöstlicher Richtung auf den Nordatlantik. Südlich von Grönland ändert sich die Bewegungsrichtung gen Westen bis etwa 20° W. Von dort an durchläuft der Sturm eine Schleife, zuerst Richtung Norden, dann nach Westen bis kurz vor Grönland und schließlich südwestlich wieder bis kurz vor die Britischen Inseln. Sturm 48 (Abbildung 30c und d) entsteht an der Ostküste der USA, wandert meridional über den Nordatlantik hinweg und zieht schließlich westlich an Grönland vorbei. Sturm 72 (Abbildung 30e und f) dagegen bildet sich an Amerikas Westküste. Nachdem er über den Kontinent hinweg gezogen ist, nimmt er in etwa die gleiche Bahn wie Sturm 48 ein und zieht meridional über den Nordatlantik und westlich von Grönland vorbei. Während der starken Vertiefungsphase befinden sich beide Stürme über dem Nordatlantik, vorderseitig stratosphärischer Rücken in 50 hPa und demnach vorderseitig eines starken troposphärischen Trog. Sturm 43 befindet sich jedoch, wie bereits angesprochen, vorderseitig eines Trog in 50 hPa. Somit ist in diesem Fall eine Position des Sturms vorderseitig eines troposphärischen Rückens wahrscheinlich.

Da die Stratosphäre der PTE-Analyse zufolge deutlich zum Druckfall beiträgt, ist die Position der drei Stürme in einem Feld negativer Tendenz zu erwarten, was auch zutrifft. Sie bewegen sich jeweils mit dem stärksten Feld negativer Geopotentialtendenzen vorderseitig des stratosphärischen Rückens mit. Sturm 43 befindet sich jedoch in einem Übergangsbereich beider Tendenzen und steht auch unter dem Einfluss positiver Geopotentialtendenzen. In den darüber liegenden Level bildet sich im Bereich der positiven Tendenzen ein Rücken, was die Position dieses Feldes erklärt.

Bei Betrachtung der Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials (Abbildung 31a) und der Geopotentialtendenz (Abbildung 31b) in 50 hPa bezüglich Sturm 43 zeigt sich eine Übereinstimmung mit der zuvor betrachteten synoptischen Situation. Sturm 43 entsteht, wie die meisten Stürme der Familie mobiler Wellen, in einem Bereich höheren Geopotentials und durchläuft in der weiteren Lebenszeit, dazu gehört auch die Phase der stärksten Vertiefung, Bereiche niedrigen Geopotentials. Das besondere hierbei ist, dass der Sturm von einem zweiten Wellenpaket mitgenommen wird. Zu Beginn wandert er mit der ersten Welle Richtung Nordosten. Ab dem 30.01.1990 taucht eine zweite Welle auf. Der Sturm bewegt sich fortan mit dieser zweiten Welle mit. In der synoptischen Situation wird dies durch die Schleife deutlich, die der Sturm über dem Nordatlantik durchläuft. Beim Blick auf das Hovmöller-Diagramm der Geopotentialtendenz (Abbildung 31b) wird nochmals deutlich, dass sich Sturm 43 in einem Übergangsbereich beider Tendenzen befindet, mit Einwirkung der zweiten Welle jedoch in einem Feld negativer Tendenzen.

Bezüglich Sturm 43 werden zwei Phasengeschwindigkeiten berechnet. Die erste Welle in Abbildung 31a bewegt sich in zwei Tagen um etwa 35° von 15° W bis 20° O. Die Welle bewegt sich demnach mit einer Phasengeschwindigkeit von etwa 47 km/h. Sturm 43 bewegt sich in den zwei Tagen um etwa 40° von 70° W nach 30° W und ist mit 53 km/h etwas schneller als die erste Welle. Die zweite Welle bewegt sich schließlich in drei Tagen um 25° von 40° W nach 15° W. Mit einer Phasengeschwindigkeit von 22 km/h ist diese Welle langsamer als die erste. Sturm 43 bewegt sich schließlich mit der zweiten Welle mit und weist mit 23 km/h in etwa die gleiche Geschwindigkeit auf.

Die Stürme 48 und 72 entstehen in Bereichen tieferen stratosphärischen Geopotentials. Im Laufe der Entwicklung und auch während der Phase der explosiven Vertiefung

ziehen beide Stürme mit leicht westlicher Richtung über den Nordatlantik und gelangen in einen Bereich etwas höheren stratosphärischen Geopotentials. Dennoch nimmt das Geopotential ab dem Zeitpunkt der Vertiefung ebenfalls ab. Sturm 48 bewegt sich anschließend gen Norden. In der Auflösungsphase nimmt auch das Geopotential wieder zu. Ähnliches ist bei Sturm 72 zu beobachten. Nach der Durchquerung des Gebiets tiefen Geopotentials, gelangt der Sturm bei seiner Auflösung in einen Bereich höheren Geopotentials. Beide Stürme sind während ihrer Vertiefungsphase und weiteren Entwicklung in Feldern negativer Tendenz. Zum Zeitpunkt ihrer Auflösung gelangen jedoch beide in Gebiete höherer Geopotentialtendenz. Dies ist Abbildung 31d und f zu entnehmen. In der synoptischen Situation (Abbildung 30c bis f) ist dies nicht erkennbar. Die wendige Zugbahn von Sturm 71 ab dem 22.02.2000 folgt den Tendenzen. Der Sturm schlägt die Richtung größer werdenden Tendenzen ein, bis diese zum Ende des 23.02.2000 nur noch abnimmt. Ab diesem Zeitpunkt nimmt der Sturm bis zu seiner Auflösung wieder eine geradere Zugbahn gen Norden an.

Die Welle bezüglich Sturm 48 in Abbildung 31c bewegt sich, nachdem sie zuvor einige Zeit stationär war, in drei Tagen um etwa 35° von 80° W bis 45° W und weist eine Phasengeschwindigkeit von etwa 31 km/h auf. Sturm 48 bewegt sich in dieser Zeit meridional gen Norden und bewegt sich daher lediglich um etwa 8° von 50° W nach 58° W. Der Sturm weist mit 7 km/h eine deutlich geringere Bewegungsgeschwindigkeit Richtung Osten gegenüber der Welle auf. Der Trog in Abbildung 31e wandert in vier Tagen etwa 43° von 76° W bis 33° W. Dies entspricht einer Phasengeschwindigkeit von 29 km/h. Sturm 72 bewegt sich in der gleichen Zeit um nur etwa 17° Richtung Westen von 58° W bis 75° W. Mit 11 km/h ist der Sturm in diesem Fall nicht nur langsamer als die Welle, sondern weist auch eine entgegengesetzte Bewegungsrichtung auf.

Das Besondere an diesen beiden Stürmen ist die ähnliche Ausgangssituation wie beim Braer Sturm. Bei beiden ist die Welle mit niedrigem Geopotential erst einige Tage stationär, wird dann jedoch plötzlich mobil. Jedoch nur Sturm 48 und die Geopotentialwelle sind einigermaßen in Phase. Sie bewegen sich etwa in die gleiche Richtung. Sturm 72 läuft unter der Welle hindurch. Sie sind im Entwicklungszeitraum des Sturms nicht in Phase, in der Phase der Auflösung dann einigermaßen. Ab diesem Zeitpunkt bewegen sich Sturm und Welle beide mit nordöstlicher Richtung.

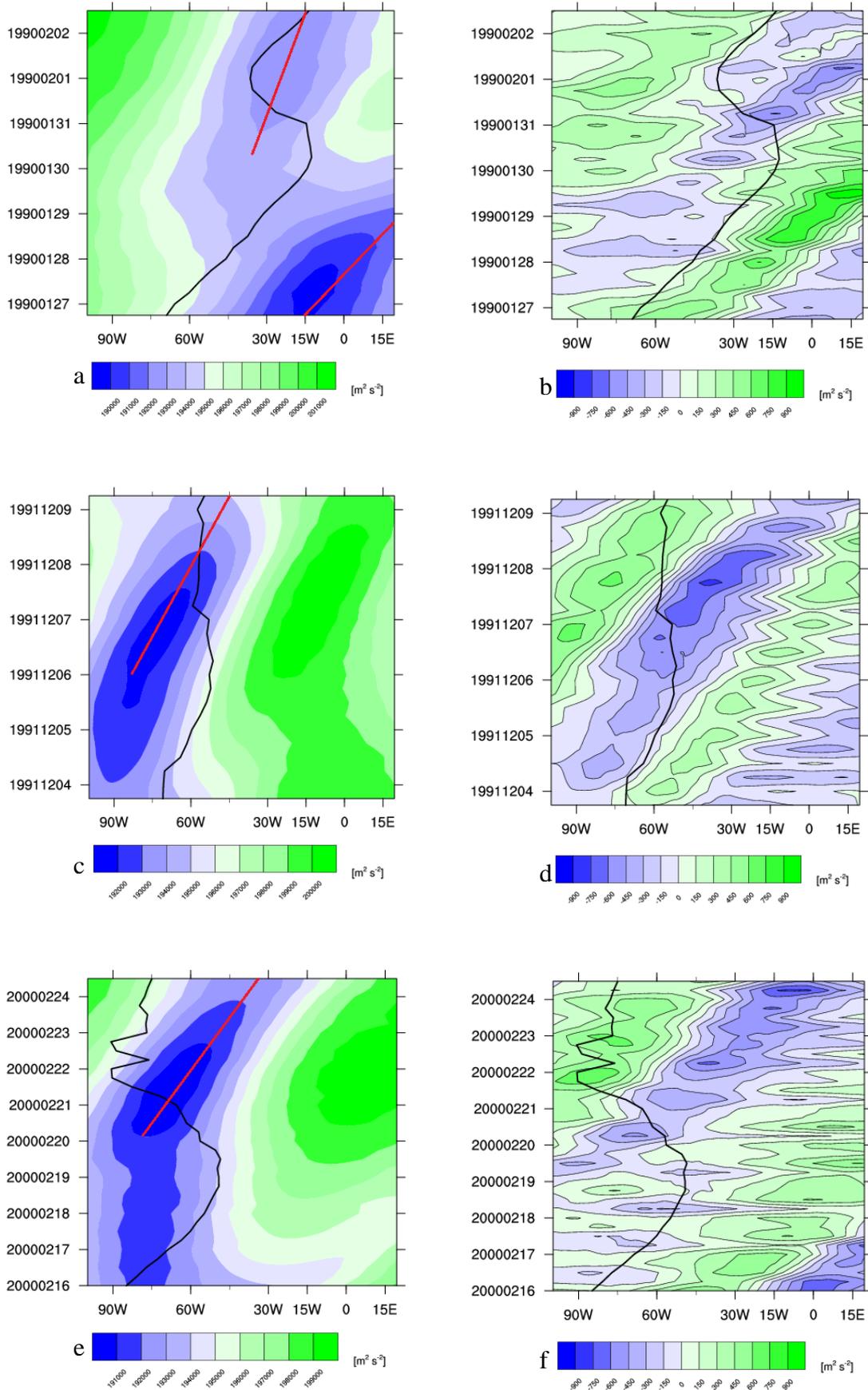
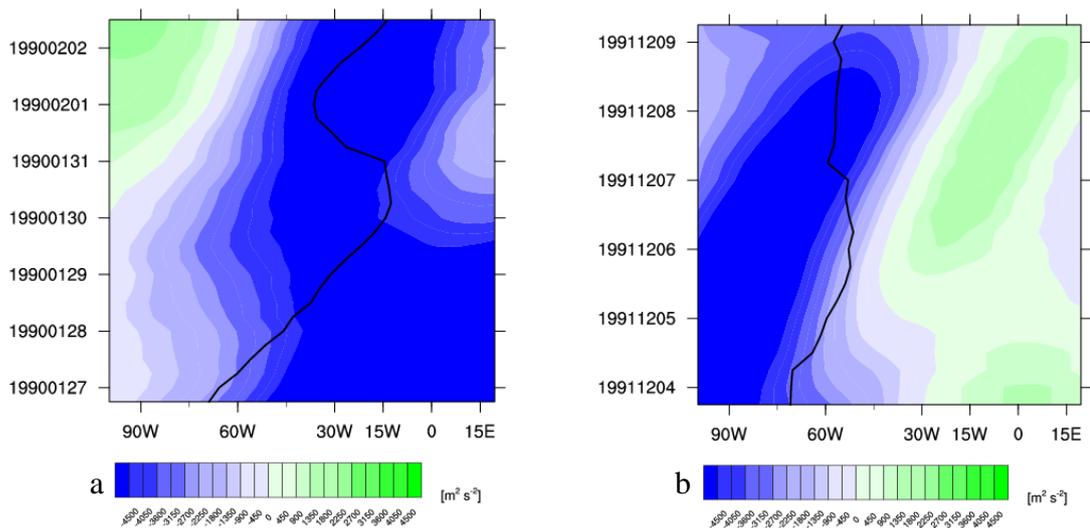


Abbildung 31: Hovmöller-Diagramme a, c, e) des absoluten Geopotentials sowie b, d, f) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von a, b) Sturm 43, c, d) Sturm 48 und e, f)

Sturm 72. Die Zugbahn der Stürme wird durch die schwarzen Linien dargestellt, die Phasengeschwindigkeit der Welle durch die rote Linie.

Außergewöhnliche Muster in der Stratosphäre bezüglich der drei Stürme 43, 48 und 72 werden durch die Betrachtung von Anomalien des absoluten Geopotentials in Abbildung 32a bis c näher untersucht. Wieder ist tieferes Geopotential mit negativen Anomalien verbunden sowie hohes Geopotential mit positiven Anomalien. Wie bei den zuvor betrachteten Stürmen sind auch hier in allen drei Abbildungen die negativen Anomalien aufgrund der mobilen Wellen stark ausgeprägt. Jedoch sind auch hier die positiven Anomalien vergleichsweise stärker ausgeprägt. Dies ist darin begründet, dass die Wellen höheren Geopotentials vor allem bei den Stürmen 43 und 48 ebenfalls mobil sind.



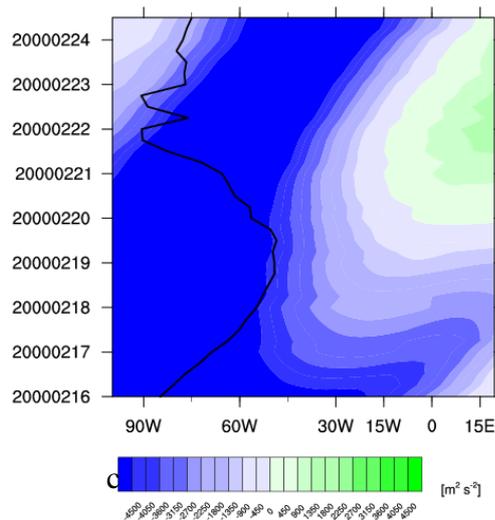


Abbildung 32: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 43, b) Sturm 48 und c) Sturm 72. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms.

Der Meridionalwind und dessen Anomalie zu Sturm 43 in Abbildung 33a und b zeigen die zwei, den Sturm beeinflussende Wellen nicht so deutlich. Hier ist dies eher als eine Welle sichtbar. Der Südwind (positive Werte, grün), welcher zu dem Trog stromab des Sturms (siehe Abbildung 30a und b) gehört, ist nur schwach. Stark dagegen ist der Nordwind, welcher vorderseitig des stratosphärischen Rückens weht. Dieser bringt wärmere Luft aus der polaren Region heran. Durch Ausdehnung der Luftsäule und damit verbundener Absenkung der Troposphäre, trägt die Stratosphäre hier deutlich durch thermische Effekte zum Druckfall bei. Die stratosphärischen Winde in 50 hPa bezüglich der Stürme 48 und 72 (Abbildung 33c und e) sind eher schwach. Durch die Lage der Geopotentialtendenzen auf den Gradienten des Windes, ist auch hier einsehbar, dass sich die Stürme 48 und 72 im Bereich negativer Tendenzen bewegen. Starke Meridionalwinde in 50 hPa werden auch hier durch stärkere Anomalien begleitet, schwächere Winde durch schwächer ausgeprägte Anomalien.

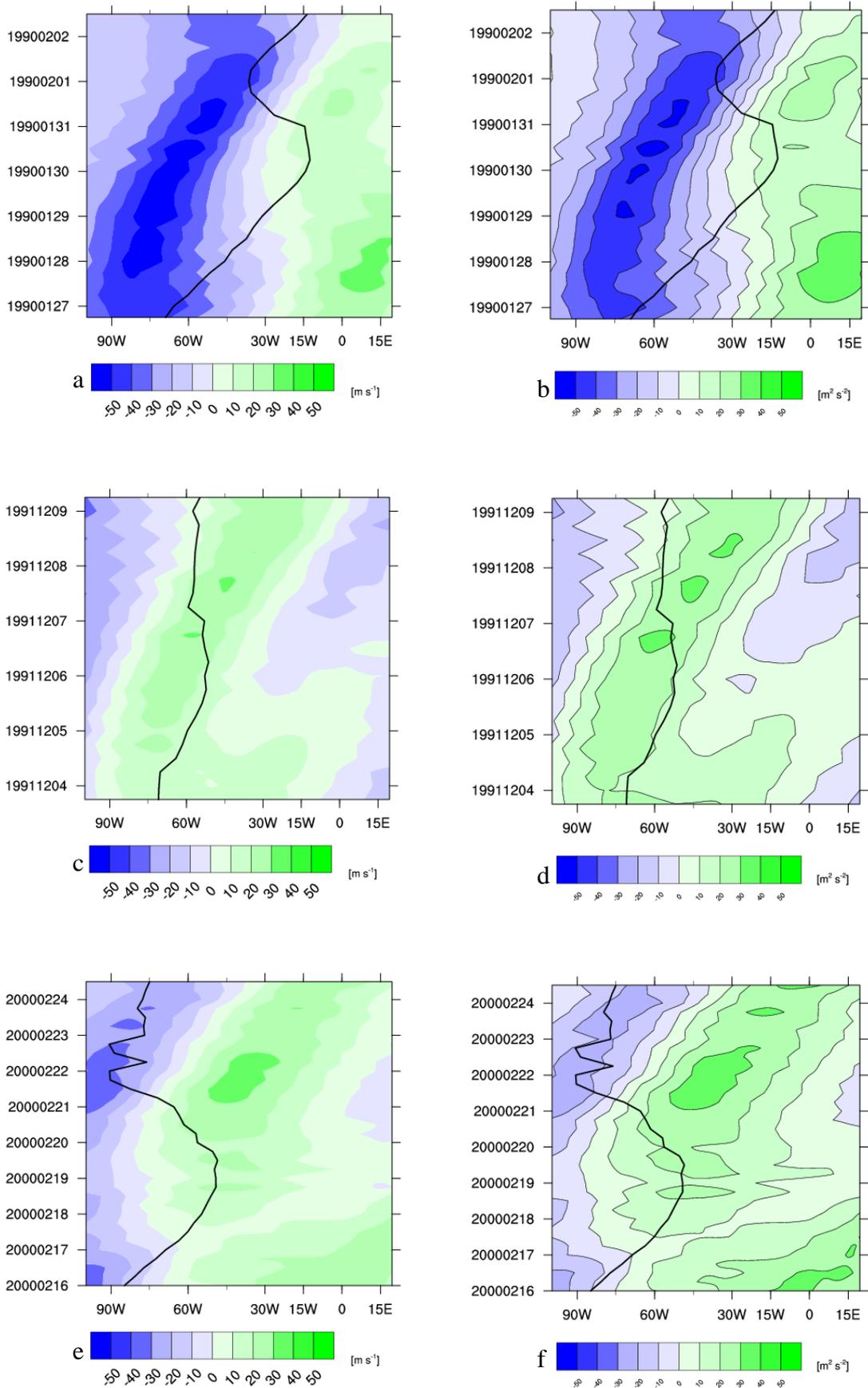


Abbildung 33: Hovmöller-Diagramme des Meridionalwinds von a) Sturm 43, c) Sturm 48 und e) Sturm 72 und der Anomalie des Meridionalwinds von b) Sturm 43, d) Sturm 48 und f) Sturm 72 in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit der Stürme. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen.

Schließlich folgt noch die Einordnung der Stürme in die gefilterten Hovmöller-Diagramme des Geopotentials in 50 hPa für die gesamte Nordhemisphäre (Abbildung 34a bis c) der Stürme 43, 48 und 72. Bezüglich Sturm 43 wird hier noch einmal die Phasenbeziehung mit beiden Wellenpaketen deutlich. Sturm 43 bewegt sich zuerst mit der ersten Wellen tiefen Geopotentials mit, wird dann von der zweiten Welle erfasst und bewegt sich schließlich mit dieser etwas weiter nördlich als zuvor. Nicht besonders gut zu erkennen ist die Tatsache, dass die Geopotentialwellen bezüglich der Stürme 48 und 72 zuerst einige Zeit stationär sind, dann plötzlich mobil werden. Sturm 72 ändert seine Bewegungsrichtung und läuft gen Westen unter der Welle hindurch. Wird dann aber von der mobil gewordenen Welle mitgezogen. Alle drei Stürme sind auch hier in Phase mit den Geopotentialwellen.

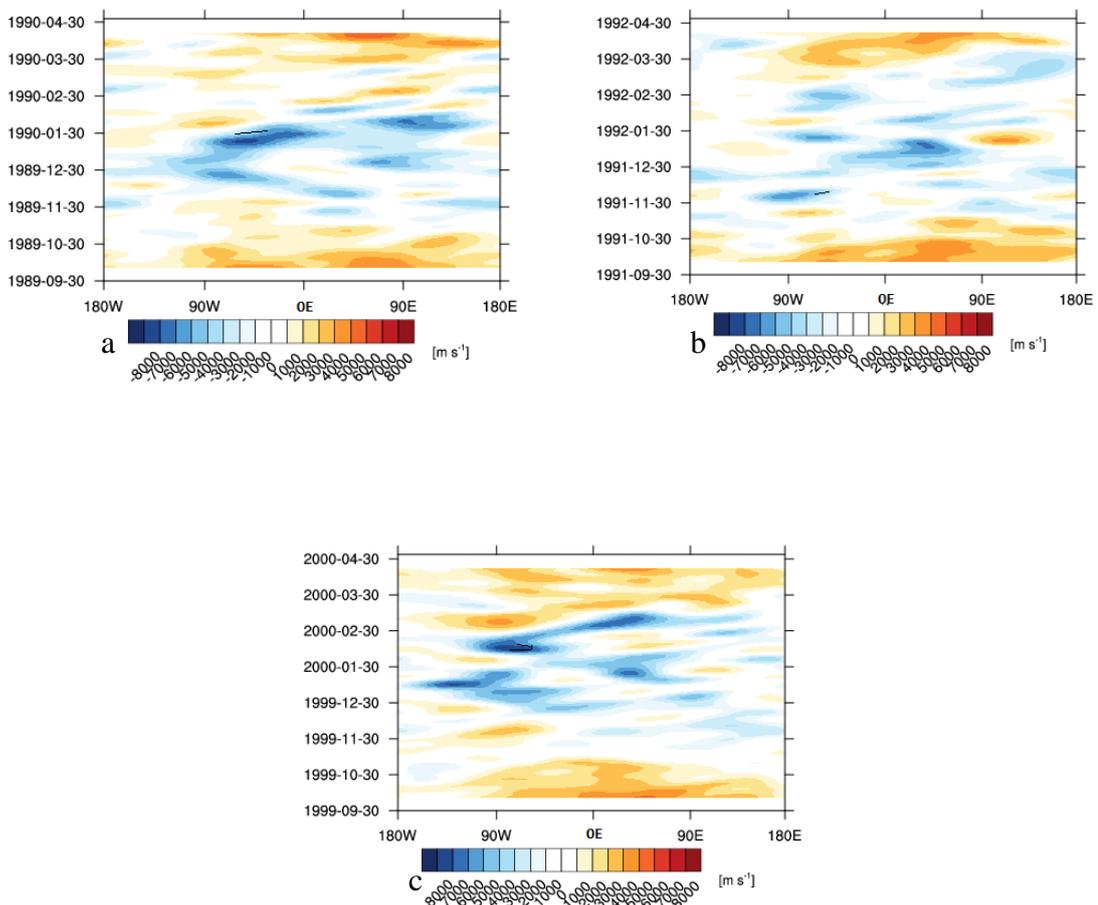


Abbildung 34: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0°N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen der jeweiligen Stürme 43, 48 und 72.

4.2.4 Sturm 96

Sturm 96 unterscheidet sich von den anderen bisher in dieser Familie betrachteten Stürme darin, dass die Stratosphäre hier dem Druckfall entgegen wirkt. Nach Anwendung der PTE übt die Stratosphäre einen Beitrag zur Druckentwicklung von $-10,70\%$ auf Sturm 96 aus. Dargestellt ist dies in der PTE-Analyse in Abbildung 35.

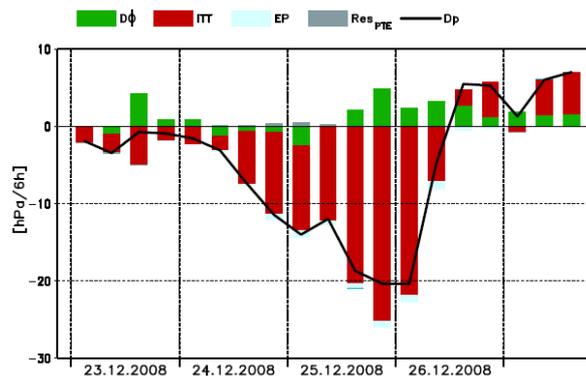


Abbildung 35: Ergebnis der PTE-Analyse von Sturm 96 vom 23.12. – 27.12.2008. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme.

Im Bereich des Druckfalls vom 24.12. bis zum 26.12.2008 trägt die Stratosphäre anfangs noch zum Druckfall bei und weist positive Beiträge auf. Diese sind jedoch eher gering. Die größten Beiträge hat die Stratosphäre während des stärksten Druckfalls am 25.12.2008. Dabei wirkt sie durch negative Beiträge dem Druckfall entgegen.

Sturm 96 entsteht, wie auch Sturm 43, vorderseitig eines stratosphärischen Trogens. Dies ist in der synoptischen Situation in Abbildung 36a und b zu erkennen. Der Zeitraum der stärksten Vertiefung bezüglich Sturm 96 beträgt drei Tage (24.12. - 26.12.2008).

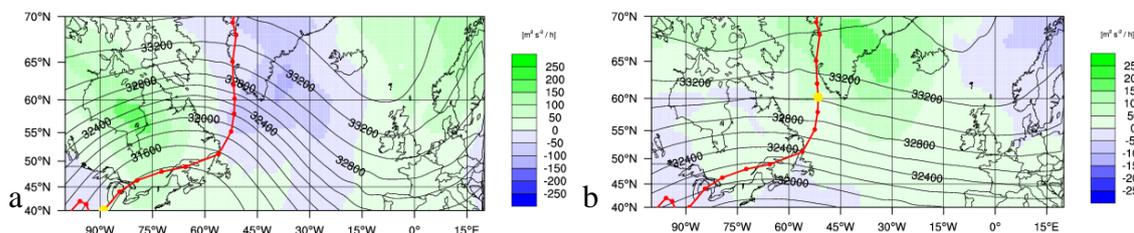


Abbildung 36: Synoptische Entwicklung von Sturm 96 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbig ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 24.12.2008, b: 26.12.2008, jeweils 12 UTC

Sturm 96 entsteht an der nördlichen Westküste der USA im Ostpazifik. Er zieht mit nordöstlicher Richtung über den südlichen kanadischen Kontinent auf den Nordatlantik. Dort nimmt er eine meridionale Bewegungsrichtung gen Norden an. An der Westküste Grönlands löst sich Sturm 96 schließlich auf. Während der starken Vertiefungsphase befinden sich Sturm 96 zunächst noch über dem Kontinent, dann jedoch über dem Nordatlantik. Während dieser Entwicklungszeit flacht der zuvor noch stark ausgeprägte Rücken vorderseitig des Sturms deutlich ab. Der Rücken scheint auch stationär zu verharren. Sturm 96 gerät von seiner ursprünglich noch trogvorderseitigen Position in den abgeflachten Rücken. In der Troposphäre befindet sich an Stelle des stratosphärischen Rückens mit großer Wahrscheinlichkeit ein Trog. Sturm 96 befindet sich zuerst rückseitig des troposphärischen Trogs, gelangt dann jedoch in das vorderseitige Gebiet. Der Trog und andere troposphärische Effekte sorgen dafür, dass sich Sturm 96 trotz der entgegengesetzten Wirkung der Stratosphäre zu einem intensiven Wintersturm entwickelt.

Da die Stratosphäre der PTE-Analyse zufolge dem Druckfall entgegen wirkt, ist die Position von Sturm 96 in einem Feld positiver Geopotentialtendenz zu erwarten. Tatsächlich bewegt sich Sturm 96 mit dem Feld stärkster positiver Geopotentialtendenzen erst rück- und dann vorderseitig des stratosphärischen Rückens mit. In den darüber liegenden Level bildet sich im Bereich der positiven Tendenzen ein Rücken aus.

Abbildung 37a und b zeigen das absolute Geopotential und die Geopotentialtendenz in 50 hPa bezüglich Sturm 96. Der Sturm entsteht im Bereich der Gradienten zwischen höherem und tieferem Geopotential, mit Tendenz zum niedrigen Geopotential. Er ist im weiteren Verlauf in Phase mit der tiefen Geopotentialwelle, bleibt jedoch im Gradientenbereich. So auch während der stärksten Vertiefung. Unmittelbar danach jedoch, wenn der Druck wieder ansteigt, wird die Geopotentialwelle schwächer und geht relativ schnell über in hohes Geopotential. Zu diesem Zeitpunkt schlägt der Sturm die meridionale Bewegungsrichtung gen Norden ein.

Die Geopotentialwelle ist zunächst noch für kurze Zeit stationär, wird dann jedoch mobil. Während dieser Zeit sind Sturm und Welle in Phase. Mit dem Abflachen des Rückens (vgl. Abbildung 36b) löst sich auch die mobile Welle tiefen Geopotentials auf.

Bei Betrachtung des Hovmöller-Diagramms der Geopotentialtendenz (Abbildung 37b) wird noch einmal die Erwartung bestätigt, dass sich Sturm 96 in einem Feld positiver Tendenz bewegt. Lediglich direkt bei der Entstehung und auch bei der Auflösung sind die Tendenzen leicht negativ. Zu Beginn des Druckfalls war in der PTE-Analyse auch ein geringer positiver Beitrag von $D\Phi$ auszumachen.

Die Welle in Abbildung 37a bezüglich Sturm 96 bewegt sich um 30° in zwei Tagen von 75° W nach 45° W und weist damit eine Phasengeschwindigkeit von 40 km/h auf. Sturm 96 bewegt sich in dieser Zeit mit 64 km/h um 48° und ist damit schneller als der stratosphärische Trog.

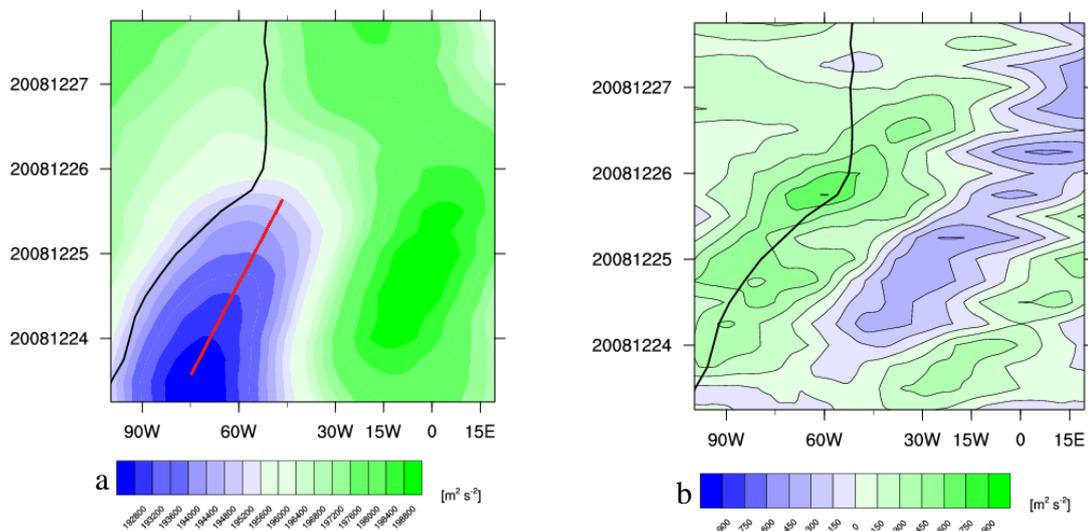


Abbildung 37: Hovmöller-Diagramme a) des absoluten Geopotentials sowie b) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von Sturm 96. Die Zugbahn des Sturms wird durch die schwarzen Linien dargestellt, die Phasengeschwindigkeit der Welle durch die rote Linie.

Anomalien des absoluten Geopotentials sollen nun Aufschluss darüber geben, ob die stratosphärische Situation, welche während der Lebenszeit von Sturm 96 vorherrschte, gewöhnlich oder außergewöhnlich ist. Dargestellt sind die Anomalien in Abbildung 38. Bei der Betrachtung dieser Abbildung wird festgestellt, dass die stratosphärische Situation keinesfalls der klimatologischen entspricht. Die negativen Anomalien, welche mit dem tiefen Geopotential korrelieren, sind deutlich ausgeprägt. Die anfangs stationäre, später dann mobile Welle entspricht nicht dem der Klimatologie nach erwarteten Zustands. Auch die plötzliche Auflösung der tiefen Geopotentialwelle mit Übergang in höheres Geopotential scheint außergewöhnlich zu sein. Positive

Anomalien sind hier stattdessen verschwindend gering. Das hohe Geopotential des Rückens weicht nicht markant von der stratosphärischen Klimatologie ab.

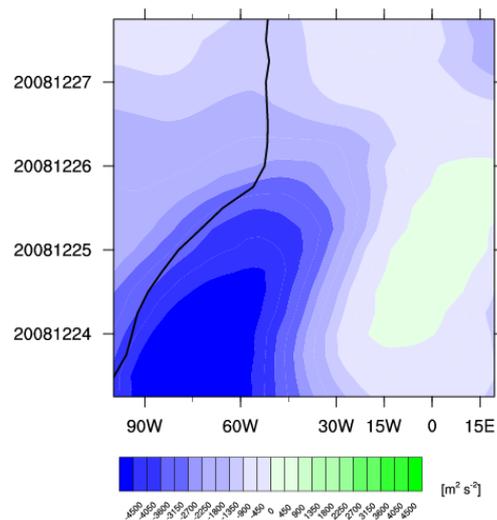


Abbildung 38: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von Sturm 96. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms.

Der Meridionalwind und dessen Anomalie zu Sturm 96 sind in Abbildung 39a und b dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass die Geopotentialwelle erst kurze Zeit stationär, dann mobil ist. Durch die Lage der Geopotentialtendenzen auf den Gradienten des Windes, wird auch hier die Lage des Sturms in Bereichen positiver Geopotentialtendenzen deutlich. Die Meridionalwinde in 50 hPa sind unter anderem sehr stark mit Geschwindigkeiten über 50 km/h. So sind entsprechend auch die Anomalien stark ausgeprägt. Nordwind transportiert wärmere Luft aus der polaren Region heran, Südwind kalte Luft aus der Äquatorregion. Der Transport unterschiedlich temperierter Luftmassen hat einen dämpfenden Effekt auf Druckänderungen. Die Stratosphäre kann somit durch thermische Effekte dem Druckfall entgegen wirken.

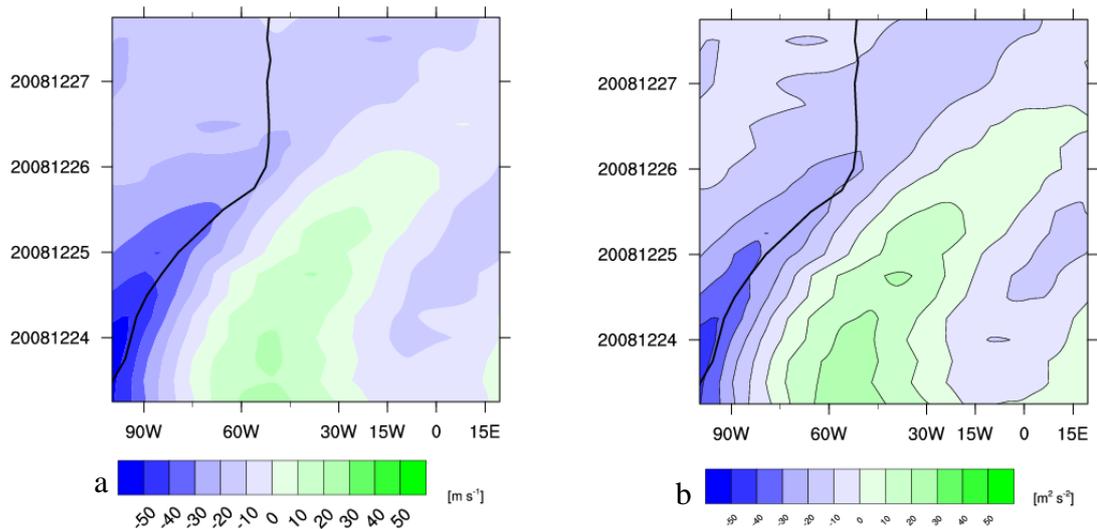


Abbildung 39: Hovmöller-Diagramme des Meridionalwinds von Sturm 96 und der Anomalie des Meridionalwinds in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit des Sturms. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen.

Schlussendlich folgt die Betrachtung der gesamten Nordhemisphäre. Abbildung 40 zeigt das entsprechende gefilterte Hovmöller-Diagramm des Geopotentials in 50 hPa. Hier noch einmal die Phasenbeziehung mit der Welle deutlich. Es ist hier jedoch nicht ersichtlich, dass die Welle stationär war, bevor sie mobil wurde. Auch der Übergang von tiefem in hohes Geopotential ist hier nicht gut zu erkennen.

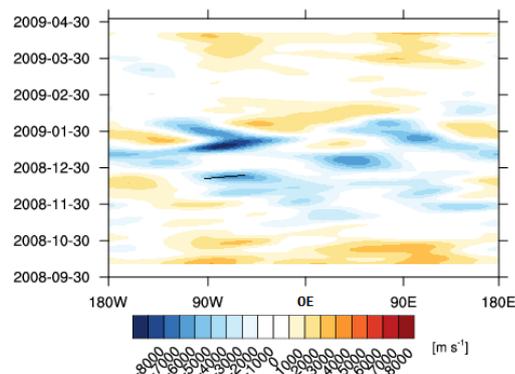


Abbildung 40: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0°N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen von Sturm 96.

4.2.5 Interpretation

Mobile Wellen treten in der Stratosphäre doch sehr häufig auf. Von den 94 betrachteten Fällen, werden 56 Stürme und stratosphärische Situationen der Familie der mobilen Wellen zugeordnet.

Die Stürme dieser Familie sind im Allgemeinen in Teilen der Entwicklung in Phase mit der Geopotentialwelle der Stratosphäre in 50 hPa. Sie bewegen sich mit ähnlicher Geschwindigkeit mit der Welle mit. Die Stürme entstehen und entwickeln sich nahezu alle im Bereich tiefen Geopotentials und lösen sich in höherem Geopotential auf.

Der überwiegende Teil der Stürme dieser Familie erfährt einen geringen bis stark positiven Beitrag durch die Stratosphäre, gekennzeichnet durch den Anteil von $D\Phi$ in der PTE-Analyse. Bei Beispielsturm 15 hat $D\Phi$ einen Anteil von 34,94%. Der Einfluss der Stratosphäre ist jedoch am größten unmittelbar nach dem starken Druckfall. Die Stratosphäre trägt, wie der prozentuale Anteil bereits aussagt, zwar zur Druckverringerng bei, jedoch erfolgt der Hauptanteil durch andere, troposphärische Effekte, wie diabatische Effekte, Temperaturadvektion oder Vertikalbewegungen. Bei Beispielsturm 11 ist der Beitrag der Stratosphäre mit 0,47% vernachlässigbar klein. In der PTE-Analyse wird deutlich, dass die Stratosphäre dem Druckfall auch immer wieder entgegen wirkt. Somit ist diese bei diesem Sturm nicht verantwortlich für den starken Druckfall.

Von den 9 näher betrachteten Stürmen, welche einen großen positiven Beitrag mit mehr als 50% von $D\Phi$ erfahren, werden 8 zu dieser Familie gezählt. Bei allen ist in der PTE-Analyse auch deutlich der Beitrag von $D\Phi$ zum Druckfall zu erkennen. Bei den Stürmen 43, 45 und 68 taucht der größte Beitrag jedoch erst unmittelbar nach dem raschen Druckfall, also bei Druckanstieg, auf. Von den 3 näher betrachteten Stürmen, welche einen großen negativen Beitrag mit weniger als – 10% durch $D\Phi$ erfahren, wird 1 Sturm zu dieser Familie gezählt. Auch bei Sturm 96 ist, nach erstmalig positivem Beitrag, auch ein deutlicher Beitrag von $D\Phi$ während der Vertiefungsphase zu erkennen. Hier wirkt die Stratosphäre dem Druckfall jedoch entgegen.

Die Mehrheit der in dieser Familie betrachteten Stürme entsteht und entwickelt sich vorderseitig stratosphärischer Rücken. Da sich Wellen von oben nach unten von Westen nach Osten hin fortsetzen, die Druckzentren also eine vertikal geneigte Achse aufweisen, befindet sich an der Stelle der stratosphärischen Rücken in der Troposphäre jeweils ein starker Trog. Dieser ist mit vertikal geneigter Achse mit dem stratosphärischen Trog westlich des Rückens verbunden. So kann die Stratosphäre durch eine Intensivierung des Troposphärentrogs zum bodennahen Druckentwicklung der Zyklonen beitragen. Ein Beitrag zum Druckfall durch die Stratosphäre kann jedoch

auch durch thermische Effekte erfolgen. Ein Nordwind in der Stratosphäre transportiert wärmere Luft heran, da in dieser Höhe im Bereich der Pole wärmere Luft zu finden ist. Die kältesten Luftmassen befinden sich beim Äquator. Ein Südwind transportiert demnach kältere Luft heran. Durch das Heranführen wärmerer Luft dehnt sich die Luftsäule der Stratosphäre aus. In der Folge sinkt die Tropopause ab und drückt die troposphärische Luftsäule zusammen. Der Druck am Boden fällt. Der Transport unterschiedlich temperierter Luftmassen kann jedoch auch einen dämpfenden Effekt auf die bodennahe Druckentwicklung haben. Dies ist bei Sturm 96 der Fall.

Die Mehrheit der Stürme dieser Familie tritt während eines positiven NAO-Index auf. Dieser begünstigt die Entstehung und Entwicklung intensiver Winterstürme über dem Nordatlantik. Es wird im Allgemeinen sogar ein positiver NAO-Index erwartet.

Damit kann keine genaue Aussage gemacht werden bezüglich der Einwirkung der Stratosphäre auf die Entwicklung von intensiven Zyklonen. Bei einigen ist der Beitrag zum Druckfall groß bis sehr groß. Darunter taucht der größte Einfluss jedoch auch immer wieder bei Beginn des Druckanstiegs auf. Und nur bei 8 Stürmen ist der Einfluss größer als der troposphärischer Effekte. So ist ein Einfluss der Stratosphäre auf die bodennahe Druckentwicklung sicherlich vorhanden. Ob dieser jedoch zufällig ist und auch der Auslöser für die intensive Entwicklung, ist unklar und bedarf weitergehender Untersuchungen. Da der NAO-Index im Allgemeinen bei den betrachteten Stürmen positiv ist, ist auch eine Aussage bezüglich eines direkten Einflusses der Stratosphäre auf einzelne Zyklonen in dieser Form noch nicht möglich. Es kann hier nicht unterschieden werden, ob die Stratosphäre die weitere Entwicklung der Stürme direkt begünstigt oder indirekt durch den ohnehin schon vorhandene NAO-Index.

4.3 Die Familie der stationären Wellen

In die Familie der stationären Wellen fallen 35 Stürme. Bezogen auf die ausgewählten 94 Stürme entspricht dies einem Anteil von 37,10%. Diese Familie ist gekennzeichnet durch stationäre Geopotentialwellen. Dieser stratosphärische Zustand wurde eingangs anhand der Klimatologie vermutet. Mit 37,10% tritt diese Situation in den betrachteten Fällen zwar nicht mehrheitlich auf, aber dennoch häufig.

Abbildung 41a und b zeigen zwei Geopotentialwellen dieser Familie. Dargestellt sind Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit der Stürme 40 und 76. Die schwarzen Linien in den Abbildungen zeigen die jeweilige Zugbahn der Stürme.

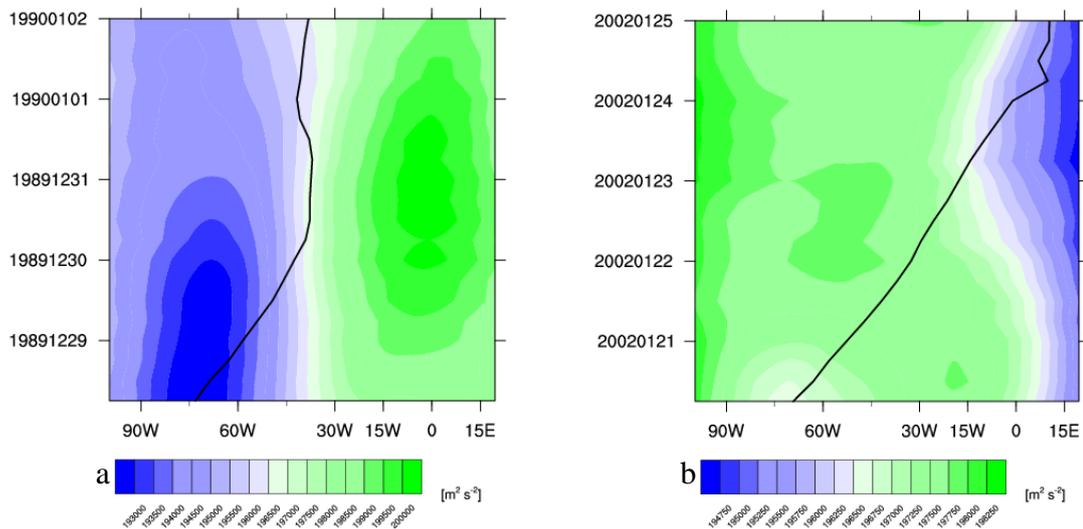


Abbildung 41: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die jeweilige Lebenszeit von a) Sturm 40 und b) Sturm 76

In dieser Familie lassen sich ebenfalls zwei unterschiedliche Situationen spezifizieren. In der ersten Situation befindet sich der Sturm vorderseitig eines stratosphärischen Trogés in 50 hPa. Der Sturm bewegt sich dabei während der Entstehung und weiteren Entwicklung im Bereich eines Tiefs. Der Sturm zieht anschließend in einen Bereich höheren stratosphärischen Geopotentials, wo er sich schließlich auflöst. Dies ist in Abbildung 41a anhand von Sturm 40 gezeigt. In der zweiten Situation (Abbildung 41b) befindet sich der Sturm während Entstehungs- und Entwicklungsphase vorderseitig eines stratosphärischen Rückens in 50 hPa. Während Entstehungs- und Entwicklungsphase bewegt sich der Sturm in einem Bereich höheren Geopotentials und wandert erst im weiteren Verlauf in ein Gebiet tieferen Potentials. Der Sturm löst sich in diesem Bereich auch auf.

Die Mehrzahl der Stürme dieser Familie weist die Eigenschaften der ersten Situation auf. Sie entwickeln sich also vorderseitig eines stratosphärischen Trogés. Die Stürme sind oft in Phase mit einer stratosphärischen Trögen, jedoch nicht mit stratosphärischen Rücken. Die Stürme, welche rückenvorderseitig entstehen und von hohem zu tiefem

Geopotential wandern, sind bei Erreichen der Welle niedrigen Geopotentials in Phase mit dieser. Die andere Welle zuvor wird, oft auch mit starker zonaler Richtung, durchquert. Die meisten entstehen und entwickeln sich in einem Bereich niedrigeren Geopotentials. Zum Zeitpunkt der Auflösung befinden sich die meisten Stürme in einem Bereich höheren Geopotentials. Manche geraten dabei in einen stratosphärischen Rücken, andere wiederum lösen sich dann auf, wenn auch der stratosphärische Trog schwächer wird. Bilden sich die Stürme vorderseitig eines stratosphärischen Rückens, so weisen sie oftmals eine zonalere Bewegungsrichtung und eine höhere Bewegungsgeschwindigkeit auf als Stürme, die trogvorderseitig entstehen.

Nach Anwendung der PTE auf die Stürme, trägt die Stratosphäre mit 15,53% bei Sturm 40 zum Druckfall am Boden bei. Demnach wird erwartet, dass sich Sturm 40 in einem Bereich negativer Geopotentialtendenzen bewegt. Nach Abbildung 43a, dargestellt ist die Geopotentialtendenz in 50 hPa bezüglich Sturm 40, befindet sich Sturm 40 befindet sich während der Entstehungsphasen und der weiteren Entwicklung inklusive rascher Vertiefung in Bereichen, wechselnd starker, negativer Geopotentialtendenz. Erst während der Auflösungsphase ist auch die Tendenz weitgehend schwächer. Die PTE-Analyse (siehe Abbildung 42a) zeigt dazu ein ebenso passendes Bild. Der Einfluss von $D\Phi$ ist während des starken Druckfalls zwar dauerhaft vorhanden, jedoch nicht sehr groß. Der größte Anteil wirkt zudem erst bei Druckanstieg.

Abbildung 43b stellt das Hovmöller-Diagramm der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 76 dar. Nach Anwendung der PTE trägt die Stratosphäre hier mit $-1,08\%$ zur bodennahen Druckentwicklung bei. Die Stratosphäre wirkt somit der Druckentwicklung entgegen, hat jedoch einen vernachlässigbaren Einfluss. Dies wird in Abbildung 42b, der PTE-Analyse, deutlich. Während des Druckfalls hat $D\Phi$ einen vernachlässigbar geringen Einfluss, welcher abwechselnd positiv und negativ ist. Während der Entstehungsphase und der stärkeren Vertiefung befindet sich Sturm 76 unter dem Einfluss hohen stratosphärischen Geopotentials. Die Tendenzen sind nicht hoch, während Entstehung und Vertiefung jedoch im leicht positiven Bereich. Während der Auflösungsphase gerät der Sturm sowohl in einen Bereich niedrigen Geopotentials, als auch in einen Bereich negativer Tendenzen.

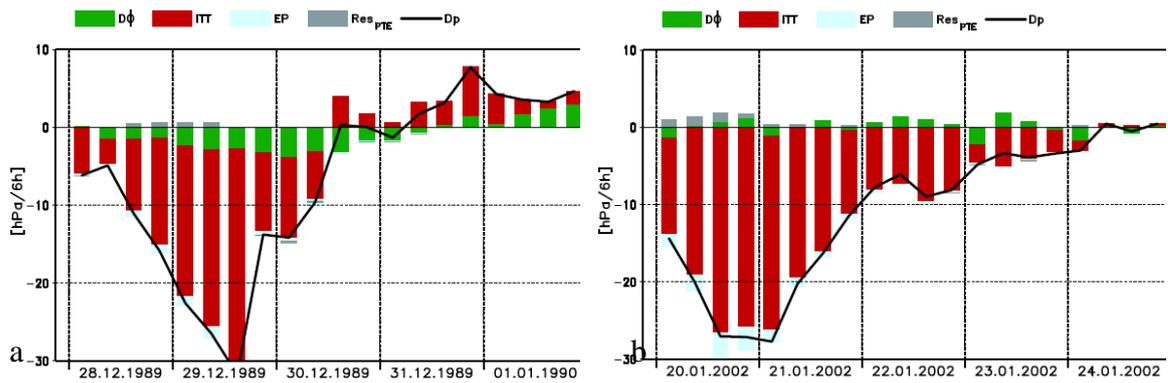


Abbildung 42: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 40 vom 28.12.1989 – 01.01.1990 und b) 76 vom 20.01. – 24.01.2002. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme

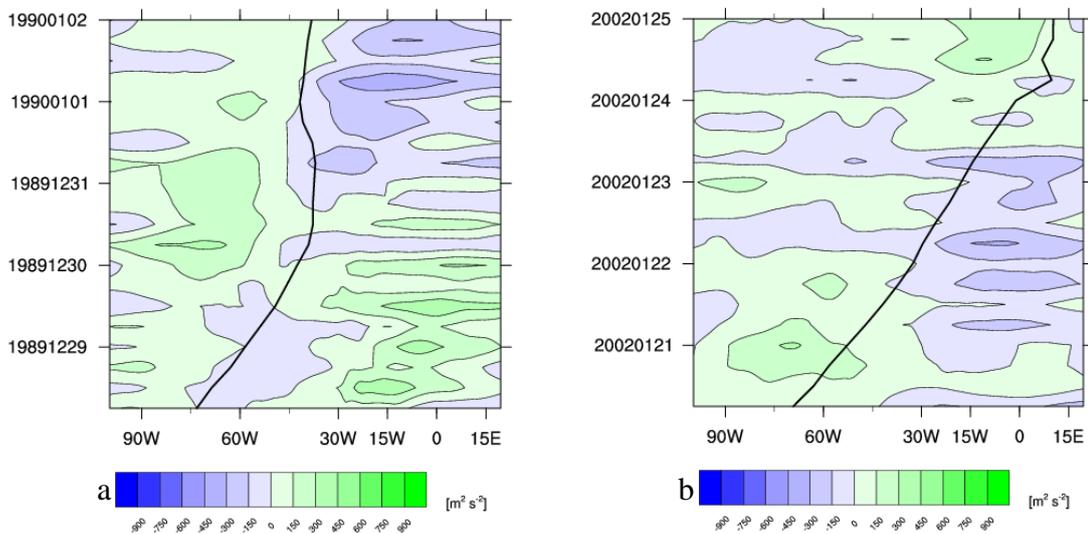


Abbildung 43: Hovmöller-Diagramme der Geopotentialtendenz in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 40 und b) Sturm 76. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms.

Durch Anomalien des Geopotentials, berechnet bezüglich der Klimatologie von 1979 bis 2015, werden dominierende Hintergrundmuster herausgefiltert. Außergewöhnliche, nicht dauerhaft auftretende Situationen in der Stratosphäre werden so sichtbar. Abbildung 44a und b stellen Anomalien bezüglich der Stürme 40 und 76 dar. Beide Bilder verdeutlichen die Abweichung des Geopotentials von der stratosphärischen Klimatologie. Dabei korrelieren Bereiche tieferen Geopotentials mit negativen Anomalien, Bereiche hohen Geopotentials mit positiven Anomalien. Das tiefe Geopotential in Abbildung 41a weist tiefere Werte als das klimatologische Geopotential auf, obwohl die Welle stationär ist. Die positiven Anomalien sind schwach ausgeprägt. Die Abweichungen des hohen Geopotentials von den klimatologischen Werten sind demnach nur gering. Bezüglich Sturm 76 sind sowohl die positiven als auch die

negativen Anomalien nur schwach ausgeprägt. Während der Lebenszeit dieses Sturmes trat in der Stratosphäre keine im Vergleich zur Klimatologie außergewöhnliche Situation auf.

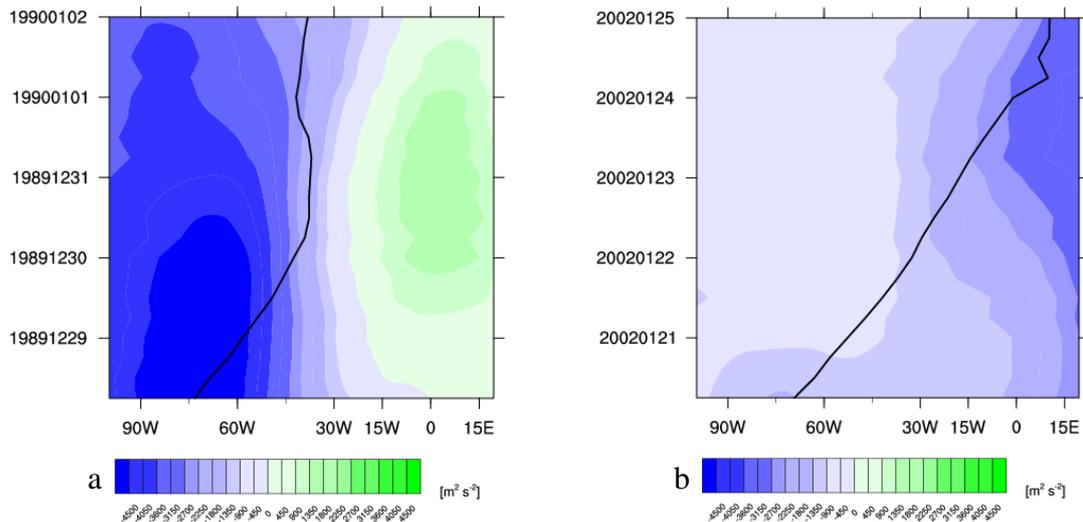


Abbildung 44: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 40 und b) Sturm 76. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms.

Von den 3 Stürmen, die nach Anwendung der PTE ein Entgegenwirken der Stratosphäre mit einem Beitrag kleiner – 10% erfahren, werden 2 zu dieser Familie gezählt. Von den 9 Stürmen mit einem stratosphärischen Beitrag größer als 50%, gehört einer zu dieser Familie. Auf diese wird nachfolgend näher eingegangen.

4.3.1 Stürme 60 und 81

Die Stürme 60 und 81 erfahren nach Anwendung der PTE mögliche Beiträge der Stratosphäre zur bodennahen Druckentwicklung von – 16,52% für Sturm 60 und – 21,97% für Sturm 81. Die Analysen sind dargestellt in Abbildung 45a und b. Bei beiden Stürmen wirkt die Stratosphäre dem Druckfall entgegen und auch bei beiden Stürmen weist $D\Phi$ zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls negative Anteile auf. Lediglich bei Sturm 60 hat $D\Phi$ zu zwei Zeitpunkten negative Werte. Zu Beginn des Druckfalls und in der Phase des Druckanstiegs. Die größten Werte von $D\Phi$ treten außerdem nach der stärksten Vertiefung auf.

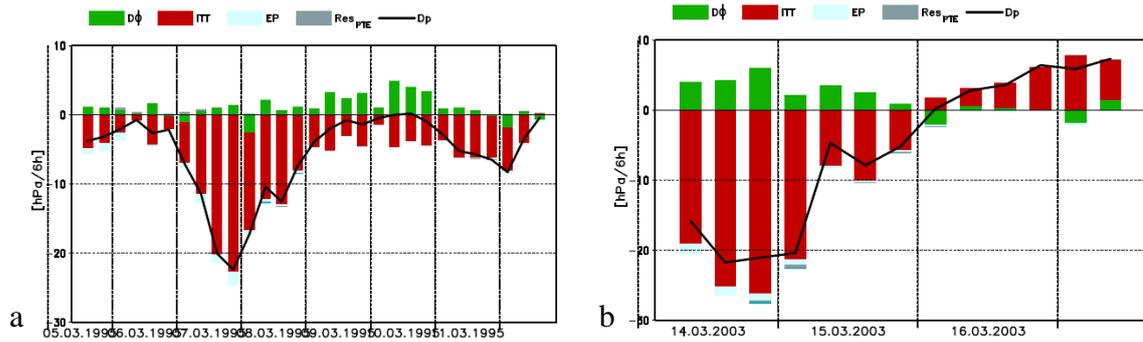


Abbildung 45: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 60 vom 05.03. – 12.03.1995 und b) 81 vom 14.03. – 17.03.2003. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (3) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme

In Abbildung 46a bis d ist die synoptische Situation der Stratosphäre abgebildet. Die Situation ist, wie bereits zuvor beschrieben, bezogen auf die Zeit der stärksten Vertiefung der beiden Stürme. Für Sturm 60 sind das vier Tage (06.03. – 09.03.1995), für Sturm 81 zwei (14.03. – 15.03.2003).

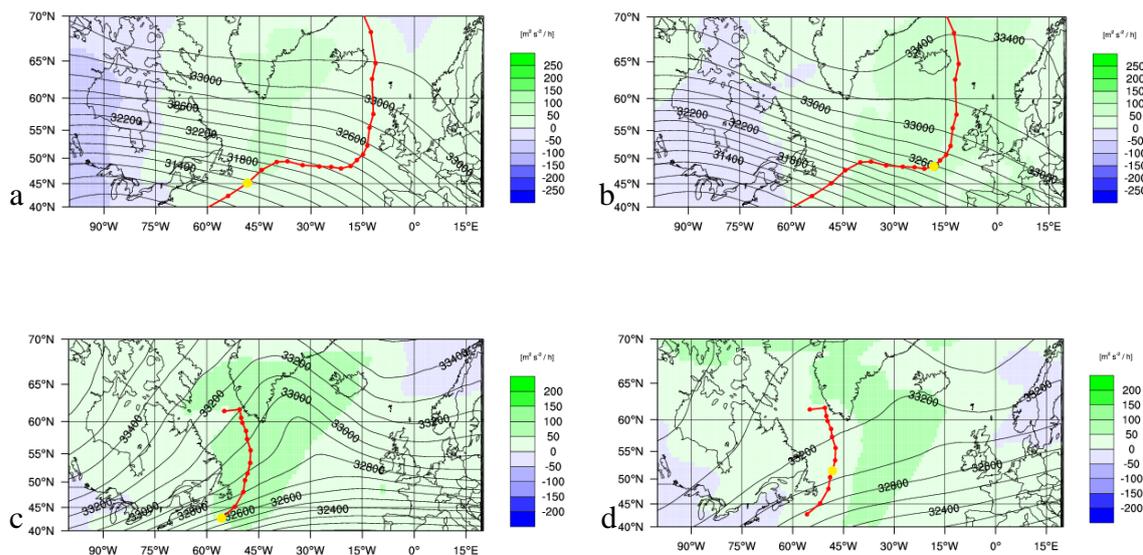


Abbildung 46: Synoptische Entwicklung von a) Sturm 60 und b) Sturm 81 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbig ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 06.03.1995, b: 09.03.1995 c: 14.03.2003, d: 15.03.2003, jeweils 12 UTC

Die Stürme 60 und 81 entstehen beide über dem Nordatlantik östlich der USA. Sturm 60 nimmt zuerst eine nordöstliche bis östliche Bewegungsrichtung an, bevor er südwestlich der Britischen Inseln seine Richtung ändert und gen Norden zieht. Sturm 60 löst sich schließlich im Osten Grönlands auf. Sturm 81 bewegt sich meridional nach Norden. Westlich der Südspitze Grönlands ändert der Sturm seine Bewegungsrichtung und zieht nach Westen. Die Auflösung des Sturms findet kurze Zeit später statt. Die

beiden Stürme befinden sich während ihrer gesamten Lebenszeit über dem Nordatlantik. So auch während der starken Vertiefungsphase. Sturm 60 entsteht und entwickelt sich vorderseitig eines stratosphärischen Rückens in 50 hPa, Sturm 81 vorderseitig eines Troges. In der Troposphäre findet sich an Stelle des stratosphärischen Rückens ein Trog, an Stelle des stratosphärischen Trogs ein Rücken. Bezüglich Sturm 81 haben dann andere troposphärische Effekte wie diabatische Effekte, starke Vertikalbewegungen oder auch Temperaturadvektion einen anderen Grund als einen starken Trog, um dazu beizutragen, dass sich Sturm 81 zu einem intensiven Wintersturm entwickelt.

Die Position der Stürme wird dem Ergebnis der PTE-Analyse zufolge in einem Feld positiver Geopotentialtendenz erwartet. Diese Erwartung trifft bei beiden Stürmen zu. Sturm 81 befindet sich zum Ende der Vertiefungsphase hin jedoch in einem Feld leicht negativer Tendenz. Sturm 60 bewegt sich mit dem Feld positiver Tendenzen rückenvorderseitig in 50 hPa mit. Sturm 81 bewegt sich aufgrund der starken meridionalen Bewegungsrichtung nicht mit dem positiven Geopotentialtendenzfeld mit.

Abbildung 47a und c zeigen Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeiten der Stürme 60 und 81. Abbildung 47b und d zeigen Hovmöller-Diagramme der Geopotentialtendenzen in 50 hPa. Sturm 60 entsteht im Bereich tiefen Geopotentials und zieht während der Vertiefungsphase in hohes Geopotential. Auffallend an der tiefen Geopotentialwelle ist, dass diese zuerst stationär ist, dann plötzlich eine retrograde Bewegung aufnimmt und schließlich wieder stationäre Züge annimmt. Während der gesamten Lebenszeit befindet sich Sturm 60 in Feldern positiver Geopotentialtendenz. Dies konnte auch in der synoptischen Situation ausgemacht werden. Sturm 81 entsteht in einem Bereich leicht positiven Geopotentials und bewegt sich meridional im Bereich der Gradienten zwischen hohem und tiefem Geopotential, befindet sich jedoch immer im Bereich positiven Geopotentials. Auch die Tendenzen sind weitgehend positiv entlang der Zugbahn des Sturms. Doch, wie auch bereits in der synoptischen Situation bemerkt, durchquert Sturm 81 zum Ende seiner Lebenszeit hin auch Felder negativer Geopotentialtendenz.

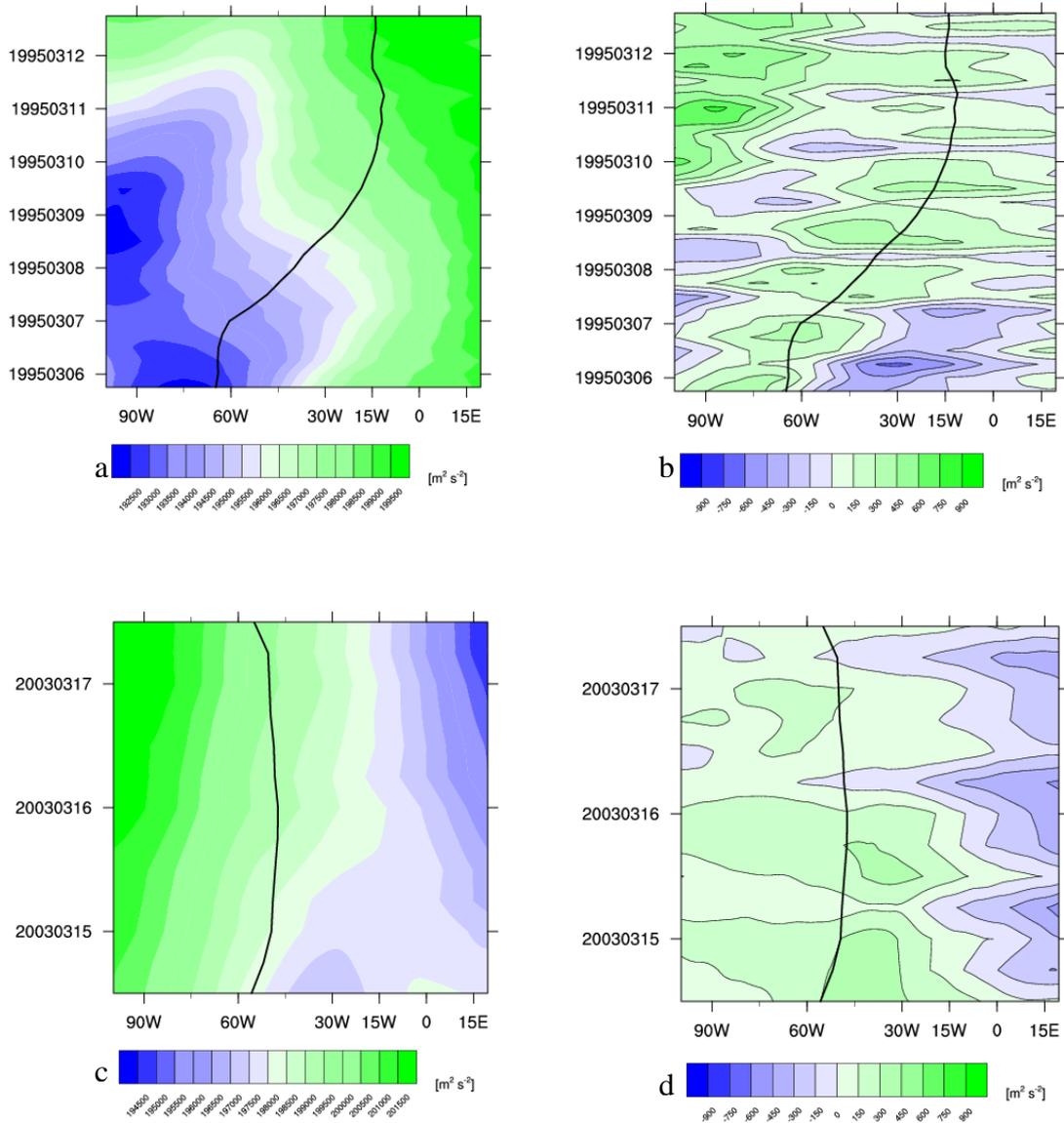


Abbildung 47: Hovmöller-Diagramme a und c) des absoluten Geopotentials sowie b und d) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von a, b) Sturm 60 und c, d) Sturm 81. Die Zugbahn der Stürme wird durch die schwarzen Linien dargestellt.

Die stratosphärischen Wellen bezüglich beider Stürme sind stationär und weisen damit keine oder vernachlässigbar kleine Phasengeschwindigkeiten auf. Sturm 60 bewegt sich in sechs Tagen um etwa 47° von 62° W bis 15° W. Der Sturm hat damit eine Geschwindigkeit von 21 km/h. Sturm 81 dagegen bewegt sich im Mittel über drei Tage nicht. Der Sturm bewegt sich meridional gen Norden von 58° W bis 58° W. Dazwischen weist der Sturm zwar geringe Geschwindigkeiten auf, diese sind jedoch sehr klein.

Abbildung 48a, die Anomalien des absoluten Geopotentials bezüglich Sturm 60, zeigt stark ausgeprägte negative Anomalien. Das tiefe Geopotential, in welchem Sturm 60

sich bildet, weist neben stationären auch leicht mobile Eigenschaften auf. Diese Welle entspricht nicht dem gewöhnlichen stratosphärischen Muster. Ein Grund kann dabei sein, dass die Welle anfangs stationär ist, dann plötzlich retrograd mobil und schließlich wieder stationär wird. Positive Anomalien sind sehr schwach ausgeprägt. Die stationäre Welle hohen Geopotentials weicht demnach nicht oder nur kaum von der Klimatologie ab. Bezüglich Sturm 81 sind sowohl negative als auch positive Anomalien relativ stark ausgeprägt (siehe Abbildung 48b). Obwohl beide Wellen stationär sind, weichen sie dennoch vom erwarteten Muster ab.

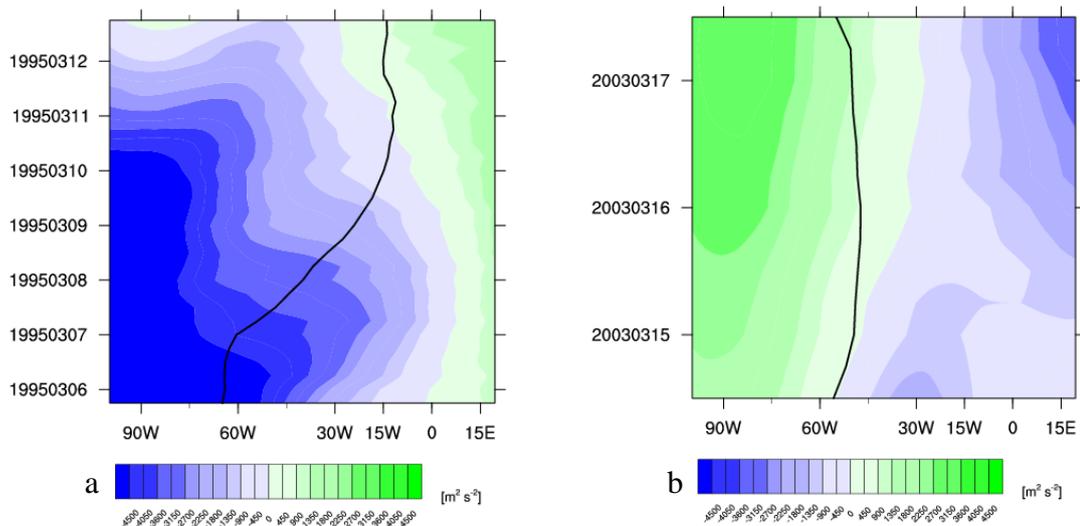


Abbildung 48: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 60 und b) Sturm 81. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms.

Als ergänzende Darstellung zu den Geopotentialtendenzen wird wieder der Meridionalwind in 50 hPa betrachtet. Dieser ist für die beiden Stürme in Abbildung 49a und c zu finden. Der Südwind rückseitig des Rückens östlich von Sturm 60 (Abbildung 49a), welcher in der synoptischen Situation bei etwa 10° W zu finden ist, ist hier nur schwach ausgeprägt. Der Herantransport kälterer Luft führt zu einer Hebung der Tropopause. Dies wiederum wirkt dem bodennahen Druckfall entgegen. Durch die schwache Ausprägung, ist der thermische Effekt der Stratosphäre auf die Druckentwicklung nicht sehr groß. Auch die Anomalie des Meridionalwinds in Abbildung 49b weist entsprechend kleine Werte auf. Die Situation des Meridionalwinds bezüglich Sturm 60 weicht kaum von der stratosphärischen Klimatologie ab.

In Abbildung 49c ist die stationäre Welle zu Sturm 81 zu erkennen. Durch die Lage der Geopotentialtendenzen auf den Gradienten des Meridionalwinds, ist diese Abbildung

der Abbildung 47d ähnlich. Obwohl die Meridionalwinde vergleichsweise geringe Geschwindigkeiten aufweisen und nur ein kleines, lokales Maximum von über 50 km/h, sind die negativen Anomalien des Meridionalwinds bezüglich Sturm 81 (Abbildung 49d) doch relativ stark ausgeprägt.

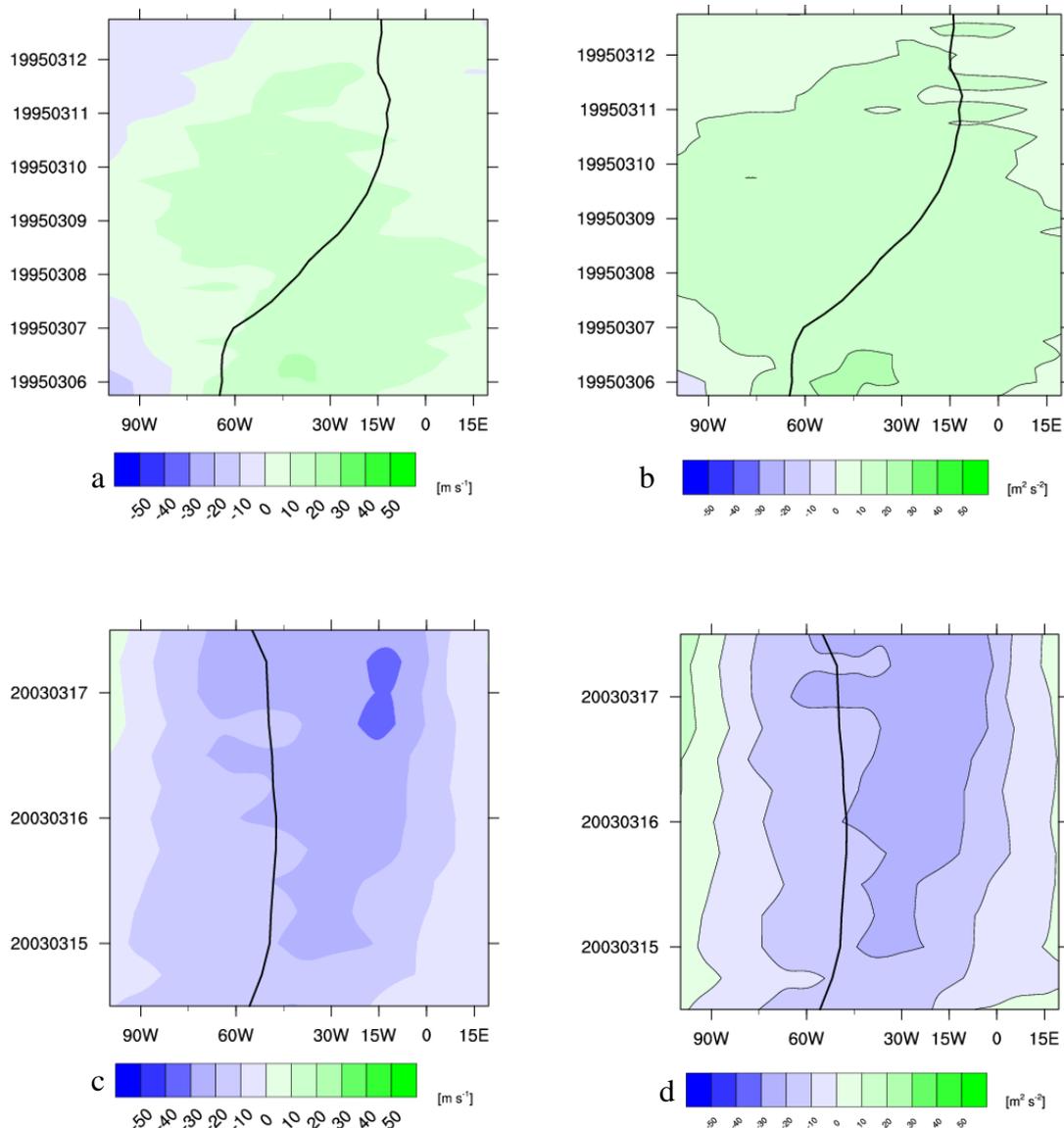


Abbildung 49: Hovmöller-Diagramme des Meridionalwinds von a) Sturm 60 und c) Sturm 81 und der Anomalie des Meridionalwinds von b) Sturm 60 und d) Sturm 81 in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit der Stürme. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen.

Der Blick auf die Hovmöller-Diagramme des Geopotentials in 50 hPa für die gesamte Nordhemisphäre (Abbildung 50a und b) der Stürme 60 und 81 zeigt noch einmal, wenn auch nicht sehr deutlich, dass Sturm 60 nicht richtig in Phase ist mit den Geopotentialwellen. Der Sturm entsteht in tiefem Geopotential, wandert aber rasch in eine Phase höheren Geopotentials. Sturm 81 befindet sich während seiner gesamten

Lebenszeit im Bereich der Gradienten zwischen hohem und tiefem Geopotential. Die Lage des Sturms zwischen beiden Wellen, mit Tendenz zum höheren Geopotential, ist auch hier ersichtlich.

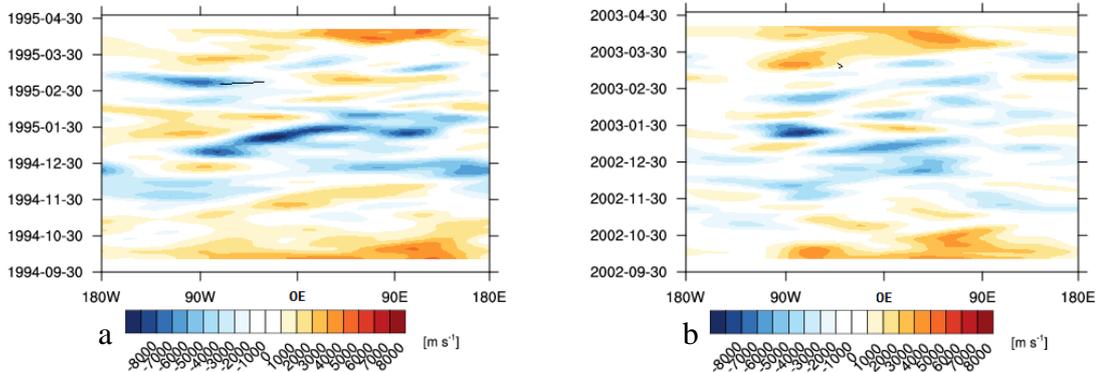


Abbildung 50: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0°N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen der jeweiligen Stürme 60 und 81.

4.3.2 Sturm 58

Sturm 58 unterscheidet sich von den anderen, in dieser Familie näher betrachteten Stürme darin, dass die Stratosphäre hier zum Druckfall beiträgt. Nach Anwendung der PTE übt die Stratosphäre während der Vertiefungsphase einen Beitrag zur Druckentwicklung von 58,17% auf Sturm 58 aus. Dargestellt ist dies in der PTE-Analyse in Abbildung 51.

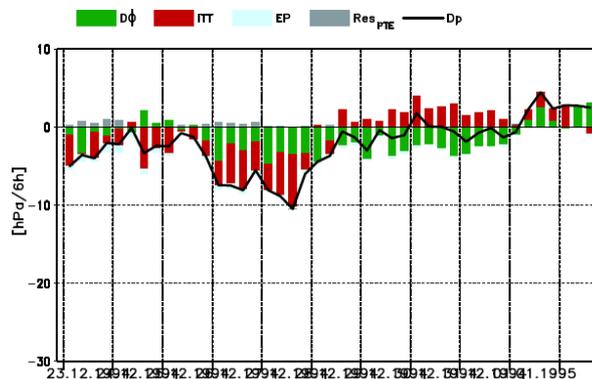


Abbildung 51: Ergebnis der PTE-Analyse von Sturm 58 vom 23.12.1994 – 02.01.1995. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme.

Die Stratosphäre trägt deutlich und während der gesamten Vertiefungsphase zum Druckfall bei. Vergleicht man die Balken miteinander, so ist der stratosphärische Einfluss auf die Druckentwicklung ähnlich groß wie der Beitrag troposphärischer Effekte wie Temperaturadvektion oder Vertikalbewegungen, durch den roten Balken dargestellt.

Abbildung 52a und b zeigen die stratosphärische synoptische Situation während des Zeitraums der stärksten Vertiefung. Bezüglich Sturm 58 findet diese über vier Tage statt (25.12. - 28.12.1994).

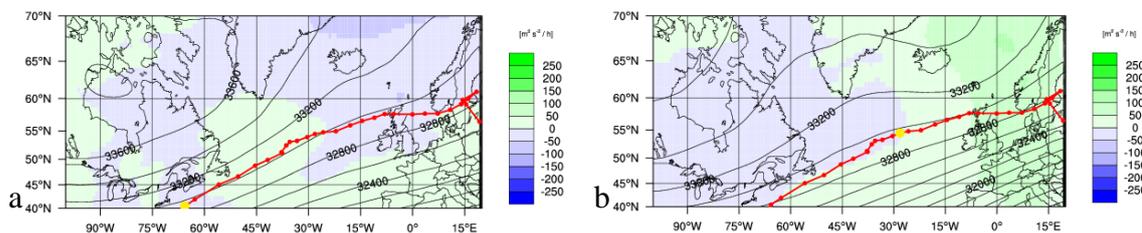


Abbildung 52: Synoptische Entwicklung von Sturm 96 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbig ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 24.12.2008, b: 26.12.2008, jeweils 12 UTC

Sturm 58 entsteht östlich der USA über dem Nordatlantik, vorderseitig eines stratosphärischen Troges. Er überquert mit nordöstlicher Richtung den Nordatlantik und zieht nördlich der Britischen Inseln entlang auf das europäische Festland zu. Dort löst er sich schließlich bei Erreichen des skandinavischen Festlands auf. Während der starken Vertiefungsphase befindet sich der Sturm über dem Nordatlantik.

Dem Ergebnis der PTE-Analyse nach, trägt die Stratosphäre hier deutlich zum Druckfall bei. Erwartet wird die Position von Sturm 58 demnach in einem Feld negativer Geopotentialtendenz. Dies trifft auch zu. Sturm 58 bewegt sich zwar mit dem Feld negativer Tendenzen mit, befindet sich jedoch zum Ende der starken Vertiefungsphase hin am Übergangsbereich von negativen zu positiven Geopotentialtendenzen.

Abbildung 53a und b zeigen das absolute Geopotential und die Geopotentialtendenz in 50 hPa bezüglich Sturm 58. Der Sturm entsteht und entwickelt sich im Bereich einer Welle hohen Geopotentials. Diese Welle ist stationär. Der Sturm zieht mit nordöstlicher Richtung unter der Geopotentialwelle hinweg und gelangt im Folgenden in den Bereich

einer Welle tiefen Geopotentials. Während der stärksten Vertiefungsphase befindet sich Sturm 58 unter dem Einfluss der Welle hohen Geopotentials. Der Sturm ist hierbei nicht in Phase mit stratosphärischen Trögen und Rücken.

Bei Betrachtung des Hovmöller-Diagramms der Geopotentialtendenz (Abbildung 53b) wird deutlich, dass sich Sturm 58 anfangs noch in einem Feld positiver Tendenzen befindet. Erst zu Beginn des starken Druckfalls gerät der Sturm in Bereiche negativer Tendenzen, was angesichts des starken Beitrags zum Druckfall so auch zu erwarten ist.

Trog und Rücken in Abbildung 53a sind stationär und weisen somit keine oder nur vernachlässigbar geringe Phasengeschwindigkeiten auf. Sturm 58 bewegt sich in elf Tagen um 96° von 76° W nach 20° O. Der Sturm bewegt sich demnach mit einer Geschwindigkeit von 23 km/h.

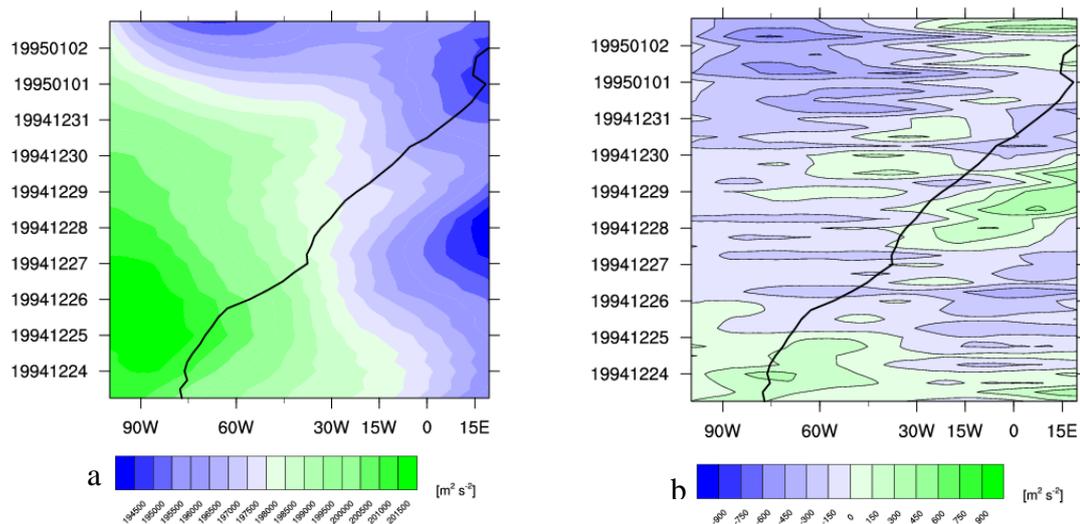


Abbildung 53: Hovmöller-Diagramme a) des absoluten Geopotentials sowie b) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von Sturm 58. Die Zugbahn des Sturms wird durch die schwarzen Linien dargestellt.

In Abbildung 54 sind die Anomalien des absoluten Geopotentials dargestellt. Sowohl positive als auch negative Anomalien sind hier stark ausgeprägt. Demnach weichen sowohl die stationäre Welle hohen Geopotentials als auch die ebenfalls stationäre Welle tiefen Geopotentials von der Klimatologie ab.

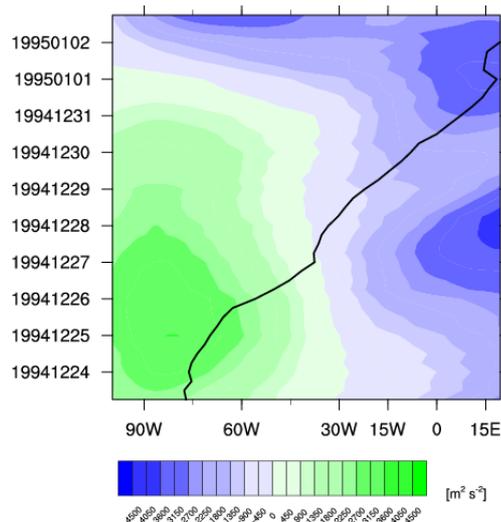


Abbildung 54: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von Sturm 58. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms.

In Abbildung 55a ist der Meridionalwind in 50 hPa bezüglich Sturm 58 dargestellt. Durch die Lage der Geopotentialtendenzen auf den Gradienten des Windes, wird hier nochmals die Lage des Sturms überwiegend in Bereichen negativer Geopotentialtendenzen deutlich. Die Meridionalwinde in 50 hPa weisen eher schwache, lokal aber auch hohe Geschwindigkeiten auf. Entsprechend stark sind auch die Anomalien in Abbildung 55b ausgeprägt. Wobei hier die positiven Anomalien auffallen, welche mit dem nur schwach auftretenden Südwind korrelieren. Dieser weicht demnach recht deutlich von der stratosphärischen Klimatologie ab. Der überwiegend im Bereich des Sturms auftretende Nordwind transportiert wärmere Luftmassen heran. Dadurch dehnt sich die stratosphärische Luftsäule aus, senkt die Tropopause ab und sorgt so für einen Druckfall am Boden. Der deutliche Beitrag der Stratosphäre zum bodennahen Druckfall ist hier durchaus zu einem großen Teil thermisch motiviert.

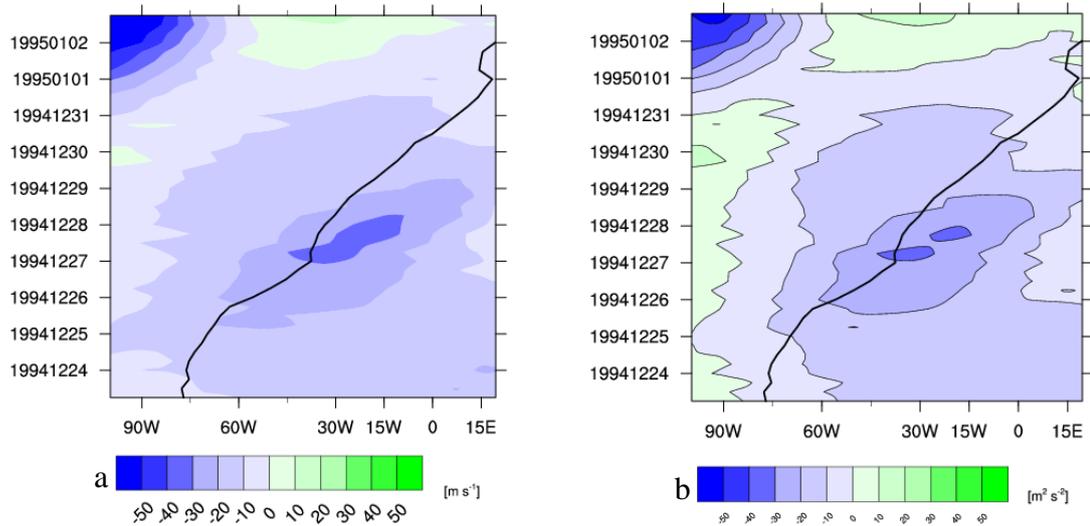


Abbildung 55: Hovmöller-Diagramme des Meridionalwinds von Sturm 58 und der Anomalie des Meridionalwinds in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit des Sturms. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen.

Bei der Betrachtung des gefilterten Hovmöller-Diagramms der gesamten Nordhemisphäre in Abbildung 56, wird noch einmal die Lage des Sturms in hohem Druck, zum Ende der Lebenszeit in tiefem Druck deutlich. Auch hier die Tatsache zu erkennen, dass der Sturm mit den Wellen nicht in Phase ist.

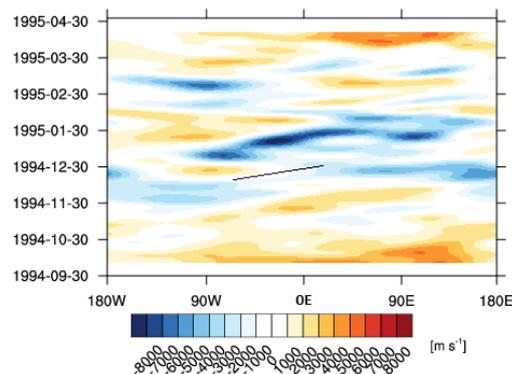


Abbildung 56: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0° N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen von Sturm 58.

4.3.3 Interpretation

Wie eingangs durch Betrachtung der stratosphärischen Klimatologie festgestellt, sind stationäre Wellen keine Seltenheit. Bei den betrachteten Fällen bilden diese jedoch nicht die Mehrheit. Von den 94 betrachteten Fällen, werden 35 Stürme der Familie der stationären Wellen zugeordnet.

Die Stürme dieser Familie sind im Allgemeinen nicht in Phase mit der Geopotentialwelle der Stratosphäre in 50 hPa. Da die Wellen stationär sind, weisen die Stürme eine deutlich größere Bewegungsgeschwindigkeit auf. Sie bewegen sich oft unter den Wellen hindurch und gelangen so im Allgemeinen in den Einfluss von hohem und tiefem Geopotential. Die Stürme entstehen und entwickeln sich nahezu gleichermaßen in Bereichen tiefen oder hohen Geopotentials und lösen sich in entsprechend entgegengesetztem Geopotential auf.

Auch hier erfährt der überwiegende Teil der Stürme dieser Familie einen positiven Beitrag durch die Stratosphäre, gekennzeichnet durch den Anteil von $D\Phi$ in der PTE-Analyse. Ein sehr starker Beitrag zum Druckfall mit über 50% ist jedoch nur bei einem Sturm gegeben. In diese Familie fallen zudem auch einige Stürme mit negativem Beitrag von $D\Phi$ zur Druckentwicklung.

Bei Beispielsturm 40 hat $D\Phi$ einen Anteil von 15,53%. Der Einfluss der Stratosphäre ist am größten während des starken Druckfalls. Die Stratosphäre trägt, wie der prozentuale Anteil bereits aussagt, zwar zur Druckverringern bei, jedoch erfolgt der Hauptanteil durch andere, troposphärische Effekte, wie diabatische Effekte, Temperaturadvektion oder Vertikalbewegungen. Bei Beispielsturm 76 ist der Beitrag der Stratosphäre mit - 1,08% vernachlässigbar klein. In der PTE-Analyse wird deutlich, dass die Stratosphäre dem Druckfall auch immer wieder entgegen wirkt. Somit ist diese bei diesem Sturm nicht verantwortlich für den starken Druckfall.

Von den 3 näher betrachteten Stürmen, welche einen negativen Beitrag von weniger als - 10% von $D\Phi$ erfahren, werden 2 zu dieser Familie gezählt. Bei allen ist in der PTE-Analyse auch deutlich das Entgegenwirken von $D\Phi$ zum Druckfall zu erkennen. Bei Sturm 60 taucht der größte Beitrag jedoch erst unmittelbar nach dem raschen Druckfall, also bei Druckanstieg, auf. In diesem Fall kann die Stratosphäre zum Druckanstieg beigetragen haben. Bei Sturm 81 ist der größte Beitrag von $D\Phi$ während des starken Druckfalls zu finden. Sturm 58 erfährt einen Beitrag von 58,17% von $D\Phi$. Der größte Beitrag findet auch tatsächlich während des starken Druckfalls statt, so dass hier ein Einfluss der Stratosphäre auf die Druckentwicklung angenommen werden kann. Durch den ausgeprägten Nordwind, welcher wärmere Luft aus der polaren Region herantransportiert, kann der starke Stratosphäreneinfluss zu einem großen Teil durch thermische Effekte motiviert sein.

Auch hier tritt die Mehrheit der Stürme dieser Familie während eines positiven NAO-Index auf. Dieser begünstigt die Entstehung und Entwicklung intensiver Winterstürme über dem Nordatlantik. Es wird im Allgemeinen sogar ein positiver NAO-Index erwartet.

Es kann keine genaue Aussage gemacht werden bezüglich der Einwirkung der Stratosphäre auf die Entwicklung von intensiven Zyklonen. Bei einigen ist ein Beitrag zum Druckanstieg deutlich gegeben, jedoch ist es ohne tiefergehende Untersuchungen nicht möglich, eine Aussage darüber zu machen, ob der Einfluss der Stratosphäre wirksam ist, denn es ist unklar, ob der Bodendruck ohne diesen Einfluss noch geringer wäre, oder ob dieser sich genau so entwickelt hätte. Des Weiteren ist nur bei einem der Stürme der Anteil von $D\Phi$ größer als 50%, so dass die troposphärischen Effekte wie diabatische Effekte, Vertikalbewegungen oder Temperaturadvektionen den Einfluss auf die Druckentwicklung dominieren. Lediglich bei Sturm 58 dominiert nach der PTE-Analyse der stratosphärische Einfluss die Druckentwicklung, so dass hier auch tatsächlich ein Einfluss der Stratosphäre auf den Sturm angenommen werden kann. Allerdings ist auch hier der NAO-Index im Allgemeinen bei den betrachteten Stürmen positiv. Eine Aussage bezüglich eines direkten Einflusses der Stratosphäre auf einzelne Zyklonen in dieser Form ist auch hier noch nicht möglich. Es kann hier nicht unterschieden werden, ob die Stratosphäre die weitere Entwicklung der Stürme direkt begünstigt oder indirekt durch den ohnehin schon vorhandene NAO-Index.

4.4 Familie „Rückläufige Wellen“

Als rückläufige Welle werden nachfolgend Wellen bezeichnet, die eine westwärts gerichtete Bewegung aufweisen. Dieser Fall tritt eher selten auf. In diese Familie fallen aus den betrachteten 94 Stürmen lediglich 3. Dies entspricht einem Anteil von 3,18%. In der Stratosphäre sind im Winter hauptsächlich Westwinde vorherrschend. Durch diese starken Winde bewegen sich die Geopotentialwellen im Allgemeinen Richtung Osten. Eine retrograde Bewegung kann dabei, wie in der Troposphäre auch, bei Überschreitung einer kritischen Wellenlänge zustande kommen, oder aber durch den von in der Stratosphäre brechenden Wellen aus der Troposphäre ausgehenden Impulsübertrag. Sie treten daher in den betrachteten Fällen selten auf.

Als Beispiel für diese Familie ist in Abbildung 57 das Geopotential in 50 hPa während der Lebenszeit von Sturm 95 als Hovmöller-Diagramm dargestellt. Die schwarze Linie zeigt die Zugbahn des Sturms. Sturm 95 existiert vom 20.12.2008 bis zum 24.12.2008. Die Phase der stärksten Vertiefung dauert zwei Tage, vom 20.12. bis 21.12.2008.

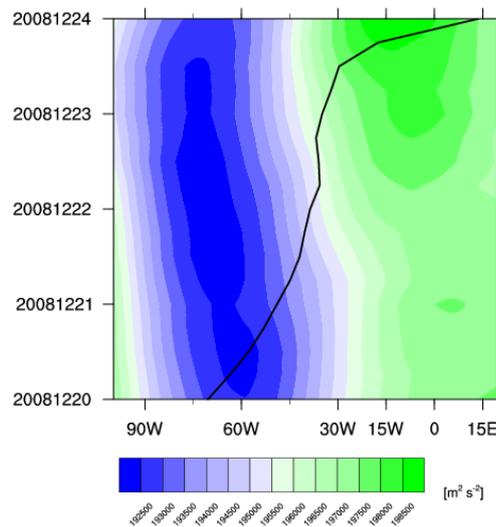


Abbildung 57: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von Sturm 95. Die schwarze Linie zeigt die Zugbahn des Sturms.

In dieser Familie befinden sich die Stürme alle vorderseitig eines stratosphärischen Troges in 50 hPa. Sie entstehen und entwickeln sich alle im Bereich tiefen Geopotentials und ziehen im weiteren Verlauf in Gebiete hohen Geopotentials. Dort findet auch die Auflösung der Stürme statt.

Die Stürme dieser Familie sind im Allgemeinen nicht in Phase mit den Geopotentialwellen. Sie weisen eine entgegengesetzte Bewegungsrichtung im Vergleich zur Geopotentialwelle auf. Damit durchlaufen sie die Wellen. Die Phase der stärksten Vertiefung erleben die Stürme im Bereich des tiefen Geopotentials, die Auflösung im Bereich hohen Geopotentials. Die Stürme weisen eine eher zonale Bewegungsrichtung auf.

Nach Anwendung der PTE auf die Stürme (Abbildung 58), trägt die Stratosphäre mit 3,90% bei Sturm 95 zum Druckfall am Boden bei. Der Beitrag ist zwar vernachlässigbar klein, dennoch wird erwartet, dass sich der Sturm in einem Bereich negativer Geopotentialtendenzen bewegt. In Abbildung 59 ist die Geopotentialtendenz in 50 hPa bezüglich Sturm 95 dargestellt. Während der Entstehungsphasen befindet sich Sturm 95

noch im Bereich leicht negativer Geopotentialtendenzen. Bereits im Laufe der stärksten Vertiefung gerät der Sturm jedoch in einen Bereich positiver Tendenzen.

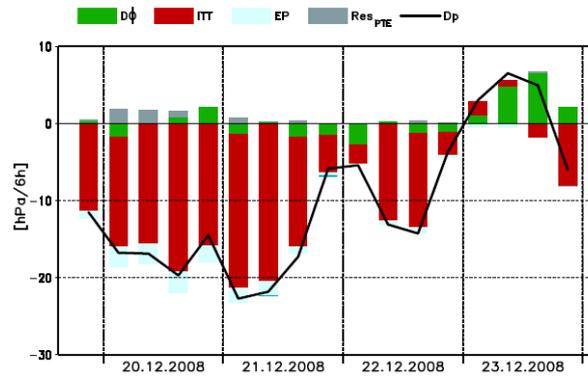


Abbildung 58: Ergebnis der PTE-Analyse von Sturm 95 vom 19.12. – 23.12.2008. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung des Sturms.

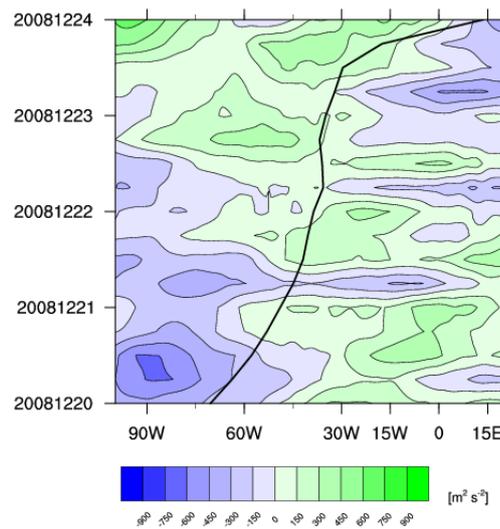


Abbildung 59: Hovmöller-Diagramm der Geopotentialtendenz in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von Sturm 95. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des Sturms.

Die Anomalien des Geopotentials bezüglich der Klimatologie von 1979 bis 2015 in Abbildung 60, lassen auf Abweichungen von gewöhnlichen stratosphärischen Muster schließen. Tiefes Geopotential ist mit negativen Anomalien, hohes Geopotential mit positiven Anomalien verbunden. Die negativen Anomalien sind stark ausgeprägt. Die retrograde Welle tiefen Geopotentials (Abbildung 57) weicht demnach stark von der stratosphärischen Klimatologie ab und wird im Allgemeinen so nicht erwartet. Positive Anomalien treten dagegen nahezu gar nicht auf. Die Abweichungen der Wellen hohen Geopotentials von der Klimatologie sind vernachlässigbar klein. Diese

Geopotentialwelle kann als eher stationär betrachtet werden, während der Trog gen Westen mobil ist.

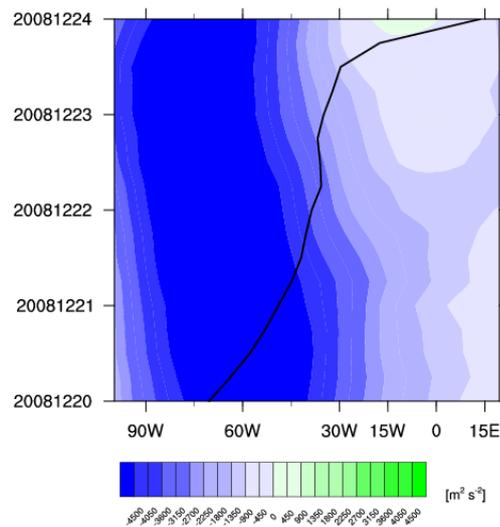


Abbildung 60: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von Sturm 95. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms.

Zu dieser Familie wird keiner der 12 Stürme, welche einen starken stratosphärischen Beitrag zur Druckentwicklung von mehr als 50% oder weniger als - 10% erwarten, gezählt.

4.4.1 Interpretation

Retrograde Wellen treten in der Stratosphäre, vor allem im Winterhalbjahr, aufgrund der starken Westwinde nur selten auf. Von den 94 betrachteten Fällen, tritt diese Situation lediglich dreimal auf. Auf den hier als Beispiel betrachteten Sturm 95 hat die Stratosphäre einen möglichen Einfluss auf die bodennahe Druckentwicklung von 3,90%. Dieser Einfluss ist vernachlässigbar klein. Auf die anderen beiden Stürme, die in diese Familie gezählt werden, hat die Stratosphäre nach Berechnungen mit der PTE einen Einfluss von - 6,92% auf Sturm 05 sowie 32,42% auf Sturm 62. Im ersten Fall wirkt die Stratosphäre dem Druckfall entgegen, ebenfalls mit eher geringem Beitrag. Im Fall von Sturm 62 weist die Stratosphäre einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluss auf die Druckentwicklung auf. Bezugnehmend auf die Ergebnisse der PTE-Berechnung ist in dieser Familie keine Regel festzumachen.

Die Stürme sind in alle drei Fällen nicht in Phase mit den Wellen. Die Stürme weisen eine ostwärts gerichtete Bewegung auf, die Wellen jeweils eine westwärts gerichtete. Die Stürme laufen demnach unter den Wellen durch und bewegen sich nicht mit ihnen mit.

Stürme dieser Familie erfahren eher zufällig einen Einfluss durch die Stratosphäre. Der Einfluss troposphärischer Faktoren wie diabatische Effekte, Vertikalbewegungen und Temperaturadvektion überwiegt die anderen Effekte und führt zu der explosiven Druckverringerung dieser Stürme.

5 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, einen direkten Einfluss der Stratosphäre, beziehungsweise stratosphärischer Wellen auf einzelne Zyklonen zu quantifizieren. Dazu wurden die 100 intensivsten Zyklonen, welche in den Jahren 1979 bis 2015 im Bereich des Nordatlantiks auftraten, näher untersucht. Da intensive Zyklonen in diesem Gebiet vorwiegend im Winter auftreten, wurde sich auf die jeweiligen Winterhalbjahre des betrachteten Zeitraums beschränkt. Das Untersuchungsgebiet bezog sich auf die Nordhemisphäre mit einer geographischen Länge von 100° W bis 20° O und einer geographischen Breite von 40° N bis 70° N. Für die genauere Betrachtung einzelner Stürme wurde das geographische Gebiet an die jeweiligen Zugbahnen angepasst. Des Weiteren gab es Betrachtungen der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0° N bis 90° N, um die Stürme in die großräumige Situation einzuordnen. Verwendet wurden dazu hochaufgelöste Reanalysedaten (ERA-Interim Daten) des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF).

Um herauszufinden, wie groß der mögliche Einfluss der Stratosphäre auf die bodennahe Druckentwicklung der jeweiligen Stürme ist, wurde die von Knippertz et al. (2008) und Fink et al. (2012) modulierte Form der Drucktendenzgleichung (*Pressure Tendency Equation*, PTE) verwendet. Zur Berechnung flossen in diese Gleichung die 6-stündigen Tracks der jeweiligen Stürme mit ein. Mittels der so erhaltenen PTE-Analyse wurde der prozentuale Beitrag der Stratosphäre zur Bodendruckentwicklung berechnet. Die gegebenen Stürme wurden anhand dieses prozentualen Beitrags sortiert, um eine kleine Auswahl an Stürmen zu treffen, welche eingehender studiert wurden. Darunter fielen 9 Stürme, deren Beitrag der Stratosphäre zur Druckentwicklung größer als 50% ist. Die Stratosphäre trägt damit nach der PTE-Analyse deutlich zum Druckfall am Boden bei. In die Auswahl wurden 3 weitere Stürme aufgenommen, deren Beitrag der Stratosphäre zum Druckfall weniger als – 10% beträgt. Hierbei wirkt die Stratosphäre dem Druckfall entgegen.

Um die Lage der Stürme in der synoptischen Situation der Stratosphäre zu bestimmen, wurde die synoptische Entwicklung in 50 hPa mit dem Programm NCL erstellt. Dabei wurde beurteilt, ob sich der jeweilige Sturm vorderseitig eines stratosphärischen Trogos oder Rückens befindet. Des Weiteren gaben diese Bilder eine erste Einschätzung zur Lage der Stürme bezüglich positiver oder negativer Geopotentialtendenzfelder. Dabei wurde die Position eines Sturmes in einem Feld negativer Tendenz erwartet, wenn die Stratosphäre zum Druckfall beiträgt. Andersherum wurde der Sturm im Feld positiver Tendenzen erwartet, wenn die Stratosphäre dem Druckfall entgegen wirkt.

Zur Identifikation stratosphärische Wellen und der Betrachtung dieser Wellen, welche der PTE-Analyse zufolge Einfluss auf die Stürme nehmen, wurden fünf unterschiedliche Arten von Hovmöller-Diagrammen erstellt, ebenfalls mit dem Programm NCL. Anhand von Hovmöller-Diagrammen des absoluten Geopotentials wurden die stratosphärischen Situationen und damit auch die betrachteten Stürme in Familien unterteilt, welche untereinander Ähnlichkeiten beispielsweise in den Eigenschaften der Wellen und der Lage der Stürme aufweisen. Unterteilt wurde in die drei Familien der mobilen Wellen, der stationären Wellen und der retrograden Wellen. Die Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials geben Aufschluss darüber, ob Sturm und Welle in Phase sind und wie sich Sturm und Welle in anderen Angelegenheiten zueinander verhalten.

Um die Vermutungen über die Position der Stürme bezüglich Felder positiver oder negativer Geopotentialtendenz zu bestätigen, wurden Hovmöller-Diagramme der Geopotentialtendenz in 50 hPa erstellt. Damit lassen sich Aussagen über die lokalzeitliche Änderung des absoluten Geopotentials treffen. Allerdings wird in der Stratosphäre das Geopotential zumeist von den Tendenzen der darunter befindlichen Level beeinflusst.

Mit Hovmöller-Diagrammen der Anomalie des Geopotentials können dominierende Hintergrundmuster entfernt und damit außergewöhnliche Situationen sichtbar gemacht werden. Die Anomalien zeigen demnach die Abweichungen der jeweiligen Situation von der stratosphärischen Klimatologie.

Als ergänzende Darstellung dienten Hovmöller-Diagramme des Meridionalwinds und auch dessen Anomalie. Aufgrund einer differentiellen Beziehung zueinander und der

daraus folgenden Phasenverschiebung, liegen die Geopotentialtendenzen auf den Gradienten des Meridionalwinds.

Für die Einordnung der betrachteten Systeme in die großräumige Wellenstruktur, wurden abschließend Hovmöller-Diagramme des Geopotentials für die gesamte Nordhemisphäre erstellt. Um hochfrequente zu unterdrücken, wurden diese gefiltert. Dies erfolgte durch einen 10-Tages-Tiefpassfilter, dem sogenannten Lanczos-Filter.

Es hat sich gezeigt, dass sich die Mehrzahl der Stürme vorderseitig stratosphärischer Rücken befindet. Die PTE betrachtet eine vertikale Luftsäule von der Troposphäre in die Stratosphäre. Wichtig für die Entwicklung der Stürme sind jedoch auch stratosphärische Ereignisse westlich der Stürme. Da die Druckzentren von Tröge und Rücken eine nach oben hin gen Westen geneigte Achse aufweisen, befindet sich an der Stelle des stratosphärischen Rückens in der Troposphäre ein starker Trog. Dieser wird durch den stratosphärischen Trog westlich des Rückens beeinflusst. So kann die Stratosphäre zum einen zum bodennahen Druckfall beitragen.

Zum anderen können auch thermische Effekte der Stratosphäre zum troposphärischen Druckfall beitragen. In der Stratosphäre sind die kältesten Temperaturen, im Gegensatz zur Troposphäre, im Bereich des Äquators zu finden. Die wärmsten Temperaturen treten in den polaren Regionen auf. So transportiert ein Nordwind, dargestellt durch die Meridionalwinde in 50 hPa, wärmere Luft heran. Dadurch dehnt sich die stratosphärische Luftsäule aus und sorgt für ein Absinken der Tropopause. Als eine Folge davon fällt der Druck am Boden. Ein Südwind weist eine umgekehrte Wirkung auf und wirkt einem bodennahen Druckfall entgegen. Ein Herantransport unterschiedlich temperierter Luftmassen kann eine dämpfende Wirkung auf bodennahe Druckänderungen haben.

Durch die Analyse der verschiedenen Stürme und der jeweiligen stratosphärischen Situation können drei Muster unterschieden werden. Im ersten Muster liegt kein zusammenhängendes Verhalten zwischen Stratosphäre und Troposphäre vor. Die Zyklogenese scheint dabei nur durch troposphärische Effekte wie diabatische Effekte, Vertikalbewegungen und Temperaturadvektion motiviert zu sein. Zyklone und stratosphärische Wellen sind nicht in Phase.

Das zweite Muster beinhaltet zwar ein kohärentes Verhalten der Stratosphäre, jedoch kein eindeutiges Phasenverhältnis zur Zyklone. Dies ist unter anderem in der Familie stationärer Wellen zu finden, besonders bezüglich Sturm 58. Die stratosphärischen Tröge und Rücken sind stationär. Der Sturm bewegt sich zonal gen Nordwesten und weist ein unklares Phasenverhältnis zu den stratosphärischen Wellen auf. Im Grunde ist Sturm 58 nicht in Phase mit den Wellen, stellenweise kann jedoch vermutet werden, dass Sturm und Welle für kurze Zeit in Phase sind. Der PTE-Analyse zufolge, hat die Stratosphäre einen großen Beitrag zur bodennahen Druckentwicklung. In solchen Fällen weist entweder die Stratosphäre ein dominantes Verhalten bezüglich der Druckentwicklung auf. Oder aber Vorgänge in der Troposphäre beeinflussen die Stratosphäre dahingehend, dass daraus folgende stratosphärische Muster in der PTE-Analyse als deutlicher Beitrag erscheinen.

Im dritten Muster ist sowohl ein kohärentes Verhalten in der Stratosphäre als auch eine deutliche Phasenbeziehung zwischen Sturm und stratosphärischer Welle zu finden. Dieses Muster ist häufig in der Familie der mobilen Wellen zu finden. Hierbei stellt sich jedoch die große Frage nach Ursache und Wirkung, welche so nicht genau beantwortet werden kann. Es ist so noch nicht möglich ist, genaue Aussagen darüber zu treffen, ob die Stratosphäre einzelne Zyklonen beeinflusst. Durch die Analyse der 12 Stürme, welche nach der PTE-Analyse den größten sowohl negativen als auch positiven Beitrag der Stratosphäre auf die bodennahe Druckentwicklung aufweisen sowie durch die Betrachtung mehrerer Beispielstürme der jeweiligen Familien, kann angenommen werden, dass die Stratosphäre einen Einfluss auf Zyklonen und die dazugehörige Druckentwicklung hat. Viele Stürme entstehen vorderseitig eines stratosphärischen Rückens, welcher an dessen Stelle in der Troposphäre einen starken Trog impliziert. Nur kann hier nicht die Frage beantwortet werden, ob die Stratosphäre den Trog beeinflusst und intensiviert, oder ob der troposphärische Trog mit einer Absenkung der Tropopause zu einer thermischen Kompensation führt und die gegebenen stratosphärischen Muster erzeugt. Des Weiteren kann ebenfalls nicht geklärt werden, ob die negativen Tendenzen, in deren Bereichen die Stürme, welche einen deutlichen Beitrag der Stratosphäre zum Druckfall der PTE-Analyse zufolge erwarten, zu finden sein sollen, durch die Stratosphäre selbst erzeugt werden oder durch die Hebung der Tropopause im Bereich des Warmsektors einer Zyklone. Einige Stürme entstehen jedoch auch vorderseitig eines stratosphärischen Trogs. In der Troposphäre befindet

sich an dessen Stelle ein Rücken, welcher eine weitere Entwicklung von Zyklonen bis hin zu intensiven Winterstürmen eigentlich verhindert. Hier müssen also andere Effekte für eine explosive Vertiefung sorgen. Ein Effekt könnte dabei die Stratosphäre sein.

Es gilt außerdem zu beachten, dass die meisten Stürme zu einem Zeitpunkt eines positiven NAO-Index auftreten. Dabei kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Einfluss der Stratosphäre indirekt über den NAO-Index erfolgt. Diese Vermutung über den Zusammenhang zwischen NAO-Index und stratosphärischem Polarwirbel besteht schon seit einiger Zeit und wurde in den Grundlagen näher erläutert.

Das Ziel dieser Arbeit, einen Einfluss der Stratosphäre auf einzelne Zyklonen zu quantifizieren, kann innerhalb dieser Studie nicht ausreichend beantwortet werden. Die Beantwortung dieser Frage benötigt weitergehender Studien. Dabei müssen die während der Lebenszeit der Winterstürme auftretenden stratosphärischen Muster genauer untersucht werden. Auch troposphärische Muster müssen in nachfolgende Studien eingebracht werden, um herauszufinden, in wie weit die Zyklonogenese durch troposphärische Effekte beeinflusst wird und in wie weit troposphärische und stratosphärische Wellenmuster korrelieren. Außerdem ist es wichtig, den genauen Zusammenhang zwischen Stratosphäre und NAO-Index zu untersuchen, um genauer spezifizieren zu können, ob der stratosphärische Einfluss direkt oder indirekt auf einzelne Zyklonen erfolgt.

Literaturverzeichnis

Baldwin, M. & Dunkerton, T., 2001. Stratospheric Harbringers of Anomalous Weather Regimes. *Science*.

Baldwin, M. et al., 2003. Weather from the Stratosphere. *Science*.

Black, R., 2002. Stratospheric Forcing of Surface Climate in the Arctic Oscillation. *Journal of Climate*.

Colucci, S., 2010. Stratospheric Influences on Tropospheric Weather Systems. *Journal of the Atmospheric Sciences*.

Dee, D. et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.

Donat, M., Leckebusch, G., Pinto, J. & Ulbrich, U., 2010. Examination of wind storms over Central Europe with respect to circulation weather types and NAO phases. *Royal Meteorological Society*.

Duchon, C., 1979. Lanczos-Filtering in One and Two Dimensions. *Journal of Applied Meteorology*.

Fink, A., Pohle, S., Pinto, J. & Knippertz, P., 2012. Diagnosing the influence of diabatic processes on the explosive deepening of extratropical cyclones. *Geophysical Research Letters*.

Glatt, I., 2012. *Automatische objektive Identifikation und Berechnung der Eigenschaften von Rossbywellenzügen*. s.l.:s.n.

Gomara, I. et al., 2014. Rossby wave-breaking analysis of explosive cyclones in the Euro-Atlantic sector. *Royal Meteorological Society*.

Hartley, D., Villarin, J., Black, R. & Davis, C., 1998. A new perspective on the dynamical link between the stratosphere and troposphere. *Nature*.

Kidston, J. et al., 2015. Stratospheric Influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nature geoscience*.

Knippertz, P., Fink, A. & Pohle, S., 2008. Reply. *Monthly Weather Review*.

Labitzke, K., 1999. *Die Stratosphäre: Phänomene, Geschichte, Relevanz*. s.l.:Springer.

Langematz, U., Brönnimann, S., Graf, H.-F. & Kapala, 2008. Stratosphäre, Vulkanismus und die NAO/AO. *promet*.

Leckebusch, G., Ulbrich, U., Fröhlich, L. & Pinto, J., 2007. Property loss potentials for European midlatitude storms in a changing climate. *Geophysical Research Letters*.

Ming, A., 2015. Stratosphere-troposphere coupling in the Earth system: Where next?. *Royal Meteorological Society*.

Mohanakumar, K., 2010. *Stratosphere Troposphere Interactions: An Introduction*. s.l.:Springer.

Muench, H., 1965. On the Dynamics of the Wintertime Stratosphere Circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*.

NOAA/ESRL, kein Datum *Atmospheric Variables Plotting Page*. [Online] Available at: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/histdata/> [Zugriff am 15 Juli 2016].

Odell, L. et al., 2013. The Braer storm revisited. *Royal Meteorological Society*.

Pinto, J. et al., 2009. Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Climate Dynamics*.

Pirret, J., Knippertz, P. & Trzeciak, T., 2016. Drivers for the deepening of severe European windstorms and their impacts on forecast quality. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.

Reuter, H., 1978. *Die Wissenschaft vom Wetter*. s.l.:Springer.

Ulbrich, U., Leckebusch, G. & Pinto, J., 2009. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theoretical and Applied Climatology*.

Wikimedia Foundation, 2016. *Wikipedia*. [Online]
Available at: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sinc-Funktion>
[Zugriff am 3 August 2016].

Wikimedia Foundation, 2016. *Wikipedia*. [Online]
Available at: <https://de.wikipedia.org/wiki/Rekonstruktionsfilter>
[Zugriff am 30 Juli 2016].

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1 Braer Sturm am 10. Januar 1993. a) Infrarotbild des AVHRR Satellit um 9:20 UTC, b) Bodenanalysekarte um 18 UTC (Odell, et al., 2013). | 5 |
| Abbildung 2: Jetstreak mit Konfluenz- und Diffluenzeffekt | 10 |
| Abbildung 3: NCEP Reanalyse des langzeitlichen Mittels, gebildet aus einem Fünf-Tages-Fenster um den 12.12. (Quelle: http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/histdata/).... | 12 |
| Abbildung 4: Zusammenhänge zwischen stratosphärischem Polarwirbel, NAO, AO und Zyklonen | 15 |
| Abbildung 5: PTE Diagnostik (Fink, et al., 2012)..... | 21 |
| Abbildung 6: Ergebnis der PTE Analyse von Sturm 13 vom 15.12.1982 - 23.12.1982. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (3) auf die Bodendruckentwicklung des Sturms | 22 |
| Abbildung 7: zeitlich konstantes absolutes Geopotential, "+" steht für Trog, "-" für Rücken; Meridionalwind durch grüne Pfeile dargestellt | 24 |
| Abbildung 8: zeitlich variables absolutes Geopotential; lineare räumliche Zunahme (links) und Abnahme (rechts) | 25 |
| Abbildung 9: räumlich konstante Geopotentialtendenz, links passend zu lineare räumliche Zunahme des Geopotentials, rechts passend zur Abnahme des Geopotentials | 25 |
| Abbildung 10: Propagation der Geopotentialwellen, blau steht für Trog, grün für Rücken | 26 |
| Abbildung 11: Geopotentialtendenz zu einer propagierenden Geopotentialwelle | 27 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 12: Histogramm über die Beiträge von DPHI zur Druckentwicklung aller 100 Stürme..... | 31 |
| Abbildung 13: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die jeweilige Lebenszeit von a) Sturm 15 und b) Sturm 11 | 35 |
| Abbildung 14: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 15 vom 24.12.1984 – 29.12.1984 und b) 11 vom 13.02.1983 – 22.02.1983. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (3) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme..... | 37 |
| Abbildung 15: Hovmöller-Diagramme der Geopotentialtendenz in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 15 und b) Sturm 11. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms. | 37 |
| Abbildung 16: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 15 und b) Sturm 11. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms..... | 38 |
| Abbildung 17: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 10 vom 15.12. – 23.12.1982, b) 13 vom 10.12. – 17.12.1983 und c) 68 vom 21.12. – 27.12.1998. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme..... | 39 |
| Abbildung 18: Synoptische Entwicklung von a, b) Sturm 10, c, d) Sturm 13 und e, f) Sturm 68 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbig ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 17.12.1982, b: 19.12.1982 c: 10.12.1983, d: 13.12.1983, e: 21.12.1998 und f: 24.12.1998, jeweils 12 UTC | 40 |
| Abbildung 19: Hovmöller-Diagramme a, c und e) des absoluten Geopotentials und b, d und f) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von a, b) Sturm 10, c, d) Sturm 13 und e, f) Sturm 68. Die Zugbahn der Stürme wird durch die schwarzen Linien dargestellt, die der Welle durch die rote Linie. | 43 |
| Abbildung 20: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 10, b) Sturm 13 und c) Sturm 68. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms..... | 45 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 21: Hovmöller-Diagramme des Merdionalwinds von a) Sturm 10, c) Sturm 13 und e) Sturm 68 und der Anomalie des Meridionalwinds von b) Sturm 10, d) Sturm 13 und f) Sturm 68 in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit der Stürme. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen. | 47 |
| Abbildung 22: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0°N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen der jeweiligen Stürme 10, 13 und 68. | 48 |
| Abbildung 23: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 45 vom 30.01. – 02.02.1991 und b) 64 vom 29.12.1996 – 02.01.1997. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme. | 49 |
| Abbildung 24: Synoptische Entwicklung von a) Sturm 45 und b) Sturm 64 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbig ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 30.01.1991, b: 01.02.1991 c: 29.12.1996, d: 31.12.1996, jeweils 12 UTC | 50 |
| Abbildung 25: Hovmöller-Diagramme a und c) des absoluten Geopotentials sowie b und d) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von a, b) Sturm 45 und c, d) Sturm 64. Die Zugbahn der Stürme wird durch die schwarzen Linien dargestellt, die Phasengeschwindigkeit der Welle durch die rote Linie. | 51 |
| Abbildung 26: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 45 und b) Sturm 64. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms..... | 52 |
| Abbildung 27: Hovmöller-Diagramme des Merdionalwinds von a) Sturm 45 und c) Sturm 64 und der Anomalie des Meridionalwinds von b) Sturm 45 und d) Sturm 64 in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit der Stürme. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen. | 54 |
| Abbildung 28: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0°N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen der jeweiligen Stürme 45 und 64. | 55 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 29: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 43 vom 26.01. – 01.02.1990, b) 48 vom 03.12. – 09.12.1991 und c) 72 vom 16.02. – 22.02.2000. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme..... | 56 |
| Abbildung 30: Synoptische Entwicklung von a, b) Sturm 43, c, d) Sturm 48 und e, f) Sturm 72 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbig ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 27.01.1990, b: 29.01.1990 c: 04.12.1991, d: 05.12.1991, e: 17.02.2000 und f: 18.02.2000, jeweils 12 UTC | 57 |
| Abbildung 31: Hovmöller-Diagramme a, c, e) des absoluten Geopotentials sowie b, d, f) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von a, b) Sturm 43, c, d) Sturm 48 und e, f) Sturm 72. Die Zugbahn der Stürme wird durch die schwarzen Linien dargestellt, die Phasengeschwindigkeit der Welle durch die rote Linie..... | 60 |
| Abbildung 32: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 43, b) Sturm 48 und c) Sturm 72. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms..... | 62 |
| Abbildung 33: Hovmöller-Diagramme des Meridionalwinds von a) Sturm 43, c) Sturm 48 und e) Sturm 72 und der Anomalie des Meridionalwinds von b) Sturm 43, d) Sturm 48 und f) Sturm 72 in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit der Stürme. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen. | 63 |
| Abbildung 34: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0°N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen der jeweiligen Stürme 43, 48 und 72. | 64 |
| Abbildung 35: Ergebnis der PTE-Analyse von Sturm 96 vom 23.12. – 27.12.2008. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme. | 65 |
| Abbildung 36: Synoptische Entwicklung von Sturm 96 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbig ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt | |

| | |
|--|----|
| verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 24.12.2008, b: 26.12.2008, jeweils 12 UTC | 65 |
| Abbildung 37: Hovmöller-Diagramme a) des absoluten Geopotentials sowie b) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von Sturm 96. Die Zugbahn des Sturms wird durch die schwarzen Linien dargestellt, die Phasengeschwindigkeit der Welle durch die rote Linie..... | 67 |
| Abbildung 38: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von Sturm 96. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms. | 68 |
| Abbildung 39: Hovmöller-Diagramme des Meridionalwinds von Sturm 96 und der Anomalie des Meridionalwinds in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit des Sturms. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen. | 69 |
| Abbildung 40: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0°N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen von Sturm 96. | 69 |
| Abbildung 41: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die jeweilige Lebenszeit von a) Sturm 40 und b) Sturm 76 | 72 |
| Abbildung 42: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 40 vom 28.12.1989 – 01.01.1990 und b) 76 vom 20.01. – 24.01.2002. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme..... | 74 |
| Abbildung 43: Hovmöller-Diagramme der Geopotentialtendenz in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 40 und b) Sturm 76. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms. | 74 |
| Abbildung 44: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 40 und b) Sturm 76. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms..... | 75 |
| Abbildung 45: Ergebnis der PTE-Analyse der Stürme a) 60 vom 05.03. – 12.03.1995 und b) 81 vom 14.03. – 17.03.2003. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (3) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme | 76 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 46: Synoptische Entwicklung von a) Sturm 60 und b) Sturm 81 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbig ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 06.03.1995, b: 09.03.1995 c: 14.03.2003, d: 15.03.2003, jeweils 12 UTC | 76 |
| Abbildung 47: Hovmöller-Diagramme a und c) des absoluten Geopotentials sowie b und d) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von a, b) Sturm 60 und c, d) Sturm 81. Die Zugbahn der Stürme wird durch die schwarzen Linien dargestellt..... | 78 |
| Abbildung 48: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von a) Sturm 60 und b) Sturm 81. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms..... | 79 |
| Abbildung 49: Hovmöller-Diagramme des Meridionalwinds von a) Sturm 60 und c) Sturm 81 und der Anomalie des Meridionalwinds von b) Sturm 60 und d) Sturm 81 in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit der Stürme. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen. | 80 |
| Abbildung 50: Hovmöller-Diagramme des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0°N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen der jeweiligen Stürme 60 und 81. | 81 |
| Abbildung 51: Ergebnis der PTE-Analyse von Sturm 58 vom 23.12.1994 – 02.01.1995. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung der Stürme. | 81 |
| Abbildung 52: Synoptische Entwicklung von Sturm 96 im Zeitraum der stärksten Vertiefung. Die schwarzen Linien sind das absolute Geopotential, farbig ist die Geopotentialtendenz. Die roten Linien sind die Zugbahnen der Stürme. Der gelbe Punkt verweist auf das jeweilige aktuelle Datum, a: 24.12.2008, b: 26.12.2008, jeweils 12 UTC | 82 |
| Abbildung 53: Hovmöller-Diagramme a) des absoluten Geopotentials sowie b) der Geopotentialtendenz in 50 hPa bezogen auf den Lebenszeitraum von Sturm 58. Die Zugbahn des Sturms wird durch die schwarzen Linien dargestellt. | 83 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 54: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von Sturm 58. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms. | 84 |
| Abbildung 55: Hovmöller-Diagramme des Meridionalwinds von Sturm 58 und der Anomalie des Meridionalwinds in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit des Sturms. Die schwarze Linie zeigt jeweils die Zugbahnen. | 85 |
| Abbildung 56: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa der gesamten Nordhemisphäre von 180° W bis 180° O sowie von 0° N bis 90° N. Die schwarze Linie zeigen die Zugbahnen von Sturm 58. | 85 |
| Abbildung 57: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von Sturm 95. Die schwarze Linie zeigt die Zugbahn des Sturms... | 88 |
| Abbildung 58: Ergebnis der PTE-Analyse von Sturm 95 vom 19.12. – 23.12.2008. Die Balken zeigen die jeweiligen Beiträge der Terme aus Gleichung (2) auf die Bodendruckentwicklung des Sturms. | 89 |
| Abbildung 59: Hovmöller-Diagramm der Geopotentialtendenz in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von Sturm 95. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des Sturms..... | 89 |
| Abbildung 60: Hovmöller-Diagramme der Anomalie des absoluten Geopotentials in 50 hPa, bezogen auf die Lebenszeit von Sturm 95. Die schwarze Linie ist die Zugbahn des jeweiligen Sturms. | 90 |
| | |
| Abbildung A 1: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 02. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms...I | |
| Abbildung A 2:Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 03. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms...I | |
| Abbildung A 3: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 04. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms...I | |
| Abbildung A 4: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 05. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms...I | |

Abbildung A 5: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 06. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. II

Abbildung A 6: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 07. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. II

Abbildung A 7: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 08. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. II

Abbildung A 8: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 09. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. II

Abbildung A 9: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 14. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. III

Abbildung A 10: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 16. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. III

Abbildung A 11: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 17. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. III

Abbildung A 12: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 19. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. III

Abbildung A 13: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 20. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. IV

Abbildung A 14: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 21. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. IV

Abbildung A 15: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 22. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. IV

| | |
|--|----|
| Abbildung A 16: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 23. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | IV |
| Abbildung A 17: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 24. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | V |
| Abbildung A 18: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 25. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | V |
| Abbildung A 19: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 26. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | V |
| Abbildung A 20: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 27. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | V |
| Abbildung A 21: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 29. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VI |
| Abbildung A 22: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 30. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VI |
| Abbildung A 23: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 31. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VI |
| Abbildung A 24: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 32. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VI |

| | |
|--|------|
| Abbildung A 25: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 33. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VII |
| Abbildung A 26: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 34. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VII |
| Abbildung A 27: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 35. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VII |
| Abbildung A 28: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 36. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VII |
| Abbildung A 29: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 37. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VIII |
| Abbildung A 30: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 38. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VIII |
| Abbildung A 31: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 39. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VIII |
| Abbildung A 32: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 41. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | VIII |
| Abbildung A 33: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 42. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | IX |

| | |
|--|----|
| Abbildung A 34: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 44. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | IX |
| Abbildung A 35: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 46. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | IX |
| Abbildung A 36: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 47. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | IX |
| Abbildung A 37: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 49. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | X |
| Abbildung A 38: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 51. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | X |
| Abbildung A 39: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 52. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | X |
| Abbildung A 40: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 53. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | X |
| Abbildung A 41: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 54. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XI |
| Abbildung A 42: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 55. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XI |

| | |
|--|------|
| Abbildung A 43: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 56. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XI |
| Abbildung A 44: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 57. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XI |
| Abbildung A 45: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 59. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XII |
| Abbildung A 46: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 63. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XII |
| Abbildung A 47: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 65. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XII |
| Abbildung A 48: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 66. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XII |
| Abbildung A 49: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 67. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XIII |
| Abbildung A 50: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 69. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XIII |
| Abbildung A 51: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 70. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XIII |

| | |
|--|------|
| Abbildung A 52: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 71. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XIII |
| Abbildung A 53: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 73. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XIV |
| Abbildung A 54: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 74. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XIV |
| Abbildung A 55: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 75. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XIV |
| Abbildung A 56: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 77. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XIV |
| Abbildung A 57: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 78. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XV |
| Abbildung A 58: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 79. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XV |
| Abbildung A 59: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 80. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XV |
| Abbildung A 60: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 82. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XV |

| | |
|--|-------|
| Abbildung A 61: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 83. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVI |
| Abbildung A 62: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 84. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVI |
| Abbildung A 63: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 85. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVI |
| Abbildung A 64: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 86. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVI |
| Abbildung A 65: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 87. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVII |
| Abbildung A 66: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 88. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVII |
| Abbildung A 67: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 89. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVII |
| Abbildung A 68: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 90. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVII |
| Abbildung A 69: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 91. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVIII |

| | |
|--|-------|
| Abbildung A 70: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 92. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVIII |
| Abbildung A 71: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 93. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVIII |
| Abbildung A 72: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 94. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XVIII |
| Abbildung A 73: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 97. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XIX |
| Abbildung A 74: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 98. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XIX |
| Abbildung A 75: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 99. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms. | XIX |
| Abbildung A 76: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 10 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC..... | XX |
| Abbildung A 77: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 13 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC..... | XX |
| Abbildung A 78: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 43 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC..... | XXI |

Abbildung A 79: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 45 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC..... XXI

Abbildung A 80: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 48 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC..... XXI

Abbildung A 81: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 58 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC.....XXII

Abbildung A 82: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 60 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC.....XXII

Abbildung A 83: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 64 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC.... XXIII

Abbildung A 84: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 68 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC.... XXIII

Abbildung A 85: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 72 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC.... XXIII

Abbildung A 86: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 81 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC.... XXIV

Abbildung A 87: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 96 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC.... XXIV

Formelverzeichnis

| | |
|---------------------|----|
| Gleichung (1) | 8 |
| Gleichung (2) | 19 |
| Gleichung (3) | 20 |
| Gleichung (4) | 22 |
| Gleichung (5) | 26 |
| Gleichung (6) | 28 |

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prozentualer Anteil von $D\Phi$ an der Bodendruckentwicklung auf Grundlage der Anwendung der PTE auf die Stürme sowie der NAO-Index. Die fünf außerhalb des Winterhalbjahrs auftretenden Stürme wurden in dieser Tabelle außer Acht gelassen. .. 32

Anhang

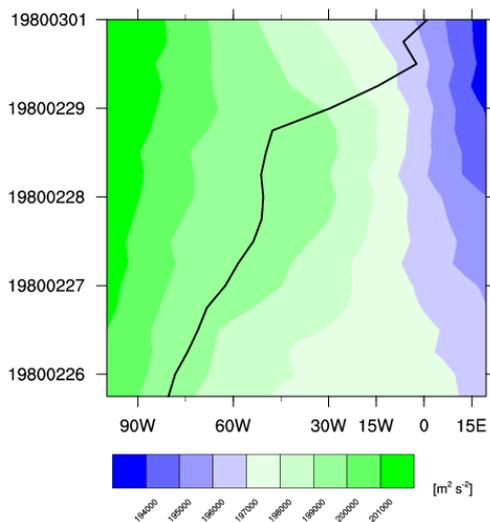


Abbildung A 1: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 02. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

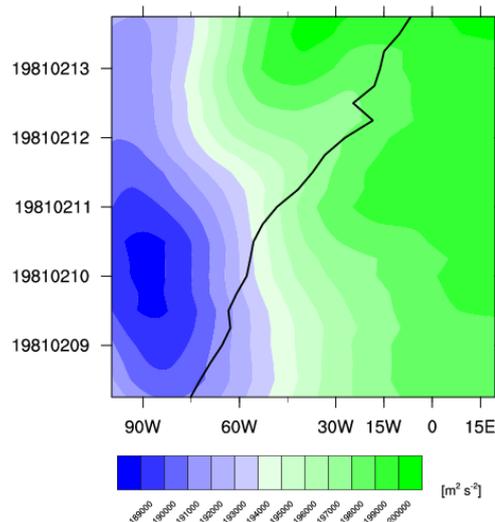


Abbildung A 2: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 03. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

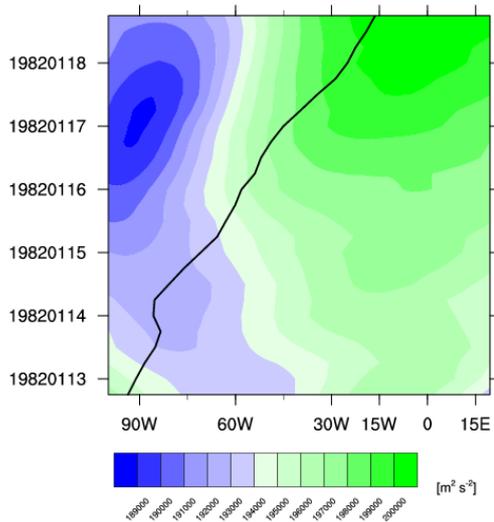


Abbildung A 3: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 04. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

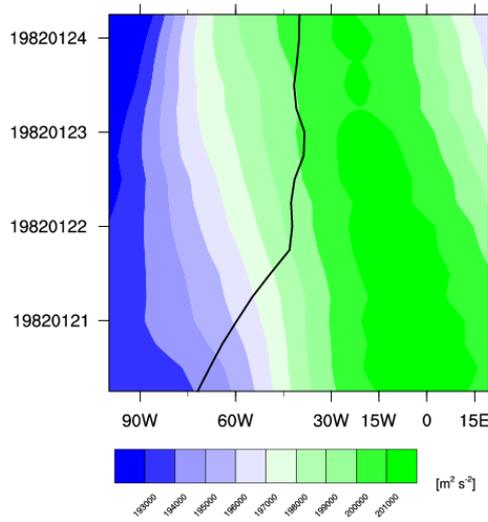


Abbildung A 4: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 05. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

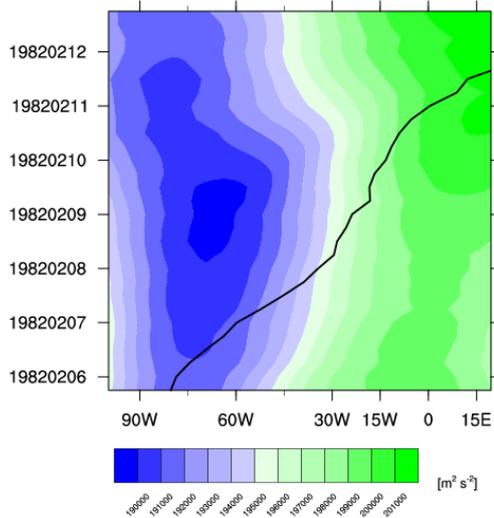


Abbildung A 5: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 06. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

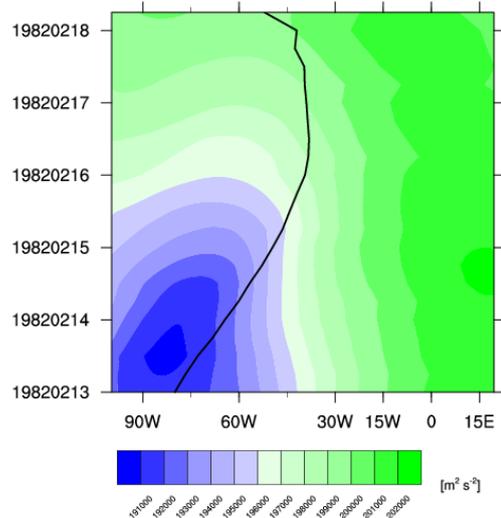


Abbildung A 6: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 07. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

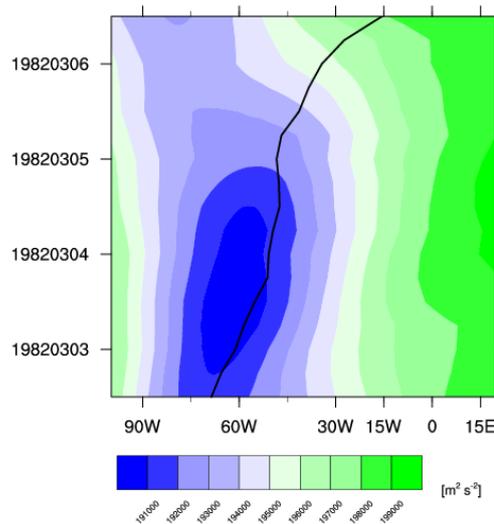


Abbildung A 7: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 08. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

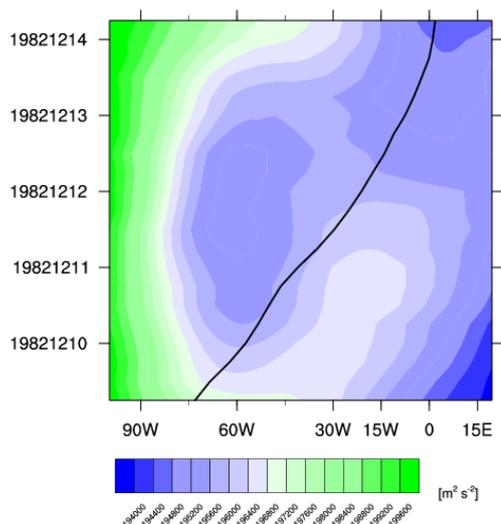


Abbildung A 8: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 09. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

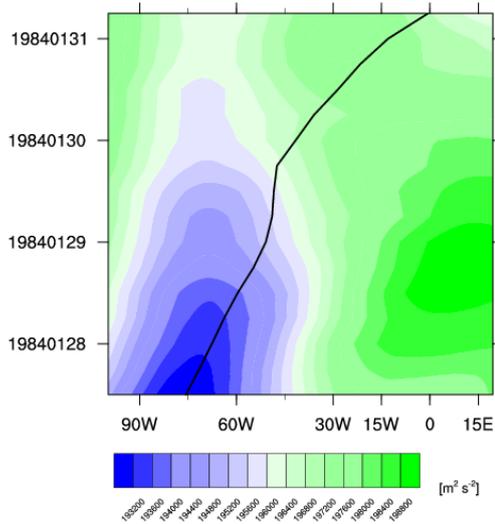


Abbildung A 9: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 14. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

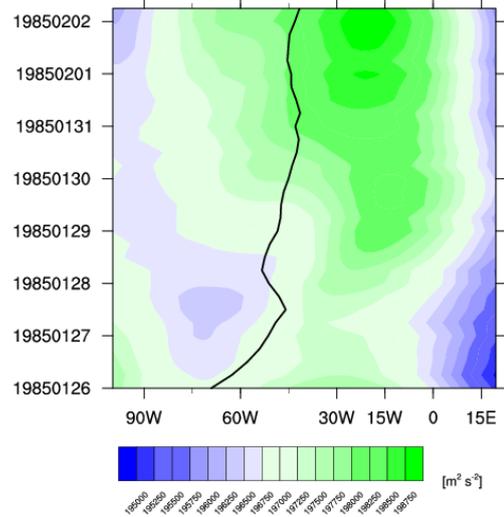


Abbildung A 10: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 16. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

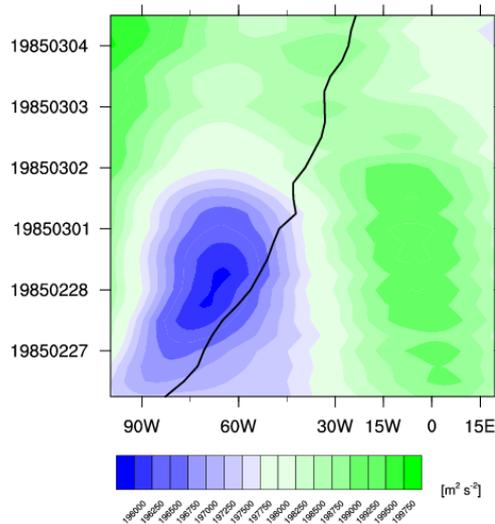


Abbildung A 11: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 17. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

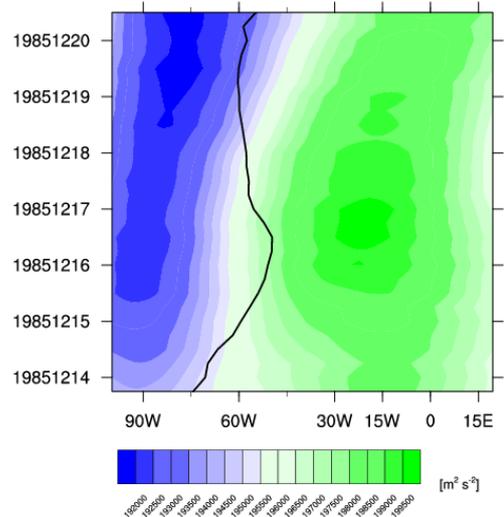


Abbildung A 12: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 19. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

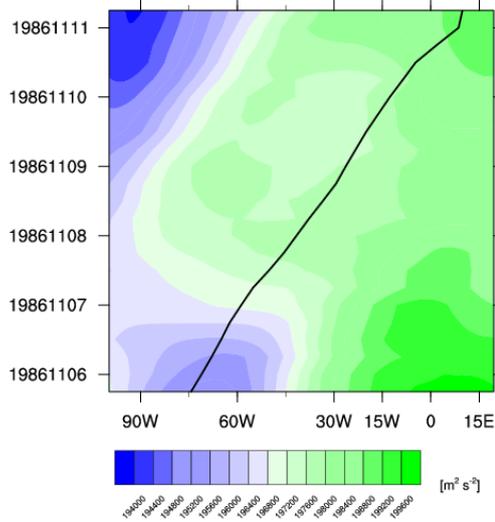


Abbildung A 13: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 20. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

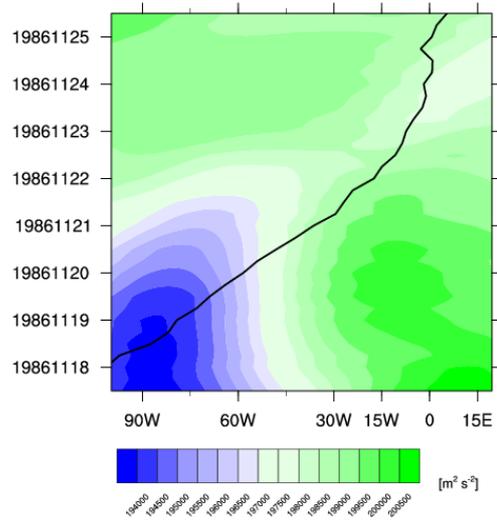


Abbildung A 14: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 21. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

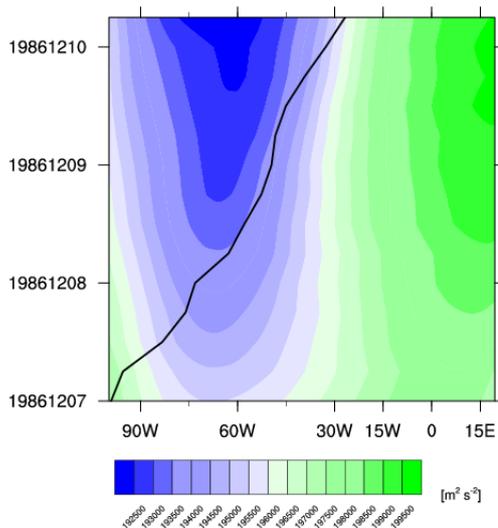


Abbildung A 15: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 22. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

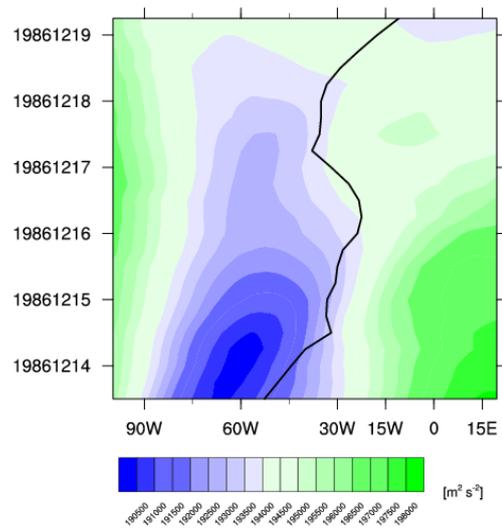


Abbildung A 16: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 23. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

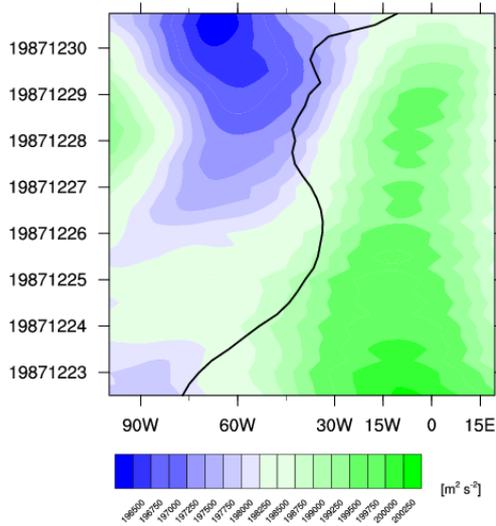


Abbildung A 17: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 24. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

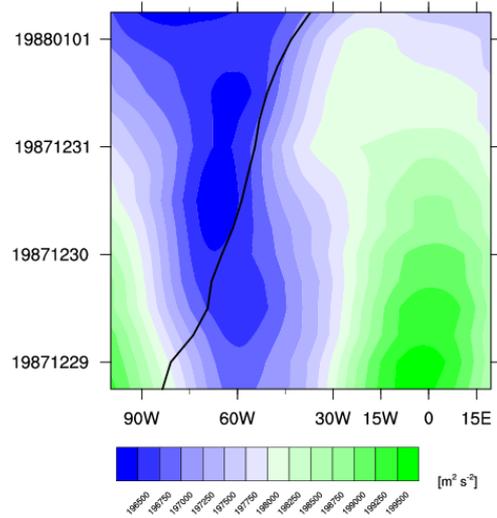


Abbildung A 18: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 25. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

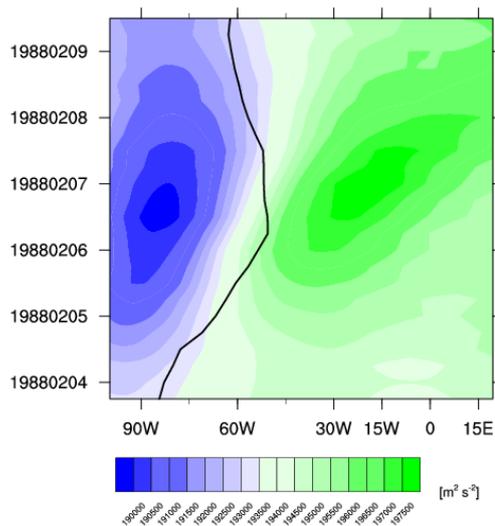


Abbildung A 19: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 26. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

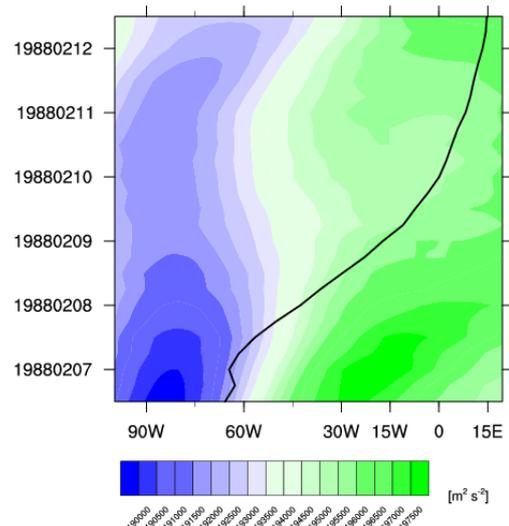


Abbildung A 20: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 27. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

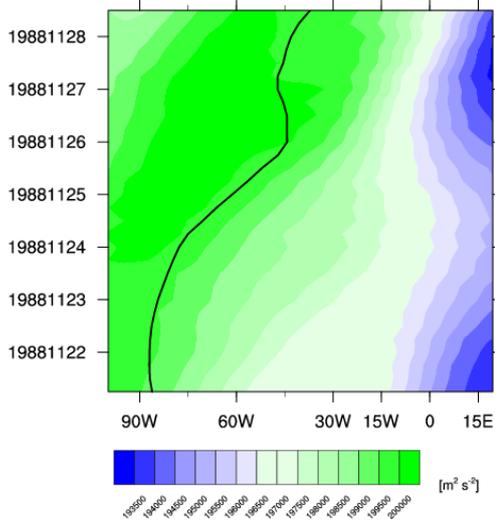


Abbildung A 21: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 29. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

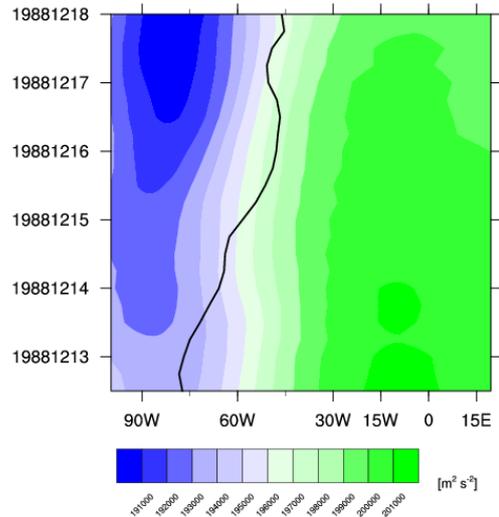


Abbildung A 22: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 30. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

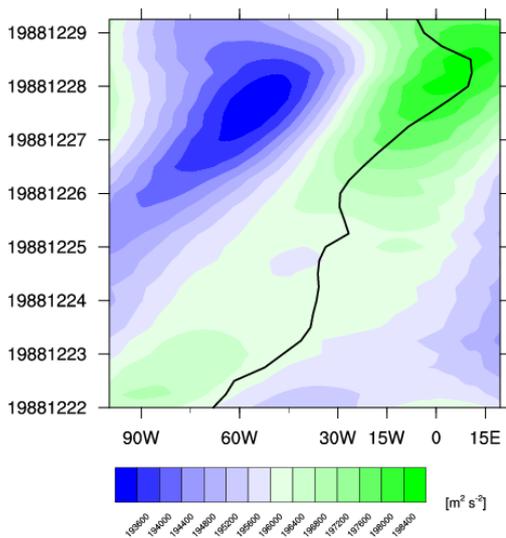


Abbildung A 23: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 31. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

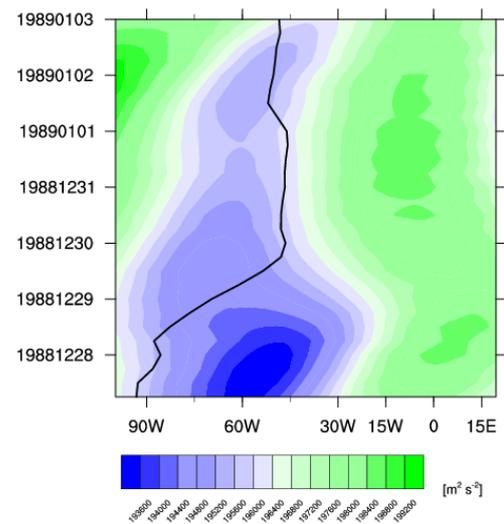


Abbildung A 24: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 32. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

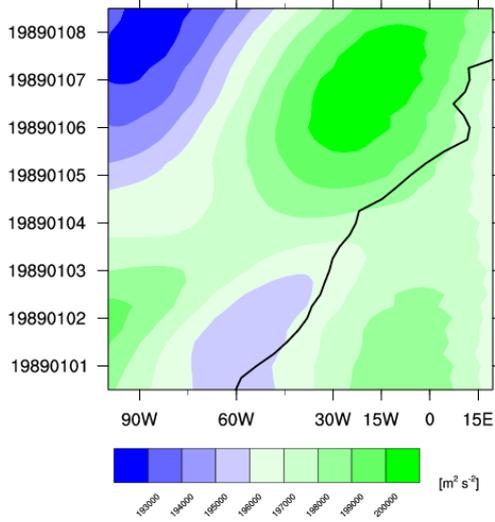


Abbildung A 25: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 33. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

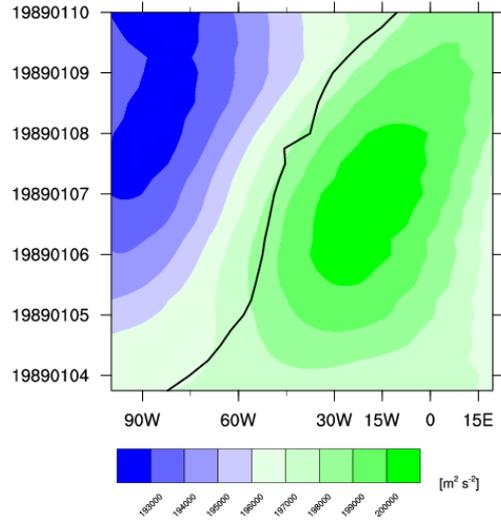


Abbildung A 26: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 34. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

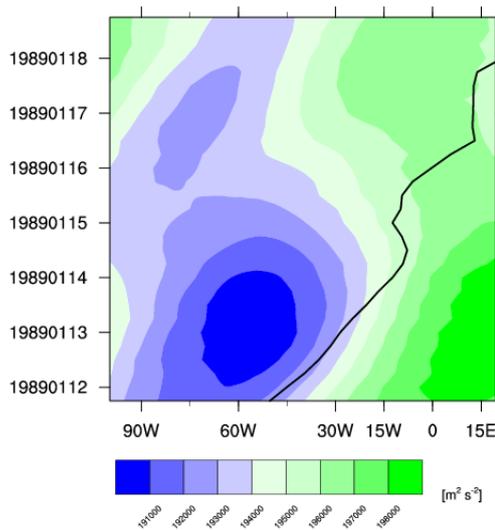


Abbildung A 27: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 35. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

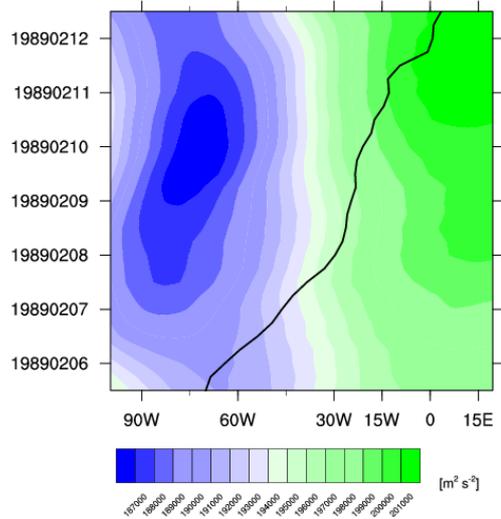


Abbildung A 28: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 36. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

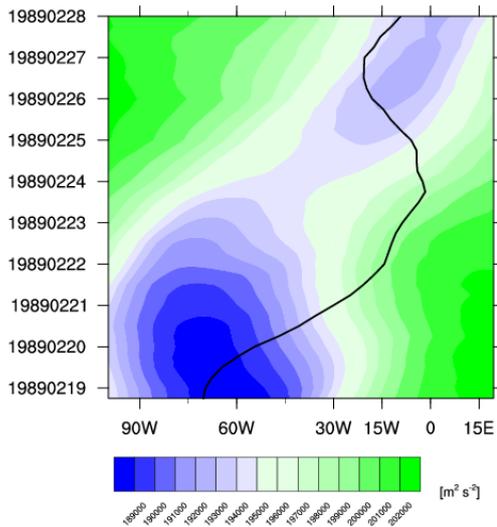


Abbildung A 29: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 37. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

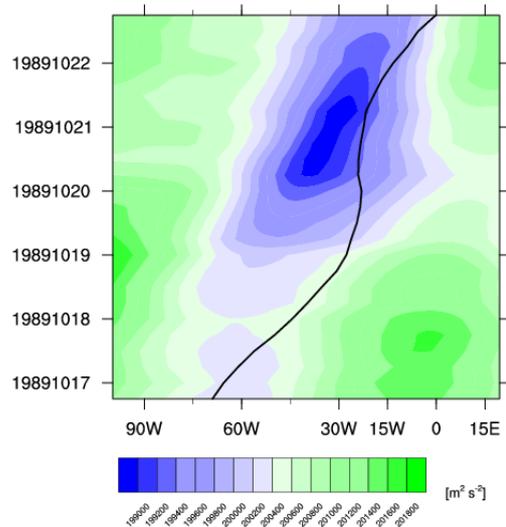


Abbildung A 30: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 38. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

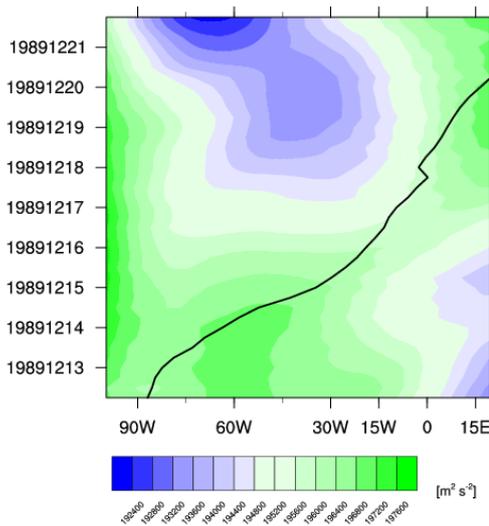


Abbildung A 31: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 39. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

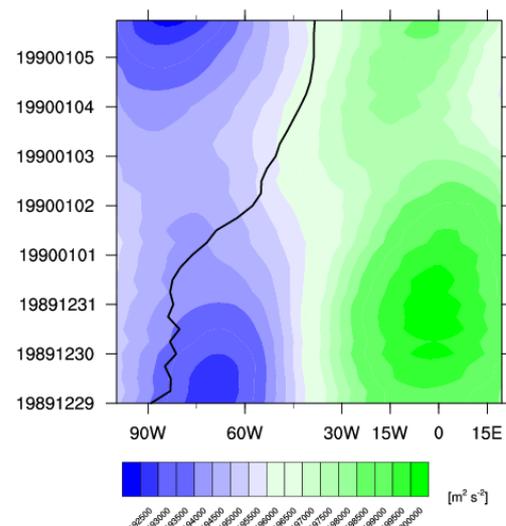


Abbildung A 32: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 41. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

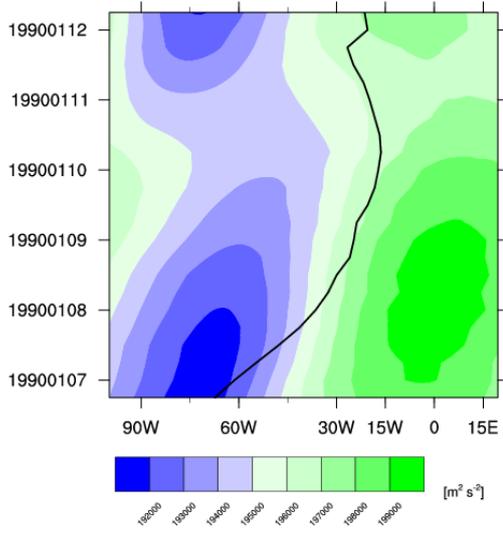


Abbildung A 33: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 42. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

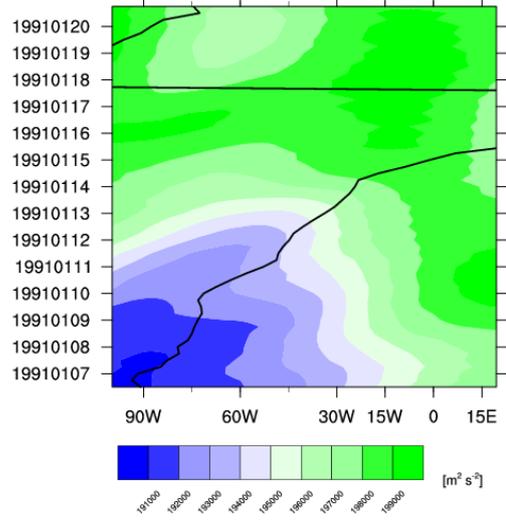


Abbildung A 34: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 44. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

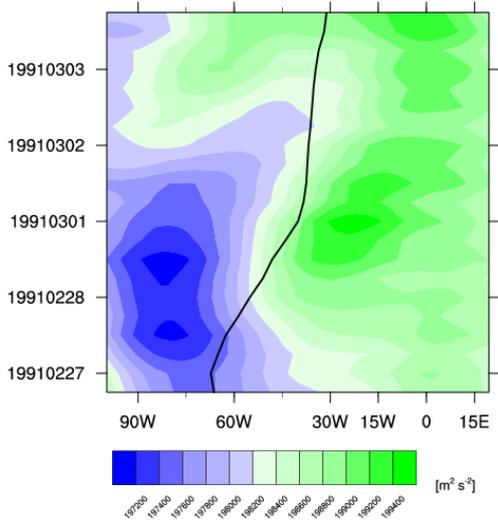


Abbildung A 35: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 46. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

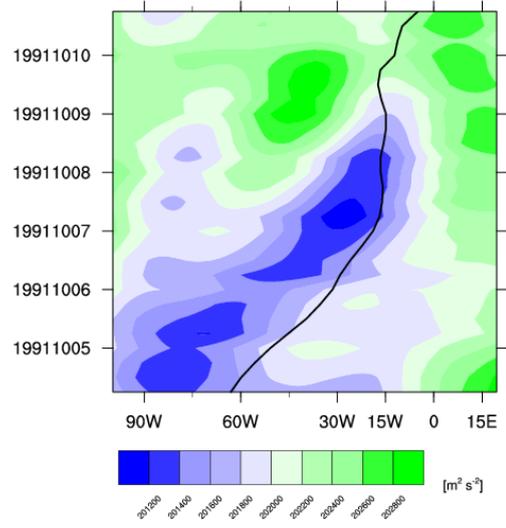


Abbildung A 36: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 47. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

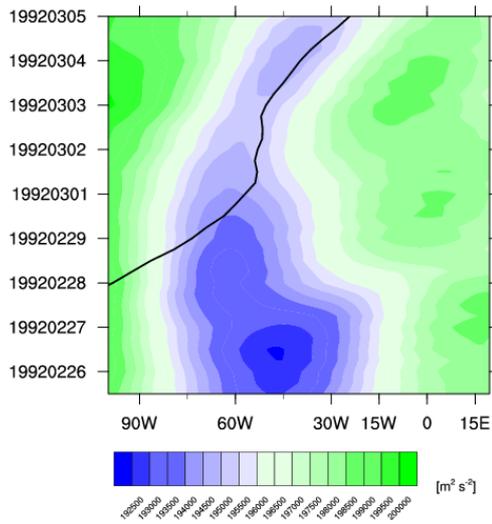


Abbildung A 37: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 49. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

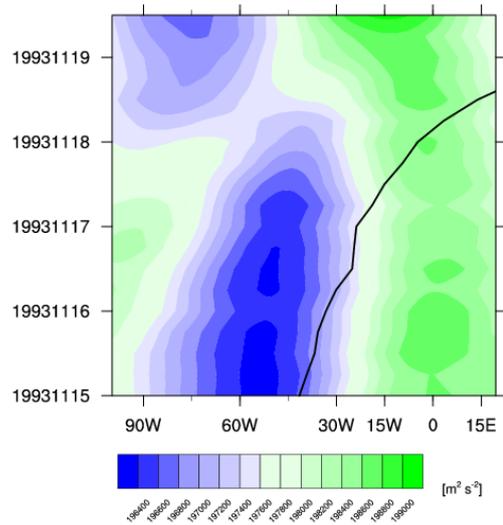


Abbildung A 38: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 51. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

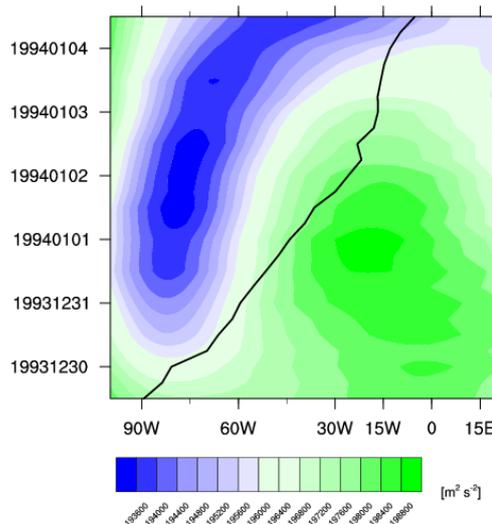


Abbildung A 39: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 52. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

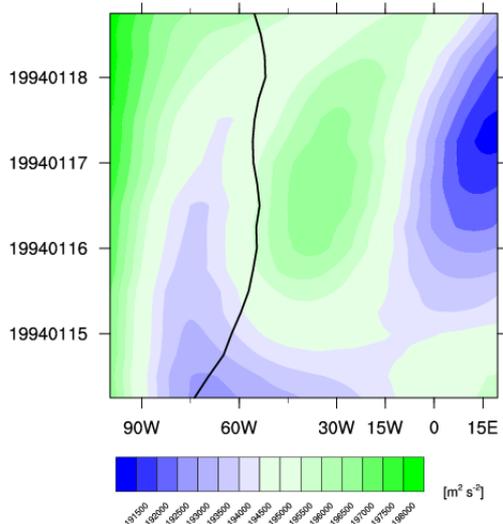


Abbildung A 40: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 53. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

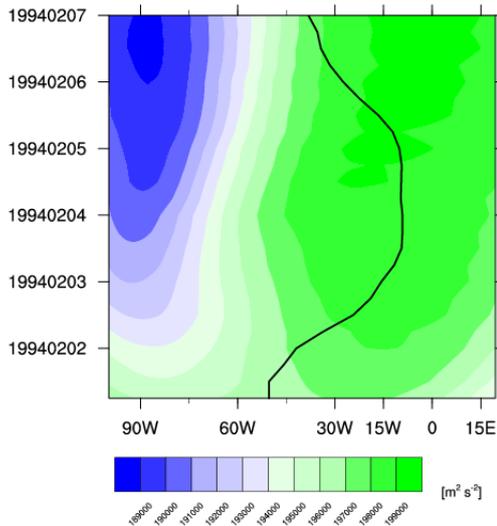


Abbildung A 41: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 54. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

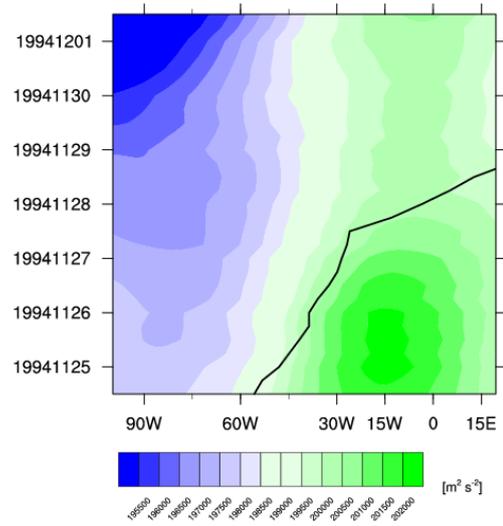


Abbildung A 42: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 55. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

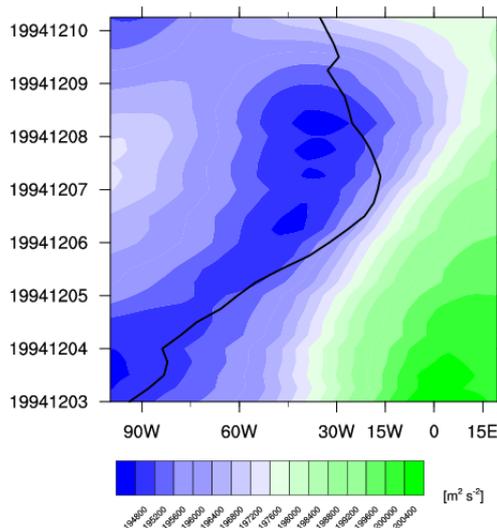


Abbildung A 43: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 56. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

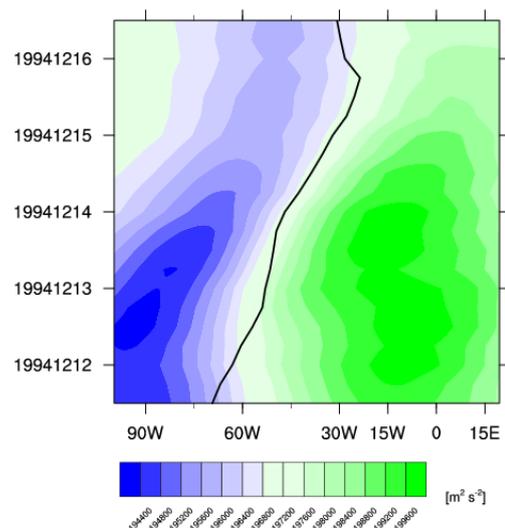


Abbildung A 44: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 57. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

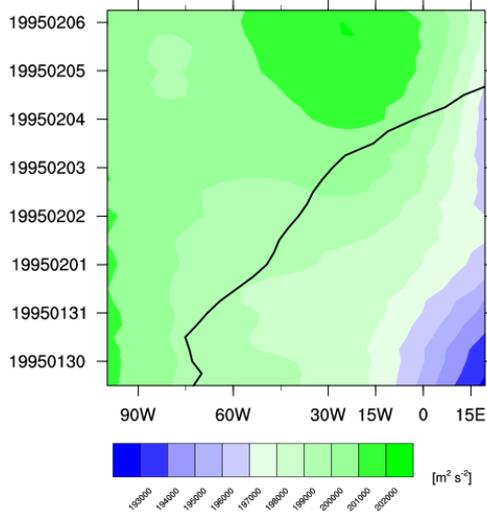


Abbildung A 45: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 59. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

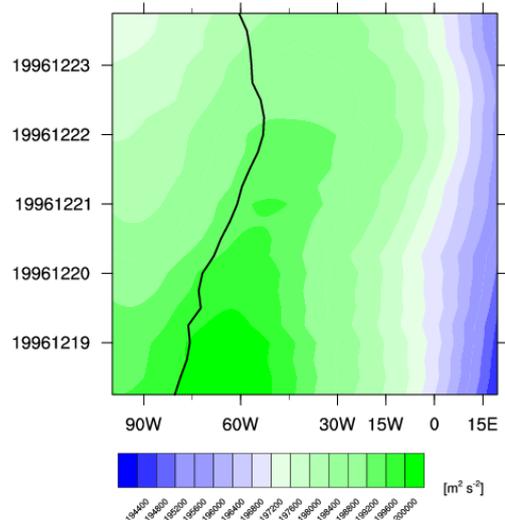


Abbildung A 46: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 63. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

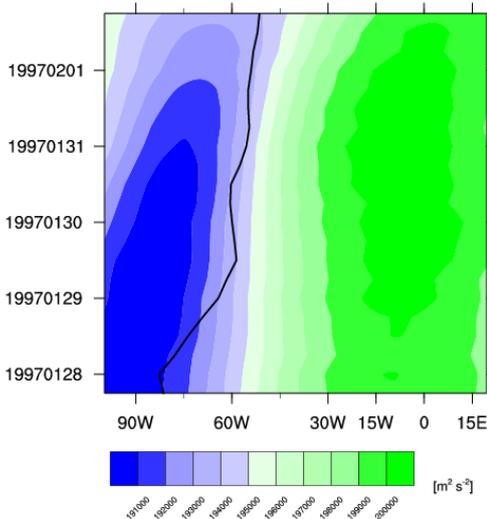


Abbildung A 47: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 65. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

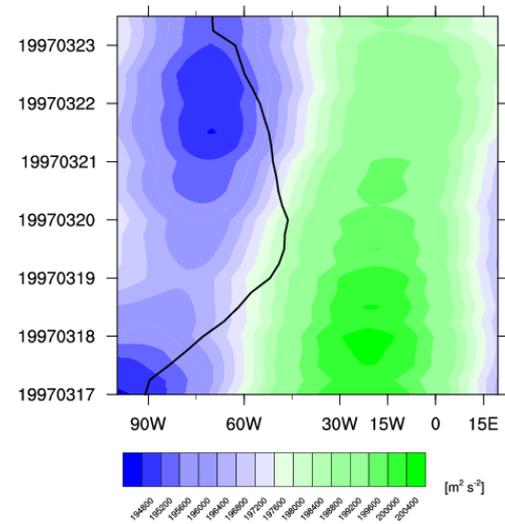


Abbildung A 48: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 66. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

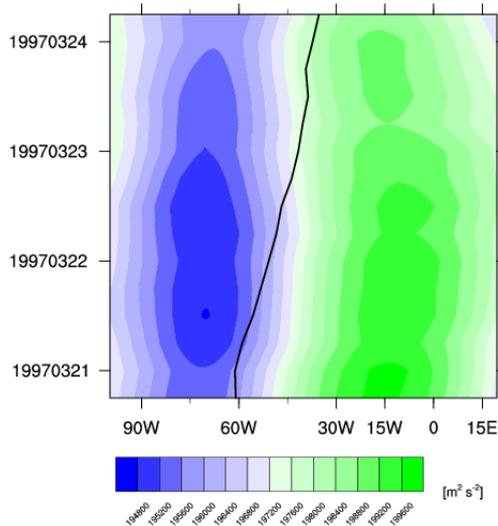


Abbildung A 49: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 67. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

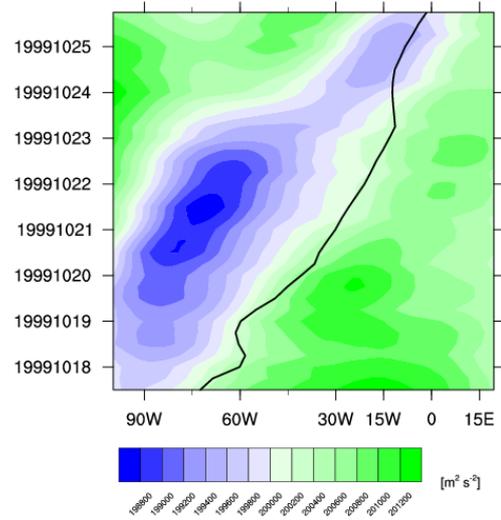


Abbildung A 50: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 69. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

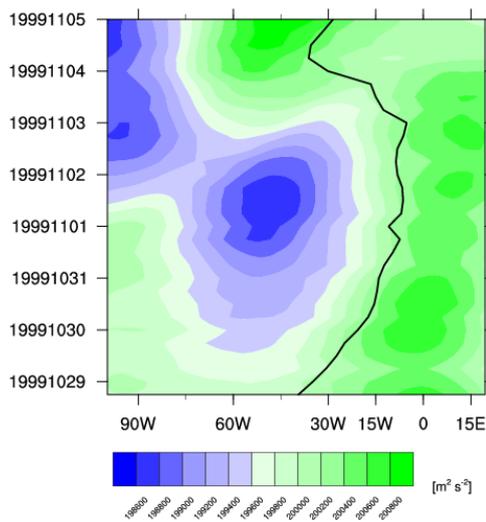


Abbildung A 51: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 70. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

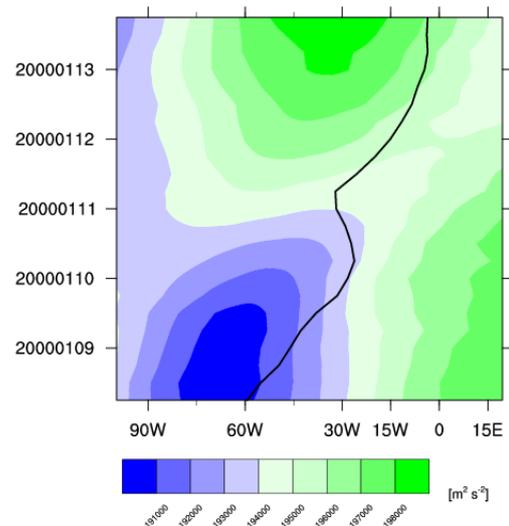


Abbildung A 52: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 71. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

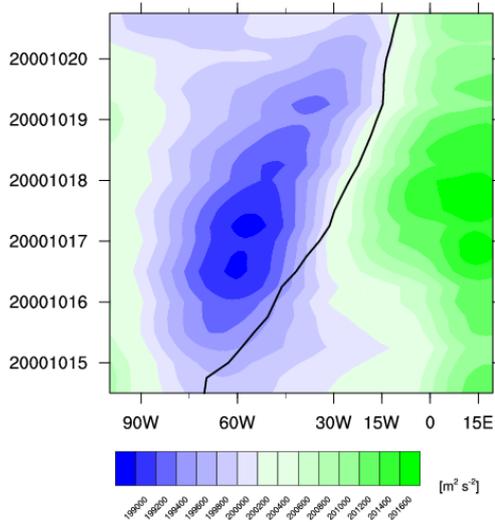


Abbildung A 53: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 73. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

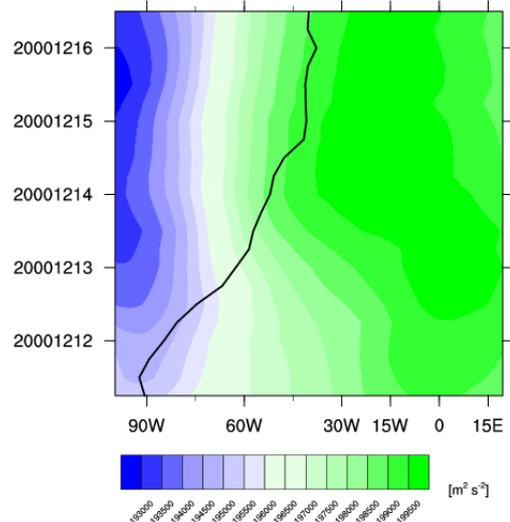


Abbildung A 54: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 74. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

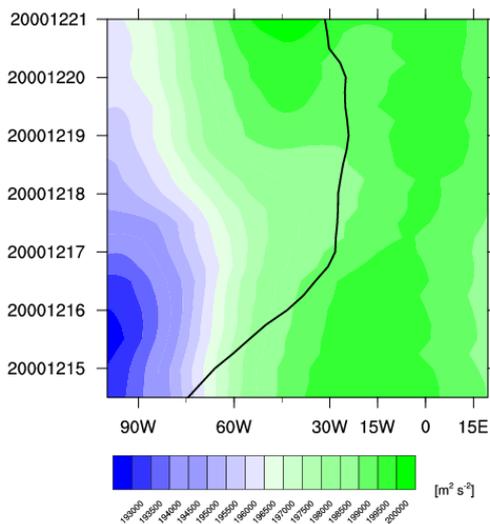


Abbildung A 55: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 75. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

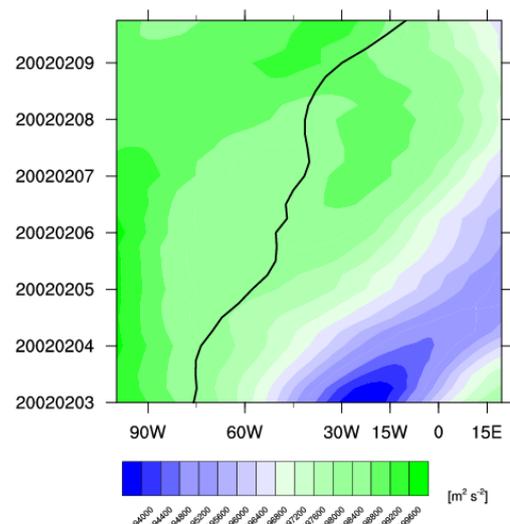


Abbildung A 56: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 77. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

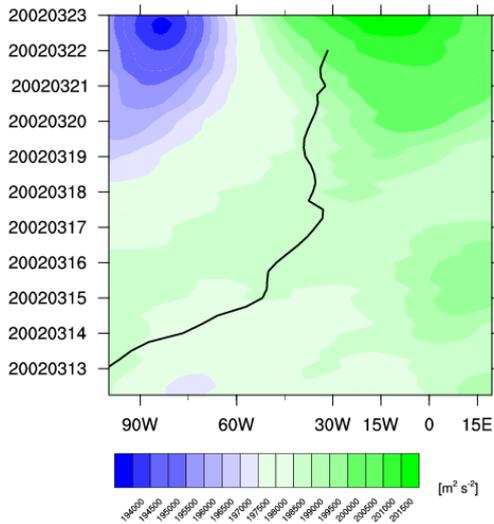


Abbildung A 57: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 78. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

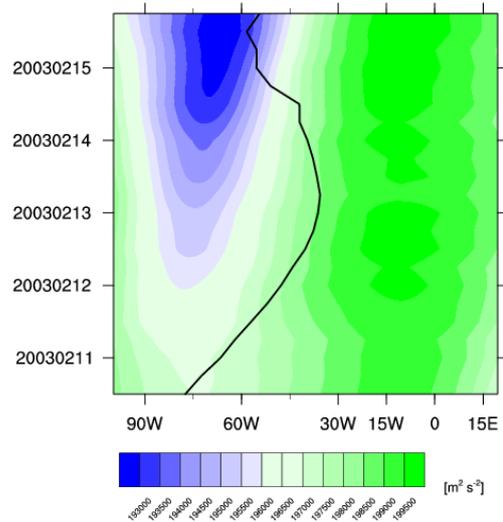


Abbildung A 58: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 79. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

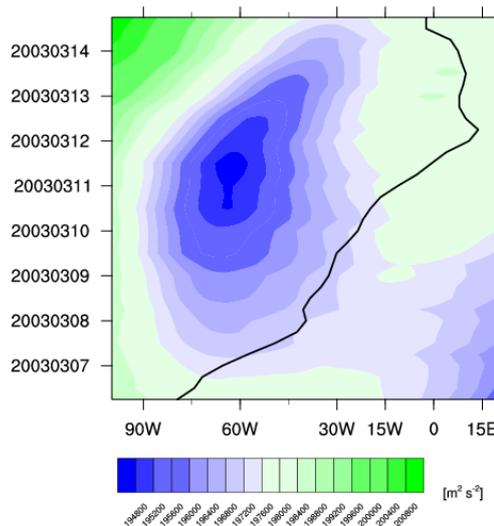


Abbildung A 59: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 80. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

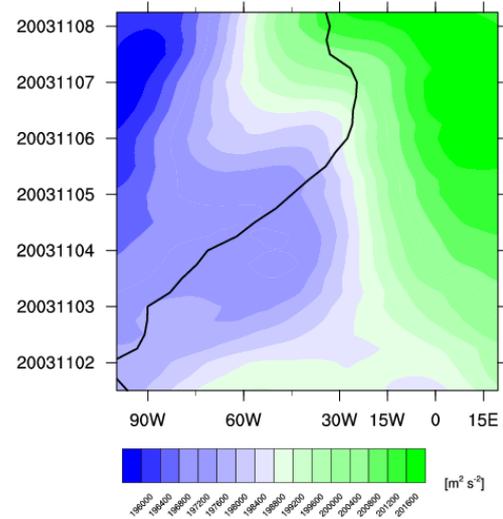


Abbildung A 60: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 82. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

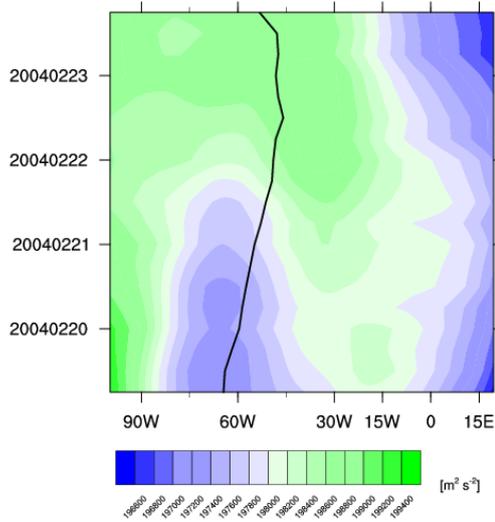


Abbildung A 61: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 83. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

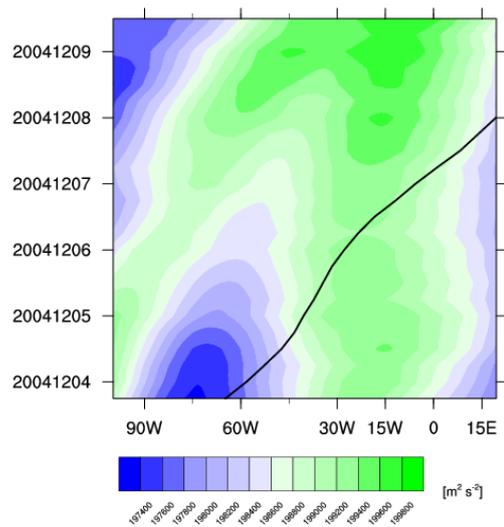


Abbildung A 62: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 84. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

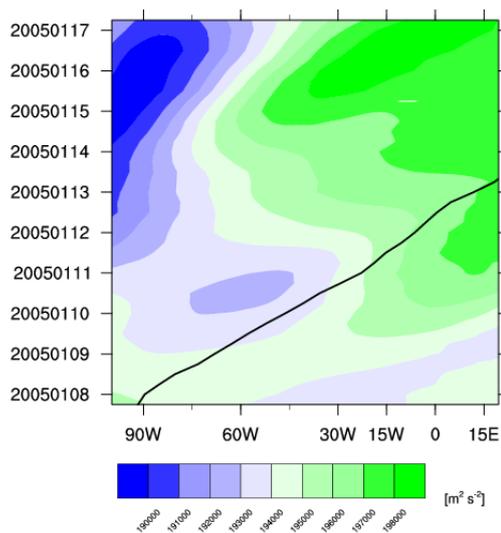


Abbildung A 63: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 85. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

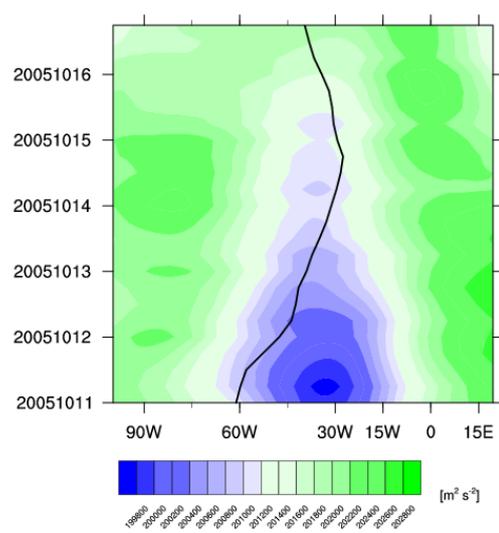


Abbildung A 64: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 86. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

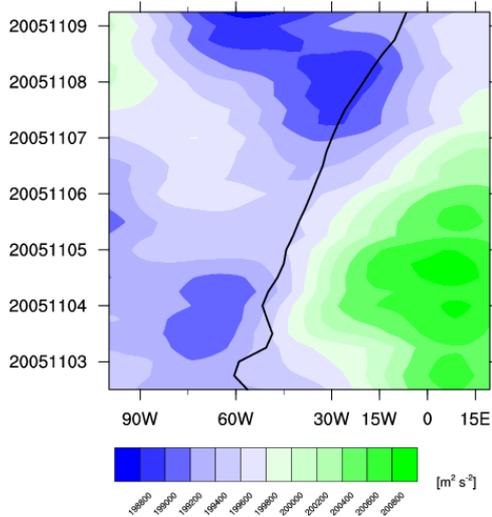


Abbildung A 65: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 87. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

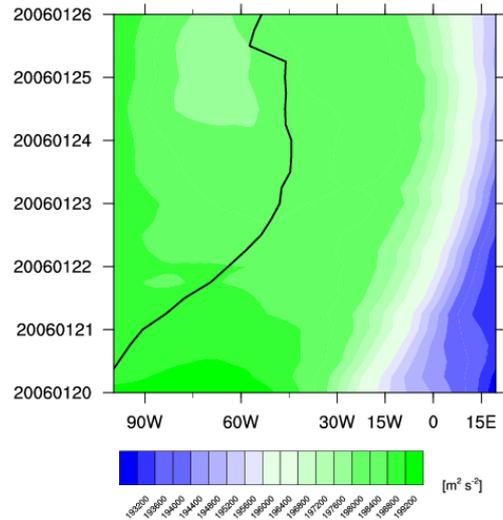


Abbildung A 66: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 88. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

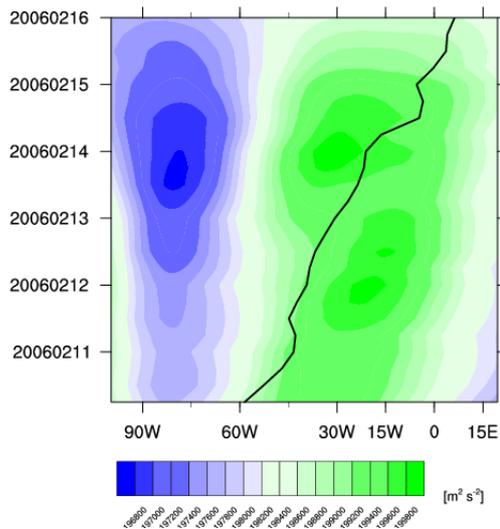


Abbildung A 67: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 89. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

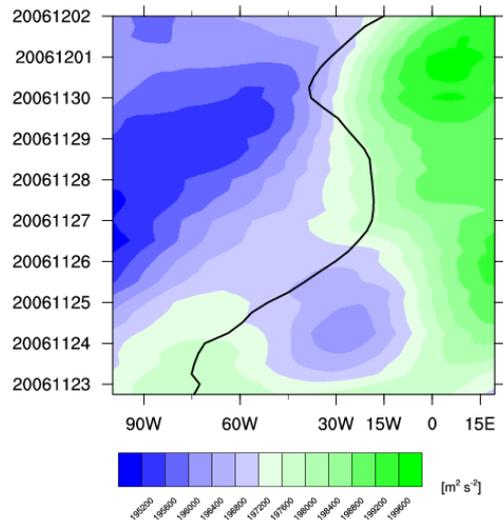


Abbildung A 68: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 90. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

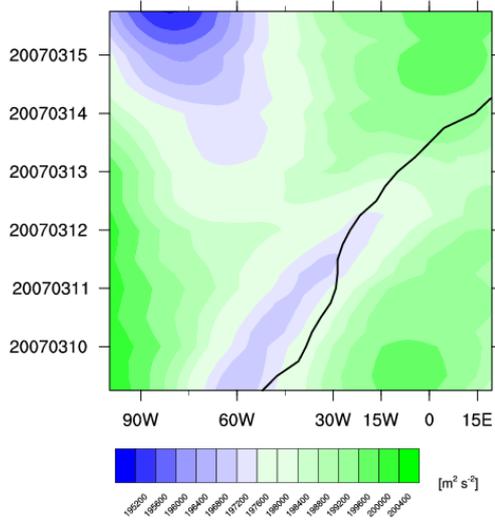


Abbildung A 69: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 91. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

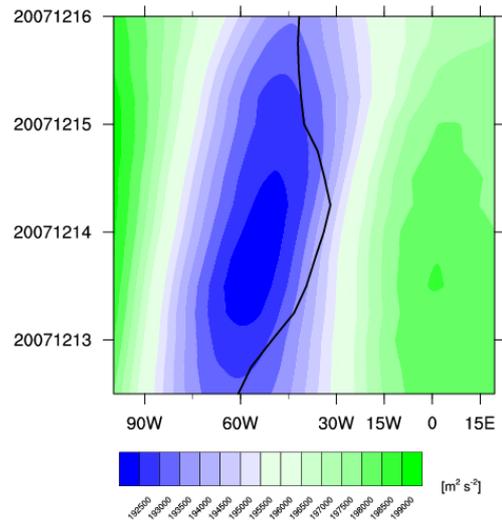


Abbildung A 70: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 92. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

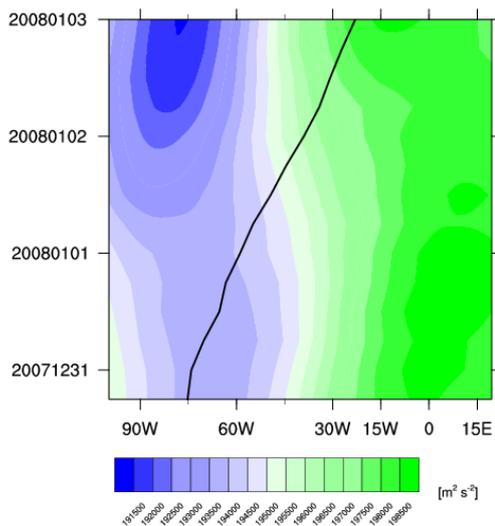


Abbildung A 71: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 93. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

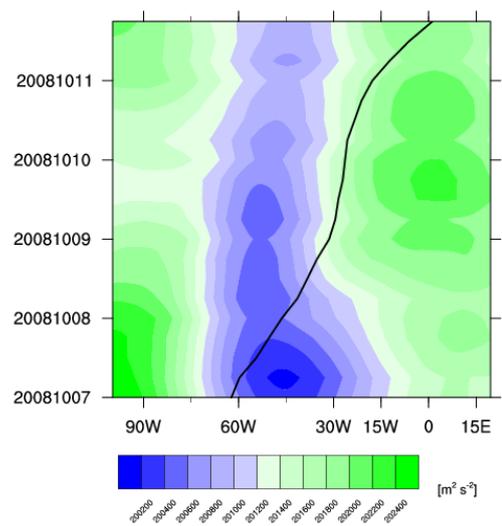


Abbildung A 72: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 94. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

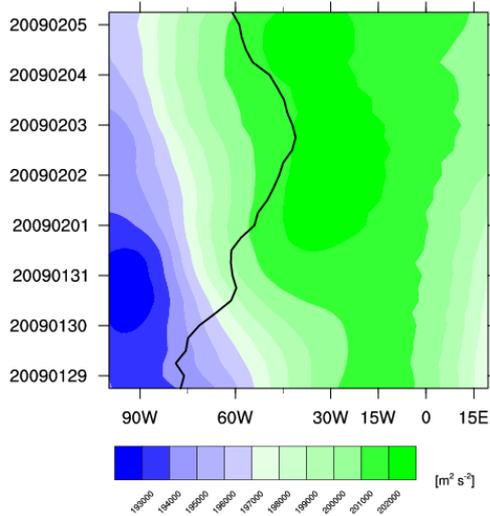


Abbildung A 73: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 97. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

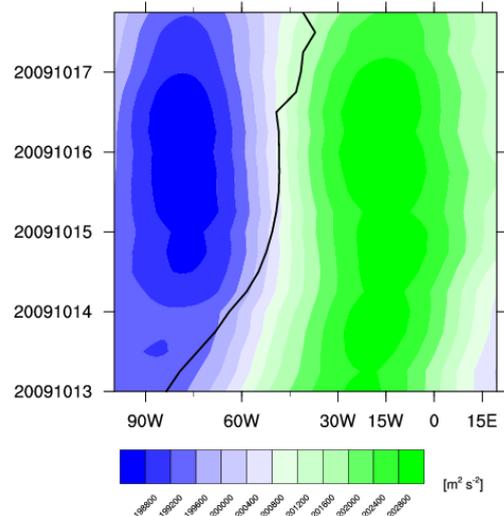


Abbildung A 74: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 98. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

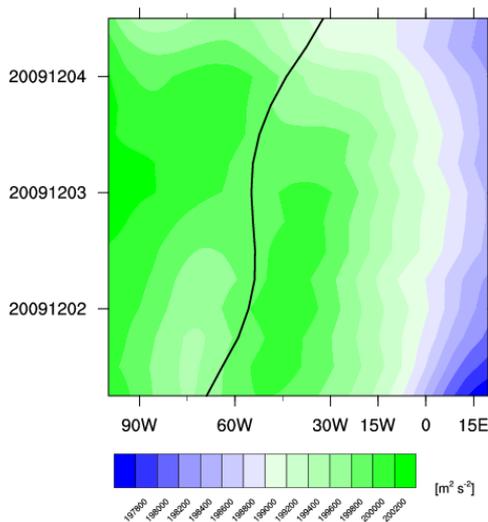


Abbildung A 75: Hovmöller-Diagramm des absoluten Geopotentials in 50 hPa bezüglich der Lebenszeit von Sturm 99. Die schwarze Linie beschreibt die Zugbahn des Sturms.

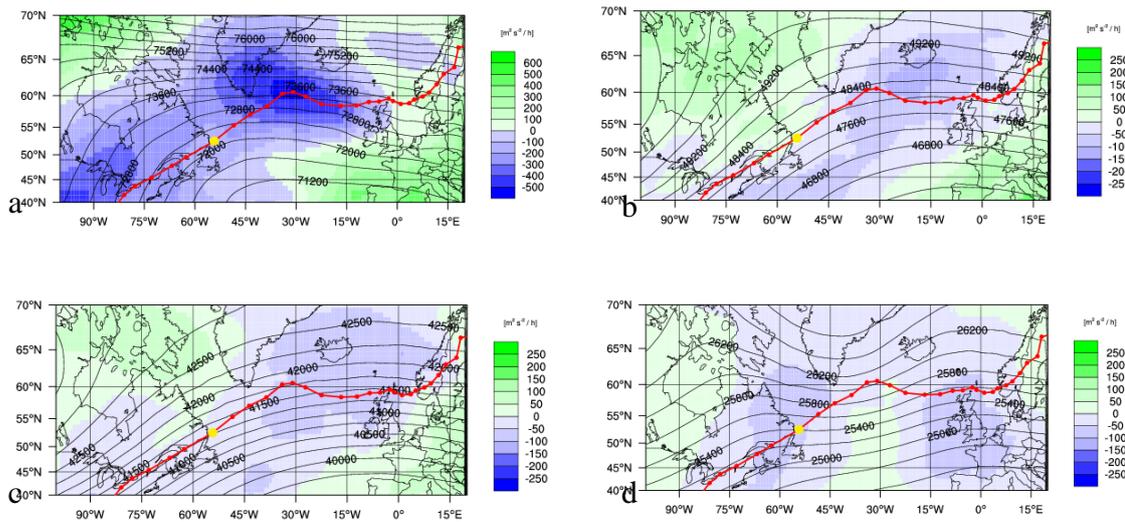


Abbildung A 76: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 10 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC

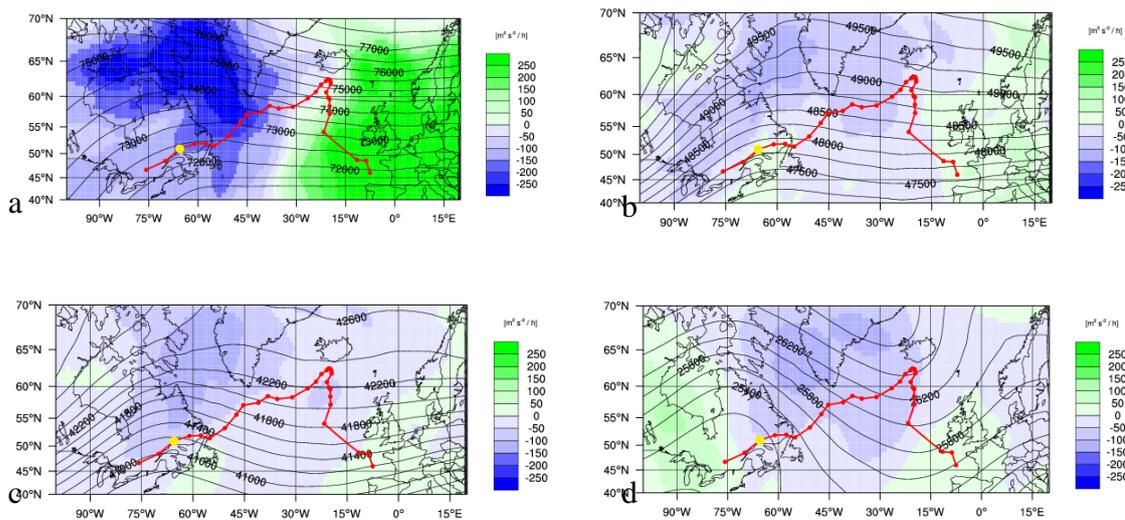
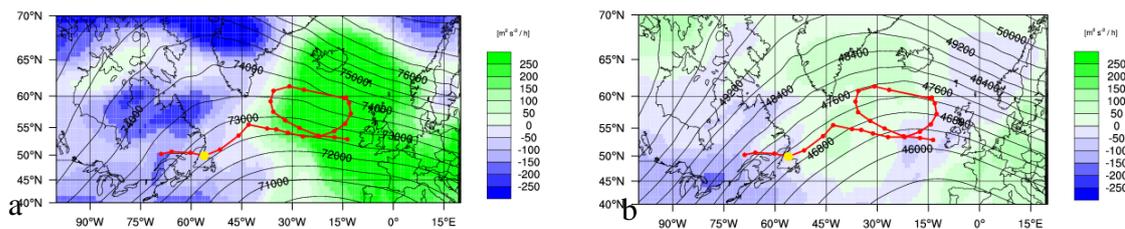


Abbildung A 77: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 13 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC



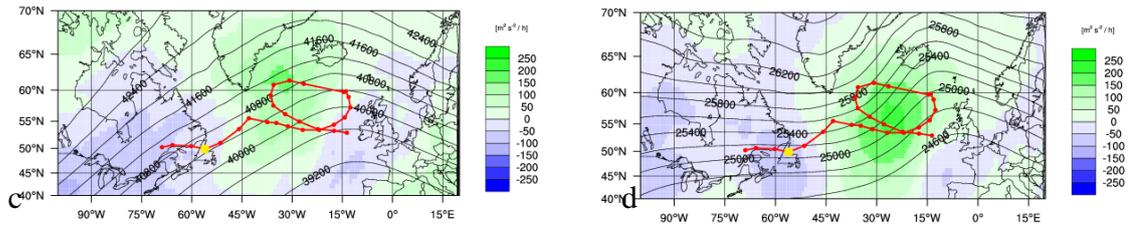


Abbildung A 78: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 43 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC

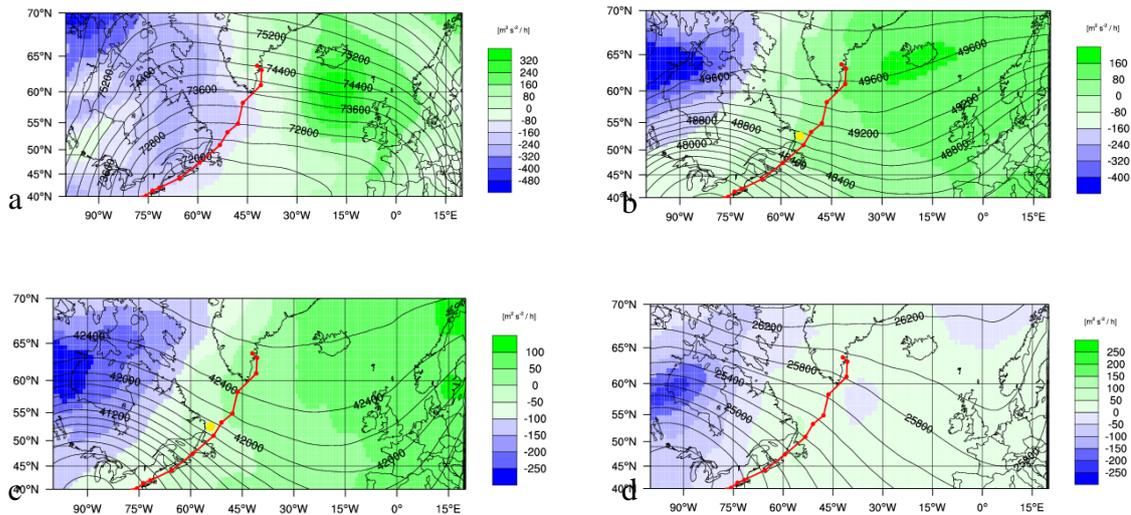


Abbildung A 79: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 45 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC

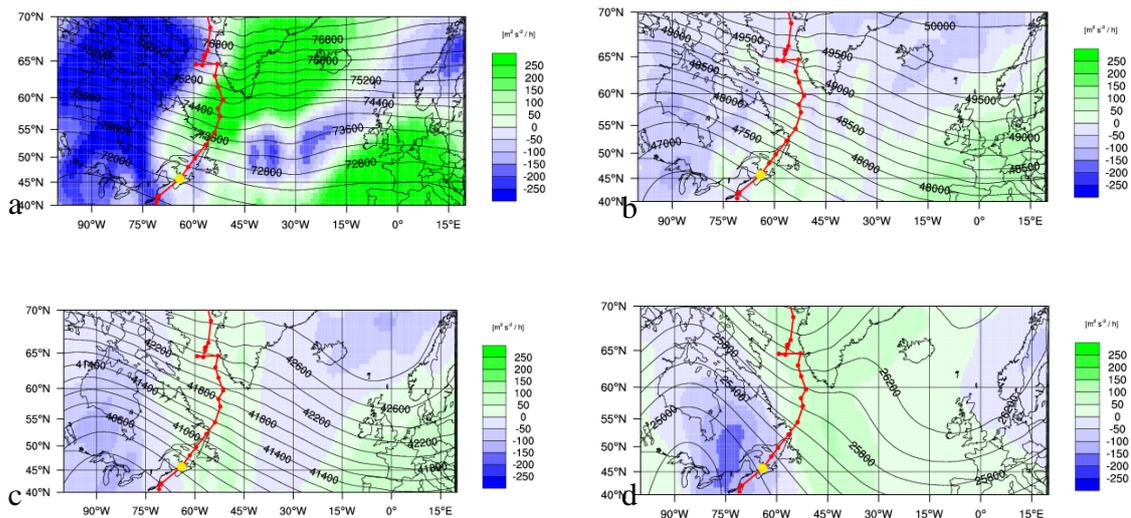


Abbildung A 80: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 48 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC

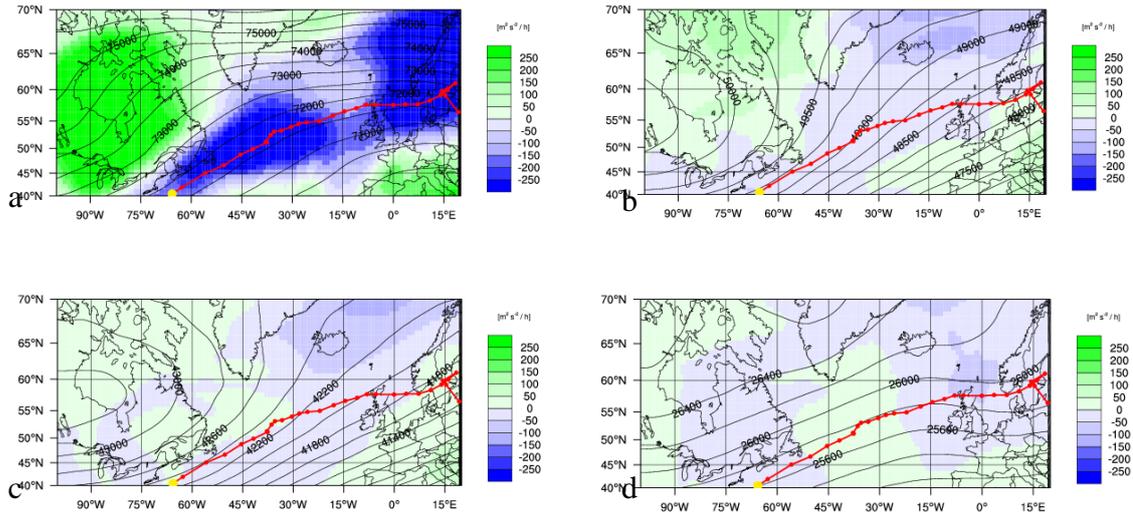


Abbildung A 81: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 58 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC

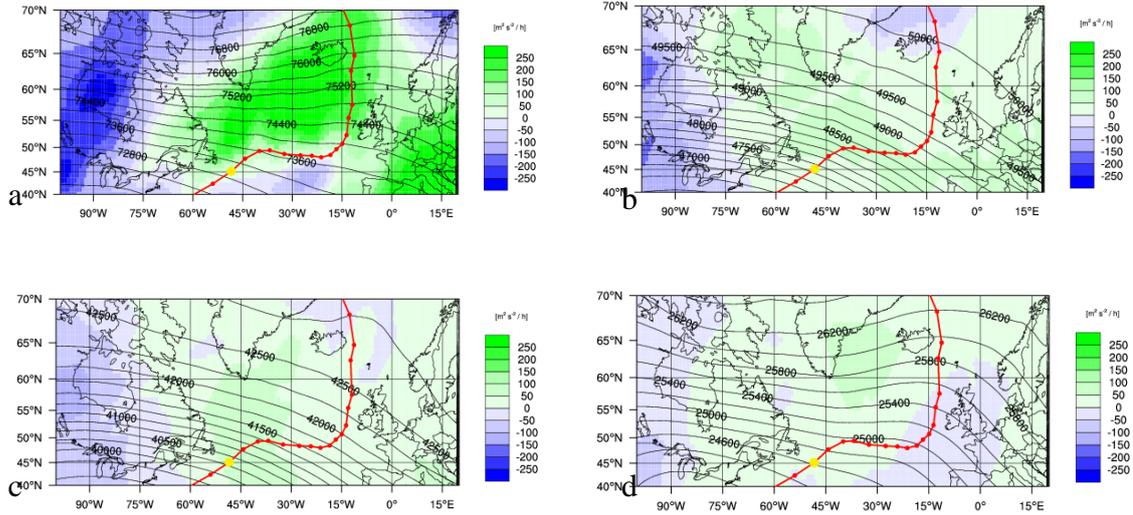
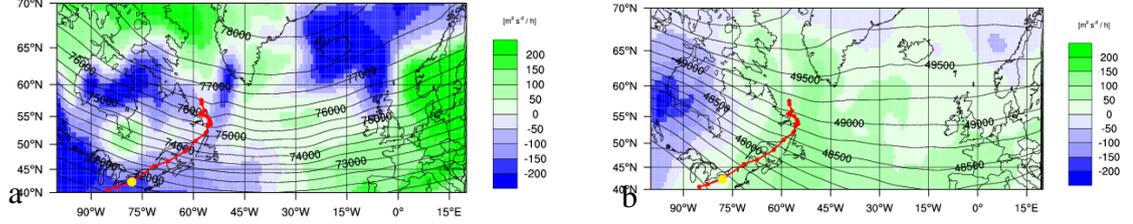


Abbildung A 82: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 60 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC



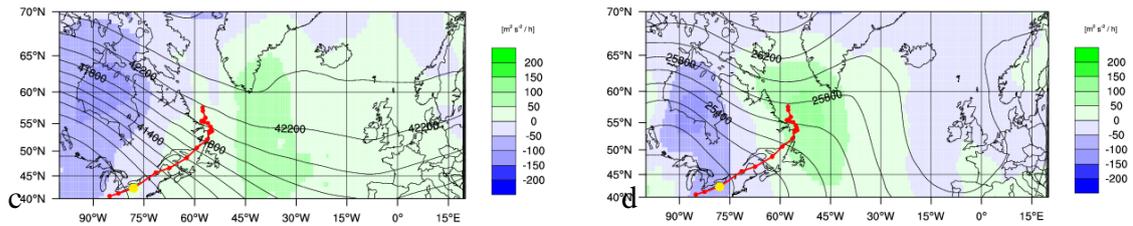


Abbildung A 83: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 64 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC

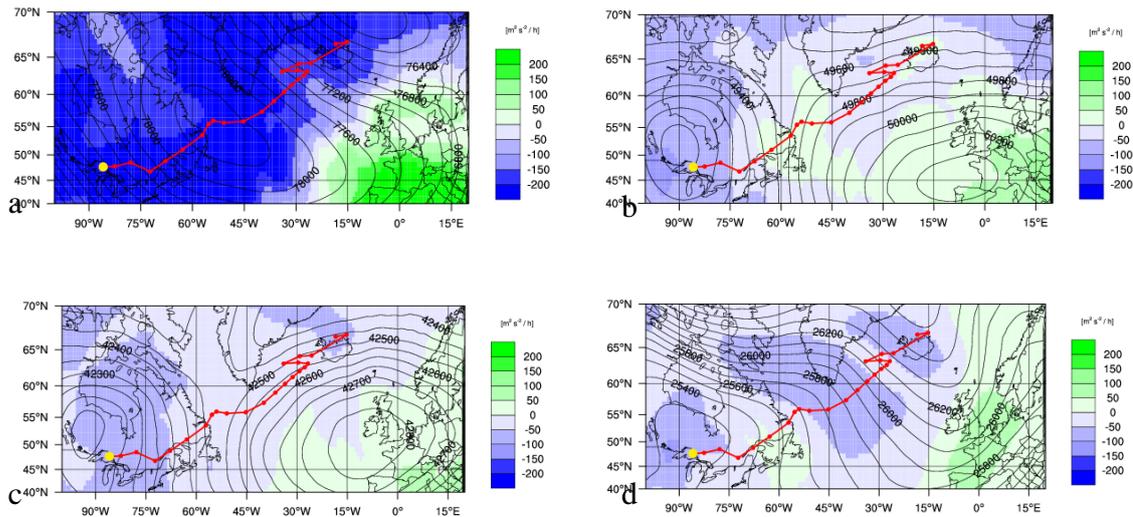


Abbildung A 84: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 68 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC

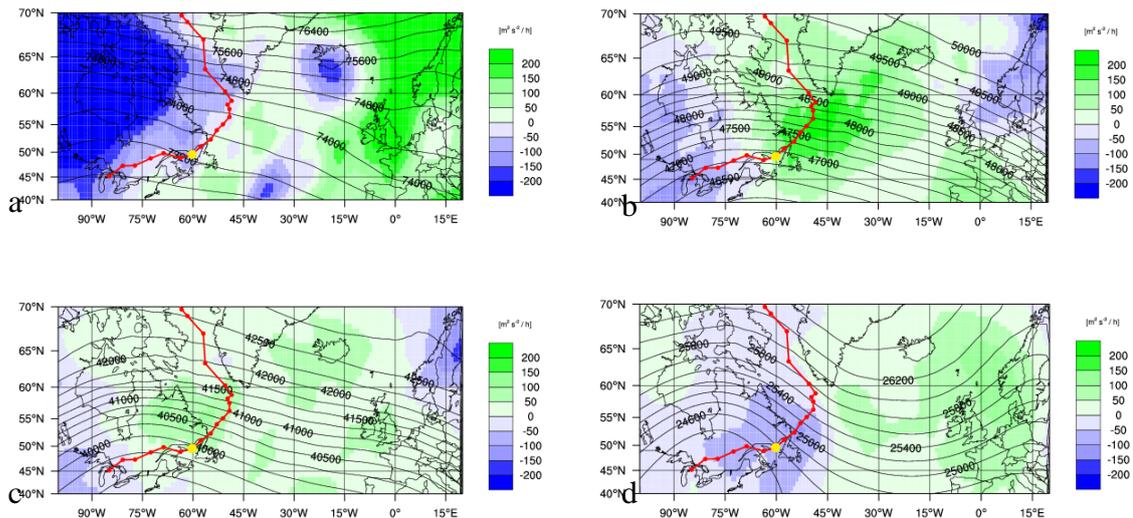


Abbildung A 85: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 72 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC

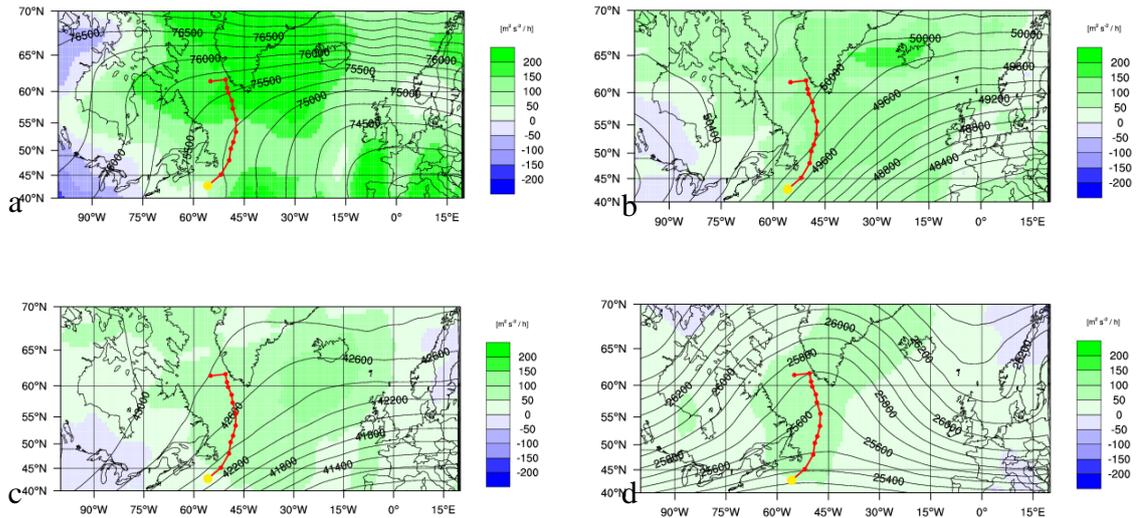


Abbildung A 86: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 81 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC

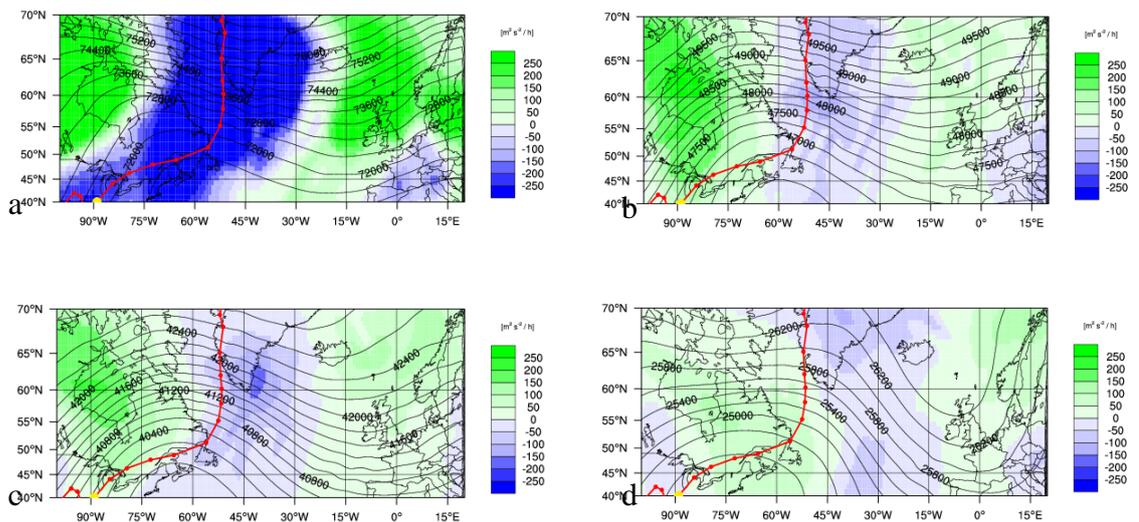


Abbildung A 87: Synoptische Situation in 50 hPa bezüglich Sturm 96 zum Zeitpunkt des stärksten Druckfalls in a) 1 hPa, b) 10 hPa, c) 20 hPa und d) 100 hPa. Die rote Linie zeigt die Zugbahn des Sturms, der gelbe Punkt das aktuelle Datum um 12 UTC

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, wörtlich oder inhaltlich übernommene Stellen als solche kenntlich gemacht und die Regeln des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der jeweils gültigen Fassung beachtet habe.

Karlsruhe, den 22. Januar 2018

Danksagung

Schlussendlich möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. Peter Knippertz danke ich für die Übernahme des Referats und die Bereitstellung des Themas. Danke für die konstruktive Kritik, die zielführenden Gespräche und die gute Betreuung. Dies hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr. Peter Braesicke danke ich für die Übernahme des Koreferats und die Bereitschaft, mir bei Fragen zur Seite zu stehen.

Ich bedanke mich bei Dr. Gregor Pante für die wertvolle Hilfe beim Programmieren und die Beschaffung der Daten.

Auch bei der restlichen Arbeitsgruppe möchte ich mich bedanken für die stets freundliche Atmosphäre und Hilfsbereitschaft.

Schlussendlich noch ein Dank an Dr. Melanie Karremann und nach Köln zu PD Dr. Joaquim Pinto und Sven Ulbrich für die Bereitstellung der Daten der 100 intensivsten Zyklonen, die für diese Arbeit grundlegend waren.