

# **Einfluss von Dropsondendaten aus tropischen Wirbelstürmen auf die Wettervorhersage für Europa**

Diplomarbeit im Fach Meteorologie

**Maxi Böttcher**

März 2006



Institut für Meteorologie und Klimaforschung  
Universität Karlsruhe (TH)



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Gezielte Beobachtungen . . . . .	4
2.1.1	Ensemblevorhersage am NCEP . . . . .	5
2.1.2	Strategie für gezielte Beobachtungen . . . . .	6
2.1.3	Ausbreitung der Signale . . . . .	7
2.2	Herkunft der verarbeiteten Daten . . . . .	8
2.3	Untersuchungsmethoden . . . . .	9
2.3.1	Dynamische Tropopausenkarten . . . . .	9
2.3.2	Eady Index . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Lebenszyklen der untersuchten Wirbelstürme</b>	<b>13</b>
3.1	Ivan 2. – 24. September 2004 . . . . .	13
3.2	Bonnie 3. – 13. August 2004 und Charley 9. – 14. August 2004 . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Ausbreitung der Vorhersageunterschiede</b>	<b>25</b>
4.1	Vorhersage Ivan . . . . .	25
4.2	Vorhersage Bonnie und Charley . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Bewertung der Vorhersagen</b>	<b>50</b>
5.1	Synoptischer Vergleich . . . . .	50
5.1.1	Vorhersage Ivan . . . . .	50
5.1.2	Vorhersage Bonnie und Charley . . . . .	54
5.2	Bestimmung des Vorhersagegüte . . . . .	57
5.2.1	Vorhersage Ivan . . . . .	58
5.2.2	Vorhersage Bonnie und Charley . . . . .	64
5.3	Mittelung über mehrere Vorhersagen . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>77</b>

**A Tabellen**

**80**

# Kapitel 1

## Einleitung

Im Jahr 1996 gelangte der ehemalige Hurrikan Lili als außertropisches System bis auf die Ostseite des Atlantischen Ozeans. Als Auswirkungen dieses reintensivierten Tiefdruckgebietes waren sieben Tote und hoher wirtschaftlicher Schaden durch Sturm und starken Niederschlag in Europa zu verzeichnen (MunichRe NatCatSERVICE).

Der verheerende Sturm im Oktober 1987 über Großbritannien und Nordfrankreich hatte mehrere Tote und beträchtlichen Sturmschaden zur Folge (MetOffice UK). Hoskins und Berrisford (1988) untersuchten die vermutlich von Hurrikan Floyd ausgelöste Tropopausenanomalie, mit welcher die verursachende Zyklone nach Europa gelangte. Wahrscheinlich können ehemalige Wirbelstürme in den mittleren Breiten Entwicklungen stromabwärts anregen, welche dann zu starken Tiefdruckgebieten führen.

An den genannten Beispielen wird deutlich, welche Gefahren von tropischen Wirbelstürmen ausgehen können, wenn sie nach Verlagerung in mittlere Breiten mit den lokalen synoptischen Systemen wechselwirken. Ist diese Wechselwirkung mit einer Reintensivierung zu einem außertropischen Tiefdruckgebiet verbunden, so wird der Vorgang als außertropische Umwandlung<sup>1</sup> bezeichnet.

Rund 46% aller atlantischen Wirbelstürme durchlaufen die Entwicklung zu einem außertropischen Tief. Dabei gelangen 1 bis 2 umgewandelte Hurrikane pro Jahr bis Westeuropa. Europa als Ganzes gesehen wird jedes 2. Jahr von einem reintensivierten, ehemals tropischen Wirbelsturm betroffen (Hart und Evans 2001). Der Durchzug eines solchen Tiefdruckgebietes kann hohe Naturgefahren wie Stürme und heftige Regenfälle mit sich bringen.

Außertropische Übergänge stellen eine große Herausforderung für die numerische Wettervorhersage dar (Jones et al. 2003). Globale Vorhersagesysteme, welche auch die Anfangsbedingungen für mesoskalige und regionale Modelle bereitstellen, können den Kern kleinräumiger Wirbelstürme oft nicht auflösen. Die erhöhte Verlagerungsgeschwindigkeit und schnelle Intensivierung der Systeme bei außertropischer Umwandlung können

---

<sup>1</sup>engl. extratropical transition, ET

die Vorhersagegüte stark mindern (Jones et al. 2003). Von besonderer Bedeutung ist dabei, die Lage des Wirbelsturmes relativ zu den obertroposphärischen Wellen der mittleren Breiten genau zu erfassen. Das zeitliche Verfehlen von tropischem und außertropischem System ist auch an den hier begutachteten Vorhersagen zu beobachten. Die Vorhersage außertropischer Übergänge ist deshalb aktuelles Forschungsthema.

Seit 1997 werden vom National Hurricane Center (NHC) und der Hurricane Research Division (HRD), Abteilungen der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Beobachtungsflüge um Hurrikane unternommen (Aberson 2002). Es werden diejenigen Wirbelstürme überwacht, von denen ein Auftreffen auf Land erwartet wird. Während der Flugmissionen werden aktuell GPS-navigierte Dropsonden abgeworfen, welche Profile von Druck, Temperatur, Wind und Luftfeuchte messen (Aberson 2002). Diese Daten werden nach Plausibilitätsprüfung sofort an die Datenassimilation des Vorhersagemodells übertragen, um als Anfangsbedingungen zu dienen.

Für die Kurzfristvorhersage 12–60 h bewirken die zusätzlichen Dropsondendaten in verschiedenen numerischen Modellen Reduzierungen des Vorhersagefehlers der Zugbahn bis zu 30% (Burpee 1996). Welche Auswirkungen die Dropsondenmessungen um tropische Wirbelstürme auf die Mittelfristvorhersage zeigen, wird in dieser Arbeit untersucht. Es werden Prognoseläufe bis zu 180 h miteinander verglichen, welche operationell die zusätzlichen Beobachtungen um Hurrikane enthalten mit denen, aus welchen diese Informationen entfernt wurden. Die mit den ehemaligen Wirbelstürmen verbundenen Luftmassen und Entwicklungen stromabwärts können in dieser Zeitspanne bis Europa gelangen.

In Kapitel 2 wird die Strategie für die gezielten Beobachtungen vorgestellt und Hintergrundwissen dazu vermittelt. Die Herkunft der ausgewerteten Daten und Informationen zum Modell sind ebenfalls Inhalt dieses Abschnittes. Zudem werden Methoden erläutert, welche zur Untersuchung dienen. Eine synoptische Übersicht über die Wirbelstürme Ivan, Charley und Bonnie aus dem Jahr 2004, auf welche das Hauptaugenmerk dieser Arbeit fällt, wird in Kapitel 3 gegeben. Anschließend werden in Kapitel 4 die Differenzen zwischen den Vorhersagepaaren untersucht. In Kapitel 5 wird die Güte der Prognosen mit und ohne Dropsondenmessungen im Vergleich zu Analysen bewertet. Abschließend erfolgt in Kapitel 6 die Zusammenfassung der Arbeit und ihrer Ergebnisse.

# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Gezielte Beobachtungen

Eine wichtige Aufgabe ist die präzise Vorhersage von Zeit und Ort des Auftreffens von tropischen Wirbelstürmen auf Landgebiete. Der Lebenszyklus tropischer Wirbelstürme verläuft über Meeresgebiete, wo Lücken im meteorologischen Beobachtungsnetz bestehen. Die Durchführung zusätzlicher Messungen im Bereich in und um den tropischen Wirbelsturm ermöglicht die Verringerung von Vorhersagefehlern der Zugbahn und der Intensität in der Kurzfristvorhersage (Burpee 1996).

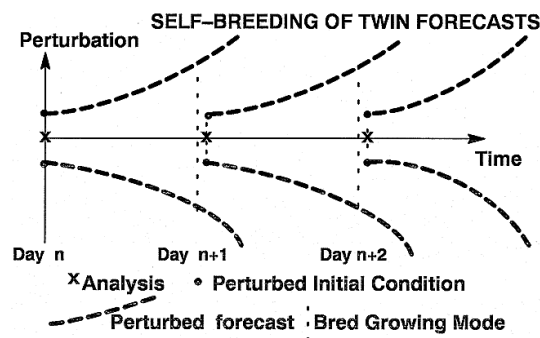
Die Ozean- und Wetterbehörde der USA, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), betreibt Flugzeuge, welche für Messflüge um Wirbelstürme vorgesehen sind. Der Jet Gulfstream IV-SP (G-IV) wird zur Beschaffung operationeller Daten aus dem Bereich von Hurrikanen eingesetzt. Diese Messdaten werden über Satellit an die Wetterdienste zur sofortigen Verarbeitung in Vorhersagemodellen übertragen. Das Flugzeug WP-3D dient der Forschung an Wirbelstürmen. Die zusätzlich erlangten Daten werden u. a. zur Untersuchung der Verbesserung numerischer Modelle verwendet. Beide Flugzeugtypen sind mit verschiedenen Instrumenten ausgestattet, wovon die Dropsondenvorrichtungen die hierzu notwendigen Messdaten liefern. Die aktuell eingesetzten GPS-navigierten Dropsonden messen Vertikalprofile von Temperatur, Feuchte und Wind ab der Flughöhe von ca. 150 hPa bis zum Boden (Aberson 2002). Davon werden die Messwerte der Feuchte bis auf weiteres nicht für die operationellen Vorhersagen verwendet (persönliche Mitteilung von S. Aberson 2006).

Um die zusätzlichen Beobachtungen bezüglich der Messgebiete zu optimieren, werden derzeit verschiedene Verfahren untersucht. Aktuell werden von der HRD (Hurricane Research Division) die Bereiche für die zielgerichtete Stichprobensammlung subjektiv ausgewählt. Dabei werden die Messungen um das Sturmgebiet gleichmäßig verteilt und unter Beachtung der Ensemblespannweite des Windmittels über eine hochreichende Luftsäule durchgeführt (Majumdar und Aberson 2005). Wie im nachfolgenden Ab-

schnitt näher erläutert wird, besteht ein Ensemble aus verschiedenen, mit geringfügig unterschiedlichen Anfangsbedingungen der Analyse gestarteten Vorhersagen. Diese verschiedenen Anfangsbedingungen bewirken ein Auseinanderdriften der Prognosen im Laufe der Vorhersagezeit. Mit der Streuung der Ensemblemitglieder kann eine Aussage zur Verlässlichkeit der Vorhersage gemacht werden.

### 2.1.1 Ensemblevorhersage am NCEP

Neben der deterministischen Wettervorhersage (Kontrollvorhersage) werden am NCEP (National Centers for Environmental Prediction) Ensemblevorhersagen zur Einschätzung und Voraussage der Vorhersagegüte gerechnet. Der Hintergrund für diese zusätzlich gerechneten Prognosen liegt in der Unvollkommenheit der Analyse. Für die Ensemblevorhersage wird die Analyse mit kleinen Abweichungen verändert, welche mögliche Fehler widerspiegeln sollen. Diese Abweichungen der Analyse vom wahren Zustand der Atmosphäre wurden durch Toth und Kalnay (1993) in Messfehlern und deren Folge, Fehlstellen im Datennetz und der Näherungen in der Analysetechnik zusammengefasst. Die Ensemblevorhersage soll alle möglichen Entwicklungen des Atmosphärenzustandes abdecken. Das Fehlerwachstum im Laufe der Prognose ist mit Instabilitäten der Strömung verbunden. Am NCEP wird für die Entwicklung der Anfangsstörungen eines Vorhersageensembles die Breeding<sup>1</sup> Methode angewandt.



**Abbildung 2.1:** Skizze eines Paares von Ensemblemitgliedern im Breeding Zyklus (Toth und Kalnay 1997)

Aktuell werden am NCEP zehn Ensembles und eine Kontrollvorhersage gerechnet. In fünf Breeding Zyklen werden die Anfangsstörungen bestimmt, welche jeweils mit positivem und negativem Vorzeichen zur Kontrollvorhersage addiert werden. Abbildung 2.1 verdeutlicht die in Toth und Kalnay (1997) beschriebenen Schritte des Breeding Zyklus.

<sup>1</sup>dt. brüten, hervorbringen



In diesem Schema repräsentiert die Abszisse den zeitlichen Verlauf der Kontrollvorhersage. An der Ordinate ist die Höhe der Abweichung eines Ensemblepaares von der Kontrollvorhersage aufgetragen.

Der Kontrollvorhersage, welche aus Analysedaten berechnet wird, wird bei einem Neustart des Rechensystems eine zufällige kleine Störung aufaddiert (Tag  $n$  in Abb. 2.1). Gestörte und ungestörte Vorhersage werden nun berechnet und entfernen sich im Laufe der Zeit voneinander. Nach einer Rechenzeit von 24 Stunden wird die Differenz zwischen den beiden mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen gestarteten Modellläufen bestimmt und normiert (Tag  $n+1$  in Abb. 2.1). Die Normierung ist eine Rückskalierung auf die Größe der Anfangsstörung. Das Störungsfeld, welches der Bred Vektor repräsentiert, fließt nun wieder als der Kontrollvorhersage auferlegte Störung in die nächste Vorhersage ein (Tag  $n+1$  in Abb. 2.1). Dieser Zyklus wird mehrmals wiederholt und pendelt sich nach 3 bis 4 Tagen auf einen stabilen Wachstumswert der Vorhersagestörung ein. Nach 5 Tagen kann der Störungswert in der Berechnung der aktuellen Ensemblevorhersage verwendet werden.

Im operationellen Betrieb werden die Ensemblepaare täglich auf den Umfang der Anfangsstörungen zurückgesetzt und wieder der Kontrollvorhersage angerechnet. Mit den so erzeugten Bred Vektoren erfordert die Ensemblevorhersage keinen zusätzlichen Rechenaufwand.

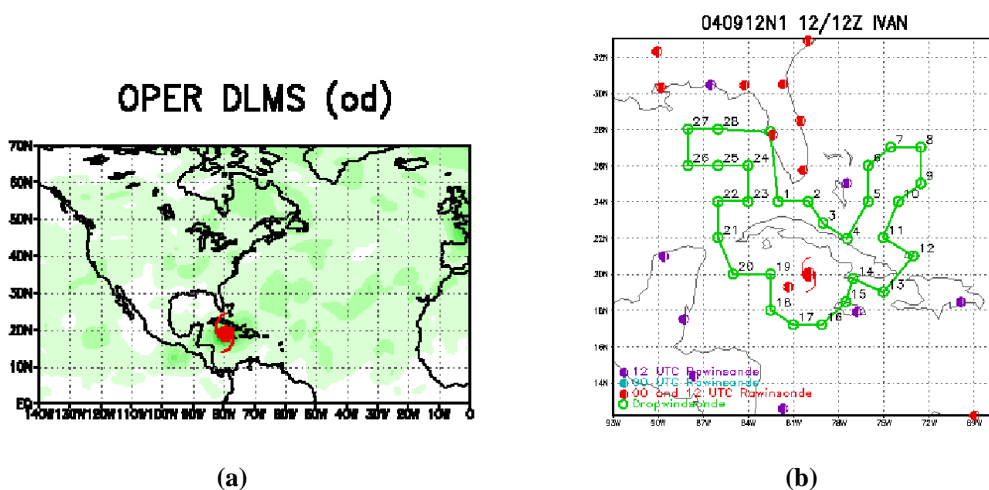
Regional unterschiedliche Rückskalierungen erlauben die Berücksichtigung größerer Störungsamplituden über datenärmeren Gebieten, welche dort eine erhöhte Analyseunsicherheit wiedergeben. Das Verfahren der Normierung bzw. Rückskalierung ist nicht näher erklärt. Das gesamte Ensemble entsteht durch das Erzeugen von verschiedenen unabhängigen Anfangsstörungen. Durch das Breeding Verfahren werden die am schnellsten wachsenden Störungen in der Atmosphäre erfasst.

Der auf einer Karte graphisch abgebildete Bred Vektor, der auf das größte zeitliche Störungswachstum weist, zeigt Bereiche mit unterschiedlich zuverlässiger Prognose an. Liegt die Anfangsstörung innerhalb der Amplitude des erwarteten Analysefehlers, so können kleinräumige Instabilitäten, die beispielsweise mit Konvektion verbunden sind, ausgesondert und instabile barokline Wellen besser wiedergegeben werden (Toth und Kalnay 1997).

### 2.1.2 Strategie für gezielte Beobachtungen

Das Ziel der gerichteten Beobachtungen ist das Auffinden von Regionen, in welchen zusätzliche Messungen voraussichtlich einen positiven Einfluss auf die Vorhersage haben. Es wird angenommen, dass zusätzliche Messungen in Regionen, wo große Ensemblespannweiten entstanden sind, die Qualität der Vorhersage verbessern können (Kalnay 2003). Abernethy (2003) untersuchte die Reduzierung von Zugbahn- und Intensitätsvorhersagefehlern auf Grundlage zielgerichteter Beobachtungen in Gebieten, welche durch eine starke Spannweite des Ensembles des Windmittels zwischen 850 und 200 hPa auffallen.

Die Strömung dieser hochreichenden Windschicht in der Umgebung des Wirbelsturms ist vorwiegend für dessen Verlagerung verantwortlich.



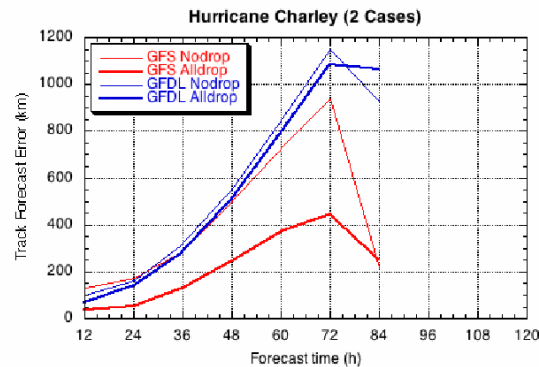
**Abbildung 2.2:** (a) Varianz des DLM Wind Ensembles (grün schattiert), das rote Symbol markiert den Ort des Hurrikans zu diesem Vorhersagezeitpunkt; (b) tatsächlich durchgeführte Dropsondenmessungen im Bereich de Hurrikans (schwarze Punkte); (Majumdar et al. 2005)

Die Bestimmung der Zielgebiete für angepasste Beobachtungen erfolgt nach folgendem Schema: Die Ensemblevorhersage wird bis zur voraussichtlichen Beobachtungszeit gerechnet. Die Orte der größten Ensemblespannweite, welche sich zu dem Zeitpunkt in der Nähe des Wirbelsturms befinden, sind die Ziele der zusätzlichen Messungen. Als Beispiel dafür zeigt Abbildung 2.2 a die vorausberechnete Varianz der Ensemblespanne nach 48 h Prognose für den 12.09.04 um Hurrikan Ivan. In kräftig grün markierten Regionen weisen die Ensembles die größten Spannweiten auf. In Abbildung 2.2 b sind Flugroute und Orte der durchgeführten Zusatzbeobachtungen am Beispiel des Hurrikans Ivan vom 12.09.2004 aufgezeichnet. Die Dropsondenmessungen fließen anschließend sofort nach ihrer Plausibilitätsprüfung in die Datenassimilation für den Vorhersagezyklus ein.

In der Praxis wurden mit diesem Verfahren durchschnittlich bessere Ergebnisse für die kurzfristige Zugbahn- und Intensitätsvorhersage erzielt als bei gleichmäßiger Verteilung der Messungen um den Wirbelsturm ohne Beachtung der Ensemblestreuung (Aber-son 2003). In Abbildung 2.3 ist die Verringerung des Vorhersagefehlers, welche durch die zusätzlichen Beobachtungen erreicht wurden, für die zwei Modelle GSF und GDFL<sup>2</sup> gegen die Vorhersagezeit aufgetragen.

Verschiedene Zielstrategien wurden von Majumdar et al. (2005) für die zusätzlichen Beobachtungen anhand der Wirbelstürme der Saison 2004 über dem Atlantischen Ozean

<sup>2</sup>Numerisches Vorhersagemodell des Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, USA



**Abbildung 2.3:** Für die Modelle GFS und GFDL berechnete Verminderung des Zugbahnvorhersagefehlers auf Grund der zusätzlichen Messungen (HRD)

untersucht. Demnach betont die Ensemblestreuung der gemittelten hochreichenden Windschicht in den meisten Fällen den unmittelbaren Bereich des Wirbelsturms. Oft markiert dieses Verfahren auch die Randgebiete des subtropischen Rückens abseits des Wirbelsturmes.

### 2.1.3 Ausbreitung der Signale

Die Differenz einer Modellvariablen, welche aus den beiden Vorhersagen mit und ohne die ergänzenden Messungen bestimmbar ist, kann als Signalwirkung der zusätzlich assimilierten Daten angesehen werden. Szunyogh et al. (2002) untersuchten die Ausbreitung dieser Signale anhand der gezielten Beobachtungen während des „Winter Storm Reconnaissance Program 2000“ mit dem Ziel der Reduzierung von Vorhersagefehlern von Winterstürmen über Nordamerika. Die Gebiete für die gezielten Beobachtungen wurden mit unterschiedlichen Strategien bestimmt.

Es wurde herausgearbeitet, dass sich die Wirkung der zusätzlichen Beobachtungen auf ähnliche Weise wie synoptische Systeme fortpflanzt. Das Signal des Bodendruckes breitet sich im Durchschnitt mit einer Geschwindigkeit von  $30^\circ$  ostwärts am Tag aus. Lokale Maxima erreichte das Bodendrucksignal an seinem vorderen Rand dort, wo es auf Gebiete mit starker Baroklinität traf. Schwächere Signale zeigten sich für Bereiche mit niedriger Baroklinität (Szunyogh et al. 2002).

Der Fehler der Bodendruckvorhersage in Verbindung mit Winterstürmen konnte durch die zusätzlich assimilierten Beobachtungen im Mittel um 15 bis 25% reduziert werden.

## 2.2 Herkunft der verarbeiteten Daten

Die ausgewerteten deterministischen Modellrechnungen wurden vom Amerikanischen Wetterdienst NCEP (National Centers for Environmental Prediction) durchgeführt. Die Bereitstellung und die Berechnung der Vorhersage ohne Dropsondenmessungen erfolgte durch Dr. Sim Aberson (HRD). Die Daten des operationellen Globalmodells GFS (Global Forecast System) liegen hier in der horizontalen Auflösung von  $1^\circ$  vor. Das GFS arbeitet im Sigma-System, d. h. die Höhenstufen liegen auf normierten Flächen gleichen Druckes vor. Die hier verwendeten Daten wurden mit 31 Höhenstufen von 1000 bis 1 hPa ausgegeben. Die Höhenschritte weisen eine unregelmäßige Abstufung auf. In der bodennahen Schicht bis 900 hPa sind die Daten alle 25 hPa vorhanden, darüber bis 100 hPa in Schritten zu 50 hPa.

Das GFS ist ein Spektralmodell. Die enthaltenen Gleichungen für Vorticity, Divergenz, Bodendruck, virtuelle Temperatur und Wolkenwasser (NCEP 2003) werden durch Transformation in Fourierrechnungen gelöst. Die Daten werden auf Gitterpunkte des Gauss'schen Koordinatensystems projiziert. Die auf Wellen transformierten Lösungen haben zur Auswirkung, dass sich kleine Änderungen an einem Ort der Atmosphäre auch in entfernten Gebieten bemerkbar machen können.

Die in das Modell einfließenden Daten durchlaufen zunächst das Assimilationsverfahren GDAS (Global Data Assimilation System). Darin ist die Prüfung der aktuellen Beobachtungsdaten, die Abbildung von Wirbelstürmen auf synthetisch erstellte Wirbel und die Analyse aus dem Schätzfeld<sup>3</sup>, bereitgestellt aus der Kurzfristvorhersage des Globalmodells, enthalten (Aberson 2002).

Die betrachteten Vorhersagen liegen alle 6 h über einen Zeitraum von 180 h vor. Für die Zeiträume der Vorhersage wurden in gleichen zeitlichen Abständen Analysen bereitgestellt. Pro Vorhersagestartzeit wurden jeweils zwei Modellläufe mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen betrachtet: (a) die operationelle Prognose mit Messdaten aus dem Bereich um Wirbelstürme und (b) die Vorhersage ohne Informationen aus Hurrikanen. In den operationellen Modellläufen sind Messwerte aus Wirbelstürmen der gesamten Saison enthalten. Die Modellrechnungen ohne Dropsondendaten enthalten keinerlei Informationen aus Wirbelstürmen des laufenden Jahres. Die Modellläufe, in welchen die gezielten Messungen um Hurrikane der Saison nicht benutzt wurden, sind von Dr. Sim Aberson (HRD) vorgenommen und zur Verfügung gestellt worden. Die Rechnung ohne die zusätzlichen Dropsondendaten der gesamten Saison ist notwendig, um Einflüsse früherer Hurrikane in der Analyse auszuschließen.

Verschiedene Größen wurden nachträglich aus den Modellausgaben bestimmt, wie z. B. die potentielle Vorticity und verschiedene Feuchtegrößen. Um letztere berechnen zu können, wurde an Gitterpunkten, an denen die relative Feuchte ( $rh$ ) mit Null ausgegeben wurde, eine Eins gesetzt. Diese Werte  $rh = 0\%$  kamen nur in Höhenstufen oberhalb von

---

<sup>3</sup>engl. first guess

700 hPa vor. Die horizontal umgebenden Gitterpunkte wiesen kleine Werten zwischen  $rh = 7$  bis  $1\%$  auf, sodass die Ersetzung mit  $rh = 1\%$  gerechtfertigt erscheint.

## 2.3 Untersuchungsmethoden

### 2.3.1 Dynamische Tropopausenkarten

Die potentielle Vorticity (PV) ist ein nützliches Instrument, um atmosphärische Zustände und Bewegungen verfolgen und analysieren zu können. Die allgemeine Form dieser Erhaltungsgröße wurde von Ertel 1942 hergeleitet. Im z-System lautet die Gleichung

$$PV = \rho^{-1}(f\vec{k} + \nabla \times \vec{v}) \cdot \nabla\theta \quad (2.1)$$

Hier wird die Form im p-System

$$PV = -g(f\vec{k} + \nabla_p \times \vec{v}) \cdot \nabla_p\theta \quad (2.2)$$

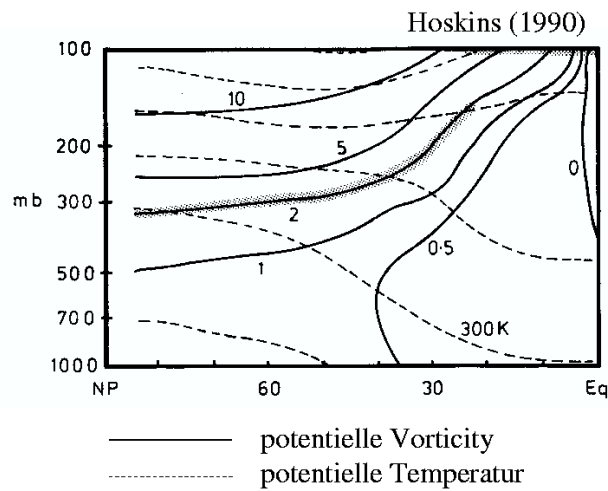
nach Hoskins et al. (1985) verwendet. Darin stellt  $\nabla_p$  den 3-dimensionalen Gradient im p-System dar. Die PV ist unter diabatischen und reibungsfreien Bedingungen erhalten. Sie wird in der Einheit  $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$  angegeben.

Die PV besitzt als meteorologische Größe den Vorteil, dynamische und thermodynamische Aspekte miteinander zu verbinden. Aus Gleichung 2.2 ist ersichtlich, dass die PV mit zunehmender absoluter Vorticity ( $\eta_p = f\vec{k} + \nabla_p \times \vec{v}$ ) und Stabilität erhöht wird. Global betrachtet nimmt der Wert der PV auf der Nordhalbkugel vom Äquator zum Pol hin und insbesondere oberhalb der Troposphäre stark zu. Somit folgen die Flächen  $1 \leq \text{PVU} \leq 3,5$  etwa dem Verlauf der Tropopause (Hoskins et al. 1985).

Abbildung 2.4 zeigt den gemittelten Verlauf von Isentropen und Linien gleicher potentieller Vorticity zwischen Äquator und Nordpol. Abbildungen, welche Werte auf einer entsprechend definierten Tropopause zeigen, werden dynamische Tropopausenkarten genannt.

Hier wurde die Tropopause auf  $PV = 2 \text{ PVU}$  definiert, um dynamische Tropopausenkarten zu erzeugen. Auf dieser Fläche sind dann potentielle Temperaturen und Windvektoren dargestellt. Die Bestimmung der 2 PVU-Fläche und der auf ihr abgebildeten Felder erfolgte hier nach einem von Morgan und Nielsen-Gammon (1998) vorgeschlagenen Algorithmus. In jeder Säule über einem Gitterpunkt der Grundfläche wurde ausgehend vom Druckniveau  $p = 100 \text{ hPa}$  absteigend nach dem nächsten Wert  $PV \geq 2 \text{ PVU}$  gesucht. Wiesen alle Werte zwischen  $p = 100$  und  $700 \text{ hPa}$  einen höheren Wert als  $2 \text{ PVU}$  auf, so wurde die Tropopause auf  $p = 700 \text{ hPa}$  gesetzt. Entsprechend wurde die Tropopause auf  $p = 100 \text{ hPa}$  festgelegt, wenn im abgesuchten Bereich alle Werte der PV unter  $2 \text{ PVU}$  lagen.

Eine herausragende Eigenschaft der PV, welche die Verbindungen zu primären Merkmalen in der Atmosphäre zeigt, ist die Invertierbarkeit. Voraussetzungen dafür ist eine



**Abbildung 2.4:** Mittlerer Verlauf von potentieller Temperatur und potentieller Vorticity über der Nordhalbkugel (Hoskins 1990)

Balancebedingung, die Definition eines Grundzustandes und geeignete Randbedingungen. Durch eine Inversion kann auf das vollständige Massen- (d.h. Temperatur-) und Windfeld geschlossen werden (Hoskins et al. 1985).

Im Vergleich zu Karten der quasigeostrophischen Betrachtungsweise auf Druckflächen können auf dynamischen Tropopausenkarten analoge Strukturen erkannt werden. So entsprechen Bereiche mit niedriger potentieller Temperatur an Orten mit tiefliegender 2 PVU-Fläche den mit stratosphärischer bzw. arktischer Luft gefüllten Trögen. Aufgrund der Erhaltungseigenschaft der PV können durch Darstellung der Windvektoren auf der dynamischen Tropopause Advektionsvorgänge gut verfolgt und vorhergesagt werden. Treten diabatische Effekte oder Reibung auf, so ist das anhand von Produktion oder Abbau von PV zu erkennen. Aus der Form der PV im z-System Gleichung 2.1 ergibt sich bei zeitlicher Änderung:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{PV} = \frac{1}{\rho} (f \vec{k} + \nabla \times \vec{v}) \cdot \nabla \theta + \frac{1}{\rho} \vec{K} \cdot \nabla \theta \quad (2.3)$$

mit  $\vec{K} = \nabla \times \vec{F}$ , worin  $\vec{F}$  die Reibung beschreibt, und der diabatischen Wärmequelle  $\dot{\theta}$  (Hoskins, McIntire und Robertson 1985). In einer ruhenden, reibungsfreien Atmosphäre vereinfacht sich die Gleichung anschaulich zu  $\frac{d}{dt} \mathbf{PV} = \frac{f}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial z}$ . Als Beispiel kann die diabatische Wärmefreisetzung durch Kondensation in der mittleren Troposphäre genannt werden.

### 2.3.2 Eady Index

Wie in Kapitel 2.1 bereits erwähnt wurde, steht die Ausbreitung der Wirkung der zusätzlichen Messungen in Verbindung mit der Baroklinität der Atmosphäre. Als geeignetes Maß, um die baroklin instabilsten Bereiche zu bestimmen, wurde durch Lindzen und Farrell (1980) eine Gleichung aus der Lösung des Eady-Modells (Eady 1949) hergeleitet. Das Eady-Modell gilt als einfachstes Modell zur Darstellung der baroklinen Instabilität. Es erfolgte die Annahme der linearen Zunahme des Windes mit der Höhe ohne horizontale Variabilität. Zudem wurde die Atmosphäre mit festem oberen und unteren Rand begrenzt.

Die Herleitung des Eady-Modells kann in gängigen Lehrbüchern der theoretischen Meteorologie, wie z. B. in Pedlosky (2003) nachgelesen werden. Betrachtet man die verschiedenen Teillösungen für die Phasengeschwindigkeit

$$c_{1,2} = \frac{U_z D}{2} \pm \frac{U_z D}{\mu} \left\{ \left( \frac{\mu D}{2} - \coth \frac{\mu D}{2} \right) \left( \frac{\mu D}{2} - \tanh \frac{\mu D}{2} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

so kann diese bekanntlich nur dann instabil anwachsen, wenn ein Imaginärteil vorhanden ist. In dieser Gleichung bezeichnet  $\mu = \frac{NK}{f}$ ,  $D$  die Höhe der Atmosphärenschicht,  $U_z$  die Windscherung,  $N$  die Brunt-Väisälä-Frequenz,  $f$  die planetare Vorticity und  $K$  die Wellenzahl. Voraussetzung für die imaginäre Phasengeschwindigkeit ist ein negativer Radikant. Nach Umformung erhält man für die imaginäre Phasengeschwindigkeit den Ausdruck

$$c_i k_i = \omega_i = \frac{k U_z D}{\mu} \left\{ \left( \coth \frac{\mu D}{2} - \frac{\mu D}{2} \right) \left( \frac{\mu D}{2} - \tanh \frac{\mu D}{2} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

unter Beachtung, dass der rechte Faktor unter der Wurzel immer positiv sein wird. Aus dimensionsloser graphischer Darstellung von  $\frac{c_i k_i \mu}{U_z D}$  über dem Wurzelausdruck (Pedlosky 2003) oder numerischer Berechnung (Lindzen und Farrell 1980) ergibt sich dann als Maximalwert für die Wachstumsrate der Wert 0,31. Dies gilt nur unter der Voraussetzung der Wellenausbreitung in x-Richtung, d. h.  $l = 0$  in  $K = \sqrt{k^2 + l^2}$ .

Der Ausdruck für das stärkste baroklin instabile Wachstum

$$c_i k_i = \sigma = 0,31 \frac{f}{N} \frac{d\bar{U}}{dz} \quad (2.6)$$

wurde erst später Eady-Index genannt. Er fand bereits Anwendung unter Hoskins und Valdes (1990) und Szunyogh et al. (2002).

Der Eady-Index wurde hier zwischen den Druckflächen 850 und 200 hPa, also einer hochreichenden Atmosphärenschicht, bestimmt. Anstatt von einer linearen vertikalen Windzunahme von 850 bis 200 hPa auszugehen, wurde der Windbetrag hier zwischen fünf Druckniveaus gemittelt. Der Eady-Index erreicht nach Gleichung 2.6 für diejenigen vertikalen Säulen höhere Werte, an denen die Windgeschwindigkeit umso stärker mit der

Höhe zunimmt und je geringere statische Stabilität sie aufweisen. Bevorzugte Region für das mit dem Eady-Index verbundene stärkste barokline Wachstum sollten demnach die Regionen sein, über welche sich der Jetstream erstreckt.



# Kapitel 3

## Lebenszyklen der untersuchten Wirbelstürme

### 3.1 Ivan 2. – 24. September 2004

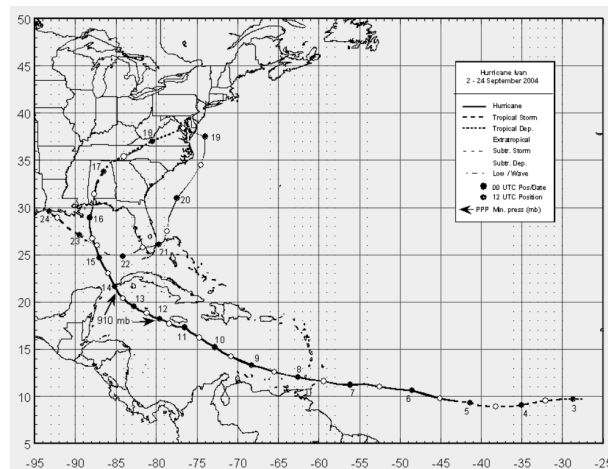
Hurrikan Ivan war ein sehr kräftiger, großer und langlebiger Wirbelsturm. Er verursachte enorme Personen- und Sachschäden. Ivan entwickelte sich am 31. August 2004 aus einer tropischen Welle vor der Westküste Afrikas (Stewart 2005). In der Umgebung geringer vertikaler Scherung wuchs Ivan bis zum 2. September 2004 zu einem tropischen Tief heran. Bei nah am Äquator verlaufenden Entwicklungen tropischer Wirbelstürme kann die Corioliskraft weniger zur Zirkulation beitragen. Trotz der südlichen Zugbahn von unter 10° Nord 3.1 verstärkte sich Ivan innerhalb von 12 Stunden zu einem tropischen Sturm. Auf der Bahn in Richtung Westen vertiefte er sich dennoch stetig und wurde um 06.00 Uhr UTC am 5. September als Hurrikan eingestuft. Zu diesem Zeitpunkt befand sich der Wirbelsturm knapp 2000 km östlich der Insel Tobago.

Nach Erreichen des Hurrikanstatus verstärkte sich Ivan rapide, so dass das erste Intensitätsmaximum am 6. September 00 Uhr UTC gemessen wurde (Stewart 2005). An diesem Tag wurde mit den Beobachtungsflügen der HRD begonnen. Ivan stellte den Rekord des südlichsten Hurrikans dieser Intensität seit Beginn der Aufzeichnungen auf.

Der Wirbelsturm gelangte in den Einfluss von trockener mitteltroposphärischer Luft, welche seine augenbegrenzende Wolkenwand<sup>1</sup> zum Erodieren und das Gebilde zum Abschwächen brachte. Nachfolgende erneute Vertiefung führte Ivan auf Hurrikanstärke 3, als er südsüdwestlich die Insel Grenada passierte. Am 9. September 2004 um 06 Uhr UTC wurde im Karibischen Meer die höchste Hurrikanstufe, Kategorie 5, gemessen. In west-nordwestlicher Richtung der Verlagerung erfuhr Ivan eine geringe Abschwächung, seine Eyewall bildete zwei konzentrische Kreise, als er am 11. September 2004 südlich von Jamaika durchzog. Nach kurzzeitiger Abschwächung auf nordwestlichem Kurs erreichte

---

<sup>1</sup>engl. eyewall



**Abbildung 3.1:** Zugbahn von Hurrikan Ivan 2.–24. September 2004 aus NHC best track Daten; ausgefüllte Kreise markieren den Zeitpunkt 00 Uhr UTC, leere Kreise 12 Uhr UTC des jeweiligen Datums

Ivan noch zwei weitere Intensitätsgipfel der Kategorie 5. Der tiefste Kerndruck wurde am Morgen des 12. September mit 910 hPa gemessen. Die Insel Groß Cayman wurde von Ivan südlich im Abstand von 15 km passiert. Er verursachte dort am 12. September starken Windschaden, Sturmflut und Überschwemmungen (Stewart 2005).

Mit Hurrikanstärke 5 zog der Wirbelsturm am 14. September 2004 durch die Straße von Yucatan. Westkuba und die Halbinsel Yucatan wurden von den Auswirkungen des Hurrikans stark betroffen. Im Golf von Mexiko drehte sich die Zugbahn durch den Einfluss des Trog über dem zentralen Nordamerika immer weiter in nördliche Richtung (Stewart 2005). Am 16. September um 06.50 Uhr traf Ivan vor der Küste Alabamas auf Land. Der Wirbelsturm wurde zu diesem Zeitpunkt in Kategorie 3 eingeordnet, der Kerndruck lag um die 945 hPa. Der letzte Beobachtungsflug, dessen Daten in die ausgewertete Vorhersage einfluss, wurde in der zweiten Tageshälfte des 16.09.04 durchgeführt.

Ivan änderte über Land seine Zugrichtung in Nordnordost. Über Alabama schwächte sich Ivan zu einem tropischen Sturm und nachfolgend am 17. September 2004 zu einem tropischen Tiefdruckgebiet ab. In der Bodenkarte Abbildung 3.2 a ist der Wirbelsturm an den konzentrisch angeordneten Isobaren nördlich von Florida zu erkennen. Die dynamischen Tropopausenkarten enthalten Konturen der zwischen 700 und 850 hPa gemittelten PV. Abbildung 3.2 b zeigt Ivan als begrenztes Gebiet erhöhter Werte der PV in Bodennähe. Der oben angesprochene flache Trog über dem östlichen Nordamerika entspricht der Tropopausenvertiefung nordwestlich von Ivan, ersichtlich an niedrigen potentiellen Temperaturen.

Der auf NN reduzierte Bodendruck stieg vom 17. September 00 Uhr UTC von 994 hPa bis zum 18. September um 00 Uhr UTC auf 1002 hPa an. Gleichzeitig verlor das Bo-

dendruckfeld die für einen Wirbelsturm markante horizontale Symmetrie und nahm eine ovale Form an (Abb. 3.2 c). Auffällig ist die Kaltfront vorderseitig des Troges, welche sich im Tropopausengefälle (Abb. 3.2 d) und dem erhöhten Gradient von  $\theta$  in Bodennähe äußert. Ivan wurde entlang dieser Kaltfront nach Nordosten bewegt. Vermutlich beeinflusst die Zirkulation des Wirbelsturmes die Spitze des Troges, indem er sie nach Süden verlängert. Am 18.09.04, 18 Uhr UTC erhielt der ehemalige Wirbelsturm über der Halbinsel DelMarVa den Status eines außertropischen Tiefs (Stewart 2005).

Zum nächsten Tag, dem 19. September, vollzog Ivan eine ungewöhnliche Entwicklung. Der ehemalige Wirbelsturm wurde aufgespalten, wobei sich ein Teil nach Süden absetzte. Nachdem Ivan bereits zum 16. September außertropische Merkmale ausgebildet hatte, wie auf Satellitenbildern zu sehen ist, trennt sich eine Wolkenformation vom Wolkengebilde um Ivan ab und driftet in Südrichtung. Vorgang ist in den vorliegenden Analysedaten anhand der Zirkulation und der PV der unteren und mittleren Troposphäre verfolgbar. In Abbildung 3.2 e tragen Reste Ivans zur langgestreckten Region niedrigen Druckes südlich von Neufundland bei.

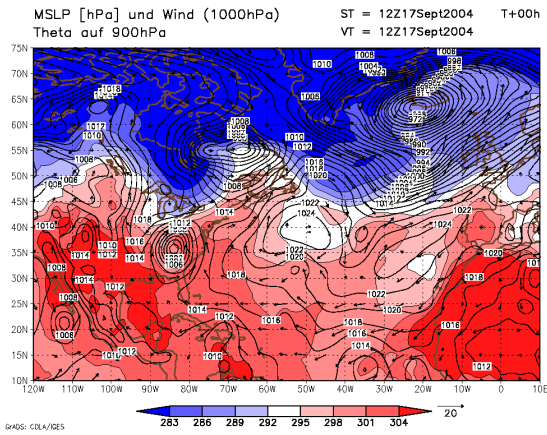
Wie in der Zugbahn des Wirbelsturmes (Abb. 3.1) ersichtlich ist, verlagerte sich das südwärts driftende Teilstück Ivans entlang der nordamerikanischen Ostküste. Es überquerte als außertropisches Tief am 21. September die Halbinsel Florida (Stewart 2005). Im Golf von Mexiko erlangte der südliche Teil Ivans erneut Charakteristika eines tropischen Sturmes. Dieser Abschnitt Ivans konnte scheinbar vom Modell nur ungenügend aufgelöst werden, sodass er lediglich in der Analyse des MSLP<sup>2</sup> am 22. September westlich von Florida erscheint (Abb. 3.2 k).

Der andere Abschnitt Ivans bewegte sich vorderseitig der Tropopausenvertiefung entlang der Küste nach Nordosten. In Abbildung 3.2 f sind nun längs der Ostküste mehrere Bereiche erhöhter PV in Bodennähe zu sehen, was auf die Abspaltung hindeutet. Das südlichste dieser Gebiete, gelegen vor der Küste North Carolinas, befindet sich im Einfluss von bodennahem Nordwind, welcher die nachfolgende Südverlagerung verursacht. Der Vergleich mit den Strukturen auf Tropopausenhöhe (Abb. 3.2 f) macht deutlich, dass dieses Gebiet mit seiner südlichen Lage keine Einwirkung des Troges zu befürchten hat. Die Position der nördlichen Überbleibsel von Ivan vorderseitig des Troges wird die Zyklonogenese in dieser Region unterstützen.

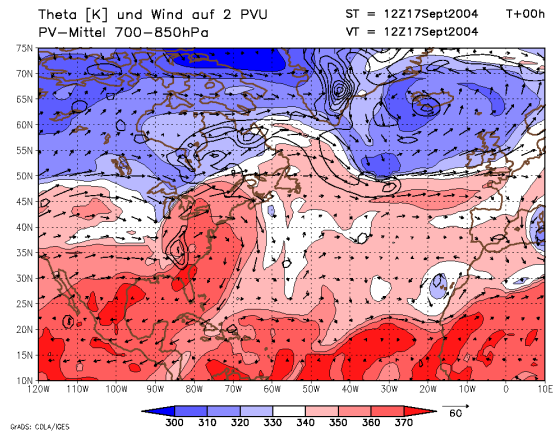
Bereits 24 Stunden später am 20.09.04 12 Uhr UTC sind die nördlichen Teilreste Ivans an der Entstehung eines Bodentiefs südlich Neufundlands beteiligt. Abbildung 3.2 g zeigt deutlich den verstärkten Bodendruckgradienten und die mit der Zyklonogenese verbundene Kalt- und Warmfront. Der Kern des Tiefs liegt über einem Bereich erhöhter Werte von  $\theta$ .

---

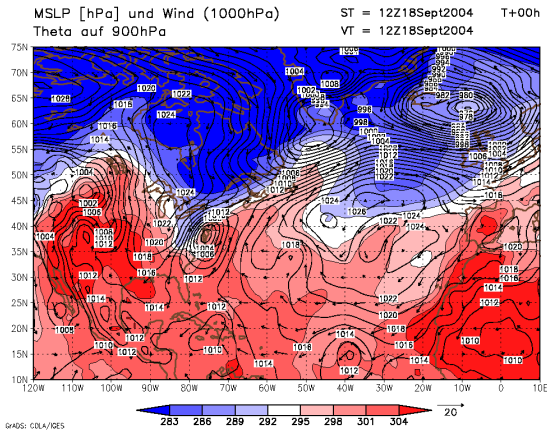
<sup>2</sup>engl. mean surface low pressure, dt. auf NN reduzierter Bodendruck



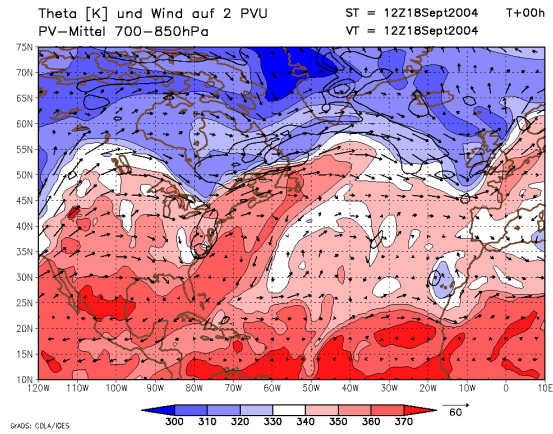
(a) Bodenkarte 17.09.2004 12 Uhr UTC



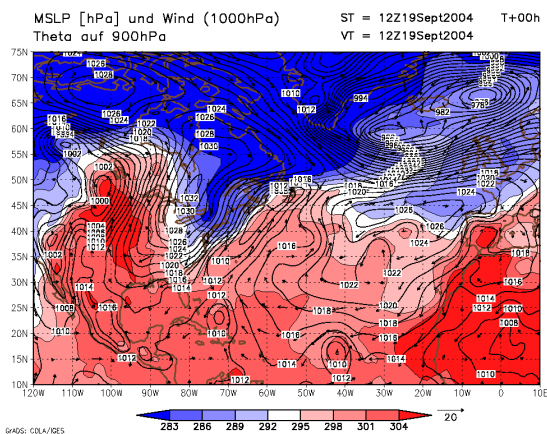
(b) Tropausenkarte 17.09.2004 12 Uhr UTC



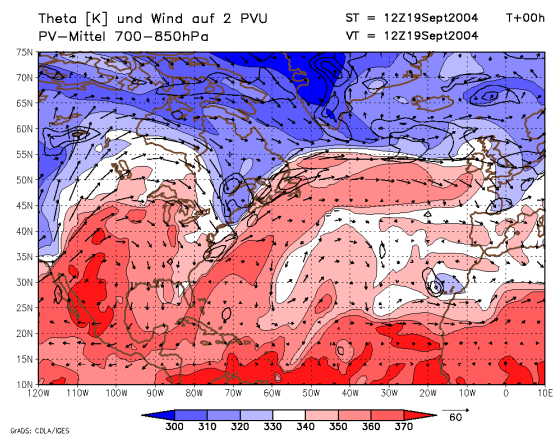
(c) Bodenkarte 18.09.2004 12 Uhr UTC



(d) Tropausenkarte 18.09.2004 12 Uhr UTC



(e) Bodenkarte 19.09.2004 12 Uhr UTC



(f) Tropausenkarte 19.09.2004 12 Uhr UTC

Abbildung 3.2

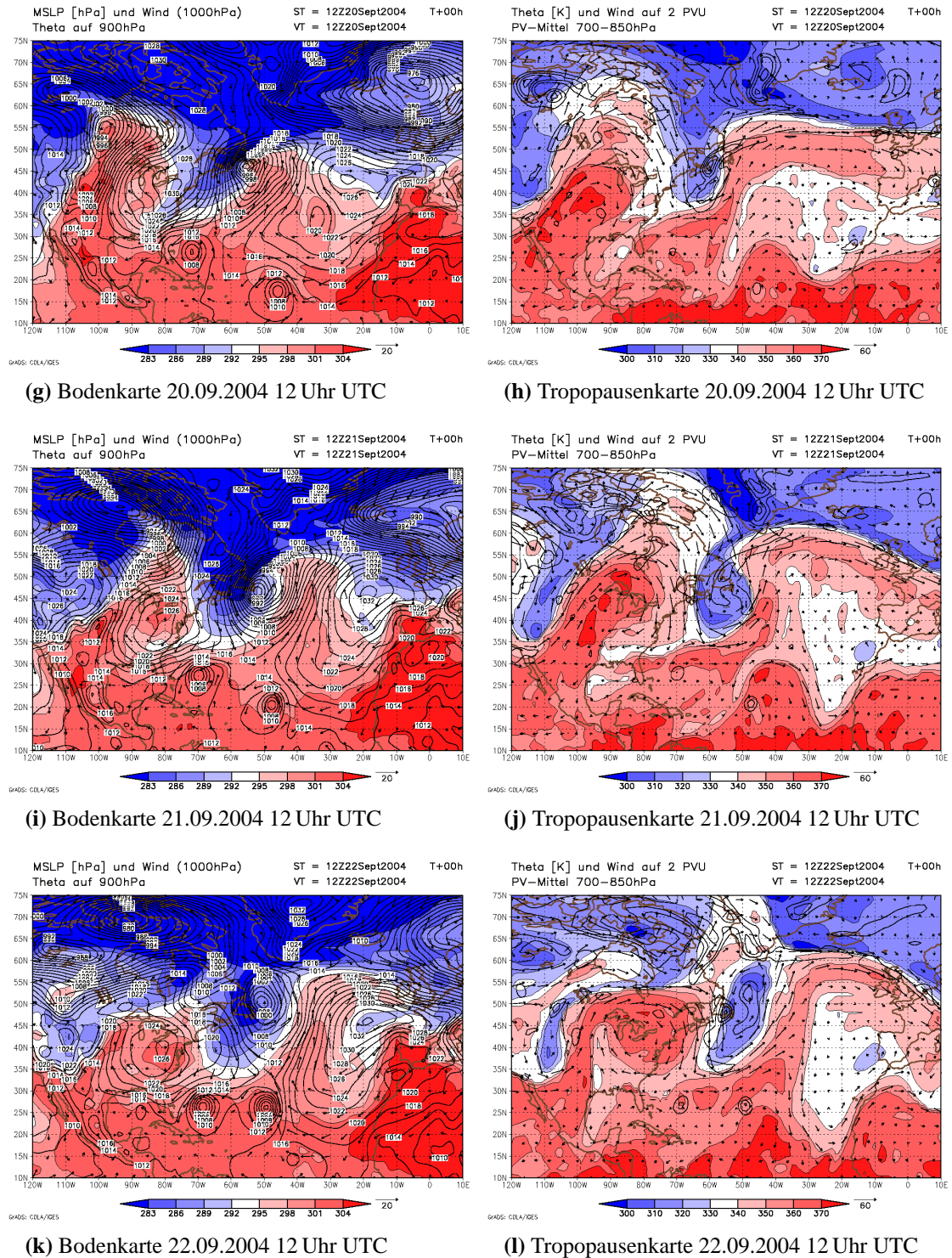
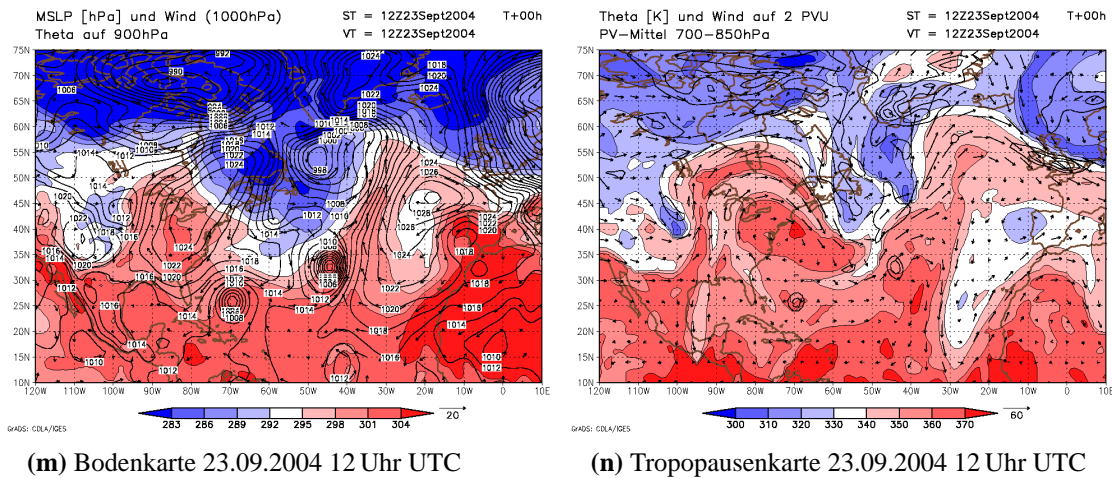


Abbildung 3.2



**Abbildung 3.2:** Linke Bildreihe:  $\theta$  auf 900 hPa, MSLP (Konturintervall 2 hPa) und Windvektoren auf 1000 hPa; rechte Bildreihe:  $\theta$  und Windvektoren auf der 2 PVU-Fläche, Isolinien PV-Mittel 700-850 hPa (Konturintervall 0,5 PVU)

Die Warmluft am Boden kann großräumig über die kalte Luft rückseitig der Front aufgleiten. Demzufolge sieht man in Abbildung 3.2 h die Verstärkung der bodennahen PV, welche durch Kondensation verbunden mit Wolkenbildung verursacht worden sein wird. Die Tropausenvertiefung wurde durch starke rückseitige Winde nach Süden verlängert. Die in der Bodenkarte (Abb. 3.2 g) zu sehenden Bereiche nahezu kreisförmiger Isobaren kennzeichnen die Wirbelstürme Jeanne nördlich der Großen Antillen und Karl im südlichen Nordatlantik.

Am nachfolgenden Tag, dem 21.09.04 12 Uhr UTC, sieht man in Abbildung 3.2 j den Trog über dem Westatlantik zwischen zwei markanten Rücken eingeschlossen. Rückseitig dieser Tropausenvertiefung wird Luft hoher potentieller Temperatur weit nach Norden advehiert. Im zyklonalen Sinne wird diese Luft in nordwestlicher Strömung gegen die Tropausenvertiefung gedrückt. Der Trog tendiert dadurch zum Abschnüren. Zugleich rückt er weiter nach Südosten in Richtung des Bodentiefs vor. Die Zyklone blieb unterdessen weitestgehend stationär über Neufundland und verstärkte sich um 10 hPa (Abb. 3.2 i). Kalt- und Warmfront hatten begonnen, miteinander zu verschmelzen. Stromauf- und abwärts von Ivans nördlichen Resten intensivieren sich die Hochdruckgebiete über dem Atlantik und dem zentralen Nordamerika.

Die Tropausenvertiefung über dem ehemaligen Hurrikan hatte sich zum Analysetermin 22.09.04 12 Uhr UTC zu einem Cutoff-Tief entwickelt (Abb. 3.2 l). Warme Luft wird in Tropausenhöhe von Nordamerika bis über Grönland advehiert. Das Bodentief liegt nun mit seinem Kern über kälteren Luftmassen und wird sich in der Folge auffüllen (Abb. 3.2 k). Seine vertikale Achse richtet sich über den Kaltlufttropfen auf (Abb. 3.2 k, l). Die zyklonale Strömung im Bereich des Tiefdruckgebietes bewirkt den Transport feuchtwarmer Luftmassen gegen die Insel Neufundland. Die Hebungsvorgänge im Tief,

verbunden mit erzwungenem Aufgleiten über orographischem Terrain, scheinen für die Erzeugung bodennaher PV durch Kondensationsvorgänge verantwortlich zu sein (Abb. 3.2 l). Der Vorgang kann anhand der Vertikalbewegungen in Verbindung mit Feuchtmaßen nachvollzogen werden.

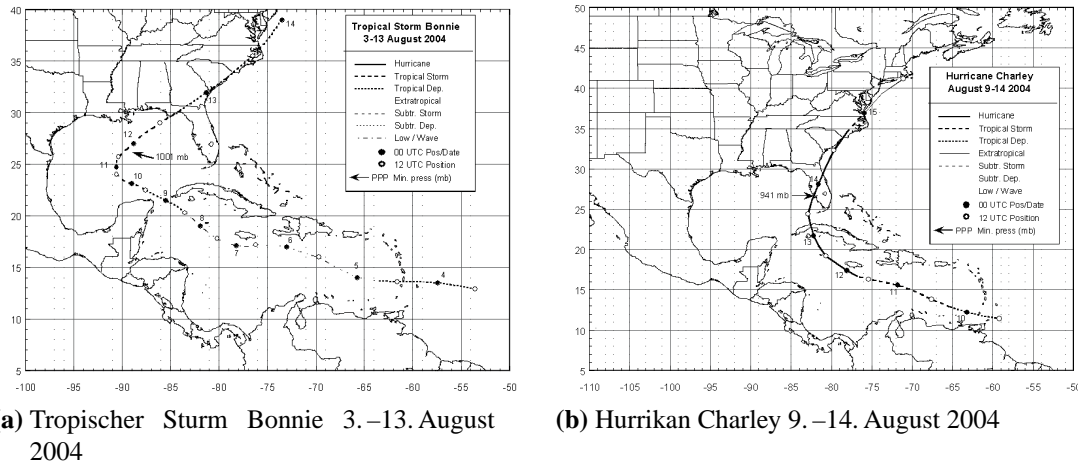
Zum letzten betrachteten Analysetermin war der Kaltlufttropfen von der großräumigen Strömung eingefangen worden (Abb. 3.2 n). Die stark mäandrierende Erscheinung der oberen Troposphäre hat sich abgeschwächt. Es ist nun eine Verlagerung von dem aus Bodentief und Tropopausenvertiefung bestehender kühler Luftmasse in Richtung Nordosten erkennbar (Abb. 3.2 m). Das Bodentief befindet sich im Stadium der Auflösung.

## **3.2 Bonnie 3.–13. August 2004 und Charley 9.–14. August 2004**

Nach allmählichem Ausbilden von konvektiven Bändern und einer schwachen bodennahen Zirkulation wurde der spätere tropische Sturm Bonnie auf seiner Zugbahn westwärts am 3. August 2004 als tropisches Tief eingestuft. Er befand sich zu diesem Zeitpunkt etwa 600 km östlich der Insel Barbados/Kleine Antillen (Avila 2004). Abbildung 3.3 a zeigt die Zugbahn des tropischen Sturmes Bonnie. Auf weiterem westlichen Kurs eingangs der Karibischen See verlor das tropische Tief seine bodennahe Zirkulation. Die spätere Bonnie erlangte nach nordwestlicher Verlagerung durch die Karibische See am 8. August östlich der Westspitze Kubas markante Anzeichen von Konvektion und die zyklonale Rotation zurück. Auf weiterer Bahn durch die Yucatanstraße mit Position nordöstlich der Halbinsel Yucatan wurde Bonnie zum tropischen Sturm ernannt. Nach Drehung der Verlagerungsrichtung auf Nord und nachfolgend Nordost im Golf von Mexiko erreichte Bonnie ihre höchste Intensität mit 1001 hPa am Abend des 11. August (Avila 2004). Bonnie traf als sich abschwächender tropischer Sturm am nächsten Tag auf den Nordwestteil der Halbinsel Florida. Als Tief bewegte sich Bonnie weiter nordostwärts.

Hurrikan Charley richtete trotz seiner kleinräumigen Ausdehnung starke Personen- und Sachschäden an. In den Modellen wurde Charley wegen seiner geringen Größe möglicherweise nur schlecht erfasst.

Charley formierte sich am 4. August 2004 als kleinräumiges Gebilde vor der Westküste Afrikas. Auf seiner Bahn westwärts durch den Atlantik verstärkte sich das System nicht bemerkenswert, wurde aber dennoch am 9. August 2004 als tropisches Tief erkannt (Pasch et al. 2005). Ein ausgeprägtes Hochdruckgebiet über dem südlichen Nordatlantik steuerte den am 10. August als tropischen Sturm klassifizierten Charley in westliche Richtung in die Karibische See. Abbildung 3.3 b zeigt die Positionen von Charley. Er erreichte am 11. August vor der Jamaikanischen Küste Hurrikanstärke. An diesem Tag wurde mit den Beobachtungsflügen der Hurricane Research Division (HRD) um Hurrikan Charley begonnen.



**Abbildung 3.3:** Zugbahnen aus NHC best track Daten, Beschriftung wie Abb. 3.1

Die ausgewertete Vorhersage für Bonnie und Charley wurde am 12. August 2004 gestartet. In dieser Zeit bewegte sich Wirbelsturm Charley mit Kategorie 2 auf die Insel Cayman in der Karibischen See zu. Charley wurde am Rand des Rückens über dem Nordwestatlantik in eine weitestgehend nördliche Bahn gelenkt (Pasch et al. 2005). Nach kurzer Abschwächung beim Passieren Westkubas am Morgen des 13. August, wo Windgeschwindigkeiten von bis zu 54 m/s gemessen wurden, nahm er wieder an Stärke zu.

Der weit nach Süden reichende Trog über dem mittleren Nordamerika übernahm nun die Steuerung der Zugbahn, so dass Charley an dessen Südostseite seine Drift am nachfolgenden Tag nordwestwärts beschleunigt fortsetzte. Dieser Trog ist anhand der Tropopausenvertiefung mit niedrigen potentiellen Temperaturen in Abbildung 3.4 b gut zu erkennen.

Mit der Tropopausenvertiefung war in der unteren Troposphäre ein Kaltluftvorstoß bis in den Süden der Vereinigten Staaten verbunden (Abb. 3.4 a). Auf der Tropopausenkarte in Abbildung 3.4 b erscheint der Wirbelsturm als kleinräumiges Gebiet erhöhter PV nördlich von Kuba. Stromabwärts von Charley ist auf den Abbildungen 3.4 a und b der ehemalige tropische Sturm Bonnie an der geschlossenen Isobare und dem überlagerten Bereich höherer PV-Werte über North Carolina zu sehen. Die höchste Intensität erreichte Charley in der Kategorie 4 mit nahezu 67 m/s, als er 19.45 Uhr UTC am 13. August 2004 auf die Südküste Floridas traf. Der tiefste Kerndruck wurde um 19.57 Uhr UTC mit 941 hPa gemessen.



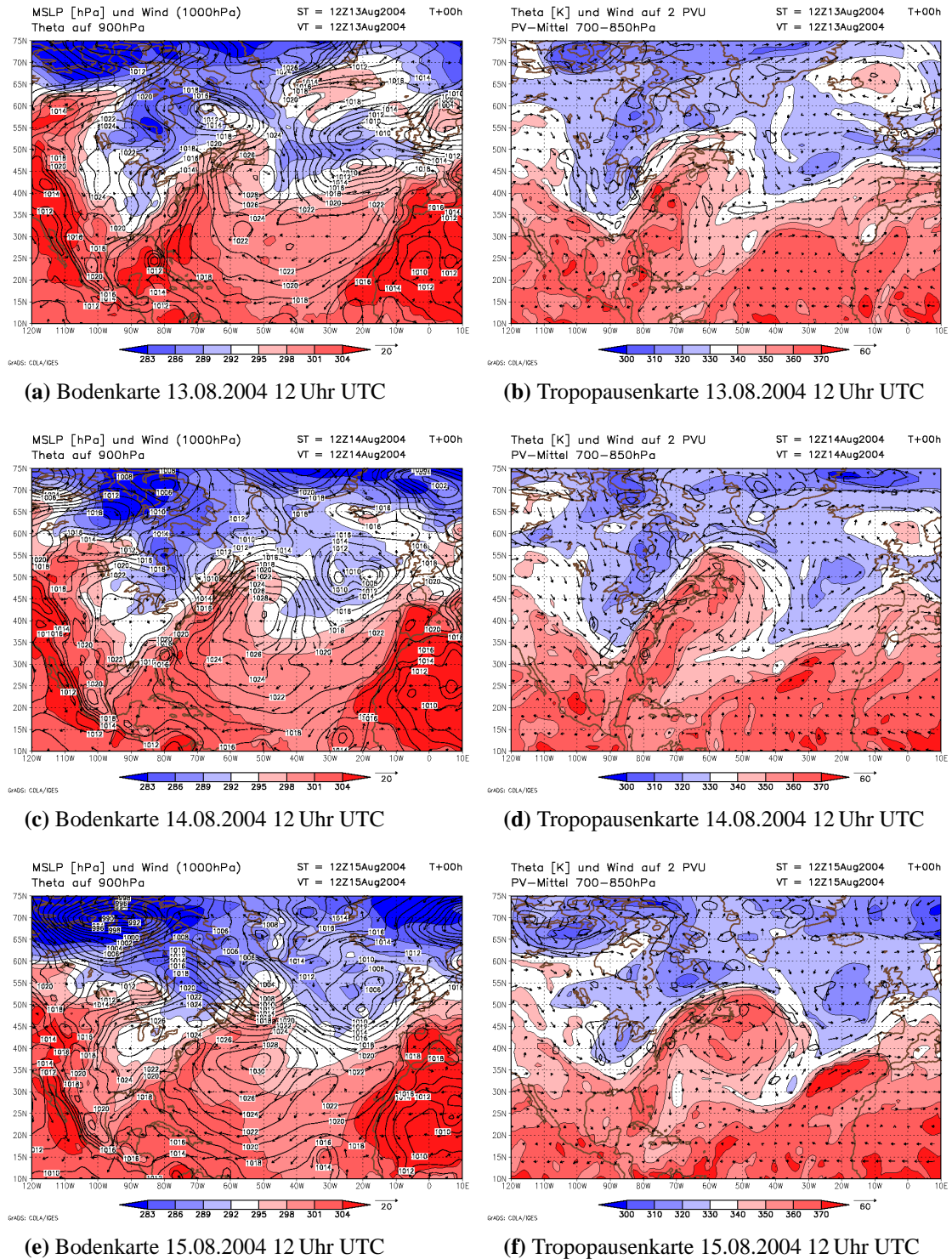
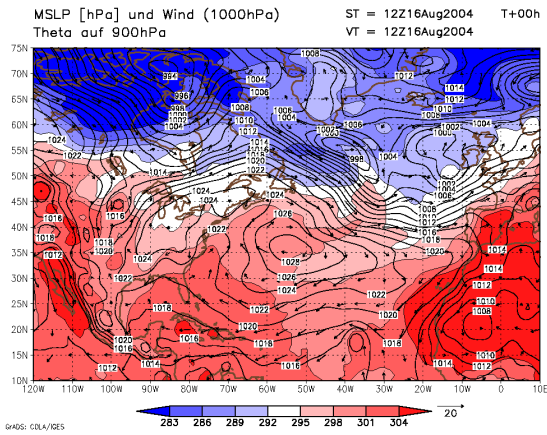
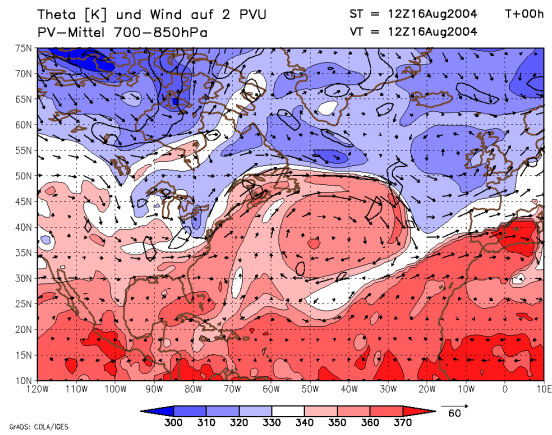


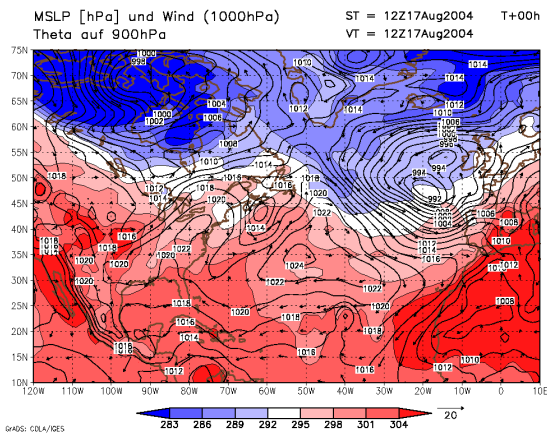
Abbildung 3.4



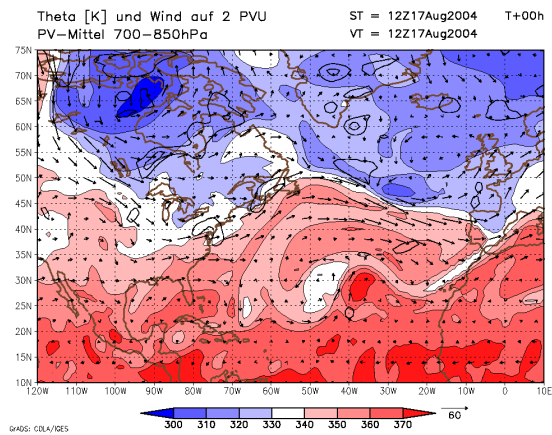
(g) Bodenkarte 16.08.2004 12 Uhr UTC



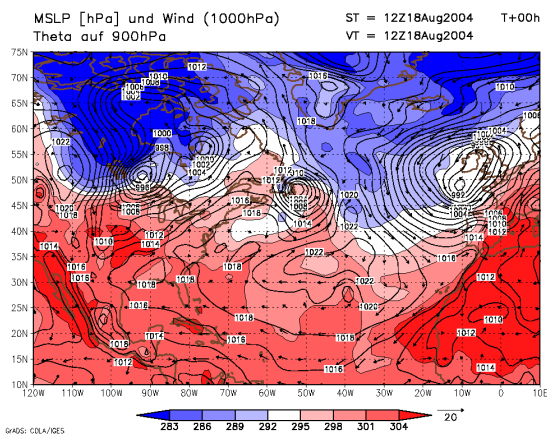
(h) Tropopausenkarte 16.08.2004 12 Uhr UTC



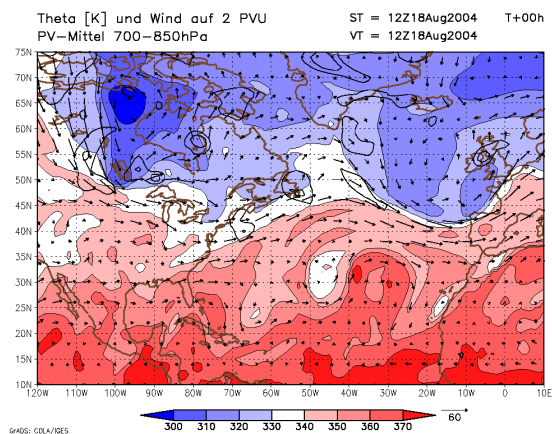
(i) Bodenkarte 17.08.2004 12 Uhr UTC



(j) Tropopausenkarte 17.08.2004 12 Uhr UTC

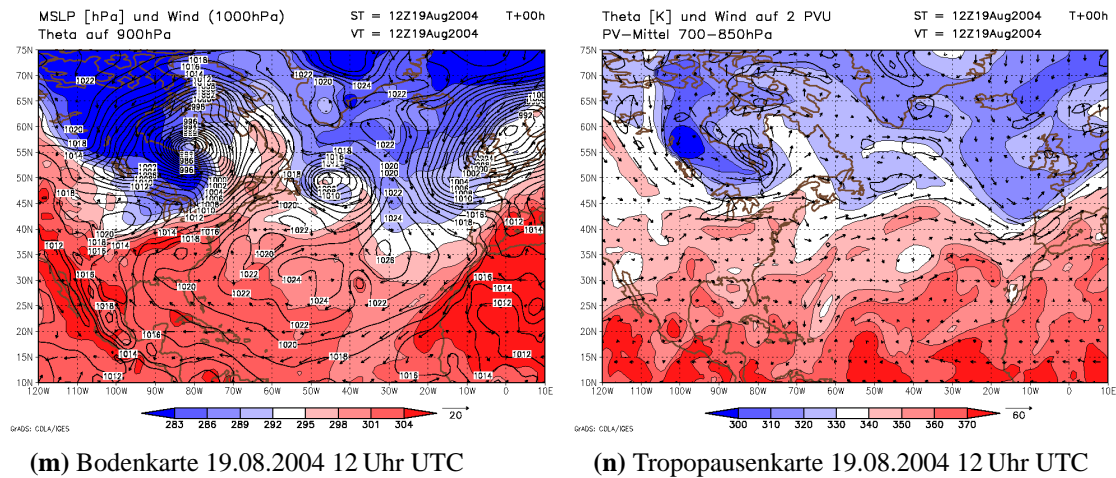


(k) Bodenkarte 18.08.2004 12 Uhr UTC



(l) Tropopausenkarte 18.08.2004 12 Uhr UTC

Abbildung 3.4



**Abbildung 3.4:** Linke Bildreihe:  $\theta$  auf 900 hPa, MSLP (Konturintervall 2 hPa) und Windvektoren auf 1000 hPa; rechte Bildreihe:  $\theta$  und Windvektoren auf der 2 PVU-Fläche, Isolinien PV-Mittel 700-850 hPa (Konturintervall 0,5 PVU)

Charley schwächte sich im Laufe seines Landdurchzuges ab und erreichte den Atlantik östlich von Florida am 14. August 03.30 Uhr UTC noch immer mit Hurrikanstatus (Pasch et al. 2005). Auf der Halbinsel Florida hinterließ der Wirbelsturm trotz seiner geringen Ausdehnung eine Spur der Verwüstung, er forderte 10 Menschenleben.

Über dem Ozean konnte sich Charley nur vorübergehend leicht verstärken. Nach Verlagerung entlang der amerikanischen Ostküste traf Charley am 14. August um 14 Uhr UTC in South Carolina erneut auf Land (Abb. 3.4 c, d). Seine Intensität schwächte sich nachfolgend rasch ab. Um die Reste von Bonnie und den auf Abbildung 3.4 c zu sehenden Isobarenring nördlich von ihr hat sich zum 14. August 12 Uhr UTC westlich von Neufundland ein schwaches Bodentief gebildet.

Am 15. August um 00 Uhr UTC verließ Ex-Hurrikan Charley erneut das Festland und wurde nun als außertropisch eingestuft. In Abbildung 3.4 e, f ist der ehemalige Wirbelsturm noch an geschlossenen Isolinien von PV und Bodendruck an der Küste North Carolinas sichtbar. Nordwestlich dieser Konturen wies die Tropopause einen verstärkten Gradienten auf (Abb. 3.4 f). Die damit verbundene Kaltfront wird die Entwicklung des ehemaligen Hurrikans beeinflussen. Das Tiefdruckgebiet, welches zum Teil aus dem tropischen Sturm Bonnie entstanden war, hatte sich über die Labradorsee verlagert und leicht intensiviert.

Am nachfolgenden Tag, dem 16. August 2004 um 12 Uhr UTC hatte sich der mit Charley verbundene bodennahe Bereich erhöhter PV zügig entlang der Tropopausenvertiefung nach Norden bewegt. Er ist zu diesem Zeitpunkt über Neuschottland auszumachen (Abb. 3.4 h). Steuernd in der unteren Troposphäre wirkt das Hochdruckgebiet über dem zentralen Nordatlantik. Das abgeschlossene Tiefdruckgebiet um Charley hatte sich aufgelöst (Abb. 3.4 g). Der Trog über dem östlichen Nordamerika und der Rücken über dem

Nordatlantik flachen sich leicht ab. Das auf Bonnie zu beziehende seichte Tief verschiebt sich südostwärts. Es ist in Abbildung Abb. 3.4 g südlich von Grönland zu erkennen.

In der Analyse vom 17. August 12 Uhr UTC (Abb. 3.4 i, j) zeigt sich am südlichen Ende der mit Charley zusammenhängenden Region erhöhter PV ein neues Gebiet mit lokal verringertem Druck. Diese Druckverminderung bildete sich vor dem kleinräumigen Bereich verstärkten Tropopausengefälles vor der Küste Neuschottlands. Die Hebung vorderseitig der mit den Trog verbundenen positiven PV-Anomalie treibt die Zyklogenese voran. Der Grundstrom richtet sich zunehmend zonal aus. Das Bodentief um Bonnies Überbleibsel hat sich nach weiterer Südostverlängerung vor den Britischen Inseln mit einem anderen Tief vereinigt und verstärkt.

Nach 24 Stunden am 18. September um 12 Uhr UTC hatte sich der Bodendruck um Ex-Charley um 11 hPa auf 1000 hPa vertieft und zugleich leicht nach Nordosten verlagert (Abb. 3.4 k). Die mit der Hebung im Tief verbundenen Kondensationsprozesse werden für die Produktion von PV zuständig sein. Der Bereich verstärkter PV ist in Abbildung 3.4 l über Neufundland zu sehen. Tröge und Rücken in der oberen Troposphäre flachen sich ab. Das weitestgehend mit Bonnie in Verbindung zu bringende Tief eingangs des Ärmelkanals hat sich zu einem Sturmtief mit starkem Bodendruckgradienten entwickelt.

Zum 19.08.2004 12 Uhr UTC wurde das kleinskalige Tiefdruckgebiet um Ex-Charley geringfügig nach Osten advehiert. Auf der Bodenkarte sieht man das zyklonale Eindrehen kühlerer Luftmassen in das Tiefdruckzentrum östlich von Neufundland (Abb. 3.4 m). Wie an dem Bereich erhöhter PV in Verbindung mit dem Tief zu erkennen ist, hat sich der flache Trog westlich von Nordamerika über das Bodentief um Charley geschoben (Abb. 3.4 n). Es befindet sich im Stadium der Auflösung. Das u. a. aus Bonnie hervorgegangene Sturmtief ist zum Analysezeitpunkt 19. August 12 Uhr UTC über der Nordsee zu sehen (Abb. 3.4 m). Damit verbunden werden Windgeschwindigkeiten bis zu 14 m/s vor der deutschen Nordseeküste und über Schottland erreicht.

# Kapitel 4

## Ausbreitung der Vorhersageunterschiede

In diesem Kapitel wird die Entstehung und Verlagerung der Differenzen zwischen den beiden Prognosen untersucht. Es wird verfolgt, woraus sich die Differenzen zwischen den Vorhersagen bilden und inwiefern deren Wachstum mit baroklin instabilen Bereichen in Verbindung gebracht werden kann. Darüber hinaus wird untersucht, wie die großräumige Dynamik der oberen Troposphärenschichten zur Fortpflanzung der Unterschiede über den Atlantik in Richtung Europa beiträgt. Auf die Qualität der Vorhersagen im Vergleich zu Analysen wird im nächsten Kapitel eingegangen.

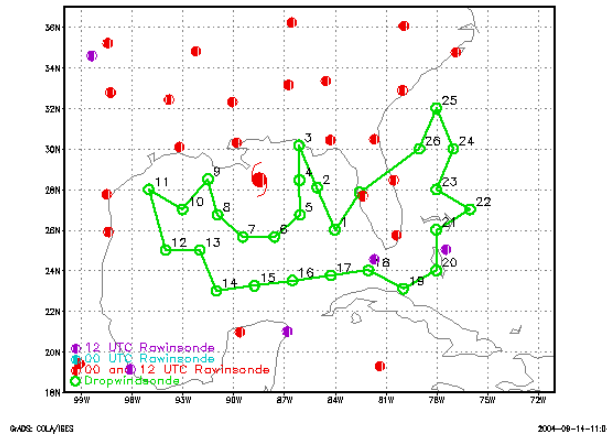
Die Daten, welche die zusätzlichen Messungen enthalten, werden nachfolgend All-drop genannt. Entsprechend werden die Vorhersagen, aus denen die Dropsondenmessungen entfernt wurden, als Nodrop bezeichnet.

### 4.1 Vorhersage Ivan

Die Beobachtungsflüge mit den damit verbundenen Dropsondenabwürfen um Hurrikan Ivan wurden am 6. September 2004 aufgenommen und dauerten bis zum 15. September an. Hier wird die Vorhersage vom 16.09.04 um 00 Uhr UTC ausgewertet. In Abbildung 4.1 sind die Positionen der Dropsondenabwürfe um Hurrikan Ivan von 17.30 Uhr UTC am 15.09.04 bis 01.00 Uhr UTC am 16.09.04 dargestellt, welche als letzte in diese Prognose einfließen.

Bereits in der Analyse verursachen die zusätzlich assimilierten Daten die Vertiefung des auf NN reduzierten Bodendruckes um 3 hPa auf 977 hPa. Die Anpassung der Daten setzt sich in höheren Schichten der Troposphäre fort, die geopotentielle Höhe in 500 hPa wird vom Alldrop-Datensatz um -26 gpm korrigiert (ohne Abbildung).

Nach 12 h zeigen die Vorhersagen ähnliche Reaktionen um Hurrikan Ivan (Abb. 4.2). Der Druck auf Meereshöhe wird von Alldrop gegenüber Nodrop um 2 hPa vertieft. Die

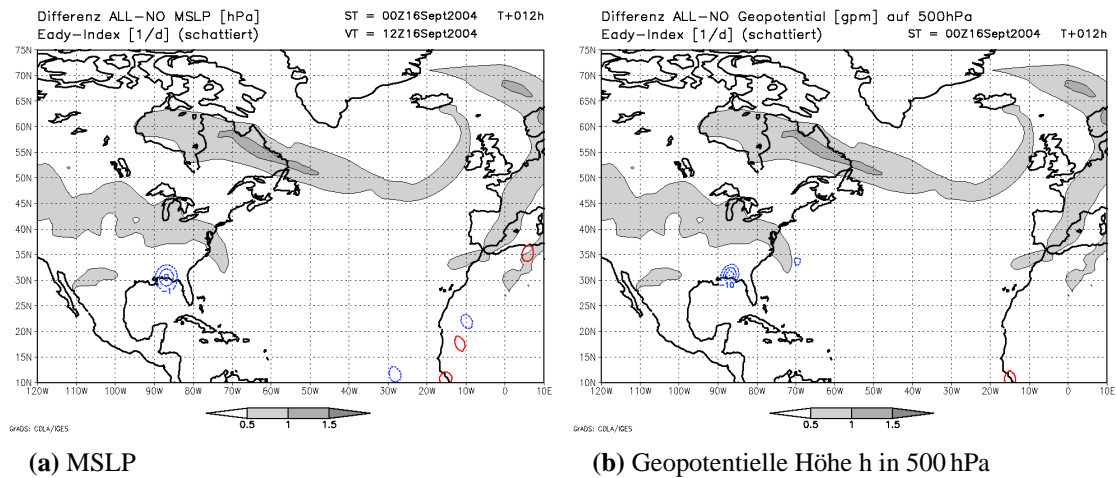


**Abbildung 4.1:** Flugroute (grün), Dropsondenabwürfe (grüne Kreise) um Hurrikan Ivan (rotes Hurrikansymbol) am Abend des 15.09.2004; Standorte der Radiosondenmessungen (rote und violette Kreise)

geopotentielle Höhe auf 500 hPa wird durch die Alldrop-Daten um 40 gpm abgesenkt. Auf dem Druckniveau 200 hPa wird die geopotentielle Höhe gegenüber der Nodrop-Vorhersage um 20 gpm vermindert, d. h. Alldrop verstärkt den Wirbelsturm (ohne Abbildung). Bis 36 h Vorhersagezeit ist festzustellen, dass die anfänglich bestandenen Differenzen abnehmen. Ähnliche Beobachtungen wurden durch Szunyogh et al. (2000) gemacht. Deren Untersuchungen der Bodendruckdifferenzen zum „Winter Storm Reconnaissance Program 1999“ ergaben, dass „Wachstum erst nach einer 12 – 24 h Periode von anfänglichem Abbau begann“. Szunyogh et al. (2000) spekulierten, dass die Ursachen dieses Phänomens im Assimilationsverfahren zu suchen sind.

Im Fall Ivan nehmen die Differenzen der betrachteten Größen ab der Vorhersagezeit von 48 h zu und breiten sich aus. Abbildung 4.3 a, b und c stellt die Differenzen von MSLP und geopotentieller Höhe am 18. September um 12 Uhr nach 60 h Vorhersage dar. Das Dipolmuster in der Bodendruckdifferenz (Abb. 4.3 a) deutet auf eine Positionskorrektur hin. An den niedrigeren Werten nordöstlich ist zu erkennen, dass sich der Wirbelsturm in den Alldrop-Daten schneller in diese Richtung verlagert hat. Die best track Daten der Koordinaten des tiefsten Kerndruckes  $77^{\circ}$  W,  $38^{\circ}$  N bestätigen diese Lage. Zu diesem Zeitpunkt lag das Zentrum des Wirbelsturms innerhalb der blau gezeichneten Bodendruckdifferenz. Die Anpassung durch die Alldrop-Daten beträgt 5 hPa, was in einem Windunterschied um 9 m/s auf 1000 hPa resultiert. In der Geopotentialdifferenz in 500 hPa (Abb. 4.3 b) ist ebenfalls eine Dipolstruktur um das tropische Tief zu erkennen. Analog zum Bodendruck berichtigen die zusätzlich assimilierten Daten die Position des Wirbelsturmes in Richtung Nordost.

Zudem fällt eine Kontur durch Alldrop erhöhten Geopotentials stromabwärts von Ivan auf. Diese überlagert sich mit einer Zone erhöhten baroklinen Wachstums, welche durch

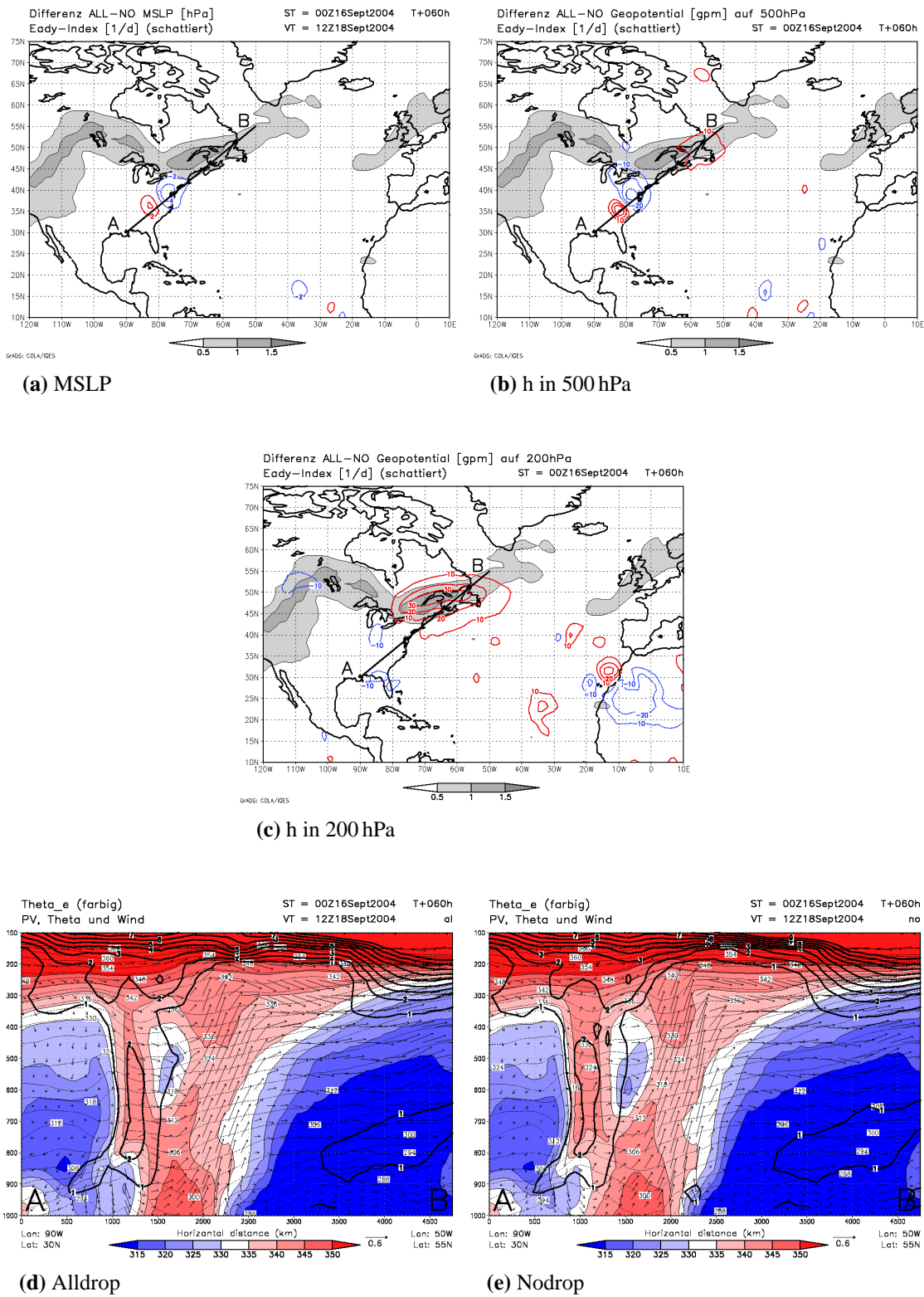


**Abbildung 4.2:** Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop; Konturintervalle (a) 1 hPa, (b) 10 gpm nach 12 h Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC zum 16.09.04 12 Uhr UTC

den Eady-Index bestimmt wurde. Für dieses Signal ist nachfolgend eine Zunahme der Differenz zu erwarten, da die Vorhersage in dieser Region ein erhöhte Unsicherheit aufweist. In oberen Troposphärenschichten verstärkt sich die Erhöhung der geopotentiellen Höhe durch die Alldrop-Daten stromabwärts von Ivan (Abb. 4.3 c).

In Abbildung 4.3 d und e ist der in den darüber gezeigten Differenzenabbildungen markierte Vertikalschnitt zu sehen. In der jeweils linken Hälfte des Querschnittes ist der zerfallende Wirbelsturm noch an vertikal ausgedehnten erhöhten Werten der PV und  $\theta_e$  zu erkennen. Die beiden Abbildungen 4.3 a Alldrop und b Nodrop weisen nur geringfügige Unterschiede auf. Man sieht, dass der Turm erhöhter  $\theta_e$ -Werte, in welchem bodennahe Konvergenz und Aufsteigen stattfindet, in Alldrop leicht in Richtung Bildmitte verschoben ist. Das steile Gefälle der Isolinie PV=1 PVU am rechten Rand der negativen ober-troposphärischen PV-Anomalie in Alldrop (Abb. 4.3 d) deckt sich mit einem stärkeren Jet (ohne Abbildung). Zudem erstreckt sich die angehobene Tropopause in Alldrop dadurch über eine größere horizontale Fläche, was sich auch in den erhöhten Geopotentialwerten bemerkbar macht (Abb. 4.3 c). Abbildung 4.4 zeigt die Differenz der äquivalentpotentiellen Temperatur im Druckniveau 300 hPa. Es ist deutlich zu erkennen, dass Alldrop den Ausfluss warmer Luft stromabwärts aus dem tropischen Tief ausgeprägter repräsentiert. Da die  $\theta_e$  leicht höhere Werte als  $\theta$  in dieser Region ausweist, kann von vertikalem Feuchtetransport ausgegangen werden. Die Erhöhung der Temperatur in dem Bereich steht über die hydrostatische Beziehung mit dem erhöhten Geopotential in Verbindung.

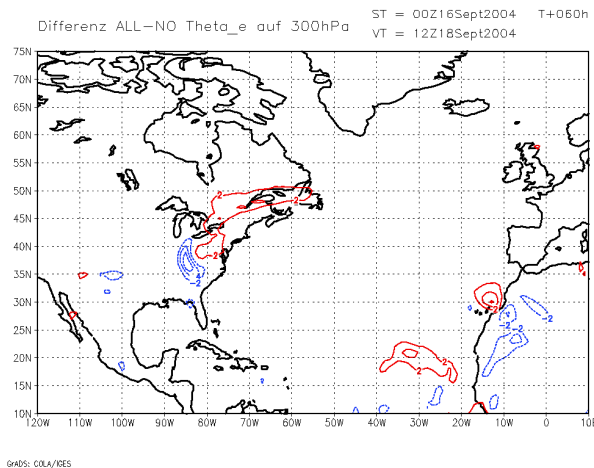
Nach 84 h Vorhersagezeit sind die Differenzen weiter ausgeweitet und verstärkt. Auf der Darstellung in der mittleren und oberen Troposphäre fällt die Fortpflanzung des Störungssignals stromabwärts vom ehemaligen Wirbelsturm aus auf (Abb. 4.5 b, c).



**Abbildung 4.3:** (a), (b), (c) Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle (a) 2 hPa, (b), (c) 10 gpm ; (d), (e) Vertikalschnitt durch die oben markierte Linie mit  $\theta_e$  (farbig), PV (durchgezogene Linien, Konturintervall 1 PVU),  $\theta$  (gepunktete Linien) und Windvektoren nach 60 h Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC zum 18.09.04 12 Uhr UTC

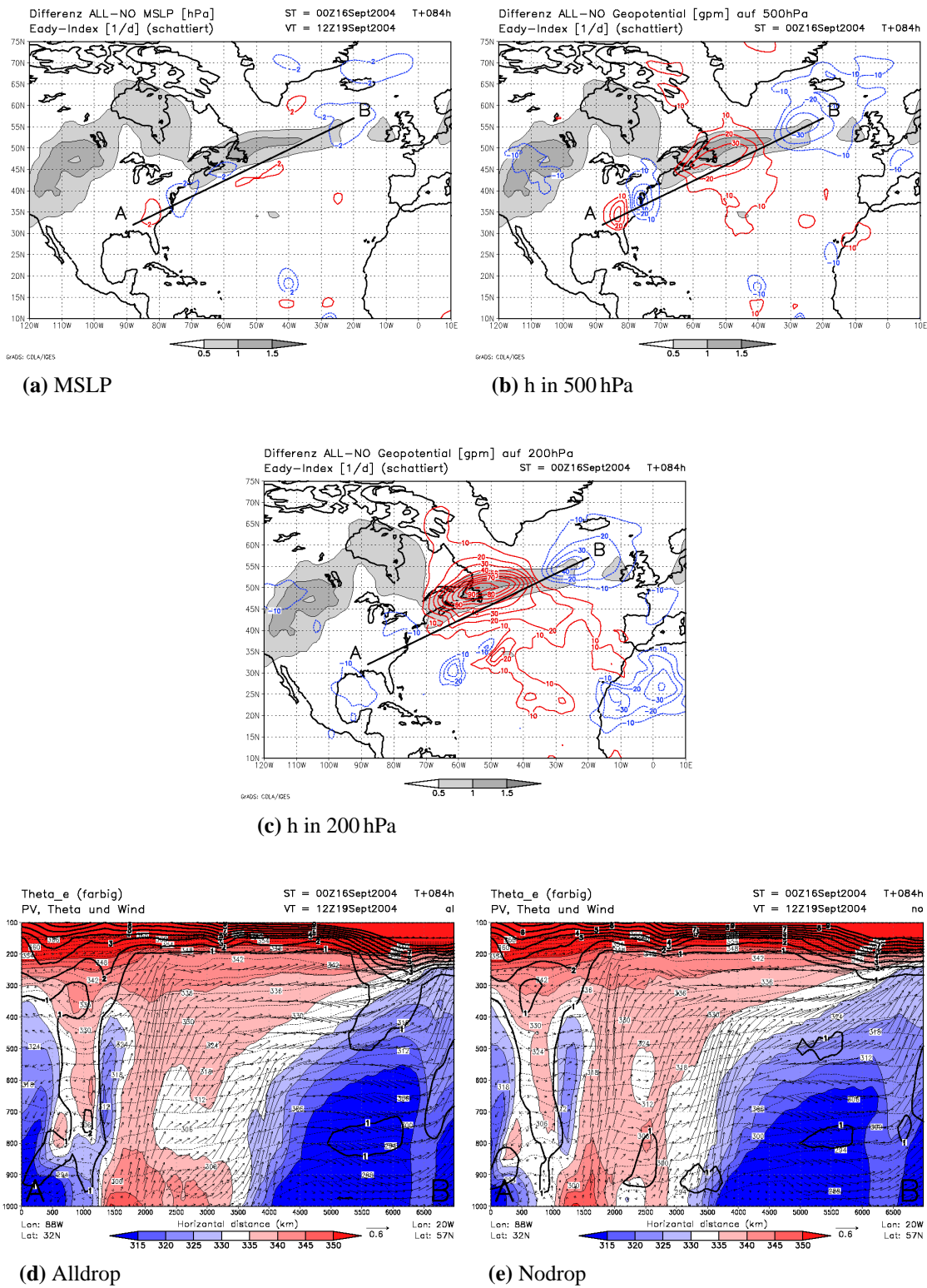


Am Boden zeigt sich nur ein geringer Druckunterschied von maximal 4 hPa zwischen den beiden Vorhersagen (Abb. 4.5 a). Ex-Hurrikan Ivan wird durch die Alldrop-Daten besser erfasst. Die Vorhersage mit Messungen aus dem Wirbelsturm lokalisiert den Bodendruck um den Kern geringfügig genauer, welcher zu dem Zeitpunkt entsprechend der best track Daten innerhalb der Koordinaten  $75^\circ$  W und  $35^\circ$  N zu finden war. Stromabwärts der Dipolstruktur um Ivan haben sich weitere Bodendruckdifferenzen herausgebildet.



**Abbildung 4.4:** Differenz Alldrop-Nodrop  $\theta_e$  in 300 hPa, Konturintervall 2 K nach 60 h Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC

Die Vertikalschnitte in Abbildung 4.5 d, e zeigen noch immer den mit erhöhten PV-Werten markierten Wirbelsturm in der linken Bildhälfte. Reibung am Boden ist für den Abbau der bodennahen PV verantwortlich. Der Wirbelsturm befindet sich in beiden Vorhersagen über kühlerer Luft am Boden. Der Positionsunterschied der Bodendruckkerne des ehemaligen Hurrikans zwischen Alldrop und Nodrop ist in den Vertikalschnitten mit leicht unterschiedlich gelegenen bodennahen PV-Maxima verbunden (Abb. 4.5 d, e). Die zyklonale Strömung des ehemaligen Hurrikans transportiert feuchtwarme Luft aus dem Hochdruckbereich über dem Atlantik (vgl. Abb. 3.2 c, e) in die Region nördlich des Wirbels. Dieser Bereich hoher Werte von  $\theta_e$  in Bodennähe ist in den Vertikalschnitten beider Vorhersagen rechts des ehemaligen Hurrikans zu sehen. Vorderseitig der Kaltfront entlang der nordamerikanischen Ostküste sind durch die mit Hebungs- und Aufgleitvorgängen verbundene Kondensation mehrere Bereiche bodennah erhöhter PV entstanden (Abb. 3.2 f). Der Vertikalschnitt erfasst nur diejenige der Nodrop-Vorhersage (Abb. 4.5 e). In Alldrop liegen die entsprechenden Gebiete geringfügig nordwestlicher und wurden deshalb vom Vertikalschnitt verfehlt (ohne Abbildung). Dieses Merkmal ist für die Bodendrucksignale verschiedenen Vorzeichens östlich von Neuschottland verantwortlich (Abb. 4.5 a). Druckdifferenzen machen sich auch in Gebieten abseits des Einflusses des Wirbelsturmes bemerkbar. In höheren Breiten liegen die Störungen im Bereich von Tiefdruckgebieten oder starkem Druckgradienten (Abb. 3.2 e).

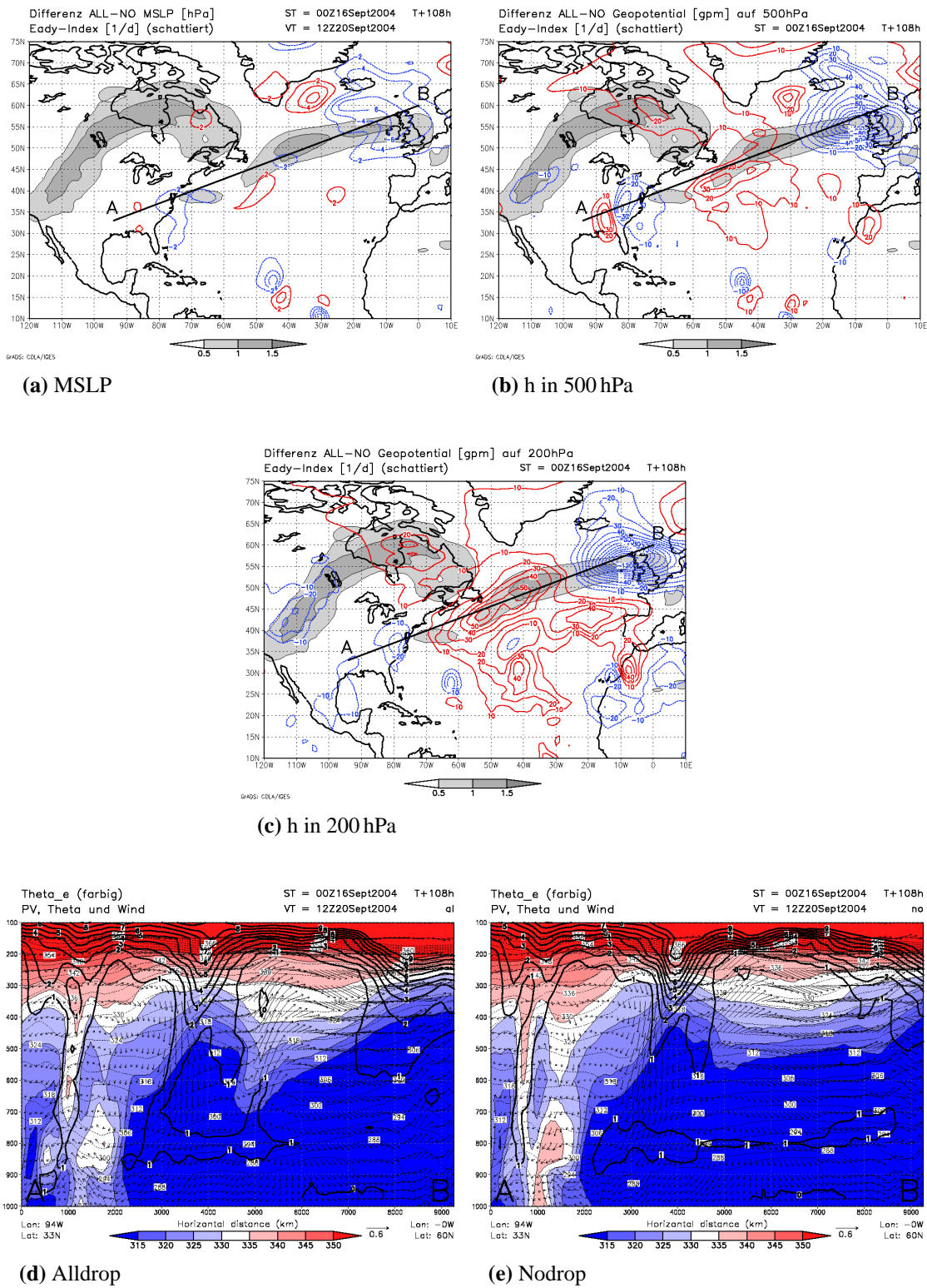


**Abbildung 4.5:** (a), (b), (c) Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle wie vorherige Abb.; (d), (e) Vertikalschnitt durch die oben markierte Linie mit  $\theta_e$  (farbig), PV (durchgezogene Linien, Konturintervall 1 PVU),  $\theta$  (gepunktete Linien) und Windvektoren nach 84 h Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC zum 19.09.04 12 Uhr UTC

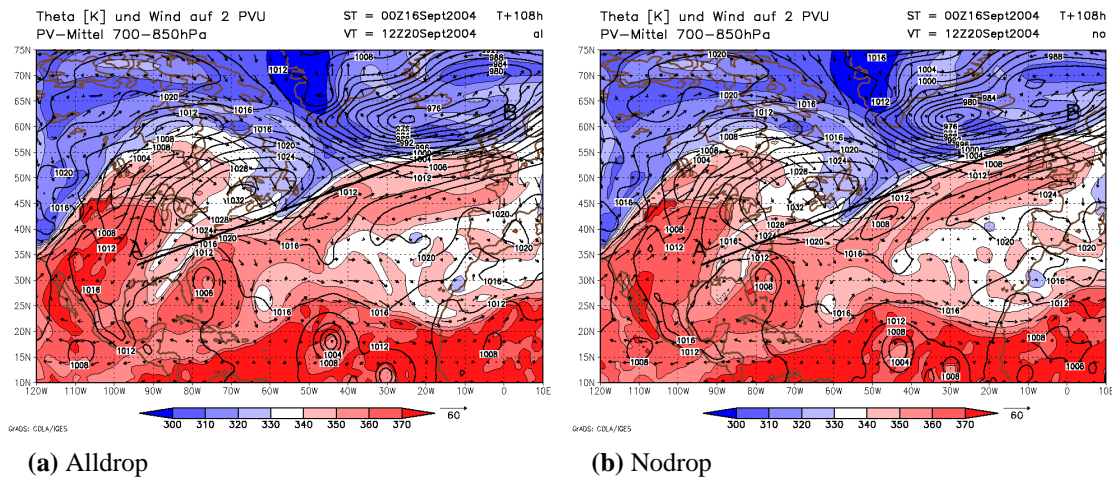
Außerdem sind in jeder Höhenstufe von der Analyse an Druck- bzw. Geopotentialstörungen über Afrika und im südlichen Nordatlantik zu sehen. Diese Differenzen sind sowohl der Assimilation von Dropsondendaten aus früheren Wirbelstürmen der Saison als auch den Eigenschaften des Spektralmodelles zuzuschreiben (persönliche Mitteilung von S. Aberson 2005). Kleinskalige Störungen können durch die spektrale Zerlegung der Wellen teilweise nur ungenau von längeren Wellen aufgenommen werden. Dadurch entstehen auch kleinskalige Abweichungen in Gebieten entfernt vom Störungsursprung.

Die zur vorherigen Vorhersagezeit bestandenen Signale in 500 hPa zeigen in Abb. 4.5 b, c eine deutliche Verstärkung. Insbesondere die Geopotentialdifferenz über Neufundland wurde innerhalb der letzten 24 h um 20 hPa angehoben, d. h. Alldrop berechnet für diesen Bereich ein erhöhtes Geopotential. Das Wachstum dieser Störung steht in engem Zusammenhang mit der verstärkten baroklinen Entwicklung der Atmosphäre, dargestellt durch die hohen Werte des Eady-Index. Dieses barokline Wachstum ist mit einer ausgeprägten vertikalen Windscherung verbunden, welche sich mit dem Jetstream in 200 hPa deckt (ohne Abbildung). Die stärkere antizyklonale Krümmung der Strömung ostseitig des Trogas über der Ostküste Nordamerikas (Abb. 3.2 f) in Alldrop verursacht die positive Geopotentialdifferenz um Neufundland (Abb. 4.5 b, c). Stromabwärts dieses Signalmaximums ist nun ein Differenzminimum zu sehen. Der Alldrop-Datensatz wirkt sich auf einen kurzwelligen Höhentrog zwischen Grönland und den Britischen Inseln vertiefend aus (ohne Abbildung). In den Vertikalschnitten kann die Verstärkung des Höhentrogas durch Alldrop den im rechten Drittel der Abbildung 4.5 d tiefer herabreichenden Isolinien der PV auf Tropopausenhöhe zugeordnet werden. Der weit absinkende Bereich erhöhter PV-Werte, markiert durch die zapfenförmige 1 PVU-Linie, wird auch in der Nodrop-Vorhersage bestimmt. Er liegt dort nordwestlich des Vertikalschnittes.

Die Bodendrucksignale haben sich nach 108 h Vorhersagezeit vorwiegend stromabwärts der Überreste Ivans ausgebreitet (Abb. 4.6 a). Das zum Vorhersagetermin 84 h bereits in der mittleren und oberen Troposphäre auffällige negative Signal über dem Islandtief macht sich nun auch im MSLP bemerkbar. Auf der Bodendruckdifferenzkarte (Abb. 4.6 a) ist eine leichte Dipolstruktur zu erkennen. Die Alldrop-Vorhersage sagt den Kern des Tiefdruckgebietes südöstlicher voraus. Das sich weiter nach Süden ausdehnende Tief in Alldrop ist in Abbildung 4.7 erkennbar. Zusätzlich vertiefen sich die Druckdifferenzen im südlichen Nordatlantik, welche mit Unterschieden um die Wirbelstürme Karl und Lisa zusammenhängen. Hurrikan Karl wird von den Alldrop-Daten mit leicht tieferem Kerndruck und nördlicher vorhergesagt. Für den späteren Hurrikan Lisa wird ein vertiefter Kerndruck bestimmt. Der leichte negative Druckunterschied vor der nordamerikanischen Küste geht südlich von Hurrikan Jeanne aus, welcher sich nördlich der Großen Antillen befindet. Der nur noch im Rotationsfeld sichtbare ehemalige Hurrikan Ivan (ohne Abbildung) verursacht in Alldrop einen leicht tieferen Druck über North Carolina. Das Zentrum der Zirkulation ist nur im Vertikalschnitt Nordop erfasst (Abb. 4.6 e), zu sehen an hohen Werten von  $\theta_e$  in Bodennähe. In Alldrop liegen die Reste Ivans südöstlich des Vertikalschnittes.

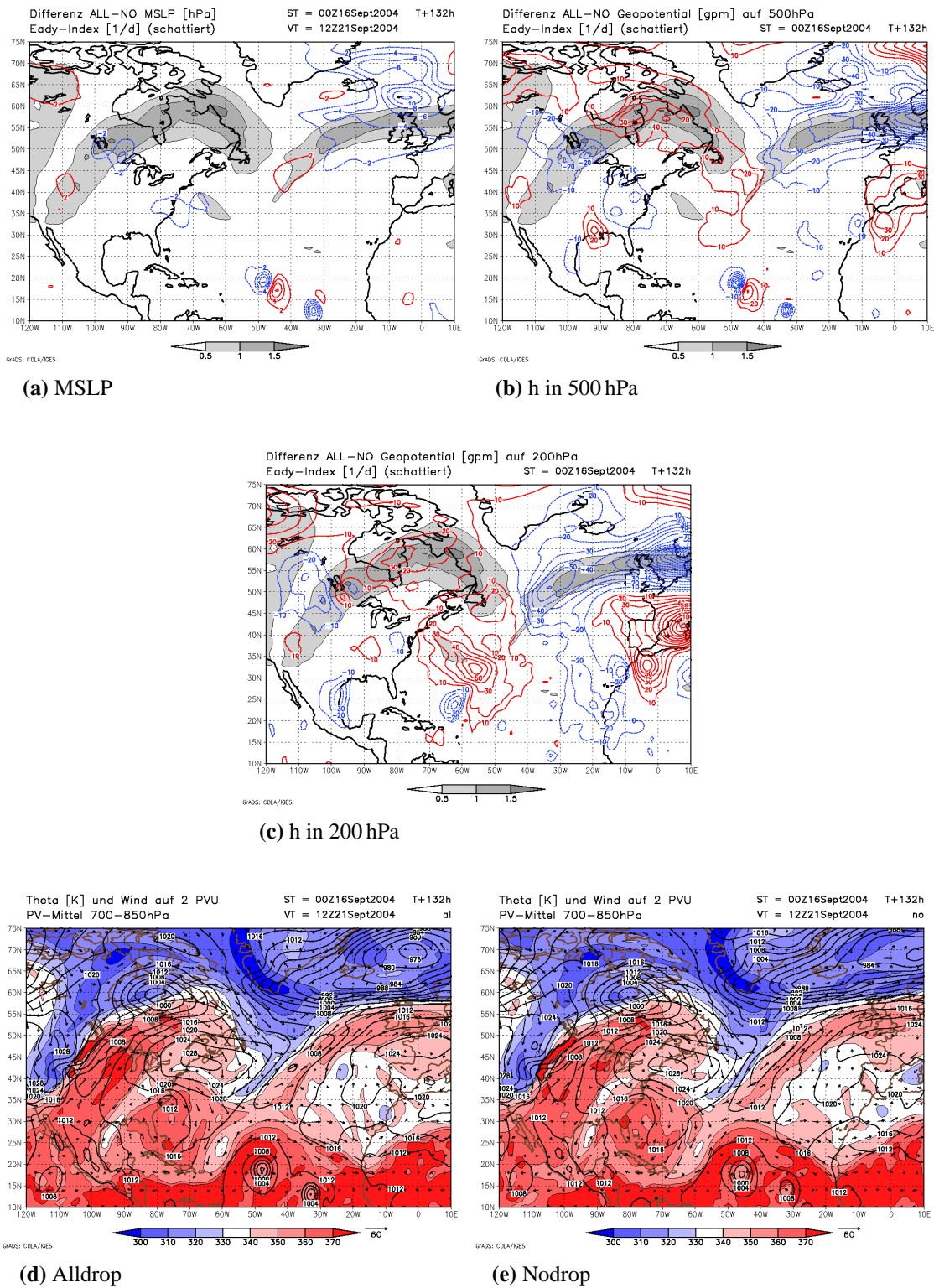


**Abbildung 4.6:** (a), (b), (c) Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle wie vorherige Abb.; (d), (e) Vertikalschnitt durch die oben markierte Linie mit  $\theta_e$  (farbig), PV (durchgezogene Linien, Konturintervall 1 PVU),  $\theta$  (gepunktete Linien) und Windvektoren nach 108 h Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC zum 20.09.04 12 Uhr UTC



**Abbildung 4.7:**  $\theta$  und Windvektoren auf 2 PVU, Konturen des MSLP und Markierung des Vertikalschnittes nach 108 h Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC

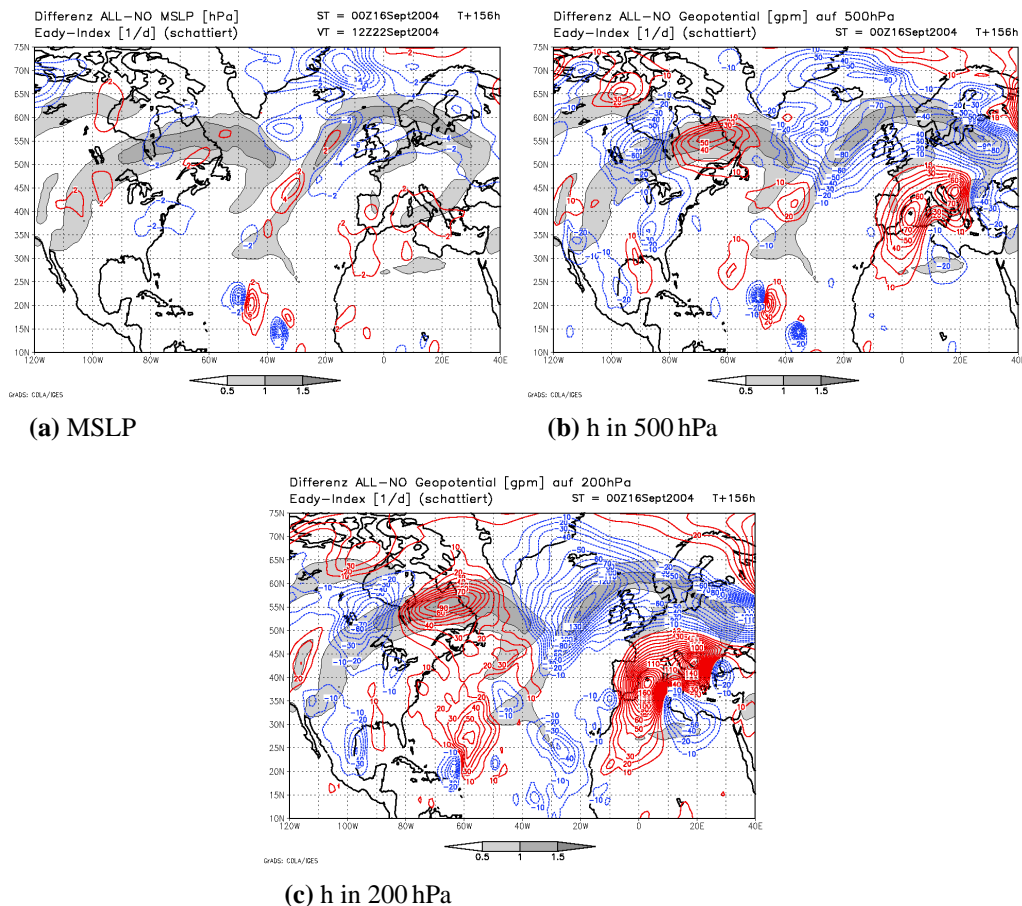
In 500 hPa hat sich die Geopotentialerhöhung südöstlich von Neufundland abgeflacht und weit nach Norden ausgebreitet. Der Eady-Index zeigt vom vorhergehenden Vorhersagetag (Abb. 4.5 b) zum aktuell betrachteten Zeitpunkt (Abb. 4.6 b) eine Abschwächung im Bereich des Zentrums dieses Signals. Die Geopotentialdifferenz liegt nun nicht mehr im Bereich des stärksten Störungswachstums, d. h. es ist keine Vertiefung der Differenz mehr zu erwarten. Das Dipolmuster am südwestlichen Ende der Vertikalschnittsmarkierung (Abb. 4.6 b) steht noch mit den Resten des Wirbelsturmes im Zusammenhang. Die vertikal lang gestreckte Region erhöhter PV-Werte in Verbindung mit Ivan ist im linken Drittel der Vertikalschnitte in Abbildung 4.6 d und e zu sehen. In der bodennahen Schicht hat die Reibung die Auflösung der Wirbelsturmmerkmale bewirkt. Die Geopotentialstörung nordwestlich der Britischen Inseln hat sich im Druckniveau 500 hPa enorm verstärkt. Die Tropopausenkarte (Abb. 4.7) zeigt den damit verbundenen zonalen Strömungsverlauf stromabwärts der Rückenachse in Alldrop. Mit den weiter nach Süden vorstoßenden Werten geringerer potentieller Temperatur auf der 2 PVU-Fläche ist in der quasigeostrophischen Theorie eine geringere geopotentielle Höhe verbunden. Am rechten Rand der Vertikalschnitte (Abb. 4.6 d, e) sieht man in Alldrop höhere Werte der PV bis in mittlere Troposphärenschichten eindringen. Das positive Geopotentialsignal auf 200 hPa (Abb. 4.6 c) östlich Neufundlands bezieht sich auf den Rücken über dem Atlantik (Abb. 4.7). Die Differenz ebnet sich ein und dehnt sich aus. Dieses Signal und die Zone verstärkten baroklinen Wachstums verlagern sich auseinander. Weiter stromabwärts verstärkt sich die Geopotentialvertiefung durch Alldrop vor den Britischen Inseln. Wie schon zur Darstellung auf 500 hPa erläutert, hängt diese Entwicklung mit einem weiter nach Norden reichenden Rücken im Nodrop-Datensatz zusammen (Abb. 4.7). Der Vertikalschnitt der Alldrop-Vorhersage (Abb. 4.6 d) erfasst den damit zusammenhängenden Bereich abgesenkter Tropopause besser.



**Abbildung 4.8:** (a), (b), (c) Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle wie vorherige Abb.; (d), (e)  $\theta$  und Windvektoren auf 2 PVU, Konturen des MSLP nach 132h Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC zum 21.09.04 12 Uhr UTC

In Nodrop verläuft der nördliche Rand des Rückens paralleler zum Vertialschnitt, was den seichteren Verlauf der Tropopausenabsenkung zur Folge hat (Abb. 4.6 e). Geopotentialunterschiede beider Vorzeichens in 200 hPa breiten sich nun nahezu über den gesamten Kartenausschnitt aus. Besonders die Regionen mit erhöhtem baroklinen Wachstum wirken verstärkend auf die Signale.

Nach 132 h seit Beginn der Vorhersage haben sich auf der Bodendruckkarte lediglich die Signale um das Islandtief und die Hurrikane Karl und Lisa verstärkt. Das negative Signal im nördlichen Atlantik (Abb. 4.8 a) wurde in Verbindung mit dem gesamten Tiefdrucksystem nach Westen verschoben. An den Konturen des Bodendruckes in Abb. 4.8 d, e ist festzustellen, dass Alldrop das Tief stärker und westlicher vorhersagt. Durch den damit veränderten Bodendruckgradienten resultiert eine leichte Korrektur der Windvorhersage auf 1000 hPa für das Gebiet der Färöer Inseln um 5 m/s (ohne Abbildung).



**Abbildung 4.9:** Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle wie vorherige Abb. nach 156 h Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC zum 22.09.04 12 Uhr UTC

Die Reste Ivans sind noch immer als Dipolstruktur auf 500 hPa in der Abbildung 4.8 b zu erkennen. Sie werden von dem Hochdruckgebiet über dem östlichen Nordamerika nach Westen gelenkt (Abb. 4.8 d, e). Die beiden Vorhersagen berechnen geringe Positionunterschiede für die übrig gebliebenen Anzeichen des Wirbelsturmes. Flache Geopotentialunterschiede machen sich auch im baroklin instabilen Bereich vom mittleren bis in das östliche Nordamerika bemerkbar. Diese Signale können nicht mehr als direkte Auswirkungen von Ex-Wirbelsturm Ivan ausgehend erklärt werden. Die negativen Geopotentialsignale der höheren Troposphärenschichten über dem Nordostatlantik (Abb. 4.8 b, c) verlagern sich mit zunehmender Vorhersagezeit mit der Strömung und verbunden mit dem Bereich erhöhten baroklinen Wachstums nach Osten. Der Rücken über dem südlichen Westeuropa wird sowohl auf 500 als auch auf 200 hPa durch Alldrop weiter nach Osten ausgedehnt wiedergegeben (Abb. 4.8 b, c), worauf die stark positiven Geopotentialunterschiede zurückzuführen sind. Das starke negative Signal in Bereich Nordwesteuropa durch alle Schichten der Troposphäre entsteht aus der Verstärkung des Islandtiefs in Alldrop.

Mit zunehmender Vorhersagezeit werden sich die mit verschiedenen Anfangsbedingungen gestarteten Vorhersagen immer weiter voneinander entfernen. Entsprechend verstärken und verschieben sich die Differenzen der betrachteten Variablen (Abb. 4.9 nach 156 h Vorhersage). Das Störungswachstum wirkt sich am stärksten auf die Regionen der mittleren Breiten aus, für welche die Wahrscheinlichkeit des baroklinen Wachstums bzw. der Bildung von Tiefdruckgebieten mit dem Eady-Index als am höchsten bestimmt wurde. Nach weiterer Vorhersage auf 156 h im Voraus können aus den dargestellten Differenzen kaum noch Schlüsse auf einen Zusammenhang mit dem Wirbelsturm Ivan gezogen werden.

## 4.2 Vorhersage Bonnie und Charley

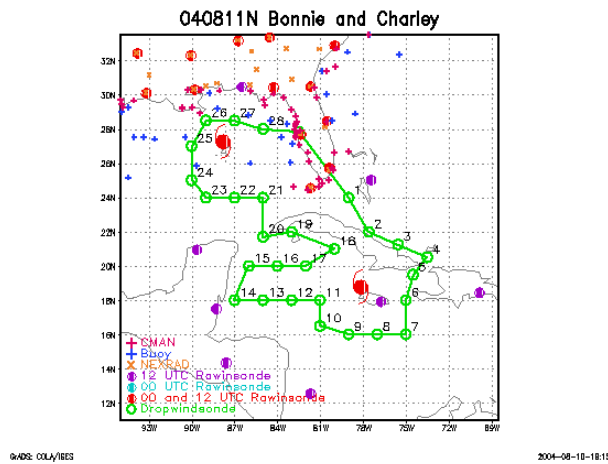
Vor Start der Vorhersage am 12. August 2004 um 00 Uhr UTC wurden Hurrikan Charley und der tropische Sturm Bonnie mit einer Flugmission überwacht. Abbildung 4.10 zeigt die Flugstrecke des Beobachtungsfluges von 17.30 Uhr UTC am 11.08.04 bis 01.30 Uhr UTC am 12.08.04. Charley befand sich zu dieser Zeit südlich der Insel Kuba, Bonnie bewegte sich im Golf von Mexiko auf die nordamerikanische Küste zu.

In den Analysedaten (Abb. 4.11) sind in keiner Troposphärenschicht nennenswerte Unterschiede im Druck oder der geopotentiellen Höhe zu verzeichnen. Die Alldrop-Daten vertiefen den Kerndrucke Bonnies und Charleys am Boden nur geringfügig. Die geopotentielle Höhe um Charley wird in 500 hPa durch Alldrop etwas angehoben.

Wie bereits in vorherigen Kapiteln erwähnt wurde, kann der räumlich gering ausgehende Wirbelsturm Charley möglicherweise durch die Auflösung des Modells von  $1^\circ$  Gitterweite nur ungenügend erfasst werden.

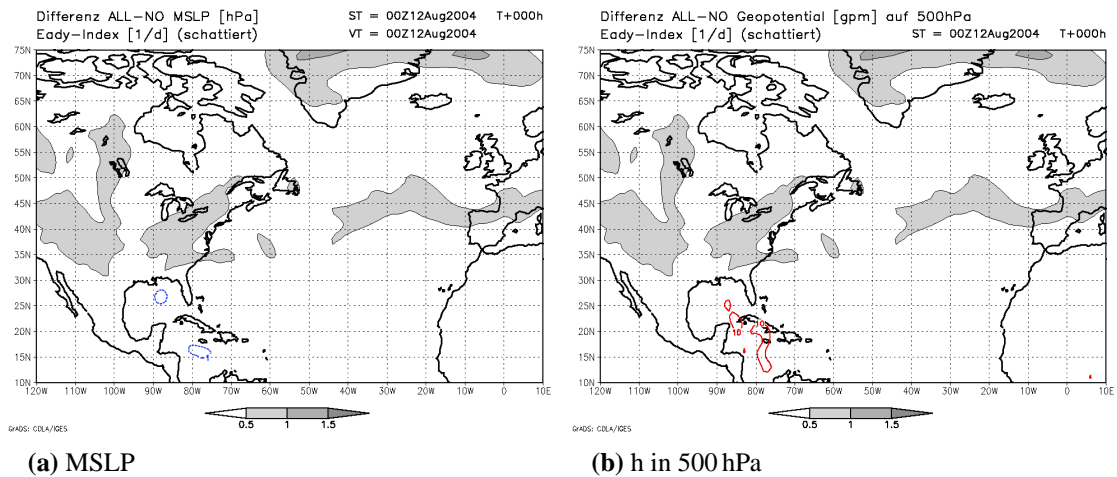
Wie auch schon in der Vorhersage zu Ivan festgestellt wurde, beginnen die Signale





**Abbildung 4.10:** Flugroute (grün) und Dropsondenabwürfe (grüne Kreise) um Hurrikan Charley (südlich) und den tropischen Sturm Bonnie (nördlich) am Abend des 11.08.2004; Standorte der Radiosondenmessungen (rote und violette Kreise)

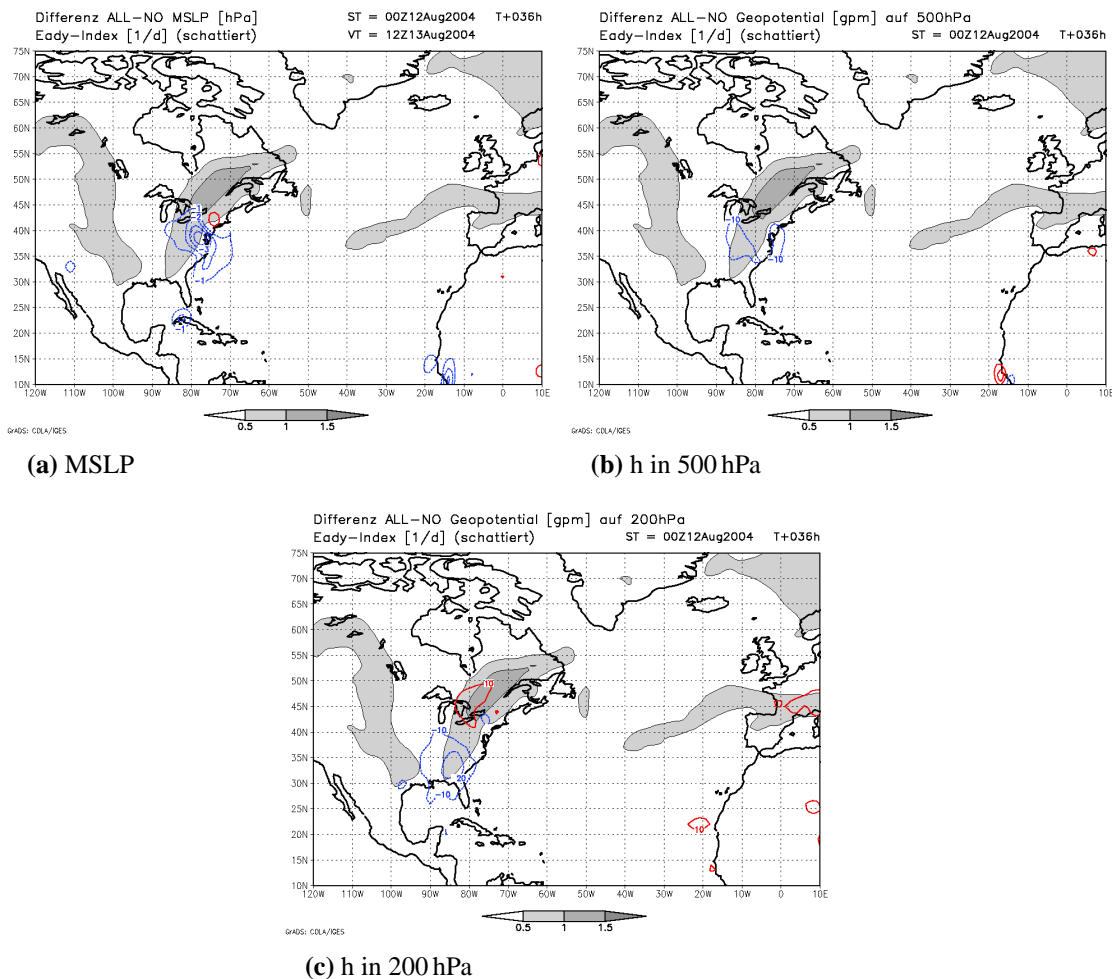
erst nach kurzer Zeit des Rückganges zu wachsen. Bei Charley ist in der Vorhersage nach 12 h ein geringfügiger Rückgang der Differenzen von Bodendruck und Geopotential zu beobachten. Die Signale breiten sich aus und vertiefen sich bereits nach 24 h Vorhersage.



**Abbildung 4.11:** Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle (a) 1 hPa, (b) 10 gpm zum Analysezeitpunkt 12.08.04 00 Uhr UTC

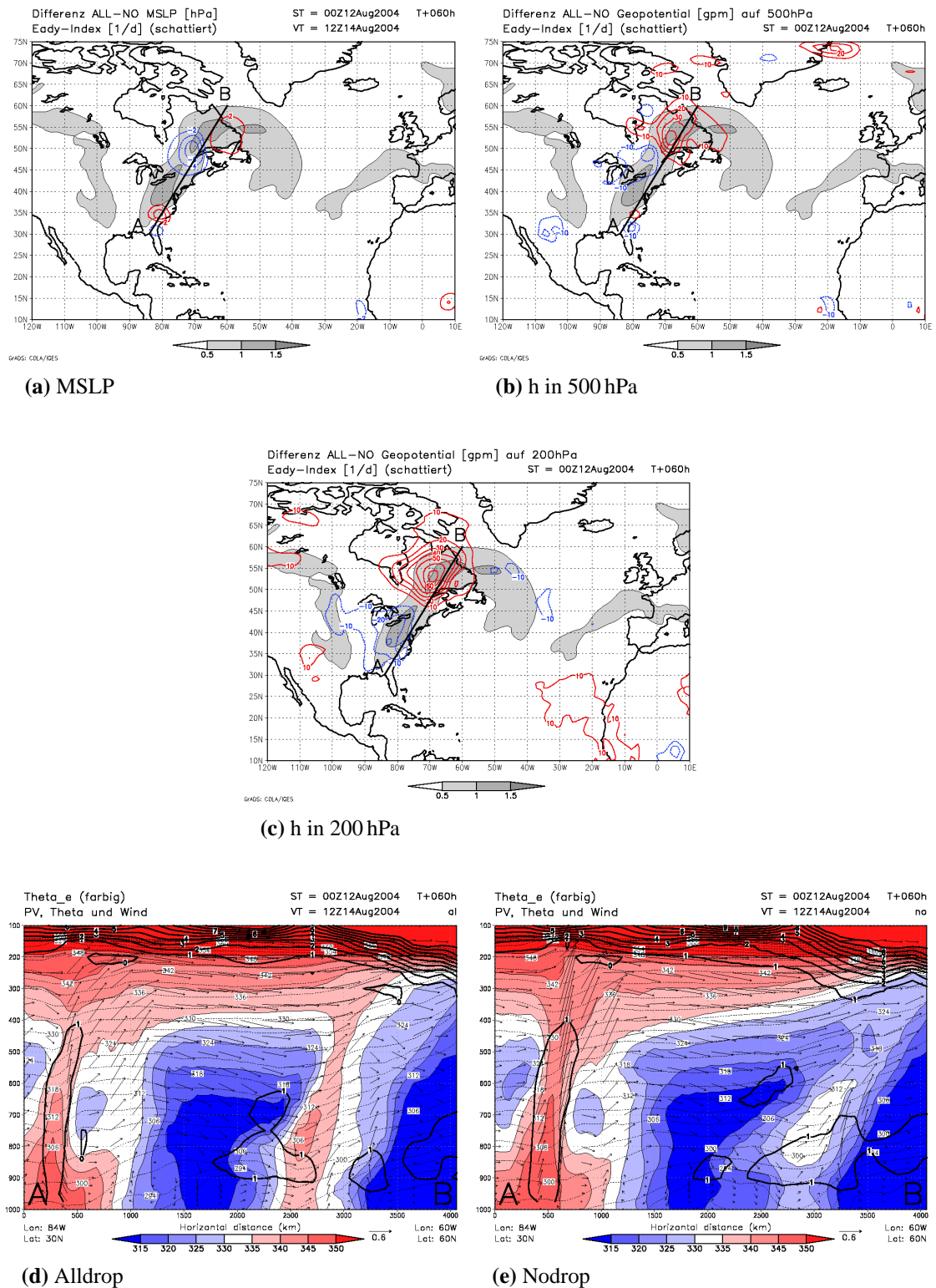
Nach der Vorhersagezeit von 36 h zeigt sich im Bodendruck (Abb. 4.12 a) eine Vertiefung um Charley mit 2 hPa und Bonnie mit 4 hPa in der Alldrop-Vorhersage. Bonnie wird in Alldrop zudem leicht nach Süden verschoben. Charley wird für diese Vorhersagezeit an der Westspitze Kubas lokalisiert. Bonnie befand sich bei Cape Hatteras, North Carolina, kurz vor dem Stadium des extratropischen Tiefs. Auf der Differenzenkarte für

500 hPa (Abb. 4.12 b) sind flache negative Signale um Bonnie entstanden. Grund dafür ist mit der südlicheren Position Bonnies verbunden die leichte Verschiebung des Trogges über dem mittleren Nordamerika in Richtung Osten (vgl. Abb. 3.4 b) in den Alldrop-Daten. In 200 hPa treten positive und negative Differenzen im Ostteil Nordamerikas über Bonnie auf. In dieser Höhe weist die Spitze des bereits für 500 hPa angesprochenen Trogges bei Alldrop leicht in östliche Richtung.



**Abbildung 4.12:** Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle (a) 1 hPa, (b), (c) 10 gpm nach 36 h Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC zum 13.08.04 12 Uhr UTC

Die Signale des Bodendruckes zeigen zur Vorhersagezeit 60 h (Abb. 4.13 a) ein Dipolmuster um Hurrikan Charley nördlich der Halbinsel Florida. Das Druckzentrum wird durch die Alldrop-Daten etwas nach Süden verschoben.

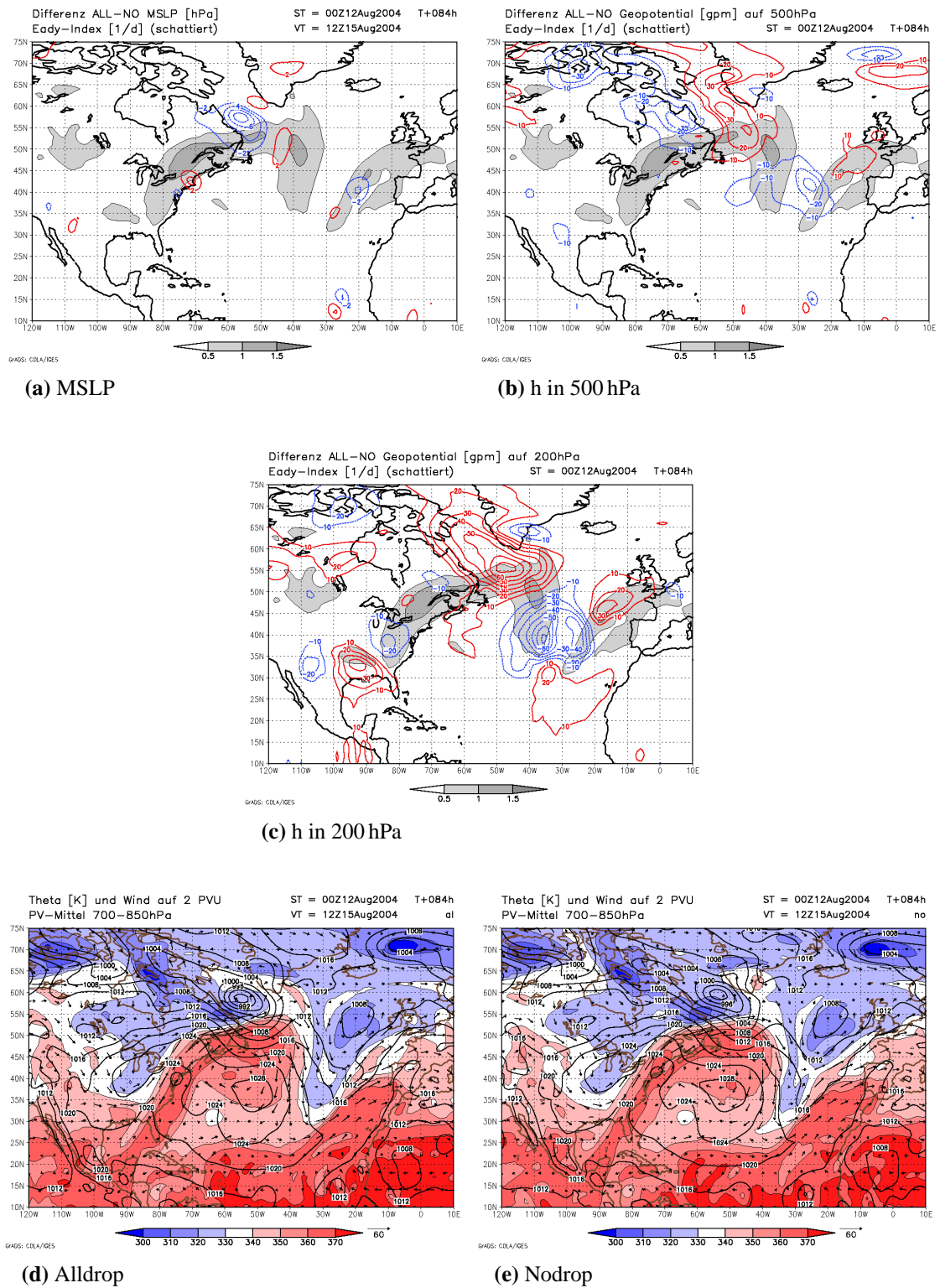


**Abbildung 4.13:** (a), (b), (c) Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle (a) 2 hPa, (b), (c) 10 gpm; (d), (e) Vertikalschnitt durch die oben markierte Linie mit  $\theta_e$  (farbig), PV (durchgezogene Linien, Konturintervall 1 PVU),  $\theta$  (gepunktete Linien) und Windvektoren nach 60 h Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC zum 14.08.04 12 Uhr UTC

Die scheinbare Vertiefung des MSLP in den Nodrop-Daten entsteht aus dem stärkerem Druckgradienten nordseitig des Wirbelsturmes in Alldrop. Eine weitere Dipolstruktur bildete sich nordwestlich der Großen Seen aus. Dieser Positionsunterschied ist auf das außertropische Tief, welches nun aus Bonnies Resten entstanden war, zurückzuführen. Im Vertikalschnitt auf Abbildung 4.13 d, e sind die genannten Positionsverschiebungen zu erkennen. Im Alldrop-Vertikalschnitt sind beide Bereiche mit höheren äquivalentpotentiellen Temperaturen am Boden nach links verschoben. Die Aufsteigbewegungen in diesen Gebieten weisen auf das tropische und das außertropische Tief hin. Die  $\theta_e$ -Anomalie in der rechten Hälfte des Vertikalschnittes, welche Bonnie darstellt, wurde durch Alldrop mit bis zu 10 K höheren äquivalentpotentiellen Temperaturen und verstärkter Vertikalbewegung berechnet. Dadurch kann das um 6 hPa vertiefte Bodendrucksignal nordöstlich der Großen Seen erklärt werden. Vorderseitig des Troges über dem östlichen Nordamerika (vgl. Abb. 3.4 d) wird feuchtwarmer Luft in Bodennähe nach Norden transportiert. Der in Alldrop tiefere MSLP um die aus Bonnie entstandene Zyklone weist einen starken Druckgradienten ostseitig auf. Die damit verbundenen höheren Windgeschwindigkeiten ziehen die milden atlantischen Luftmassen zyklonal auf das Festland in westliche Richtung. Der stärker ausgebildete Turm hoher Werte von  $\theta_e$  in der rechten Hälfte der Abbildung 4.13 d bildet die Konsequenz daraus.

Im Druckniveau 500 hPa breitet sich das Geopotentialsignal ausgehend von der Störung 24 h vorher nach Nordost und Südwest entlang des Bereiches erhöhten baroklinen Wachstums aus (Abb. 4.13 b). Um die Rückstände von Bonnie hat sich nun eine Dipolstruktur mit gleichzeitiger Verstärkung der Differenzen gebildet. Die Vergrößerung der Unterschiede in diesem Gebiet ist auf Grund der starken Baroklinität, d. h. hohen Werten des Eady-Index zu erwarten. Die Lage in der Kaltfront vorderseitig des ausgeprägten Troges über Nordamerika (Abb. 3.4 c, d) kann für das Auseinanderdriften der beiden Vorhersagen in dieser Region sorgen. Der vertikal langgestreckte Bereich hoher Werte von  $\theta_e$  in der rechten Bildhälfte des Vertikalschnitts in Abbildung 4.13 d ist für höhere Werte der geopotentiellen Höhe in der Alldrop-Vorhersage verantwortlich. Im Vertikalschnitt aus den Nodrop-Daten ist dieser Warmluftbereich durch die Windscherung stark geneigt und abgeschwächt worden (Abb. 4.13 e). Die Geopotentialsignale um Charley zeigen eine Lageveränderung in den Alldrop-Daten nach Süden in Verbindung mit einer Vertiefung des Geopotentials. Die Maximalwerte der Größen um Charley sind durch horizontale Verschiebungen im Vertikalschnitt für Alldrop nicht erfasst, sie liegen östlich der Linie. Aus diesem Grund erscheint die PV in 500 hPa in der Alldrop-Vorhersage trotz der erhöhten geopotentiellen Höhe schmaler.

Auf 200 hPa dominiert das positive Signal westlich von Neufundland (Abb. 4.13 c) über dem aus Bonnie entstandenen Tief. Im Vertikalschnitt (Abb. 4.13 d, e) ist die negative PV-Anomalie in Tropopausenhöhe in der Alldrop-Vorhersage deutlicher vorhanden, was mit dem Aufstieg warmer Luft aus den mit Bonnie zusammenhängenden Resten verbunden ist.



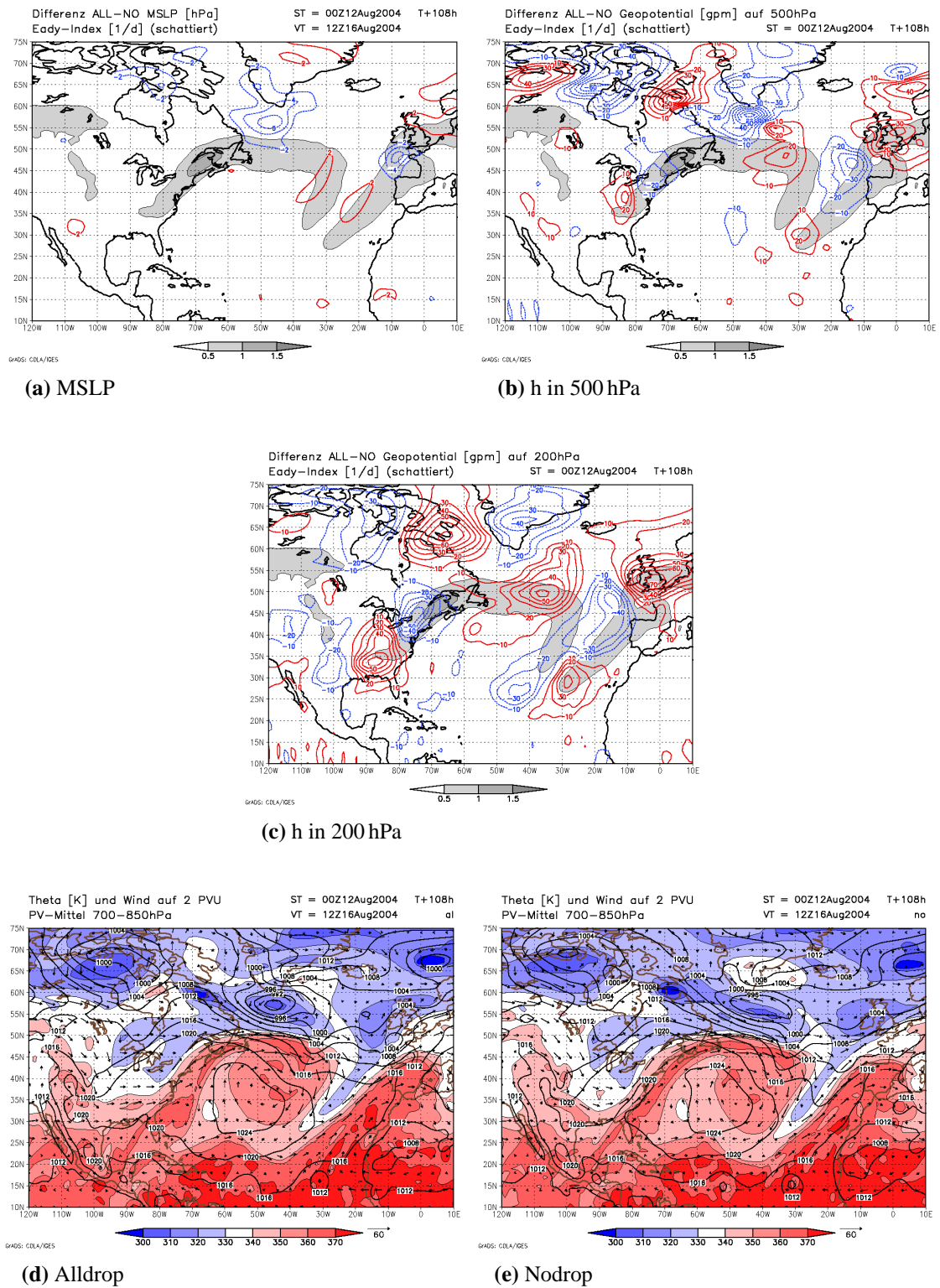
**Abbildung 4.14:** (a), (b), (c) Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle wie vorherige Abb.; (d), (e)  $\theta$  und Windvektoren auf 2 PVU, Konturen des MSLP nach 84 h Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC zum 15.08.04 12 Uhr UTC

Die Tropopause fällt bei Nodrop am rechten Bildrand steiler ab. Daraus resultiert ein leicht stärkerer Jet an dieser Stelle (ohne Abbildung). Südlich der positiven Geopotentialdifferenz in Abbildung 4.13 c wird die Tropopause in den Nodrop-Daten weiter angehoben. Verglichen mit dem Vertikalschnitten (Abb. 4.13 d, e, Entfernung von A 600 km) resultiert das aus verstärktem Aufsteigen, verbunden mit dem diabatischer Wärmefreisetzung aus Charley in der Nodrop-Vorhersage.

Nach einem weiteren Tag der Prognose sind auf der Bodenkarte (Abb. 4.14 a) noch immer Signale der Verstärkung durch Alldrop um Ex-Bonnie zu sehen. Charleys Reste befinden sich nach 84 h Vorhersagezeit über der mittleren Ostküste Nordamerikas. Sein Bodendruckbereich wird im Alldrop-Datensatz leicht stärker und südlicher berechnet. Die intensivere positive Bodendruckdifferenz östlich der Großen Seen resultiert aus der Verstärkung der flachen Hochdruckbrücke nördlich von Charley in Alldrop (Abb. 4.14 d, e). Die Strukturen um die beiden ehemaligen Wirbelstürme bewegen sich vorderseitig der mit dem ausgeprägten Trog über Nordamerika verbundenen baroklinen Zone nach Nordosten. Nördlich des Rückens über dem Atlantik (Abb. 4.14 d, e) verstärkt sich das Tiefdruckgebiet um Ex-Bonnie. Diese Zyklone über der Labradorsee wird im Alldrop-Lauf um 8 hPa tiefer wiedergegeben (Abb. 4.14 a). Das negative Signal östlich der Azoren im Bereich verstärkten Eady-Index liefert eine flache Tiefdruckzunge  $20^{\circ}$  W,  $40^{\circ}$  N in den Alldrop-Daten. Die baroklin instabilen Regionen wirken sich auf Störungen in den Modellläufen verstärkend aus.

In 500 hPa scheinen die Signale des Geopotentials zu verlaufen (Abb. 4.14 b). Die Signaturen um die Überbleibsel von Bonnie vom letzten Vorhersagetermin haben sich weit nach Nordwesten verbreitet. Die Ausweitung dieser Unterschiede kann nicht mit der Lage starken baroklinen Wachstums in Verbindung gebracht werden. Über die Davisstraße ziehen sich mehrere abgeschlossene Bereiche niedrigen Geopotentials, deren Lage in den Läufen leicht unterschiedlich wiedergegeben wird. Diese Höhentiefdruckgebiete sind in den Tropopausenkarten der Abbildung 4.14 d und e mit den abgegrenzten Regionen tiefer potentieller Temperaturen verbunden, welche sich vom nordwestlichen Kartenrand bis fast in Bildmitte erstrecken. Um das in Alldrop stärker ausgebildete Tief aus Bonnies Resten wird im zyklonalen Sinne wärmere Luft aus dem Rücken über dem Atlantik nach Nordwesten transportiert (Abb. 4.14 d, e). Dieses Umschließen der Bereiche tiefen Geopotentials mit Warmluft ist als Ursache für die flachen Signale der geopotentiellen Höhe (Abb. 4.14 b) anzusehen. Das Signal, welches sich im Bereich der Azoren entwickelt hat, erscheint markanter in 200 hPa.

Auf der Höhenkarte 200 hPa fällt das eben genannte negative Signal über dem mittleren Atlantik auf (Abb. 4.14 c). Der dort positionierte Trog wird in Alldrop breiter vorhergesagt, wie an der Tropopausenvertiefung in Abbildung 4.14 d und e zu sehen ist. Dieser Geopotentialunterschied entwickelte sich seit dem Vorhersagezeitpunkt 60 h aus schwachen negativen Strukturen stromabwärts von Bonnie (Abb. 4.13 c). Verlagerung und Wachstum dieser Differenz fand im Bereich stärksten baroklinen Wachstums statt.



**Abbildung 4.15:** (a), (b), (c) Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle wie vorherige Abb.; (d), (e)  $\theta$  und Windvektoren auf 2 PVU, Konturen des MSLP nach 108 h Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC zum 16.08.04 12 Uhr UTC

Stromaufwärts des negativen Signals konnte sich der Geopotentialunterschied in Verbindung mit Bonnie südlich von Grönland nach Nordwesten ausbreiten, was wiederum auf den für 500 hPa angesprochenen Warmluftvorstoß zurückzuführen ist.

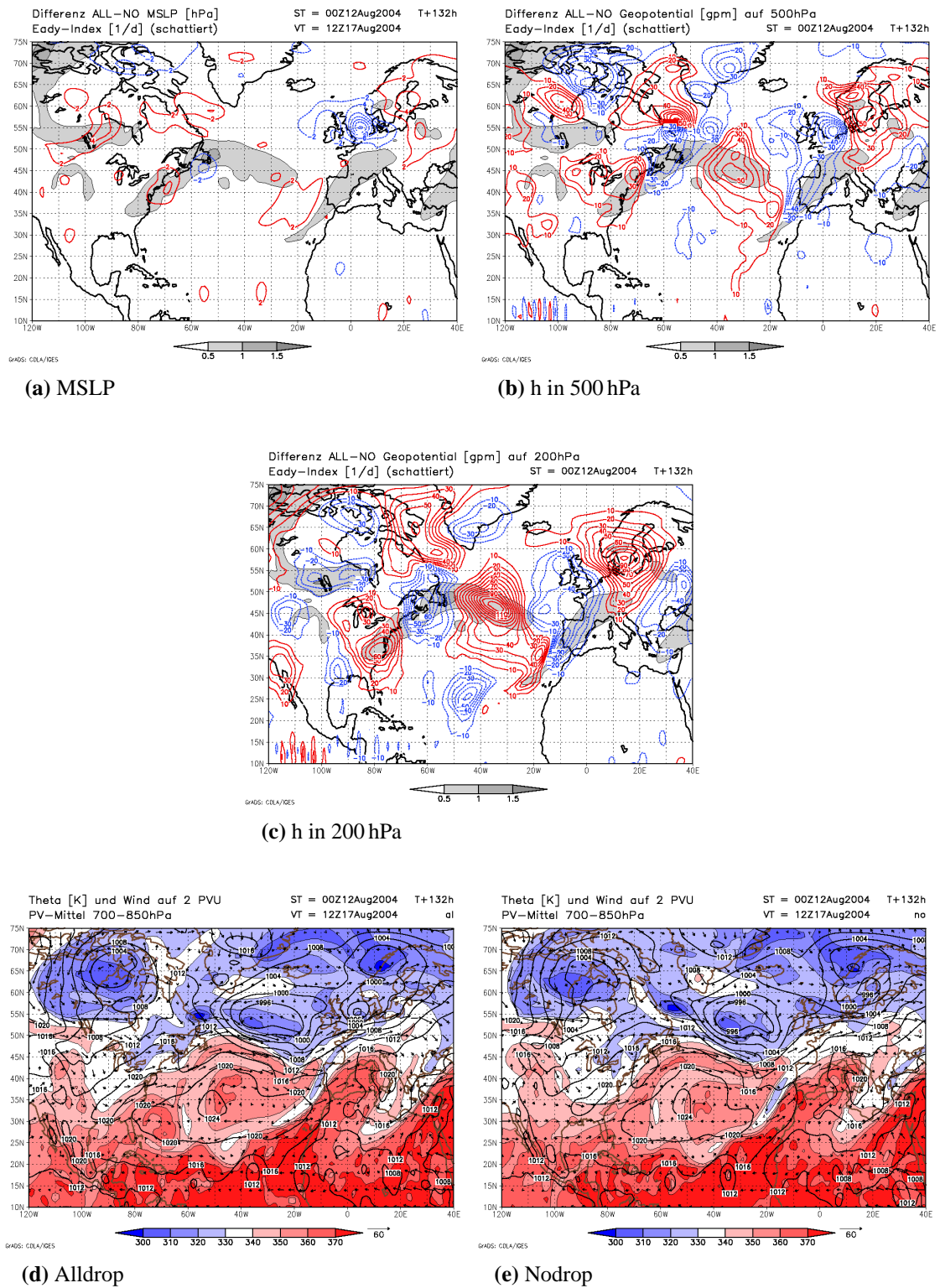
Die Geopotentialdifferenz über den Südstaaten der USA (Abb. 4.14 c) ergibt sich aus dem etwas weiter nach Süden reichenden Trog über Nordamerika in der Nodrop-Vorhersage (Abb. 4.14 e). Trotz der Position dieser Störung unmittelbar stromaufwärts von Ex-Charley kann keine Verbindung zu dem ehemaligen Hurrikan gezogen werden. Diese Unterschiede der geopotentiellen Höhe werden aus Westen in den Bildausschnitt hineinverlagert. Es kann vermutet werden, dass diese Differenzen aus Temperaturunterschieden über Nordmexiko und Südkalifornien entstehen. Kleinräumige Differenzen des Bodendruckes in Abbildung 4.14 a und im Zeitschritt 12 h davor (ohne Abbildung) unterstützen diese Annahme.

Das Tiefdruckgebiet südlich von Grönland, welches sich aus den Resten Bonnies verfolgen lässt, wird durch die Alldrop-Vorhersage nach 108 h um 5 hPa verstärkt wiedergegeben (Abb. 4.15 a). Es verlagerte sich innerhalb der letzten 24 h leicht in Südostrichtung. Nur die Alldrop-Daten berechnen ein seichtes Tiefdruckgebiet, welches das Signal am Eingang des Ärmelkanals verursacht. Dieses Bodendrucksignal fiel bereits in der Vorhersage für 84 h als geringer Unterschied der beiden Läufe im Bereich der Azoren auf (Abb. 4.14 a). Das sich aus der flachen Zunge entwickelte kleine Tief wurde mit der Strömung vorderseitig des Troges über dem östlichen Atlantik nach Nordosten verlagert. Die Hebungsvorgänge in Verbindung mit dem Trog bzw. der positiven PV-Anomalie (Abb. 4.15 d, e) begünstigen die Zyklogenese.

In 500 hPa hat sich aus den flachen Geopotentialunterschieden im Bereich der Labradorsee ein markanter Wellenzug aus positiven und negativen Signalen gebildet, welcher sich über den gesamten Bildausschnitt in den mittleren Breiten erstreckt (Abb. 4.15 b). Von der Verstärkung des Tiefs um Bonnie in der Alldrop-Vorhersage ausgehend, verursacht das Vordringen wärmerer Luft nach Nordwesten bis über die Davisstraße hinaus die Verschiebung der obertroposphärischen synoptischen Systeme gegenüber der Nodrop-Prognose. Diese Positionsunterschiede zwischen den beiden Vorhersageläufen lösen die wellenförmig erscheinenden Signale aus. Die Lageabweichungen der Höhentiefdruckgebiete im nördlichen Kanada werden durch den Vergleich der Bereiche tiefer Werte von  $\theta$  in den beiden Vorhersagen anschaulich gemacht (Abb. 4.15 d, e). Die Signale im mittleren bis östlichen Nordatlantik (Abb. 4.15 b) gehen aus der leicht verschiedenen Breite und Ausrichtung des Troges hervor (Abb. 4.15 d, e).

Das wellenförmige Signal setzt sich in etwas abgeschwächter Form bis auf Tropopausehöhe fort. Im Unterschied zur mittleren Troposphäre breiten sich in 200 hPa die Differenzen der geopotentiellen Höhe bevorzugt über Gebieten aus, welche baroklines Wachstum begünstigen. Abgesehen von den Signalen über Nordkanada, welche als Auswirkungen des Tiefs um Bonnie angesehen werden können, liegen die wellenförmig angeordneten Störungen entlang der Gebiete mit erhöhtem Eady-Index (Abb. 4.15 c).





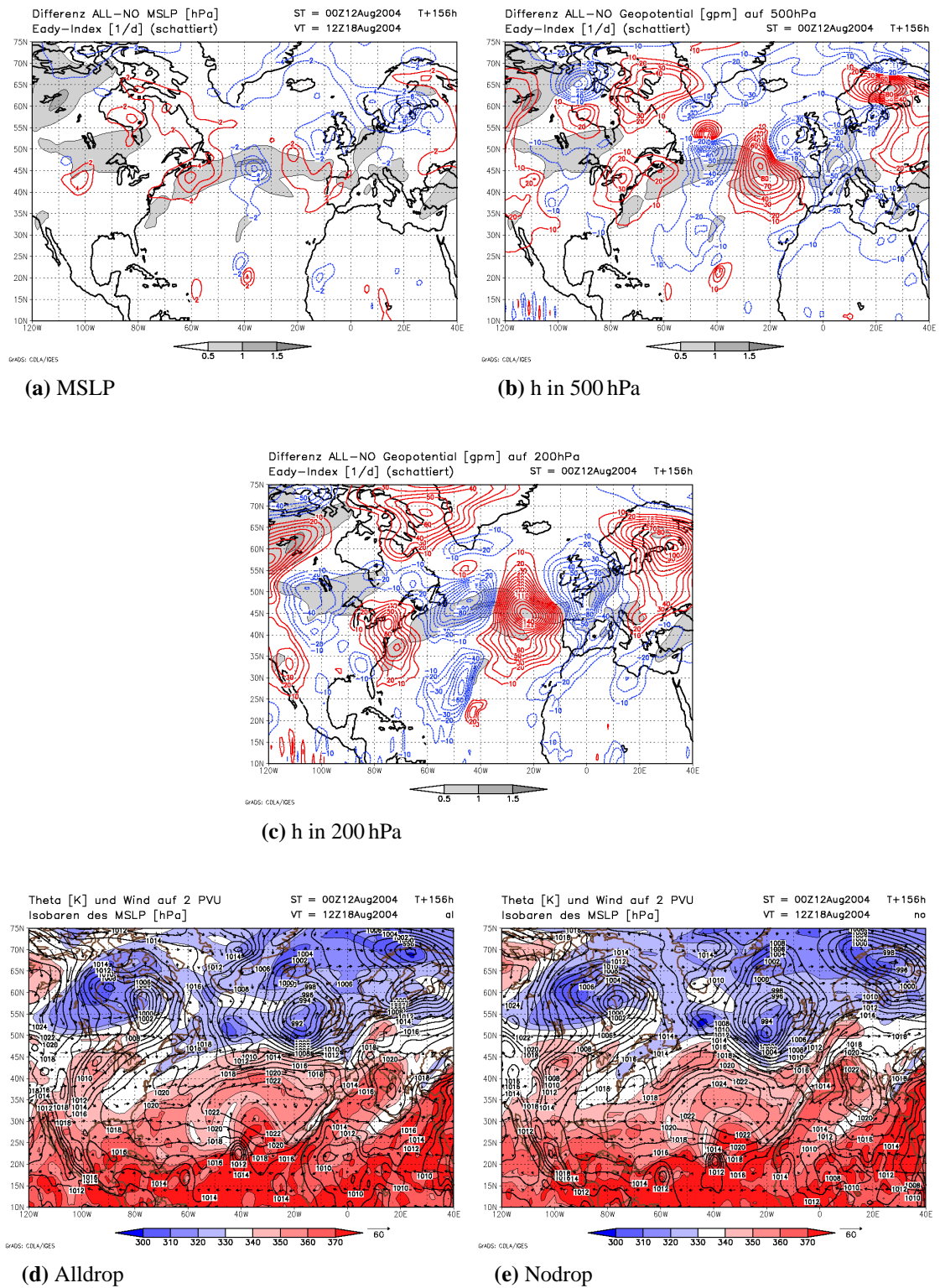
**Abbildung 4.16:** (a), (b), (c) Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle wie vorherige Abb.; (d), (e)  $\theta$  und Windvektoren auf 2 PVU, Konturen des MSLP nach 132 h Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC zum 17.08.04 12 Uhr UTC

Markant stärker erscheint auf Druckniveau 200 hPa das Dipolmuster im Bereich der Großen Seen, welches den Wellenzug längs der baroklin instabilen Regionen einleitet. Diese in Laufe der Vorhersagezeit vom südwestlichen Nordamerika aus eingedrungene Differenz der geopotentiellen Höhe befindet sich nun über dem Bereich mit erhöhtem Eady-Index, wo das Auseinanderdriften der Prognosen erwartet wird. Das Signal wird durch den kürzeren und etwas nach Osten verlagerten Trog in Alldrop verursacht (Abb. 4.15 d, e). Ein Zusammenhang mit den leicht stromabwärts noch im bodennahen PV-Feld erkennbaren Überresten von Charley ist nicht zu sehen. Zur Herkunft der übrigen Geopotentialunterschiede kann auf die Erläuterungen zum Druckniveau 500 hPa verwiesen werden.

Nach 132 h Vorhersage sind auf der Bodenkarte (Abb. 4.16 a) noch der starke Druckunterschied über der Nordsee und das Dipolmuster um den ehemaligen Hurrikan Charley verfolgbare Strukturen. In der Bodendruckdifferenzkarte zum vorher betrachteten Prognosezeitpunkt 108 h (Abb. 4.15 c) war ein kleinskaliges Signal um die Reste Charleys östlich von Neuschottland zu sehen. Die Überbleibsel Charleys vorderseitig des flachen Troges über dem östlichen Nordamerika werden zur Hebung beigetragen haben, so dass nun in beiden Vorhersagen leichte Zyklonense einsetzt (Abb. 4.16 d, e). In der Alldrop-Prognose findet die Druckvertiefung über Neufundland leicht nördlicher statt und verursacht damit die Dipolstruktur um Neuschottland in Abbildung 4.16 a. Das sich abschwächende Bodentief aus den Resten Bonnies wird in beiden Vorhersagen mit gleicher Stärke und Position wiedergegeben. Die nur in der Alldrop-Vorhersage berechnete Zyklone über der Nordsee wurde weiter entlang der Vorderseite des Troges über den östlichen Atlantik nach Nordost advehiert (Abb. 4.16 d, e). Das Bodentief sorgt für erhöhte Windgeschwindigkeiten um 18 m/s über der Nordsee und um bis zu 12 m/s über den Küstenregionen Hollands und Frieslands in der Vorhersage.

Im Druckniveau 500 hPa verschwimmt das markante Wellenmuster. Das mit Bonnie im Zusammenhang stehende Höhentief erzeugt nach leichter Südwärtsverlagerung die ausgedehnte positive und nordwestlich davon gelegene negative Struktur im Nordatlantik (Abb. 4.16 b). Die Differenzen stromaufwärts stehen mit Lageabweichungen der mehrfach erwähnten Höhentiefdruckgebiete in Verbindung (Abb. 4.16 d, e). Vertikal über der Bodendruckdifferenz um Ex-Charley bildet die Alldrop-Vorhersage einen sanften Sekundärtrog aus (Abb. 4.16 d), welcher das Signal zwischen den Großen Seen und Neufundland auslöst (Abb. 4.16 b). Der starke Differenzgradient über Dänemark ist dem Tiefdruckgebiet über der Nordsee in der Alldrop-Vorhersage zuzuschreiben. Die auf den Höhenkarten der Abbildung 4.16 b und c erscheinenden kurzwelligen Strukturen in niederen Breiten sind auf Störungen im Modell zurückzuführen.

Diejenigen Signale, welche auf 200 hPa mit erhöhten Werten des Eady-Index überlagert sind, vertiefen sich. Die Alldrop-Daten berechnen die Position des Troges bzw. der schmalen Tropopausenvertiefung über dem östlichen Nordatlantik leicht östlicher (Abb. 4.16 d, e). Daraus ergibt sich das starke positive Signal über dem Nordatlantik in Verbindung mit dem negativen Merkmal über Westeuropa.



**Abbildung 4.17:** (a), (b), (c) Eady-Index [1/d] (grau schattiert) und Differenzen Alldrop-Nodrop, Konturintervalle wie vorherige Abb.; (d), (e)  $\theta$  und Windvektoren auf 2 PVU, Konturen des MSLP nach 156 h Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC zum 18.08.04 12 Uhr UTC

Im Zusammenhang mit dem Bodentief über der Nordsee bildet der Isohypsenverlauf in 200 hPa in der Alldrop-Vorhersage den Rücken über Osteuropa stärker aus. Dieser ist als positives Geopotentialsignal über Westskandinavien in Abb. 4.16 c zu sehen. Zur Begründung anderer Strukturen wird wiederum auf die Erklärungen zur Karte in 500 hPa verwiesen.

Nach 156 h Vorhersagezeit hat sich das Tiefdruckgebiet über der Nordsee beachtlich abgeschwächt und nach Osten verlagert, wie am Rückgang der Isobarendifferenz des MSLP zu erkennen ist (Abb. 4.17 a). Die auf den ehemaligen Wirbelsturm Charley zurückverfolgbaren seichten Tiefdruckgebiete, welche im hier gewählten Isobarenintervall von 4 hPa in Abbildung 4.17 d und e nicht aufgelöst werden können, haben sich vom letzten betrachteten Vorhersagetermin von Neuschottland in Richtung Osten verschoben. Die damit verbundenen Positionsunterschiede in den Vorhersagen verursachen das Dipolmuster südöstlich von Neufundland (Abb. 4.17 a). Vertikal darüber haben sich unterschiedlich positionierte leichte Sekundärtröge ausgebildet, welche Signale in höheren Troposphärenschichten verursachen (Abb. 4.17 b, c). Das Tiefdruckgebiet westlich der Britischen Inseln, welches auf Bonnie zurückzuführen ist, vertieft sich in der Alldrop-Vorhersage erneut (Abb. 4.17 d, e). Es ist für die Signale gegensätzlichen Vorzeichens westlich von Europa verantwortlich (Abb. 4.17 a). Das dipolförmige Signal des MSLP im südlichen Nordatlantik ist Hurrikan Danielle zuzuordnen.

Die Signale in den oberen Troposphärenschichten in Abbildung 4.17 b und c werden durch Verschiebungen und unterschiedliche Formen der Tröge und Rücken verursacht, welche nicht mehr direkt auf die Messungen um die Wirbelstürme zu beziehen sind. Nach 6 1/2 Tagen zeigen die beiden Prognoseläufe trotz der stark erscheinenden Differenzen (Abb. 4.17 a, b und c) im synoptischen Erscheinungsbild nur geringe Unterschiede (Abb. 4.17 d, e).

# Kapitel 5

## Bewertung der Vorhersagen

Dieses Kapitel wird in zwei Abschnitte unterteilt. Zunächst werden die Vorhersagen mit den Analysen visuell anhand der Abbildungen verglichen, wobei eine subjektive Begutachtung der Vorhersagegüte entsteht. Im zweiten Teil des Kapitels erfolgt die Beurteilung der Prognosequalität nach einer Gleichung, welche pro Variable auf einen Gitterpunkt angewandt wird. Der Einfluss der zusätzlichen Daten auf den Vorhersagefehler wird somit objektiv sichtbar gemacht.

### 5.1 Synoptischer Vergleich

Mit der folgenden subjektiven Beurteilung wird ein allgemeiner Überblick gegeben, inwiefern die beiden mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen gestarteten Vorhersagen den wahren Zustand der Atmosphäre wiedergeben können. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Erfassung der Entwicklung der Wirbelstürme, sowie die großräumige Struktur der Strömung in der oberen Troposphäre gerichtet.

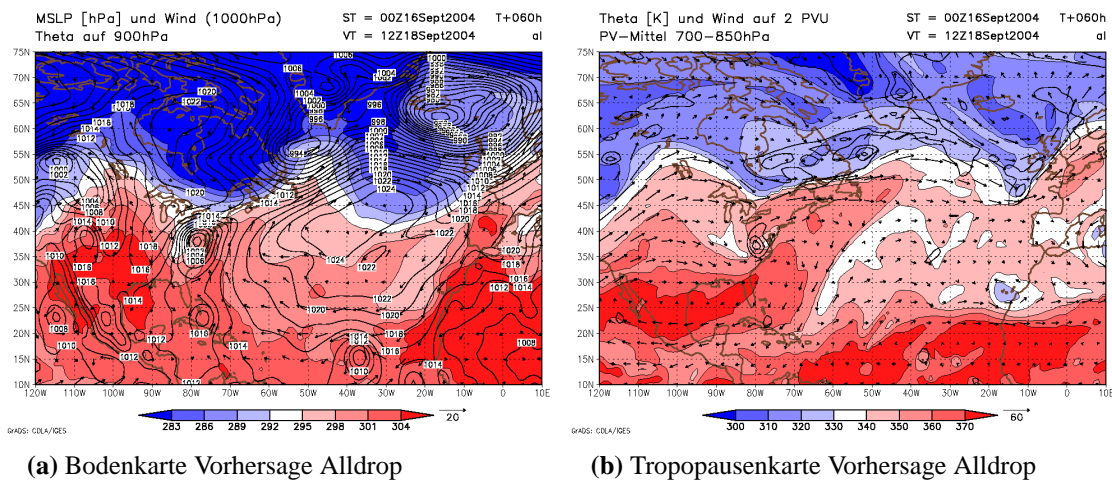
#### 5.1.1 Vorhersage Ivan

Die Zugbahnvorhersage Ivans wird bis zum Tag des ersten Auftreffens auf Festland in Stewart (2005) als gut bewertet. Der Vorhersagefehler lag unter dem zehnjährigen Durchschnittswert. Insbesondere der Ort des Kontaktes mit amerikanischem Festland konnte in den Vorhersagen bis 72 h auf einen eng begrenzten Bereich eingeschränkt werden. Die Fehler der Intensitätsvorhersage Ivans lagen jedoch über den zehnjährigen Mittelwerten (Stewart 2005). Dieser Mängel wurde der raschen Intensivierung Ivans zugeschrieben.

In der hier betrachteten Vorhersage für Ivan vom 16. September 2004 00 Uhr UTC zeigt sich ab der Prognose um 48 h eine Tendenz zur unterschiedlichen Positionswiedergabe des Wirbelsturmes im Bodendruckfeld. Der Trend verstärkt sich zum Vorhersagetermin 60 h zum 18.09.04 12 Uhr UTC. Abbildung 5.1 zeigt die Vorhersage Alldrop für

die untere und obere Troposphäre stellvertretend für beide Prognosen, welche sich kaum unterscheiden (siehe Kapitel 4).

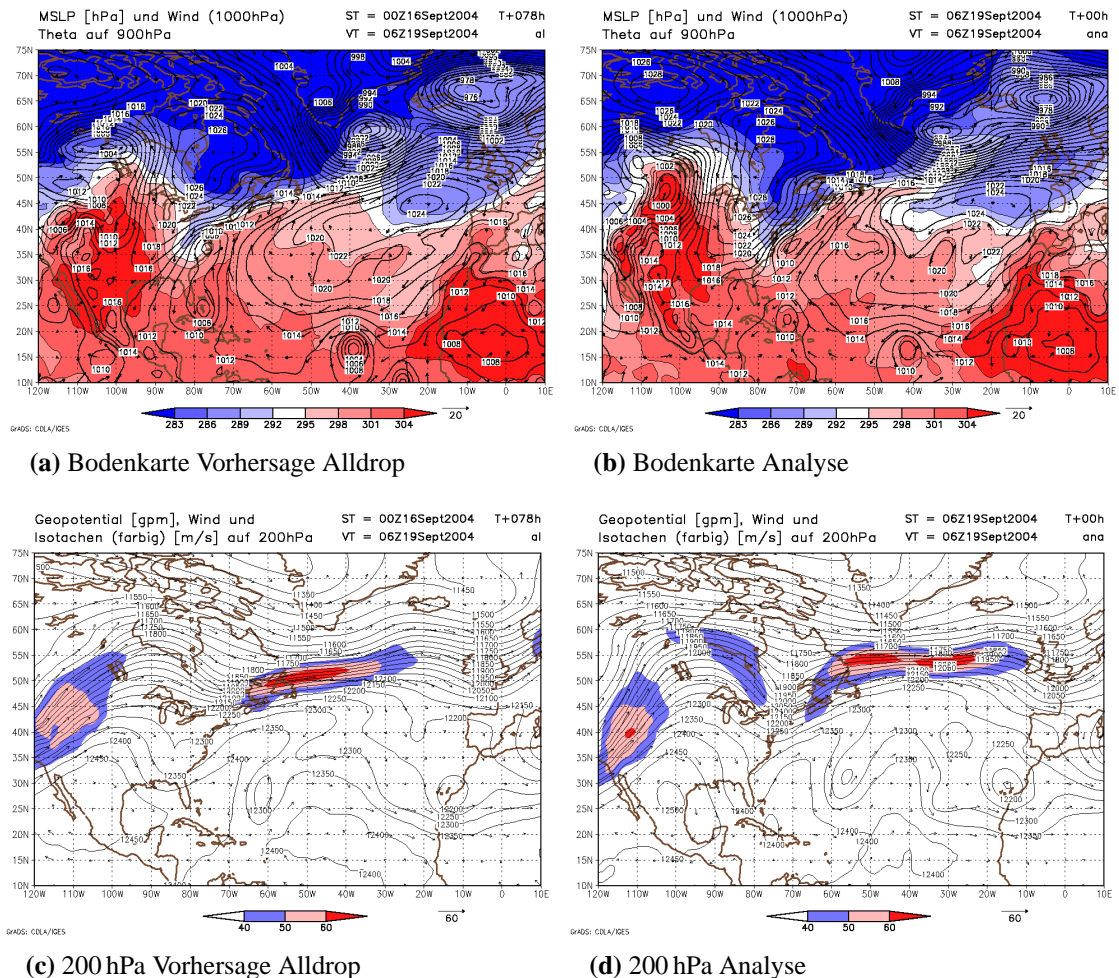
Der Vergleich mit der Analyse auf Abbildung 3.2 c macht deutlich, dass der Kern Ivans am 18.09.04 12 Uhr UTC über der mittleren Ostküste Nordamerikas liegt. Die Vorhersagen berechnen die Lage des Tiefdruckkerns westlicher landeinwärts (vgl. Abb. 5.1 a). Die Analyse (Abb. 3.2 c) weist einen ausgeprägten, meridional ausgerichteten Hochdruckrücken über Nordostamerika auf, welcher ostseitig kühlere Luft in den Süden transportiert. Die Kaltluftadvektion westlich des Hurrikans wird durch dessen zyklonale Drehung verstärkt. Damit verbunden entsteht ein stärkerer Druckgradient westlich von Ivan in der Analyse. Das Hochdruckgebiet über Nordamerika ist in den Prognosen (vgl. Abb. 5.1 a) über die Hudsonbay gegrenzt. Die Kaltluftadvektion ist schwächer ausgeprägt.



**Abbildung 5.1:** (a)  $\theta$  auf 900 hPa (farbig), MSLP (Konturintervall 4 hPa) und Windvektoren auf 1000 hPa; (b)  $\theta$  und Windvektoren auf 2 PVU, Isolinien PV-Mittel 700-850 hPa; Vorhersage All-drop vom 16.09.04 00 Uhr UTC um 60 h zum 18.09.04 12 Uhr UTC

Der Trog über Nordostamerika wird in der Vorhersage flacher bestimmt, wie der Vergleich zwischen der Analyse in Abbildung 3.2 d und der Vorhersage Alldrop in Abbildung 5.1 b zeigt. Wirbelsturm und Tropopausenvertiefung liegen in der Vorhersage weiter voneinander entfernt, was auch als Ursache für die schwächere Kaltluftadvektion westlich von Ivan in den Vorhersagen angesehen werden kann.

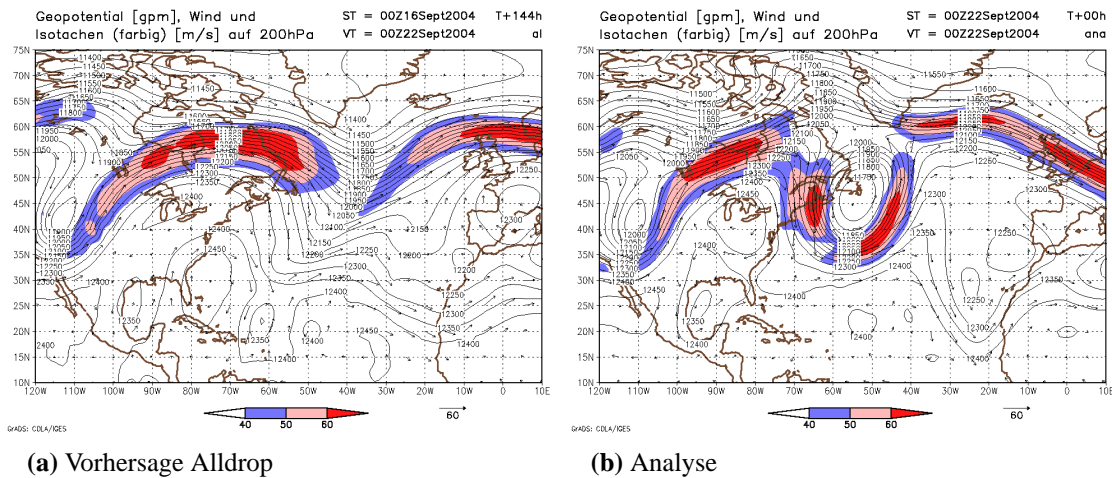
Nach weiterer Vorhersage um 18 Stunden zum 19.09.04 06 Uhr UTC hatte sich das Bodendruckfeld um Ivan in der Analyse vor der Ostküste Nordamerikas abgeflacht und gestreckt (Abb. 5.2 b). Es fand eine Deformierung und die Verbindung zu einem weiteren Tiefdruckkern in Richtung Nordost statt. Im Gegensatz dazu war der zerfallende Wirbelsturm in den Vorhersagen über North Carolina weitestgehend ortsfest geblieben (Abb. 5.2 a).



**Abbildung 5.2:** (a), (b)  $\theta$  auf 900 hPa (farbig), MSLP (Konturintervall 2 hPa) und Windvektoren auf 1000 hPa; (c), (d) geopotentielle Höhe, Windvektoren und Isotachen (farbig) auf 200 hPa; (a), (c) Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC um 78 h; (b), (d) Analyse vom 19.09.04 06 Uhr UTC

Durch die westlichere Lage des Wirbelsturmes zum zuletzt betrachteten Vorhersagezeitpunkt 18.09.04 12 Uhr UTC in den Prognosen gelangte dieser mehr in den Einfluss der Nordostströmung am Boden südöstlich des Hochdruckgebietes über Ostkanada. Der Kaltluftvorstoß westlich des Wirbelsturmes ist in der Alldrop-Vorhersage (Abb. 5.2 a) leicht stärker ausgebildet. Dieses Merkmal ähnelt der Kaltluftadvektion in der Analyse. Zwischen den beiden Vorhersagen sind nach 78 h Rechenzeit sonst nur geringe Unterschiede in der unteren Troposphäre auszumachen.

Die Unterschiede der Strömung auf der Druckfläche 200 hPa zwischen Prognose und Analyse sind in Abbildung 5.2 c, d zu sehen. Der Trog über Nordostamerika vertieft sich in der Analyse mit fortschreitender Zeit. In beiden Prognosen ist dieser Trog in höheren Breiten nur leicht ausgeprägt (Abb. 5.2 c). Durch die stärkere Isobarendrängung rückseitig



**Abbildung 5.3:** Geopotentielle Höhe, Windvektoren und Isotachen (farbig) auf 200 hPa für (a) Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC um 78 h, (b) Analyse vom 22.09.04 00 Uhr UTC

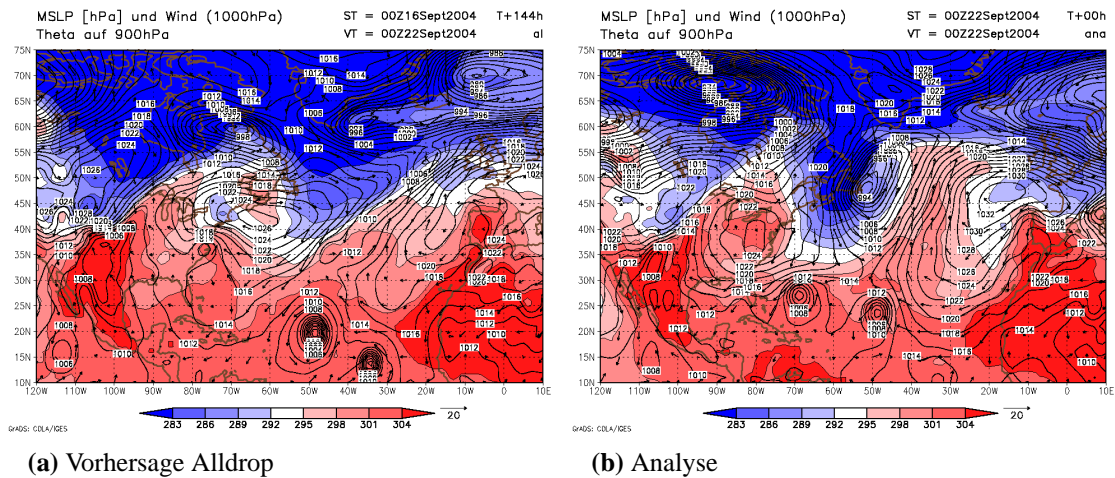
des Trog erscheint in der Analyse ein weiteres Jetmaximum nördlich der Großen Seen (Abb. 5.2 d).

Innerhalb der nächsten zwölf Stunden der beiden Prognosen verschwindet der ehemalige Wirbelsturm im Bodendruckfeld vollständig. Die Reste sind als Bereiche erhöhter PV in Bodennähe verfolgbar. Im Laufe der weiteren Vorhersage findet die Verlagerung der PV-Anomalien in Bodennähe in Südwestrichtung statt. Die explosive Bildung des Bodentiefs um die Überreste Ivans (vgl. Abb. 3.2 g, i) wird in keiner der Prognosen wiedergeben.

Auf den Höhenkarten entfernen sich Prognose und Analyse zunehmend voneinander. Durch das südliche Verweilen Ivans in den Vorhersagen kam kein Kontakt mit dem Trog über Nordostamerika zustande. Der Trog behält in beiden Prognosen eine eher flache Form mit einer in Südwestrichtung geneigten Spitze der Trogachse. Gemäß der Analyse geriet an Ivans Westflanke kühlere Luft in niedere Breiten. Der Trog verlängert sich weit nach Süden. Der unterschiedliche Verlauf der Höhenströmung nach 144 h Vorhersage zum 22.09.04 00 Uhr UTC ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Das auch schon in Kapitel 3.1 beschriebene Abschnüren des Kaltlufttropfens über dem westlichen Nordatlantik wurde in den Vorhersagen komplett verfehlt. Stromabwärts wirkt sich der unterschiedliche Strömungsverlauf auch über Europa aus. Für den 22.09.04 00 Uhr UTC sollte Europa laut den Vorhersagen unter einem Rücken liegen. Tatsächlich traf das nur auf Südwesteuropa zu, östlichere Teile waren von einem Trog erfasst (Abb. 5.3). Lediglich der Trog über dem westlichen Nordamerika wird in Vorhersagen in Vergleich zur Analyse ähnlich wiedergegeben. Die Vorhersagen untereinander weisen nur geringe Unstimmigkeiten auf.

Auch die Bodenkarten in Abbildung 5.4 zeigen erhebliche Differenzen der Vorhersage von der Analyse nach 144 h für den 22.09.04 00 Uhr UTC. In der Analyse (Abb. 5.4 b) ist östlich von Neufundland das u. a. aus den Resten Ivans entstandene Tiefdruckgebiet





**Abbildung 5.4:**  $\theta$  auf 900 hPa (farbig), MSLP (Konturen) und Windvektoren auf 1000 hPa für (a) Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC um 144 h, (b) Analyse vom 22.09.04 00 Uhr UTC

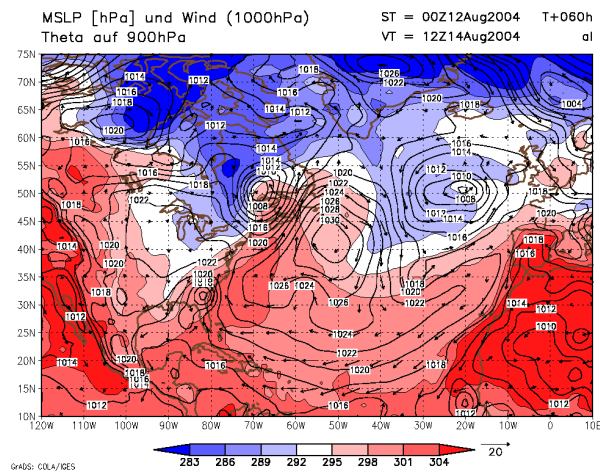
zu sehen. Dieses liegt eingebettet zwischen Hochdruckgebieten nördlich der Appalachen und westlich Europas. Die Vorhersagen bildeten zwischenzeitlich ein schwaches Tief vor der Seite des Troges aus, welches sich nach 144 h bereits wieder weitestgehend aufgefüllt hatte. Es ist in Abbildung 5.4 a noch westlich der Britischen Inseln angedeutet. Die Hochdruckgebiete beidseitig des Kaltluftvorstoßes über dem Atlantik sind in den Vorhersagen östlicher und schwächer vorzufinden als in der Analyse. Das in der Analyse westlich der europäischen Atlantikküste befindliche Hoch wurde zum Vorhersagezeitpunkt 144 h in den Prognosen über dem europäischen Festland lokalisiert.

Zusammenfassend gesehen wurde die tatsächliche Entwicklung des Wettergeschehens von den Vorhersagen größtenteils verfehlt. Im Unterschied zu den in den Analysen dargestellten Atmosphärenzuständen sind die Differenzen zwischen Alldrop und Nodrop klein.

### 5.1.2 Vorhersage Bonnie und Charley

Die Vorhersage der Zugbahn Bonnies erreichte für die Kurzfristvorhersage geringere Positionsfehler als der zehnjährige Mittelwert (Avila 2004). Mit zunehmender Prognosezeit verstärkte sich der Vorhersagefehler. Die Intensität wurde gut erfasst, sie entsprach mit Ausnahme eines hohen Fehlers nach 120 h Prognose den Durchschnittswerten. Die Zugbahn von Hurrikan Charley wurde laut Pasch et al. (2005) in der Kurzfristvorhersage gut bestimmt. In längeren Prognosen wich der vorausberechnete Kurs des Wirbelsturmes weit von der tatsächlich eingetretenen Bahn ab. Die Vorhersage der Intensität fiel schlechter als das zehnjährige Mittel aus (Pasch et al. 2005).

Die untersuchten Vorhersagen vom 12.08.04 00 Uhr UTC geben bis 60 h Rechenzeit die Position Bonnies gut wieder. Die Intensität wird von der Vorhersage Alldrop durchge-



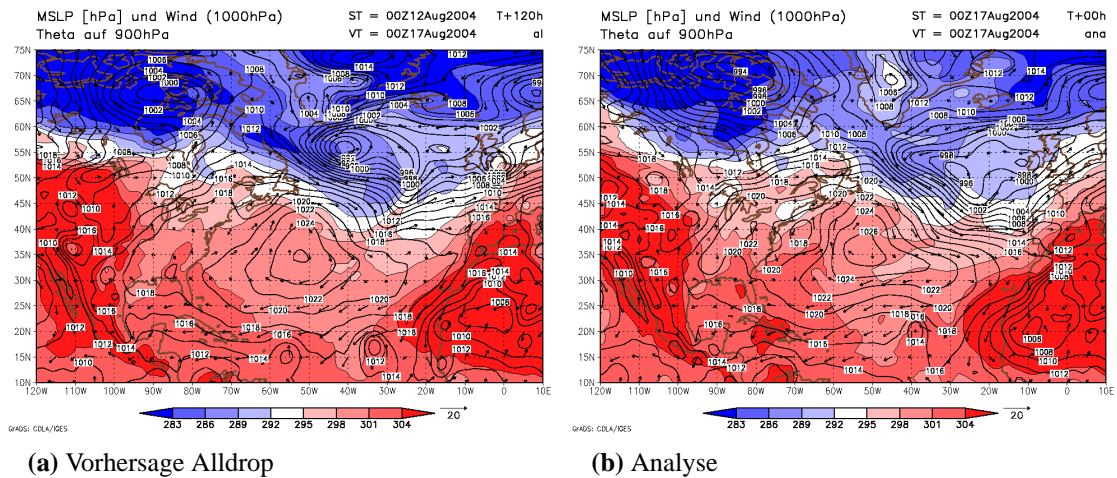
**Abbildung 5.5:**  $\theta$  auf 900 hPa (farbig), MSLP (Konturen) und Windvektoren auf 1000 hPa für Vorhersage Alldrop vom 12.08.04 00 Uhr UTC um 60 h zum 14.08.04 12 Uhr UTC

hend leicht überschätzt, während Nodrop die Stärke Bonnies im Stadium des tropischen Sturmes leicht schwächer wiedergibt als in der Analyse (ohne Abbildung). Charley wird anfänglich in beiden Prognosen schwächer dargestellt. Die Kerndrücke der Vorhersagen nähern sich dem der Analyse nach 48 h Vorhersage an (ohne Abbildung).

In Abbildung 5.5 ist die Prognose Alldrop nach 60 h Vorhersage dargestellt. Als Vergleich dient die Analyse in Abbildung 3.4 d. Die Position Charleys im Bodendruckfeld wird geringfügig westlicher als in der Analyse wiedergegeben, wobei Alldrop die Lage unwesentlich genauer berechnet als Nodrop. Dieser Umstand kann der stärkeren Repräsentation des Hochdruckgebietes über dem Atlantik in den Vorhersagen zuzuschreiben sein. Zudem sagen die Prognosen Charley mit leicht tieferem Kerndruck vorher. Die Vertiefung des Bodendruckes um die Reste Bonnies ist in beiden Vorhersagen enthalten. Die Position der Zyklonogenese über dem nordöstlichen Kanada stimmt gut mit der Analyse überein. Die Vorhersagen, und insbesondere Alldrop, stellen den Kerndruck zu tief dar (Abb. 5.5).

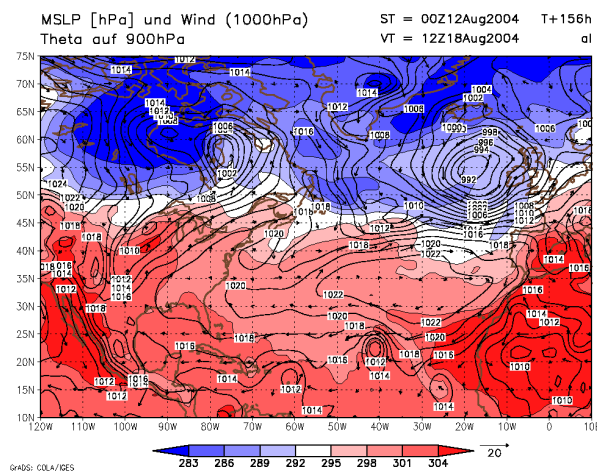
Im weiteren Verlauf der Vorhersagen wurde die Vertiefung des Bodendruckes in der aus Bonnie entstandenen Zyklone beibehalten. Die Lage des Tiefs bestimmten die Prognosen knapp nordwestlich der Position in der Analyse. Die Zugbahn und die Auflösung Charleys wurde passend repräsentiert. Starke Unterschiede zu den zeitlich zugehörigen Analysen entwickelten sich nicht. Entsprechend wiesen die Strömungen in der oberen Troposphäre ähnliche Merkmale auf (ohne Abbildungen).

Nachdem die Bodendruckmerkmale Charleys südwestlich von Neuschottland verschwommen waren, sind dort leichte Unterschiede in den Vorhersagen und der Analyse zu bemerken. Nach 120 h Vorhersagezeit (Abb. 5.6) ist um die aus Charley verfolgbare bodennahe PV-Anomalie ein flacher Bereich vertieften Druckes in der Analyse entstanden. Dieser ist in Abbildung 5.6 b vor der nordamerikanischen Küste im Atlantik zu sehen.



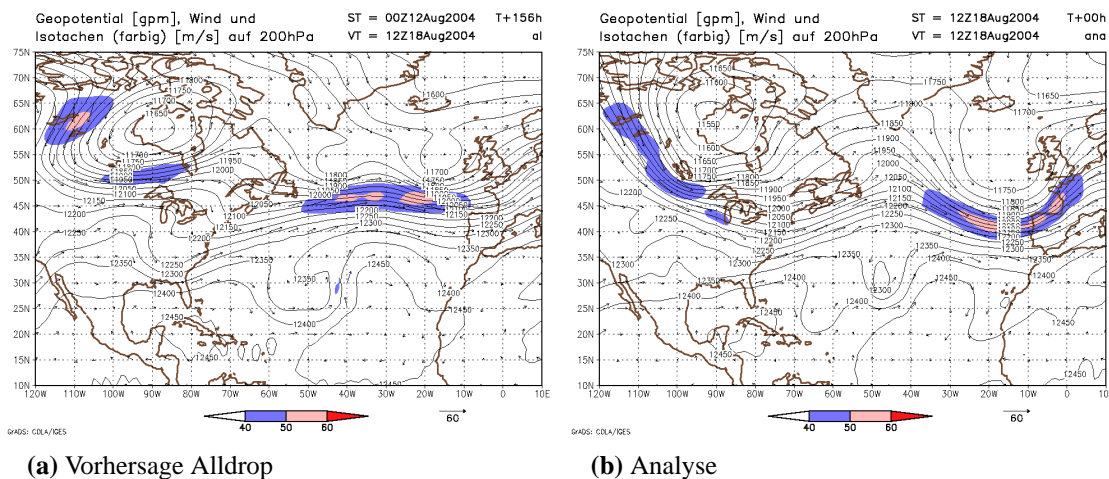
**Abbildung 5.6:**  $\theta$  auf 900 hPa (farbig), MSLP (Konturen) und Windvektoren auf 1000 hPa für (a) Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC um 120 h, (b) Analyse vom 17.08.04 00 Uhr UTC

Die Nodrop-Vorhersage bildet ebenfalls einen Bereich vertieften Druckes um die Ostküste Nordamerikas aus (ohne Abbildung). Alldrop zeigt für diesen Bereich eine ausgedehnte Region mit geringem Druckgradienten (Abb. 5.6 a). Weitere Unterschiede sind im Werdegang des Tiefdruckgebietes um die Überreste Bonnies zu verzeichnen. Beide Vorhersagen zeigen nach wie vor eine starke Zyklone südöstlich Grönlands (Abb. 5.6 a). Tatsächlich schwächte sich das System zügiger ab und verlagerte sich in südöstliche Richtung, wie in Abbildung 5.6 b zu sehen ist. Auffällig ist das bereits in Kapitel 4.2 angesprochene Bodentief, welches nur in der Alldrop-Vorhersage, für 120 h über Südengland, zu finden ist (Abb. 5.6 a).



**Abbildung 5.7:**  $\theta$  auf 900 hPa (farbig), MSLP (Konturen) und Windvektoren auf 1000 hPa für Vorhersagen Alldrop vom 12.08.04 00 Uhr UTC um 156 h zum 18.08.04 12 Uhr UTC

Im Verlauf der Vorhersagezeit zerfällt das seichte, mit Charley verbundene Tiefdruckgebiet in der Nodrop-Vorhersage auf dem Weg nach Nordosten vor Neuschottland. In der Alldrop-Vorhersage war die Druckvertiefung in diesem Bereich vollständig ausgeblieben (Abb. 5.7). Unterdessen erfolgte gemäß der Analyse die weitere Verstärkung des Tiefs, welches vermutlich Bestandteile von Charley enthält. Die voranschreitende Zyklonogenese östlich von Neufundland ist in Abbildung 3.4 k und m in Kapitel 3.2 zu sehen. Das u. a. aus Bonnie hervorgegangene Tief bewegt sich in beiden Vorhersagen nach 156 h langsamer auf Europa zu als in der Analyse. Die Abbildungen 5.7 und 3.4 k zeigen das Bodentief in unterschiedlicher Entfernung westlich der Britischen Inseln. Alldrop liefert gegenüber Nodrop mit der leicht nach Osten versetzten Zyklone eine bessere Vorhersage (Abb. 5.7). Die Kerndrucke liegen bei etwa gleicher Intensität. Während die Zyklone in der Analyse mit der Ausbildung von Fronten als entwicklungsfähig angesehen werden kann (Abb. 3.4 k), liegen die Tiefdruckgebiete in den Vorhersagen vollständig über Gebieten kühler Luft, so dass mit dem Auffüllen gerechnet werden muss.



**Abbildung 5.8:** Geopotentielle Höhe, Windvektoren und Isotachen (farbig) auf 200 hPa für (a) Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC um 156 h, (b) Analyse vom 18.08.04 12 Uhr UTC

Die Höhenkarten weisen eine weitestgehend ausgeglichene Entwicklung auf. Erst nach 156 h Vorhersage machen sich Abweichungen in Strömung und Gradienten bemerkbar. Übereinstimmend ist auf den Karten der Abbildung 5.8 der Trog über Westeuropa zu sehen, obwohl er leicht unterschiedlich positioniert und geformt dargestellt wird. Die Analyse (Abb. 5.8 b) zeigt den Trog mit der im Vergleich stärksten Krümmung und am weitesten östlich gelegen. Die Nodrop-Vorhersage liegt mit leicht ausgeprägten Trögen und Rücken näher an der Analyse als Alldrop (ohne Abbildung). Die operationelle Vorhersage stellt wie Strömung fast zonal dar (Abb. 5.8 a).

Die am 12.08.2004 00 Uhr UTC gestartete Mittelfristprognose berechnet die großräumige Strömung der Realität ähnlich voraus. Form und Ort großskaliger Strukturen

stimmen weitestgehend überein. Im Detail sind in Bodennähe nicht alle Entwicklungen erfasst worden. Die in der Alldrop-Vorhersage vorherbestimmten Ereignisse liegen teilweise weiter von der Analyse entfernt als in der Vorhersage ohne zusätzliche Informationen aus den Wirbelstürmen der laufenden Saison.

## 5.2 Bestimmung des Vorhersagegüte

Nach augenscheinlicher Gegenüberstellung soll nun ein sachlicher Vergleich der Vorhersagen herangezogen werden, welcher Aufschluss darüber geben soll, inwieweit die Dropsondenmessungen zur Reduzierung des Vorhersagefehlers beitragen. Dazu wurde die Gleichung (7) aus Szunyogh et al. (2000) für die hier vorliegenden Verhältnisse angepasst. Auf einen Gitterpunkt angewandt, kann für jede Modellgröße und jeden Vorhersagezeitschritt mittels

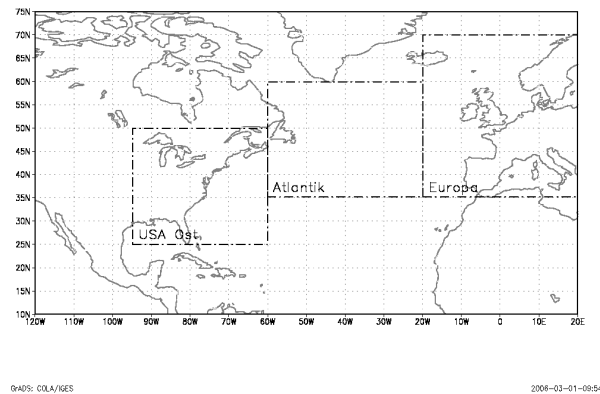
$$\mathcal{F} = |f_{no} - f_{ana}| - |f_{al} - f_{ana}| \quad (5.1)$$

die Verbesserung der Alldrop-Vorhersage gegenüber der Nodrop-Vorhersage ermittelt werden. Die Größe  $f$  kann durch jede Variable des Modellgitters ersetzt werden. Dabei bezeichnen die Indizes  $al$  die Vorhersage Alldrop,  $no$  die Vorhersage Nodrop und  $ana$  die Analysevariable. Die Gleichung drückt aus, dass  $\mathcal{F}$  positiv ausfällt, sobald die in Alldrop berechnete Größe näher an der Analyse liegt als der in Nodrop bestimmte Wert. Fällt  $\mathcal{F}$  in den negativen Bereich, so stellt die Alldrop-Vorhersage eine Verschlechterung gegenüber der Nodrop-Prognose dar. Wird  $\mathcal{F}$  über ein Gebiet aufsummiert und durch die Anzahl der eingeschlossenen Gitterpunkte  $n$  geteilt, so ergibt sich die durchschnittliche Reduzierung des Vorhersagefehlers durch Alldrop für den betreffenden Abschnitt:

$$\mathcal{F}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathcal{F} \quad (5.2)$$

Zur genaueren Betrachtung wurde die für den Verlauf des Wettergeschehens der Vorhersageperiode relevante Region in drei Bereiche eingeteilt. Abbildung 5.9 zeigt die Unterteilung in die Gebiete *USA Ost* ( $95^\circ$ – $60^\circ$  W,  $25^\circ$ – $50^\circ$  N), *Atlantik* ( $60^\circ$ – $20^\circ$  W,  $35^\circ$ – $60^\circ$  N) und *Europa* ( $20^\circ$  W– $20^\circ$  O,  $35^\circ$ – $70^\circ$  N).

Für das Gebiet *USA Ost* wird für die Kurzfristvorhersage zwischen 24 und 72 h die Erfassung des Zerfalls und der außertropischen Umwandlung der Wirbelstürme betrachtet. Über dem Atlantik findet anschließend die Ausbreitung und Verlagerung der mit den Wirbelstürmen zusammenhängenden Wettersysteme und die von ihnen möglicherweise induzierte Entwicklung stromabwärts statt. Der Bereich *Atlantik* schließt Neufundland mit ein, da außertropische Umwandlungen oft in dieser Region stattfinden. Als nördliche Grenze des Bereiches *Atlantik* wurde  $60^\circ$  N festgelegt, um Einflüsse des grönländischen



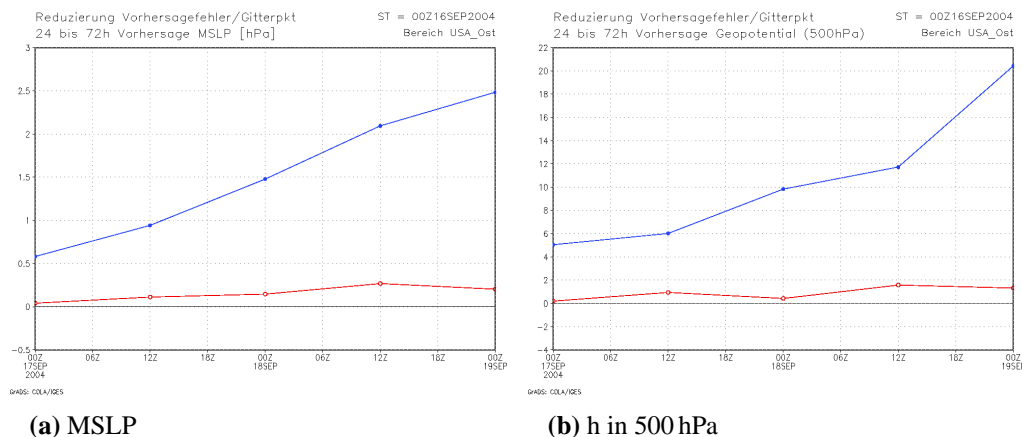
**Abbildung 5.9:** Aufteilung der Bereiche für die objektive Bewertung

Festlandes möglichst auszuschließen. Für *Europa* soll untersucht werden, wann und wie sich die zusätzlich assimilierten Daten in Alldrop auswirken.

### 5.2.1 Vorhersage Ivan

#### Bereich USA Ost

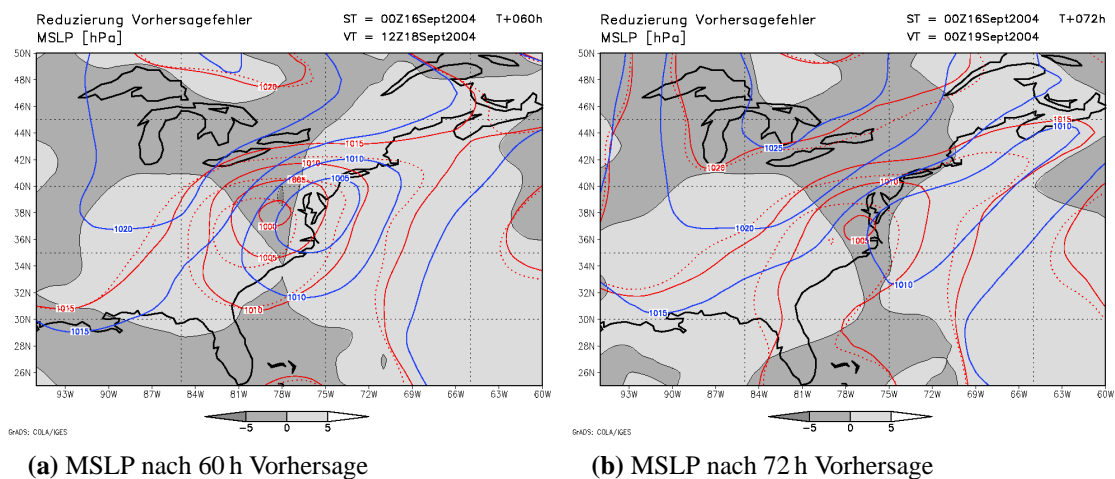
Für die Kurzfristvorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC bis zu 72 h im Bereich *USA Ost* erzielt Alldrop durchgehend eine der Analyse geringfügig näherliegende Vorhersage als Nodrop. Die Verminderung des Vorhersagefehlers zeigt der roten Graph anhand positiver Werte in Abbildung 5.10.



**Abbildung 5.10:** Reduzierung des Vorhersagefehlers  $\mathcal{F}_n$  durch Alldrop (rot); gemittelte Abweichung Alldrop von Analyse (blau) im Gebiet *USA Ost*, Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC nach 24 bis 72 h für (a) MSLP [hPa] und (b) Geopotentielle Höhe [gpm] in 500 hPa

Gleichzeitig entfernen sich die Alldrop-Vorhersagewerte von der Analyse, wie auf Grund des unberechenbaren Verhaltens der Atmosphäre erwartet wird (blauer Graph in Abb. 5.10). Obwohl sich die Differenz des MSLP der Alldrop-Vorhersage zum Analysewert bis auf 2,5 hPa nach 72 h Rechnung erhöht, steigt die Reduzierung des Vorhersagefehlers nur auf unbedeutende Werte bis zu 0,3 hPa (Abb. 5.10 a). Für das Geopotential auf 500 hPa ist ebenfalls eine geringe Vorhersagefehlerreduzierung durch Alldrop zu verzeichnen, wie in Abbildung 5.10 b zu sehen ist.

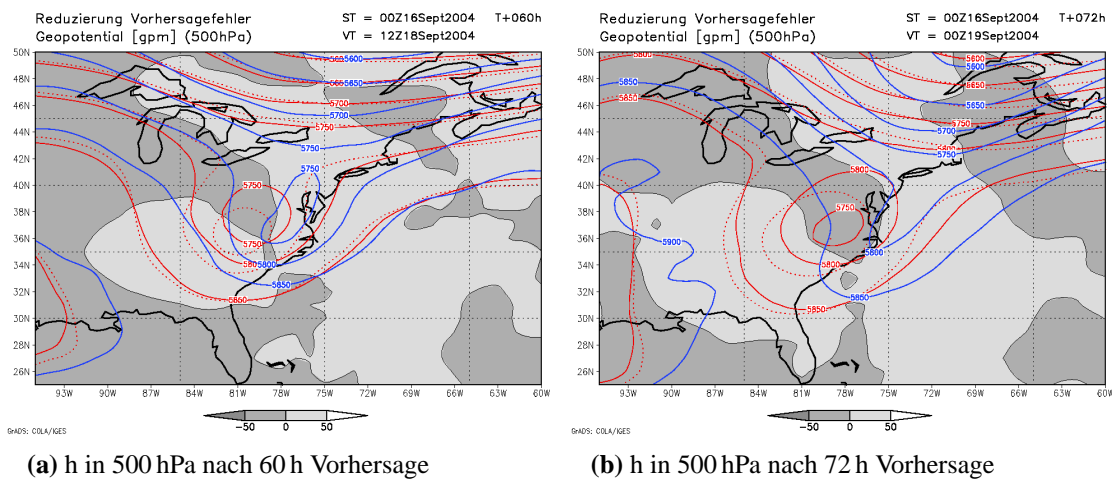
Die Ursache der Verbesserung der Vorhersage in Alldrop zu den anfänglichen Vorhersageterminen liegt in der Vertiefung des Bodendruckes von Ivan gegenüber Nodrop (ohne Abbildung). In Abbildung 5.11 ist die Reduzierung des Vorhersagefehlers durch Alldrop in positiven Werten an hellem Grau zu erkennen. In dunkel schattierten Gebieten erfolgte eine Zunahme des Vorhersagefehlers durch Alldrop. Da die Auffüllung des Tiefdruckwirbels nachfolgend schneller voranschritt als erwartet, lag der Kerndruck Ivans über dem von Alldrop bestimmten. Die Messdaten aus den Wirbelstürmen tragen in diesem Fall zur Erhöhung des Vorhersagefehlers im Zyklonenkern bei. Außer in Unterschieden im Wirbelsturmzentrum machen sich die unterschiedlichen Anfangsbedingungen der Vorhersagen auch im Isobarenverlauf bemerkbar. Nach 60 h Vorhersage (Abb. 5.11 a) sind die Positionsunterschiede des Bereiches tiefsten Druckes des ehemaligen Wirbelsturmes in der Analyse (blaue Konturen) gegenüber den beiden Vorhersagen (rote Konturen) zu sehen. Besonders der Isobarenverlauf östlich sowie westlich des ehemaligen Wirbelsturmes wird von den Alldrop-Daten besser wiedergegeben. Verringerungen des Prognosefehlers durch Alldrop ergeben sich somit ausschließlich durch bessere Positionswiedergabe.



**Abbildung 5.11:** Reduzierung des Vorhersagefehlers  $\mathcal{F}$  des MSLP (schattiert) und Konturen des MSLP [hPa] Vorhersage Alldrop (rot durchgezogen), Vorhersage Nodrop (rot gepunktet) und Analyse (blau) im Bereich USA Ost für Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC zum (a) 18.09.04 12 Uhr UTC und (b) 19.09.04 00 Uhr UTC

Nach 72 h Prognose beginnen die beiden Vorhersagen des Bodendruckes stärker von der Analyse abzuweichen. Der Bereich tiefen Druckes aus den ehemaligen Wirbelsturm hat sich deformiert. Er befindet sich in lang gestreckter Gestalt vor der amerikanischen Küste über dem Atlantik, was an den blauen Konturen in Abb. 5.11 b zu sehen ist. Obwohl der Kerndruck des außertropischen Tiefdruckgebietes um Ex-Ivan in der Alldrop-Prognose zu tief bestimmt wird, ist der Aufläufer des tiefen Druckes nach Nordosten vor die Ostküste Nordamerikas realitätsnäher nachgebildet als durch Nodrop. Auch die Struktur des Hochdruckrückens über Nordostamerika westlich des ehemaligen Hurrikans sagt die Alldrop-Vorhersage etwas genauer voraus (Abb. 5.11 b).

Bis zur Vorhersage von 36 h wurde bei den Geopotentialwerten in 500 hPa die Intensität im Zyklonenkern durch die Messdaten aus den Wirbelstürmen korrigiert (ohne Abbildung). Danach bilden zunehmend Verlagerungsunterschiede die Ursache für Vorhersageabweichungen. Obgleich beide Vorhersagen das meridionale Ausrichten der Trogachse verfehlen, liegen dennoch die Isohypsen der Alldrop-Vorhersage größtenteils näher an denen der Analyse, wie in Abbildung 5.12 a nach 60 h Vorhersage erkennbar ist. Auffällig ist die Reduzierung des Vorhersagefehlers durch Alldrop stromauf- und abwärts von Ex-Ivan (Abb. 5.12 a).



**Abbildung 5.12:**  $\mathcal{F}$  (schattiert) und Konturen der geopotentiellen Höhe [gpm] auf 500 hPa Vorhersage Alldrop (rot durchgezogen), Vorhersage Nodrop (rot gepunktet) und Analyse (blau) im Bereich USA Ost für Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC (a) zum 18.09.04 12 Uhr UTC und (b) 19.09.04 00 Uhr UTC

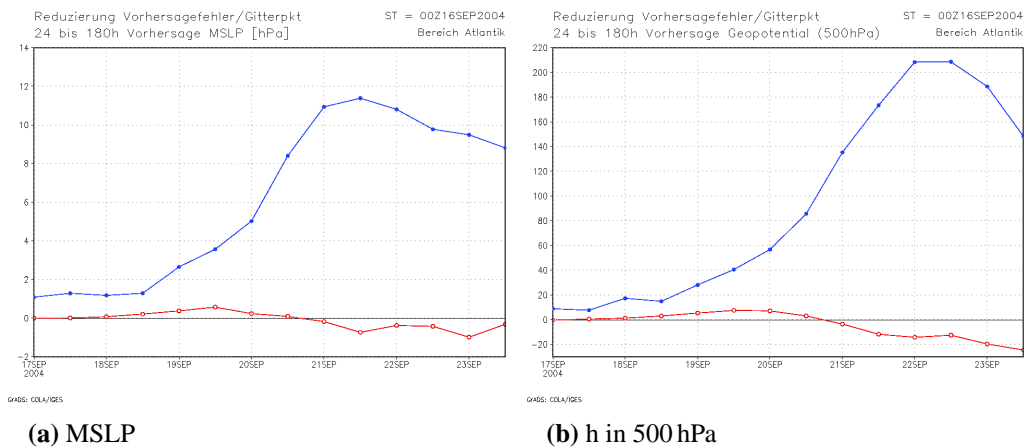
In der Vorhersage nach 72 h zum 19.09.04 00 Uhr UTC ist, wie auch im Bodendruck, die Verstärkung des Geopotentials im zerfallenden Wirbelsturm durch die Vorhersagen deutlich zu sehen (Abb. 5.12 b). Der Bereich tiefsten Geopotentials wird in den Prognosen beinahe ortsfest bestimmt, während sich dieser in der Realität abschwächt und nach



Osten driftet. Alldrop berechnet das niedrigere Geopotential, was in der Region zur Verminderung der Vorhersagequalität führt (Abb. 5.12 b). Östlich und westlich der Reste Ivans gibt Alldrop die Isohypsenführung treffender wieder.

### Bereich Atlantik

Im östlich angrenzenden Bereich *Atlantik* ist in der Kurzfristvorhersage keine Veränderung der Prognosegüte durch Alldrop zu verzeichnen (Abb. 5.13). Nach 72 h Vorhersagezeit bewirken die Messungen aus Wirbelstürmen für beide Größen vorübergehend die Erhöhung der Vorhersagequalität.

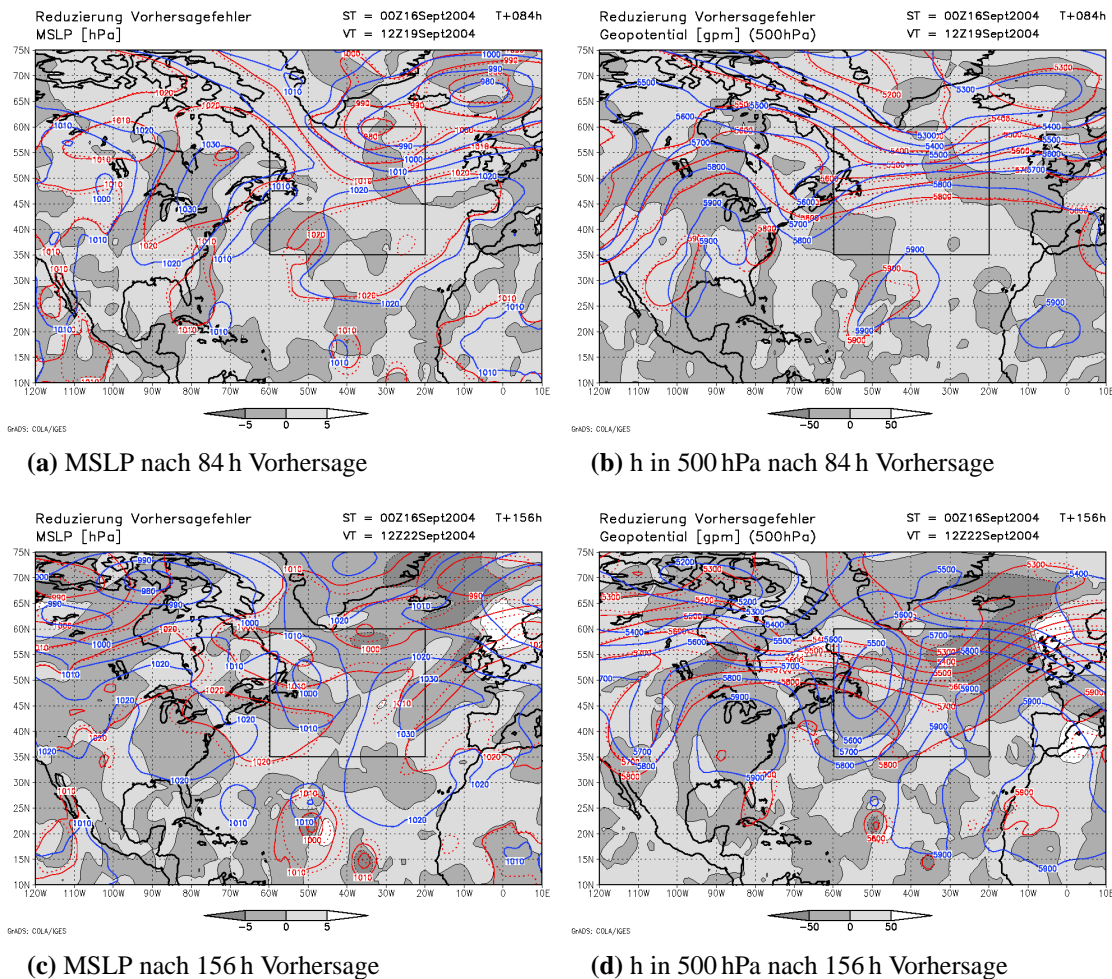


**Abbildung 5.13:**  $\mathcal{F}_n$  (rot); gemittelte Abweichung Alldrop zu Analyse (blau) im Gebiet *Atlantik*, Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC um 24 bis 180 h für (a) MSLP [hPa] und (b) geopotentielle Höhe [gpm] in 500 hPa

Zu diesem Vorhersagezeitpunkt gelangen erste Ausläufer des aus Ivan hervorgegangenen außertropischen Tiefdruckgebietes in den Ausschnitt des Bereiches *Atlantik*. In Abbildung 5.14 a ist südöstlich Neufundlands die mit der außertropischen Umwandlung Ivans verbundene Streckung der Isobaren des MSLP in der Analyse zu sehen. Die Tiefdruckrinne über Island und die Hochdruckgebiete über dem Atlantik und Ostkanada bilden weitere markante Druckgebilde. Obwohl keine der beiden Vorhersagen die Entwicklungen genau wiedergibt, liegt dennoch der durch Alldrop bestimmte Druckgradient im Bereich *Atlantik* größtenteils dichter an der Analyse (Abb. 5.14 a).

In der Struktur des Geopotentials auf 500 hPa streckt sich der Trog, vermutlich beeinflusst von der Wechselwirkung mit dem ehemaligen Hurrikan, über die nordamerikanische Ostküste nach Süden aus. Diese Entwicklung ist an den blauen Linien der Analyse in Abbildung 5.14 b zu sehen. Die Vorhersagen verfehlen diese Änderungen der großräumigen Strömung. Die Alldrop-Vorhersage (Abb. 5.14 b) gibt den Isohypsenverlauf im zentralen Teil des Abschnittes *Atlantik* unwesentlich genauer wieder als Nodrop.

Das könnte hier ebenfalls auf das Zusammenspiel des in Alldrop etwas nördlicher berechneten zerfallenden Hurrikans mit dem Trog zurückzuführen sein, welcher in Abbildung 5.14 b als geschlossene Isohypse um North Carolina dargestellt ist. Südlich der Umrandung des Bereiches *Atlantik* macht sich die Repräsentation des Hochdruckrückens über dem Atlantik bemerkbar, dessen Lage von Alldrop besser erkannt wird.



**Abbildung 5.14:**  $\mathcal{F}$  (schattiert) und Konturen Vorhersage Alldrop (rot durchgezogen), Vorhersage Nodrop (rot gepunktet) und Analyse (blau) von (a), (c) MSLP [hPa]; (b), (d) geopotentieller Höhe [gpm] auf 500 hPa für Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC zum (a), (b) 19.09.04 12 Uhr UTC und (c), (d) 22.09.04 12 Uhr UTC; Markierung des Bereiches *Atlantik*

Mit voranschreitender Vorhersagezeit ab 108 h beginnt die Alldrop-Prognose, die Analyse weiter zu verfehlen als Nodrop. Sowohl der Graph des Bodendruckes als auch der des Geopotentials auf 500 hPa in Abbildung 5.13 fallen in den negativen Bereich.

Abbildung 5.14 c, d zeigt die Veränderung der Vorhersagegüte durch Alldrop zum Zeitschritt 156 h. Im Bodendruckfeld (Abb. 5.14 c) hatte sich bis zum 22.09.04 12 Uhr UTC ein abgeschlossenes Bodentief um die Reste Ivans östlich von Neufundland entwickelt. Die Vorhersagen bestimmen statt dessen die Hochdruckzone über der Ostküste Nordamerikas nördlicher. Im Gegensatz zur Nodrop-Vorhersage liegt das Hochdruckgebiet bei Alldrop etwas weiter im Norden, was zur Erhöhung des Vorhersagefehlers beiträgt. Das an den blauen Konturen der Analyse in Abbildung 5.14 c erkennbare Tief über Nordkanada wurde in den Vorhersagen weiter nach Osten transportiert. In der Alldrop-Vorhersage ragt dieses Tiefdruckgebiet in den Bereich erniedrigten Druckes um den ehemaligen Wirbelsturm hinein und führt in der nordwestlichen Region des Bereiches *Atlantik* zu Vorhersagefehlerreduzierung. Ein weiteres dominantes System des Bereiches *Atlantik* ist das nur in den Vorhersagen vorhandene Tiefdruckgebiet östlich der Südspitze Grönlands, welches seit dem vorher betrachteten Zeitschritt 84 h stationär geblieben ist. Entsprechend der Analyse entfernte sich der Ausläufer des Islandtiefs in Richtung Osten. Da Alldrop den vermeintlich tiefsten Kerndruck bestimmt, sinkt die Vorhersagequalität in diesem Gebiet.

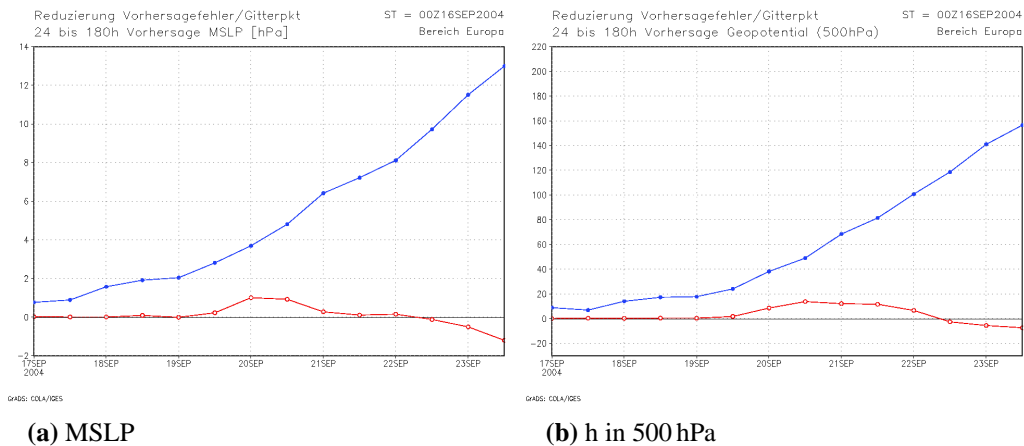
Starke Abweichungen der Prognosen von der großräumigen Strömung der Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC wurden bereits in Kapitel 5.1 festgestellt. Das zentrale Merkmal des Druckniveaus 500 hPa in Abbildung 5.14 d bildet das abgeschnürte Höhentief der blau gedruckten Isohypsenkonturen der Analyse. Beide Vorhersagen zeigen unterdessen einen Trog östlich des Kaltlufttropfens. Da Alldrop den Trog flacher darstellt als Nodrop, resultiert das wiederum in einer Verminderung der Vorhersagegüte.

Auffällig ist die Verringerung des Abstandes der Alldrop-Prognose von der Analyse nach 132 h Vorhersagezeit im Bodendruckfeld und nach 144 h im Geopotential auf 500 hPa, zu sehen an den blauen Graphen in Abbildung 5.13. Nach einem Vorhersageintervall von 6 Tagen verbessert sich die Prognose, indem sie sich der Analyse annähert. Dieser Verlauf wird darauf zurückzuführen sein, dass sich die voneinander abweichenden synoptischen Systeme von Prognosen und Analyse abbauen. Das Bodentief aus Resten des Hurrikans Ivan erreichte sein Reifestadium mit 985 hPa am 21.09.04 12 Uhr UTC nach 132 h Vorhersagezeit. Ähnlich verhielt sich der abgeschnürte Trog, dessen Geopotential sich entsprechend dem darunter befindlichen Bodendruck auffüllt.

### *Bereich Europa*

Die Prognose Alldrop beginnt nach 72 h Vorhersagezeit, Veränderungen gegenüber Nodrop zu bewirken (Abb. 5.15). Zwischen 84 h und 132 h zeigt sich im Bodendruckfeld die Verminderung des Vorhersagefehlers durch Alldrop in einem im positiven Bereich verlaufenden roten Graphen.

Im Vergleich mit Abbildung 5.13, welche die Vorhersagefehlerreduzierung für die Region *Atlantik* zeigt, fällt die zeitliche Verlagerung des Maximums der Prognoseverbesserung auf. Der positive bzw. negative Einfluss der Messwerte aus den Wirbelstürmen



(a) MSLP

(b) h in 500 hPa

**Abbildung 5.15:**  $\mathcal{F}_n$  (rot); gemittelte Abweichung Alldrop zu Analyse (blau) im Gebiet *Europa*, Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC um 24 bis 180 h für (a) MSLP [hPa] und (b) geopotentielle Höhe [gpm] in 500 hPa

scheint sich also mit der Strömung ostwärts zu verlagern. Während die Vorhersagefehlerreduzierung durch Alldrop in den vorher betrachteten Bereichen zwischenzeitlich 5–10% betrug, werden hier in den Zeitschritten 96 und 120 h bis zu 20% Fehlerverminderung angezeigt.

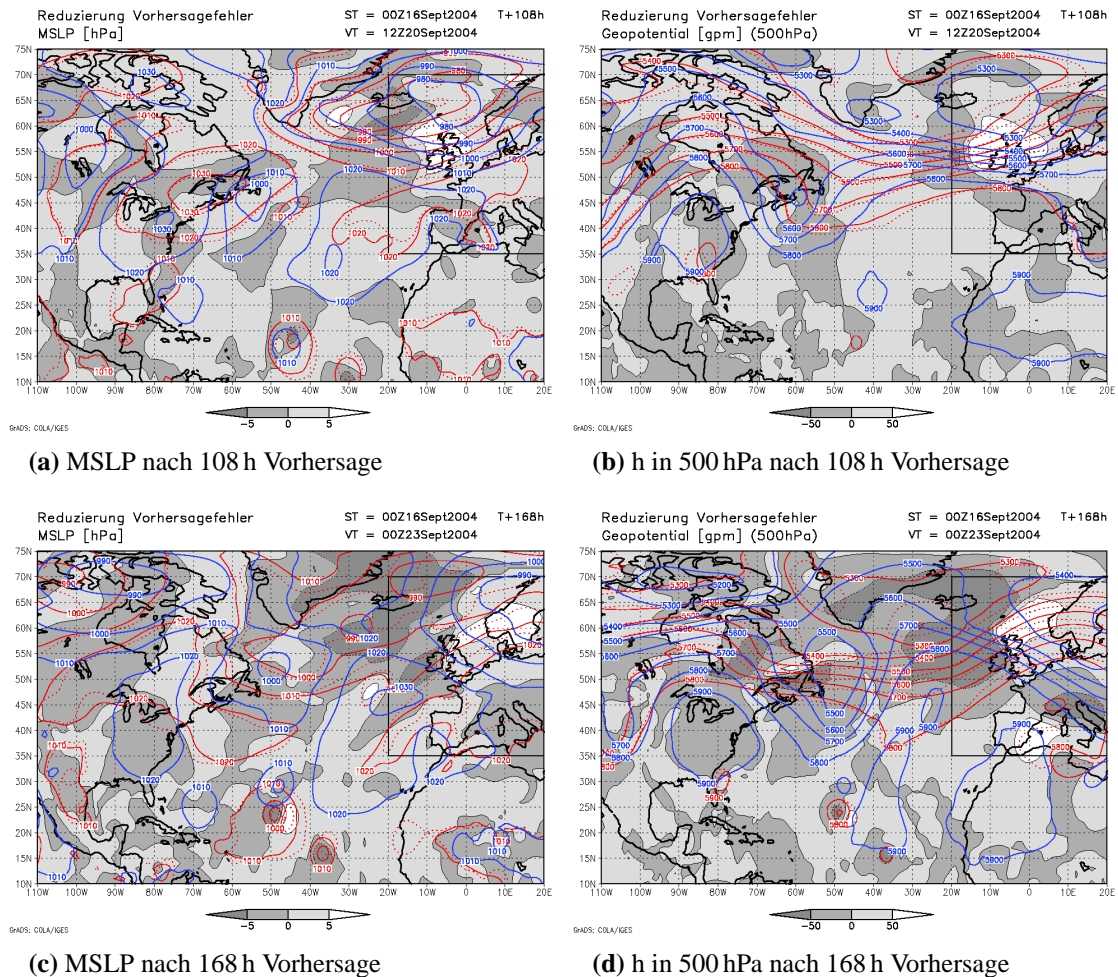
Die prägenden Merkmale zum 20.09.04 12 Uhr UTC nach 108 h Vorhersage sind das Islandtief im Norden und ein Ausläufer des Azorenhochs über Südwesteuropa (Abb. 5.16 a, b). Der damit verbundene starke Druckgradient bringt Windgeschwindigkeiten bis zu 18 m/s über der Nordsee mit sich. In der Analyse befindet sich der Kern des Islandtiefs östlich der Insel. In beiden Vorhersagen bildet sich eine etwa zonal verlaufende Tiefdruckrinne über Island (Abb. 5.16 a).

Die Alldrop-Vorhersage erzeugt gegenüber Nodrop geringfügig tieferen Druck im östlichen Abschnitt der Tiefdruckrinne. Dieser Bereich fällt mit dem Kern des Islandtiefs der Analyse zusammen und verursacht damit die Vorhersagefehlerreduzierung (Abb. 5.16 a). Zudem weitet sich der Hochdruckrücken über Westeuropa weniger weit nach Osten aus und liegt damit näher an der Analyse.

Die Vorhersage Alldrop für das Geopotential in 500 hPa erzielt im Vergleich zu Nodrop im Zeitraum 84 bis 144 h eine Verbesserung (Abb. 5.16 b). In dieser Zeitspanne bildete sich über der Zyklonogenese um die Reste Ivans ein lang nach Süden ausgestreckter Trog vor der nordamerikanischen Ostküste, welcher sich in der Folge abschnürte. Wie an den blauen Konturen der Analyse in Abbildung 5.16 b zum Vorhersagezeitpunkt 108 h zu erkennen ist, hat sich die Strömung stromabwärts des Troges nahezu zonal ausgerichtet. Zudem senkt sich ein abgeschlossener Bereich des Geopotentials über dem Islandtief ab, wie an der blauen Isohypse um Island in Abbildung 5.16 b zu sehen ist. Alldrop ist wiederum in der Lage, den Bereich des tiefsten Geopotentials über dem Islandtief dem der

Analyse geringfügig anzugleichen. Das Gebiet der stärksten Vorhersagefehlerreduzierung liegt damit gleich wie im Bodendruckfeld über den nördlichen Britischen Inseln.

Sowohl am Boden als auch in der mittleren Troposphäre reduziert sich nach 156 h Vorhersagezeit zum 22.09.04 12 Uhr UTC die durch Alldrop erhoffte Verbesserung der Prognose für den Bereich *Europa* (Abb. 5.15).



**Abbildung 5.16:**  $\mathcal{F}$  (schattiert) und Konturen Vorhersage Alldrop (rot durchgezogen), Vorhersage Nodrop (rot gepunktet) und Analyse (blau) von (a), (c) MSLP [hPa]; (b), (d) geopotentieller Höhe [gpm] auf 500 hPa für Vorhersage vom 16.09.04 00 Uhr UTC zum (a), (b) 20.09.04 12 Uhr UTC und (c), (d) 23.09.04 00 Uhr UTC; Markierung des Bereiches *Europa*

Wie an den farbigen Konturen des Geopotentials zum Vorhersagezeitpunkt 168 h in Abbildung 5.16 d sehen ist, verfehlen die Vorhersagen gänzlich die tatsächliche Entwicklung. Tröge und Rücken von Vorhersagen und der Analyse liegen um  $180^\circ$  phasenverschoben übereinander. Die beiden Vorhersagen, zu erkennen an den roten durchgezogenen

nen Konturen für Alldrop und den roten gepunkteten Konturen für Nodrop in Abbildung 5.16 b, unterscheiden sich dagegen im Verlauf des Geopotentials nur geringfügig.

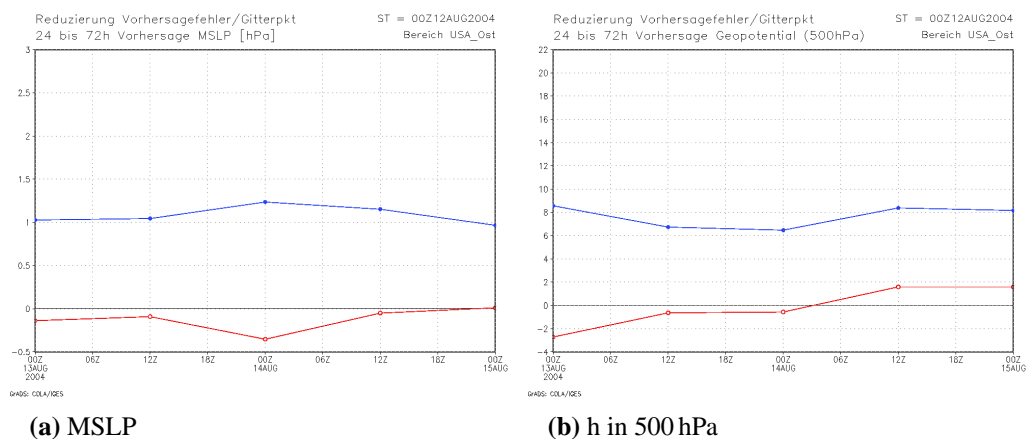
Im Bodendruckfeld (Abb. 5.16 c) hat sich entsprechend der Analyse das vormalige Islandtief nach Osten verlagert und liegt nun mit seinem Kern über Skandinavien. Beide Vorhersagen berechnen das Islandtief seit dem vorher betrachteten Zeitpunkt 108 h ortsfest in der Gegend um Island. Die hauptsächliche Ursache der Steigerung des Vorhersagefehlers für *Europa* liegt im Beibehalten des tiefen Druckes des Islandtiefs in der Alldrop-Vorhersage, während es sich in der Nodrop-Vorhersage auffüllt.

Die Unterschiede in der Repräsentation der Strömung und des Bodendruckfeldes zwischen Alldrop und Nodrop sind vernachlässigbar gering gegenüber dem generellen Vorhersagefehler zur Analyse. Die Auswirkungen der Alldrop-Vorhersage auf die Reduzierung des Vorhersagefehlers können kaum auf die Dropsondenmessungen um die Wirbelstürme zurückgeführt werden.

## 5.2.2 Vorhersage Bonnie und Charley

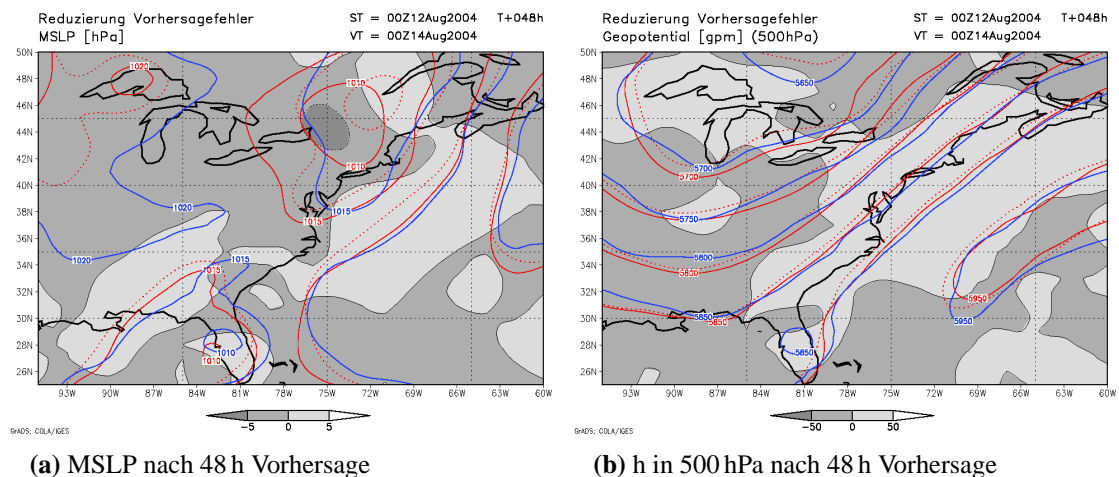
### Bereich USA Ost

In den ersten Prognosezeitschritten vom 12.08.04 00 Uhr UTC an vertieft die Alldrop-Vorhersage den Kerndruck von Hurrikan Charley gegenüber der Prognose Nodrop. Die Vorhersage mit den Messungen aus Wirbelstürmen gleicht sich somit der Analyse an. Da sich Charley zum Zeitpunkt des Vorhersagestartes noch südlich der Insel Kuba befand, gelangt er erst mit dem Zeitschritt 36 h der Vorhersage in den hier betrachteten Ausschnitt *USA Ost*.



**Abbildung 5.17:** Reduzierung des Vorhersagefehlers pro Gitterpunkt durch Alldrop  $\mathcal{F}_n$  (rot), Abweichung Alldrop zu Analyse pro Gitterpunkt (blau) im Gebiet *USA Ost*, Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC nach 24 bis 72 h für (a) MSLP [hPa] und (b) geopotentielle Höhe [gpm] in 500 hPa

Der sich stromabwärts von Charley bewegende tropische Sturm Bonnie wird von der Alldrop-Vorhersage unterschätzt, indem der Bodendruck im Wirbelsturm zu hoch bestimmt wird. Um Bonnie verursacht die Alldrop-Prognose die Abnahme der Vorhersagequalität. Abbildung 5.17 zeigt, dass Alldrop bis zu 72 h Prognosezeit den Vorhersagefehler für den Bereich *USA Ost* erhöht. Der maximale durchschnittliche Wert ist mit 0,3 hPa im Bodendruckfeld jedoch sehr klein. Die Vorhersage Alldrop für die mittlere Troposphäre nähert sich nach erster Qualitätsreduzierung ab dem Zeitpunkt 60 h mehr der Analyse an als Nodrop (Abb. 5.17 a). Alldrop-Vorhersage weist zur Analyse über die betrachtete Vorhersagezeit annähernd den gleichen Abstand auf. Abbildung 5.18 zeigt die synoptische Situation im Bereich *USA Ost* nach 48 h Prognose. Mit voranschreitender Vorhersagezeit machen sich zunehmend Verlagerungsunterschiede bemerkbar. Hurrikan Charley ist zum 14.08.04 00 Uhr UTC auf Abbildung 5.18 a über der Halbinsel Florida zu sehen. Alldrop erfasst die Position und Stärke Charleys zu diesem Zeitpunkt im Vergleich zu Nodrop besser. Gemäß den best track Daten lag Charley zu diesem Zeitpunkt innerhalb der Koordinaten  $81^{\circ}\text{W}$ ,  $28^{\circ}\text{N}$  mit einem Kerndruck von 970 hPa. Der tropische Sturm Bonnie befindet sich bereits im Zerfallsstadium östlich der Großen Seen.



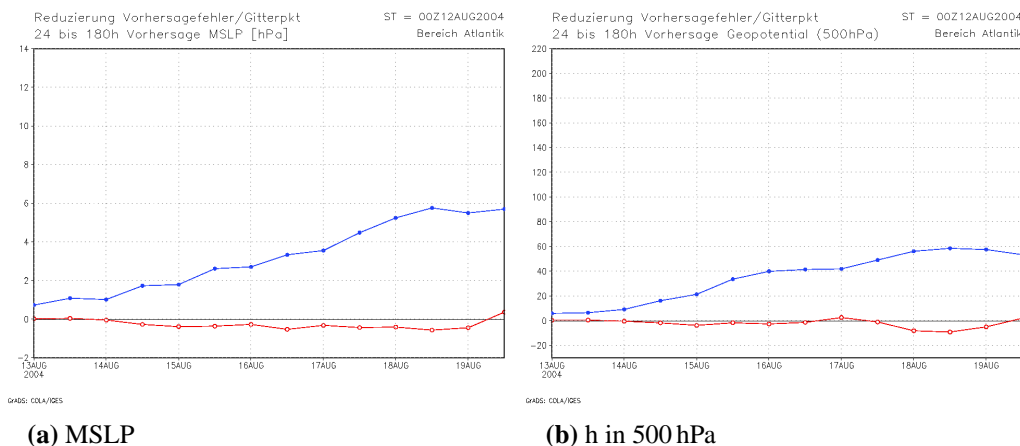
**Abbildung 5.18:**  $\mathcal{F}$  (schattiert) und Konturen Vorhersage Alldrop (rot durchgezogen), Vorhersage Nodrop (rot gepunktet) und Analyse (blau) von (a) MSLP [hPa], (b) geopotentieller Höhe [gpm] auf 500 hPa im Bereich *USA Ost* für Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC zum 14.08.04 00 Uhr UTC

Bonnie verlagert sich mit zügigerer Geschwindigkeit in Richtung Nordost als es die Alldrop-Vorhersage erwartet. Nodrop bestimmt die Zugbahn genauer voraus. Ein weiterer Mangel der Alldrop-Prognose ist die Stärke Bonnies, welche jetzt überbestimmt wird. Gemäß der Analyse füllt sich der ehemalige tropische Sturm rascher auf, welchen Umstand die Nodrop-Vorhersage geringfügig besser vorausbestimmt.

Auf der Karte der mittleren Troposphäre (Abb. 5.18 b) sind nur leichte Unstimmigkeiten zwischen den Vorhersagen und der Analyse in dem Verlauf der Isohypsen zu bemerken. Die Struktur des Troges wird in Alldrop scheinbar durch die der Analyse angenäherten Positionen beider Zyklonen besser wiedergegeben. Um Hurrikan Charley hat sich in der Analyse eine abgeschlossene Isohypse gebildet. Alldrop berechnet über dem Wirbelsturm eine Ausbuchtung der Linie gleichen Geopotentials um diesen Bereich.

### Bereich Atlantik

Die beiden Vorhersagen beginnen ab dem Vorhersagezeitpunkt 48 h zum 14.08.04 00 Uhr UTC sich im Bereich *Atlantik* voneinander zu entfernen. Alldrop trägt über die gesamte Prognosezeit nicht zur Verminderung des Vorhersagefehlers bei. In Abbildung 5.19 verlaufen die roten Graphen der Reduktion der Vorhersagefehlers für MSLP und Geopotential auf 500 hPa beinahe die gesamte Zeit im negativen Bereich. Es ist dabei noch anzumerken, dass sich die Vorhersagegüte des Bodendruckes mit durchschnittlich 0,5 hPa nur unmerklich reduziert. Vergleichbar geringe Werte treten im Verlauf der Vorhersagefehlerverminderung des Geopotentials auf.

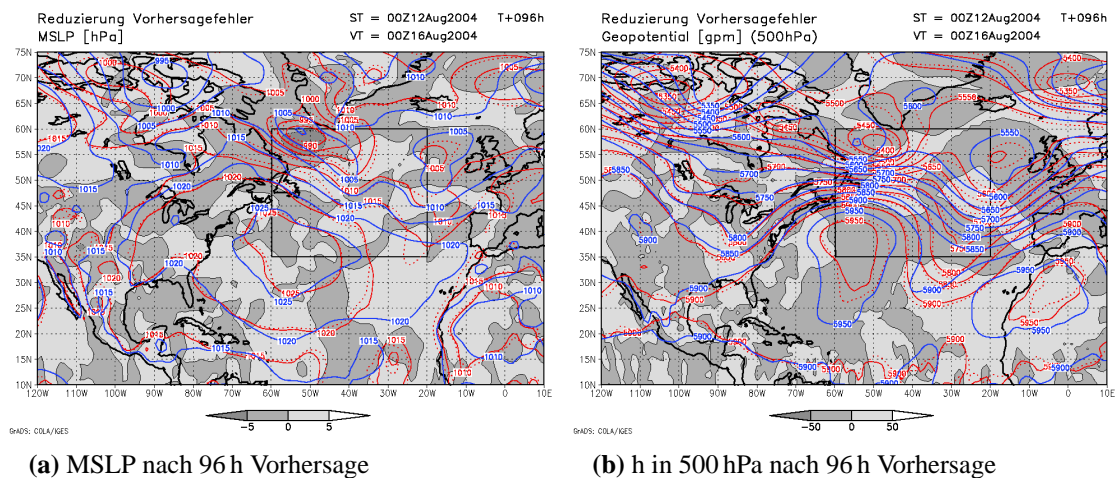


**Abbildung 5.19:** Reduzierung des Vorhersagefehlers pro Gitterpunkt durch Alldrop  $\mathcal{F}_n$  (rot), Abweichung Alldrop zu Analyse pro Gitterpunkt (blau) im Gebiet *Atlantik*, Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC nach 24 bis 180 h für (a) MSLP [hPa] und (b) geopotentielle Höhe [gpm] in 500 hPa

Nach anfänglicher Unterschätzung Bonnies in der Alldrop-Vorhersage wurde die nachfolgende Zyklongenese aus Bonnies Überresten zu stark eingeschätzt. Das in beiden Vorhersagen berechnete markante Bodentief, welches sich zum Zeitpunkt 16.08.04 00 Uhr UTC über der Labradorsee befand, ist in der Realität nicht in dieser ausgeprägten Form entstanden. Alldrop bestimmt den im Vergleich tiefsten Bodendruck für die sich aus Bonnie entwickelte Zyklone. Abbildung 5.20 a zeigt den damit verbundenen Vorhersagefehler im Bereich *Atlantik*, welcher an der dunkelgrauen Schattierung zu erkennen ist.



Die Tendenz zur Überrepräsentierung ist auch in oberen Troposphärenschichten zu sehen. Alldrop berechnet die niedrigste geopotentielle Höhe auf 500 hPa (Abb. 5.20 b) über der Labradorsee. Der Trog über dem westlichen Nordatlantik, welcher in der Analyse mit einem starken Geopotentialgradienten nördlich und einer flacher abfallenden Trogspitze gekennzeichnet ist, wird in den Vorhersagen mit gleichmäßigem Gefälle nach Süden vorausgesagt. In Verbindung mit dem durch Alldrop zu flach berechneten Höhenrücken über dem Atlantik führt das zu einem weiteren Verfehlen des Wettergeschehens.

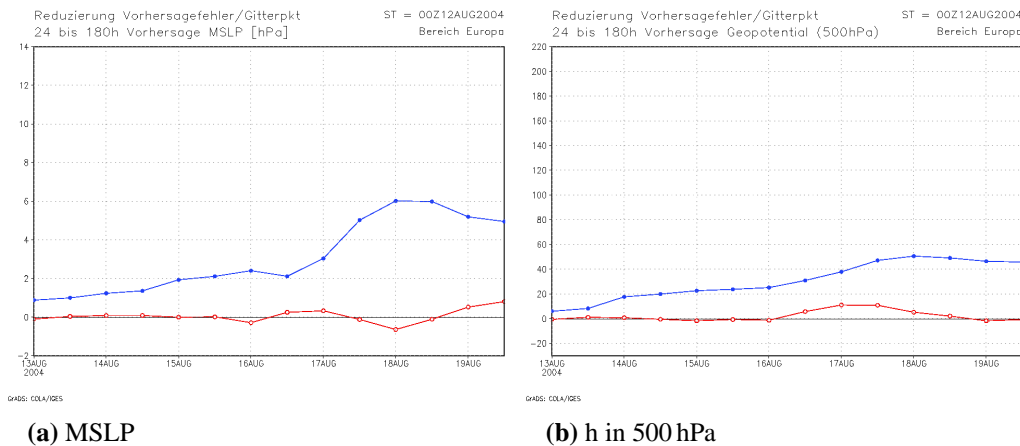


**Abbildung 5.20:**  $\mathcal{F}$  (schattiert) und Konturen Vorhersage Alldrop (rot durchgezogen), Vorhersage Nodrop (rot gepunktet) und Analyse (blau) von (a) MSLP [hPa], (b) geopotentieller Höhe [gpm] auf 500 hPa für Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC zum 16.08.04 00 Uhr UTC, Markierung des Bereiches *Atlantik*

### Bereich Europa

Differenzen zwischen den mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen gestarteten Vorhersagen machen sich über *Europa* ab der Vorhersagezeit 96 h bemerkbar. Die Zeitkurve der Vorhersagefehlerverringering für den MSLP in Abbildung 5.21 a schwingt ab diesem Prognosestermin zwischen positiven und negativen Werten. Für das Geopotential wirkt sich die Alldrop-Vorhersage vorwiegend fehlerreduzierend aus. Abbildung 5.21 b zeigt den Verlauf den roten Graphen über die Vorhersagezeit 108 bis 156 h im schwach Positiven, was mit einer durchschnittlichen Qualitätsverbesserung der Prognose im Bereich *Europa* verbunden ist. In oben untersuchten Bereichen wiesen die Verläufe der Vorhersagefehlerverminderung von Geopotential auf 500 hPa und Bodendruck oft ähnliche Merkmale auf. In diesem Fall stimmt die Entwicklung kaum überein.

Das Absinken der Vorhersagequalität im Bodendruckfeld zur Prognose um 96 h war bereits aus Abbildung 5.20 a ersichtlich. Der Ursprung der Vorhersageabweichung der

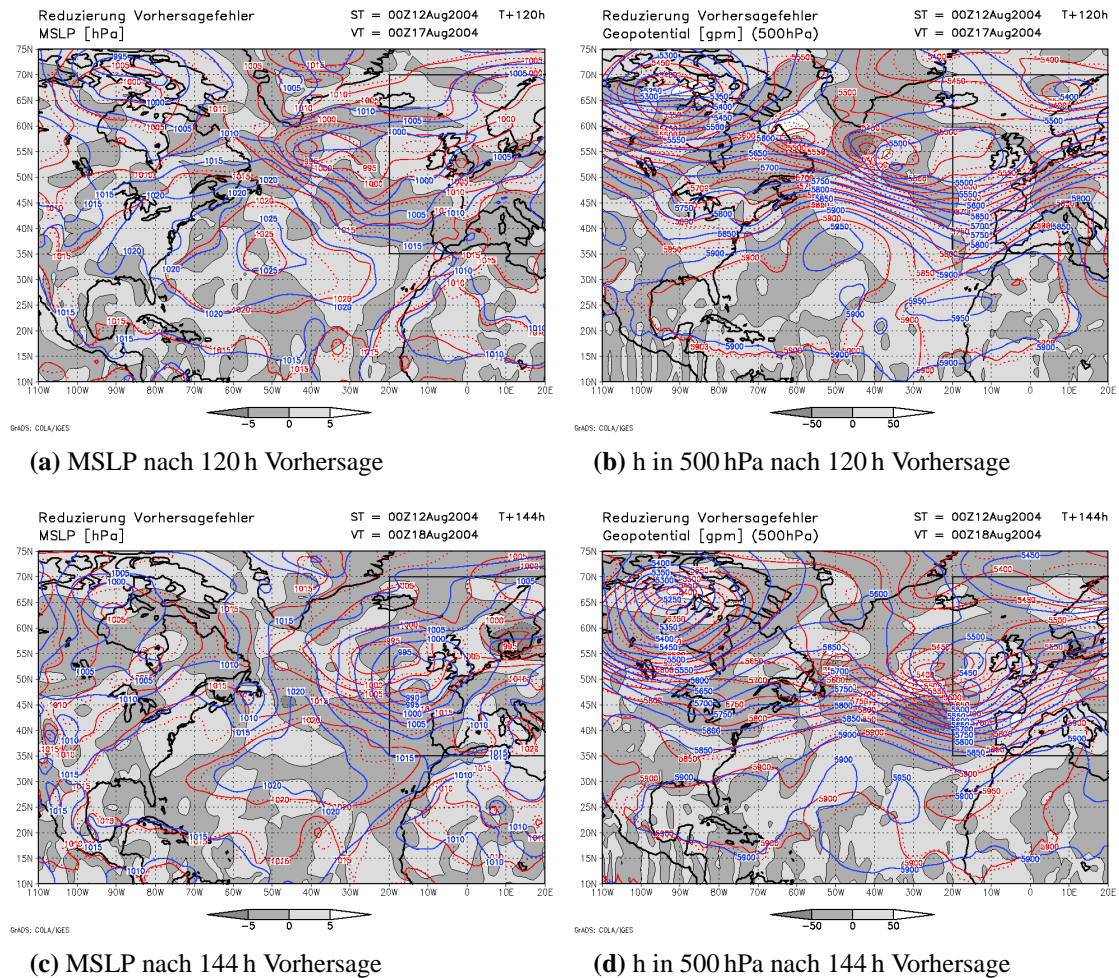


**Abbildung 5.21:** Reduzierung des Vorhersagefehlers pro Gitterpunkt durch Alldrop  $\mathcal{F}_n$  (rot), Abweichung Alldrop zu Analyse pro Gitterpunkt (blau) im Gebiet *Europa*, Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC nach 24 bis 180 h für (a) MSLP [hPa] und (b) geopotentielle Höhe [gpm] in 500 hPa

Alldrop-Prognose gegenüber Nodrop nach 96 h (Abb. 5.20 a) liegt im zu flach vorherbestimmten Tiefdruckgebiet westlich der Britischen Inseln und in der Überschätzung des Hochdruckgebietes über den Weststalpen. Die Vorhersage Nodrop ist geringfügig besser der Analyse angepasst.

Verminderungen des Vorhersagefehlers durch Alldrop zeigen sich zum Prognosezeitpunkt 120 h (Abb. 5.22 a). Erste Ausläufer des mit Bonnie verbundenen Tiefdrucksystems erreichen gemäß der Analyse *Europa* (Abb. 3.4 g, i). In den Vorhersagen um 120 h befindet sich das aus Bonnies Resten entstandene Bodentief südöstlich der Südspitze Grönlands (rote Konturen in Abbildung 5.22 a). Alldrop berechnet eine vom Tief um Bonnie nach Osten verlaufende Bodendruckrinne, welche eher der Struktur des nach Osten verlagerten Tiefs der Analyse entspricht. Zudem wird das nordwestlich von Skandinavien liegende Tief von Alldrop mehr der Analyse angeglichen wiedergegeben. Die bessere Repräsentation der beiden angesprochenen Tiefdruckgebiete wirkt sich zu dem Vorhersagezeitpunkt stärker auf die Steigerung der Vorgersagequalität aus als das falsche, nur in Alldrop erscheinende Tief über den Britischen Inseln (Abb. 5.22 a).

Die auf den Vorhersagefehler verringend wirkenden Merkmale sind auch in höheren Troposphärenschichten zu bemerken. Im Verlauf des Geopotentials auf 500 hPa verursacht die vom Tiefdruckgebiet um Bonnie ausgehende Zunge niedrigen Druckes in Ostrichtung die Reduzierung des Vorgersagefehlers (Abb. 5.22 b). Auch die in Alldrop berechneten Isohypsen um das Tiefdruckgebiet vor Skandinavien liegen näher an denen der Analyse als die der Nodrop-Vorhersage.



**Abbildung 5.22:**  $\mathcal{F}$  (schattiert) und Konturen Vorhersage Alldrop (rot durchgezogen), Vorhersage Nodrop (rot gepunktet) und Analyse (blau) von (a), (c) MSLP [hPa]; (b), (d) geopotentieller Höhe [gpm] auf 500 hPa für Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC zum (a), (b) 17.08.04 00 Uhr UTC und (c), (d) 18.08.04 00 Uhr UTC; Markierung des Bereiches *Europa*

Nach weiterer Vorhersagezeit um 24 h zum 18.08.04 00 Uhr UTC weisen die roten Graphen der Vorhersageverminderung durch Alldrop in Abbildung 5.21 unterschiedliche Vorzeichen auf. Der Prognosefehler des Bodendruckes des Bereiches *Europa* wird durch Alldrop erhöht, aber für die geopotentielle Höhe in 500 hPa reduziert.

Entscheidenden Einfluss auf den Mittelwert des Vorhersagefehlers des MSLP hat zu diesem Zeitpunkt das nur in der Alldrop-Vorhersage erscheinende Tiefdruckgebiet über Südkandinavien (Abb. 5.22 c). Das auf Bonnie zurückverfolgbare Tief hat sich zum 18.08.04 00 Uhr UTC in allen drei Modellläufen in den Bereich *Europa* verlagert, es befindet sich nun auf unterschiedlicher Breite westlich der Britischen Inseln. Obgleich beide

Vorhersagen das Tief nördlicher und schwächer bestimmen als es in der Analyse zu sehen ist, liegt der Isobarenverlauf östlich davon mit dem in Alldrop entstandenen Tief näher an der Analyse.

Die Verminderung des Vorhersagefehlers im Geopotential auf 500 hPa nach 144 h resultiert aus der besser übereinstimmenden Strömung der Alldrop-Vorhersage südöstlich des Tiefdruckbereiches westlich der Britischen Inseln mit der Analyse (Abb. 5.22 d). Im Vergleich zu Nodrop befindet sich der Trog in Alldrop geringfügig weiter im Osten und sorgt somit für eine genauere Vorhersage. Das Geopotential über dem Bodentief vor den Britischen Inseln wird in der Prognose Alldrop etwas weiter nach Osten ausgedehnt berechnet, was ebenfalls zur Vorhersagefehlerverminderung führt.

In der Vorhersage im Zusammenhang mit den tropischen Wirbelstürmen Charley und Bonnie erzielt die Alldrop-Vorhersage nur vorübergehende unerhebliche Verringerungen des Vorhersagefehlers für das Gebiet *Europa*. Trotz geringerer Abweichung der Vorhersagen von der Analyse als im Fall Ivan führten die zusätzlichen Messungen aus den Wirbelstürmen in der Kurzfristvorhersage und nachfolgend über dem *Atlantik* zu keinem Erfolg. Die Qualität der Vorhersage vom 12.08.04 00 Uhr UTC wird vorwiegend geringfügig vermindert. Der Betrag der Änderung des Vorhersagefehlers durch Alldrop ist in beiden ausgewerteten Fällen von vergleichbarer Größe.

### 5.3 Mittelung über mehrere Vorhersagen

Um eine allgemeine Aussage über den Einfluss der Dropsondenmessungen um tropische Wirbelstürme auf den Vorhersagefehler machen zu können, wurden insgesamt zehn Prognosen aus den drei Hurrikansaisons 2003, 2004 und 2005 zusammengefasst. Die Startzeiten der Prognosen sind den Tabellen im Anhang zu entnehmen. Das durchschnittliche Verhalten wurde aus dem arithmetischen Mittelwerten bestimmt. Jede der Vorhersagen erfolgte unmittelbar nach einem Beobachtungsflug der NOAA um einen Wirbelsturm. Die einzelnen statistischen Werte für die zehn verschiedenen Prognosen sind im Anhang tabellarisch aufgeschlüsselt. Die Vorhersagen konnten aus Gründen des Datenbestandes nur bis zur Vorhersagezeit von 132 h ausgewertet werden.

Abbildung 5.23 zeigt die Graphen der gemittelten Vorhersagefehlerverminderung  $\mathcal{F}_n$  in Alldrop für den MSLP und das Geopotential in 500 hPa, ausgewertet für die Bereiche *USA Ost*, *Atlantik* und *Europa*. Zu beachten ist, dass für die Gebiete *Atlantik* und *Europa* größere Abschnitte der Ordinate gewählt wurden.

#### *Bereich USA Ost*

Im Gebiet *USA Ost* ist in Abbildung 5.23 bis zu 72 h Vorhersagezeit keine beachtenswerte Auswirkung auf die Vorhersagequalität zu bemerken. der Vorhersagequalität durch Alldrop. Im Mittelwert erfasst die Vorhersage Nodrop ohne die zusätzlichen Informationen aus Wirbelstürmen für die ersten Prognosezeitpunkte die Entwicklung etwas

besser. In (Aberson 2003) wurde erwähnt, dass für die kurzfristige Vorhersage von Intensität und Zugbahn im Durchschnitt Verringerungen des Vorhersagefehlers durch Alldrop erzielt wurden. Obwohl der MSLP die Intensität des Hurrikans repräsentiert, liegen verschiedene Verfahren zur Auswertung vor. In dieser Arbeit wurde über einen ausgedehnten Bereich gemittelt. Die ausschließliche Betrachtung des MSLP der Wirbelstürme kann sich in diesem Fall mit dem der Umgebung ausgleichen. Die maximale Verbesserung der Alldrop-Prognose an einem einzelnen Gitterpunkt wird nach 72 h im Bereich *USA Ost* mit 8 hPa registriert. Dagegen beträgt der stärkste durch Alldrop verursachte Fehler 14 hPa (Tabelle A.11 im Anhang).

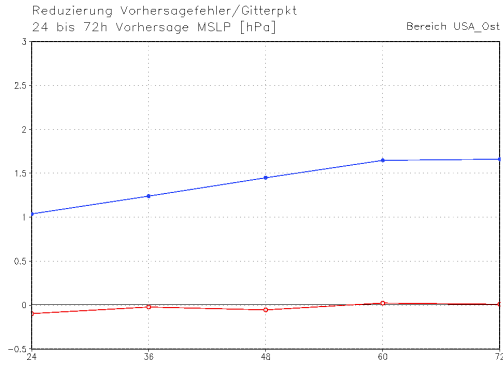
#### *Bereich Atlantik*

Im Gegensatz zu den durchschnittlichen Werten des Abstandes von Alldrop zur Analyse liegen die Vorhersagen mit und ohne Informationen aus Wirbelstürmen sehr nah beieinander (Abb. 5.23 c, d). Im Bereich *USA Ost* erreichte der Vorhersagefehler zum Zeitpunkt 60 h eine vorübergehende Verminderung durch die Alldrop-Vorhersage. Die erzielten Vorhersagefehlerreduzierungen von 1 gpm und 0,2 hPa sind als unerheblich anzusehen. Wie in den Tabellen A.9 und A.10 anhand der minimalen und maximalen Vorhersagefehleränderungen durch Alldrop abzulesen ist, gleichen sich Reduzierungen und Erhöhungen durch die Mittelwertbildung aus. Die gemittelte Vorhersagefehlerreduzierung  $\mathcal{F}_n$  für den Bodendruck steigt in den einzelnen Fällen bis maximal 1,5 hPa an.

#### *Bereich Europa*

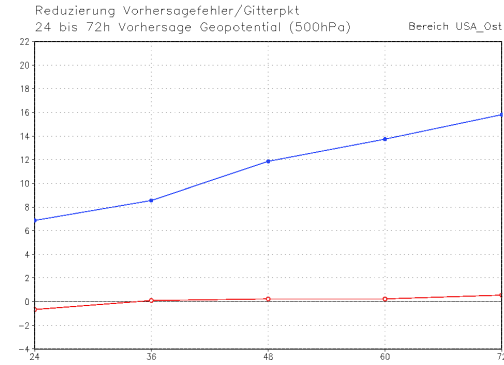
Für *Europa* steigen die Graphen der Vorhersagefehlerverminderung für MSLP und Geopotential ab dem Zeitschritt 84 h vergleichsweise stark an (Abb. 5.23 e, f). Nach ausgeglichener Verlauf der Kurven bis zu diesem Zeitpunkt ist die Verlagerung des bereits in den vorhergehenden Abschnitten aufgetretenen Maximums mit der Strömung zu vermuten. Die Werte der Verbesserung der Prognosequalität steigen bis auf 0,7 hPa und 5 gpm an. Im Mittelmaß über mehrere Wirbelstürme wird der Fehler der Vorhersage für *Europa* nach 96 h Prognose, möglicherweise nur vorübergehend, reduziert.

In allen Bereichen sind an einzelnen Gitterpunkten sowohl Reduzierungen als auch Verstärkungen des Vorhersagefehlers im Bodendruck bis knapp in den zweistelligen Bereich zu beobachten (Tabellen im Anhang). Die Veränderungen der geopotentiellen Höhe erreichen vereinzelt dreistellige Werte beider Vorzeichen. Im Mittel gleichen sich die Vorhersagefehlerveränderungen durch die zusätzlichen Messungen weitestgehend aus. Eine Auffällige Verminderung des Vorhersagefehlers durch die gezielten Beobachtungen um Hurrikan Ophelia wird in der Prognose vom 18.09.05 00 Uhr UTC in allen Bereichen erzielt (Tabellen im Anhang). Anhand der Mittelung über zehn ausgewertete Fälle kann noch keine endgültige Aussage zu den Auswirkungen der Dropsondenmessungen getroffen werden.



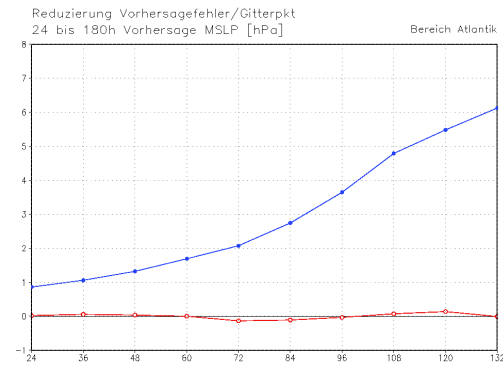
©456: ECL/A/DES

**(a) MSLP Bereich USA Ost**



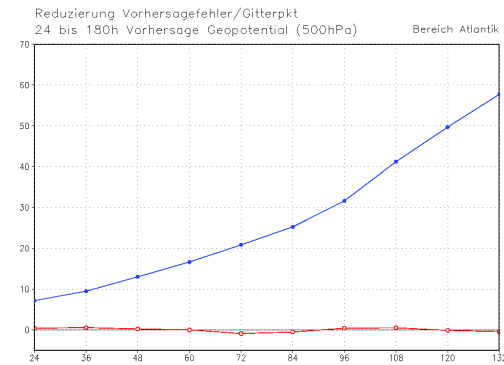
©456: ECL/A/DES

**(b) h in 500 hPa Bereich USA Ost**



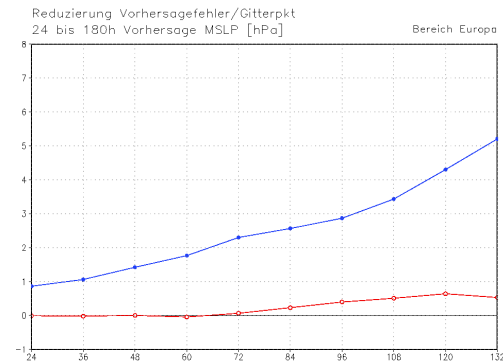
©456: ECL/A/DES

**(c) MSLP Bereich Atlantik**



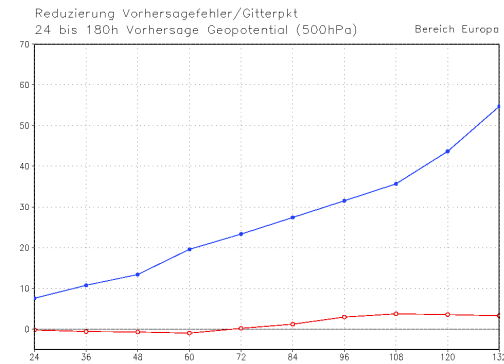
©456: ECL/A/DES

**(d) h in 500 hPa Bereich Atlantik**



©456: ECL/A/DES

**(e) MSLP Bereich Europa**



©456: ECL/A/DES

**(f) h in 500 hPa Bereich Europa**

**Abbildung 5.23:**  $\mathcal{F}_n$  gemittelt über zehn Vorhersagen

# Kapitel 6

## Zusammenfassung

Sobald ein Hurrikan amerikanische Landgebiete gefährden könnte, werden Dropsondenmessungen im Bereich des Wirbelsturmes durchgeführt. Diese zusätzlichen Informationen fließen zur Verbesserung der Kurzfristvorhersage in die Anfangsbedingungen der numerischen Rechenmodelle ein. Die Erhöhung der Vorhersagequalität, wo und mit welcher Intensität ein Wirbelsturm auf Land trifft, erfordert intensive Forschungsarbeit.

Weitere Herausforderungen bestehen in Vorhersagen, welche eine Wechselwirkung ehemals tropischer Wirbelstürme mit den Wettersystemen mittlerer Breiten enthalten. Oft wird dabei die tatsächliche Entwicklung verfehlt. Mit dieser Arbeit wurde erstmalig untersucht, welchen Einfluss Dropsondenmessungen in der Umgebung von Wirbelstürmen auf die Vorhersage stromabwärts in mittleren Breiten ausüben.

Um die Wirkung der zusätzlich assimilierten Daten herauszuarbeiten, wurden operationelle Vorhersagen mit denen verglichen, aus welchen die Dropsondenmessungen der Saison entfernt wurden. Die Modellrechnungen des Globalmodelles GFS wurden von der Hurrikane Research Division (HRD) bereitgestellt.

Aus Gründen der Effektivität bestehen Strategien, welche die Regionen für die Dropsondenmessungen um einen Wirbelsturm einschränken. Die aktuell angewandte Taktik wurde näher beschrieben. Erfolg versprechende Wirkungen werden durch Messungen in denjenigen Bereichen erzielt, in welchen das Vorhersageensemble die größte Spannweite aufweist. Starke Streuungen des Ensembles sind mit erhöhter Vorhersageunsicherheit in diesem Gebiet verbunden.

Es wurden Fallstudien an den Prognosen, welche auf Messungen um die Wirbelstürme Ivan, Bonnie und Charley aus der Saison 2004 folgten, erstellt. Jede dieser tropischen Zyklonen war nach Verlagerung in mittlere Breiten an der Entstehung eines Tiefdruckgebietes beteiligt.

Die Differenzen zwischen den beiden mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen gestarteten Vorhersagen und die Ausbreitung dieser Abweichungen im Laufe der Vorhersagezeit wurden untersucht. Als Hilfsmittel wurde der Eady-Index hinzugezogen. Diese Kennzahl für eine Atmosphärensäule gibt die Stärke des baroklin instabilen Wachstums

an. Sie beruht auf dem einfachsten baroklinen Modell von Eady (1949). Verstärktes baroklines Wachstum wird bei starker vertikaler Windscherung bzw. labil geschichteter Atmosphäre erwartet. Hohe Werte des Eady-Index fallen oft mit den Jetstream zusammen.

Leichte Unterschiede zwischen den Vorhersagen mit und ohne Dropsondenmessungen bestehen für den Bodendruck und die geopotentielle Höhe in 500 und 200 hPa ab Beginn der Rechnung zumeist in Intensität und Lage des jeweiligen Wirbelsturmes. Die Differenzen verlagern sich anschließend mit dem System. Im Bodendruck entstehen Differenzen abseits der überwachten Systeme auch in Gebieten mit verstärktem Druckgradienten, da sich dort Intensitäts- und Positionsabweichungen am deutlichsten abzeichnen können. Entstehung und Verstärkung der Unterschiede erfolgt in höheren Troposphärenschichten bevorzugt in Bereichen mit erhöhtem Eady-Index, wo das Auseinanderdriften der Vorhersagen wegen verstärkterer Vorhersageunsicherheit erwartet wird. Es ist zu beobachten, dass sich die Differenzen zwar mit den synoptischen Systemen bewegen, aber auch Entwicklungen stromabwärts anregen. Unterschiede außerhalb des Eady-Index konnten teilweise auf Intensitätsunterschiede in dem beobachteten System zurückgeführt werden, welche aus den Dropsondenmessungen resultieren können. Mit zunehmender Dauer der Prognose sind Differenzen über nahezu dem gesamten betrachteten Bereich zwischen Nordamerika und Europa zu verzeichnen. Die hauptsächlichlichen Unterschiede zwischen den Prognosen machen Verlagerungs- und Krümmungsunterschiede, sowie voneinander abweichende Achsenneigungen aus.

Die allgemeine Begutachtung der Vorhersagequalität ergab, dass die Prognosen von Hurrikan Ivan die tatsächliche Entwicklung des Zustandes der Atmosphäre weitestgehend verfehlten. Das Zusammenspiel der Zugbahn Ivans und der Strömungsstruktur der mittleren Breiten wurde nicht erkannt, sodass eine durch den ehemaligen Wirbelsturm unterstützte Zyklogenese nicht stattfand. Die Prognosen bezüglich des tropischen Sturmes Bonnie und des Hurrikans Charley gaben den atmosphärischen Ablauf zufrieden stellend wieder.

Zur objektiven Bewertung der Vorhersagen wurde die Güte der Prognosen mittels einer Normierung bestimmt. Dabei wurde angezeigt, inwiefern die operationelle Prognose mit Zusatzinformationen aus Wirbelstürmen derjenigen ohne Dropsondenmessungen überlegen ist. Die für die Unterschung bedeutenden Regionen wurden in drei Bereiche unterteilt: USA Ost, Atlantik und Europa, welche einzeln ausgewertet wurden. Mittelungen über alle Gitterpunkte des jeweiligen Gebietes zeigen die durchschnittliche Veränderung des Vorhersagefehlers durch die operationelle Prognose an. Dabei wurde deutlich, dass sich die Prognosen im Vergleich zu den starken Vorhersagefehlern nur unbedeutend unterscheiden. Der Vorhersagefehler wird durch die gezielten Messungen nur zeitweise reduziert, die Wirkung ist vernachlässigbar gering.

Abschließend wurden Prognosezeitreihen bis 132 h gemittelt über zehn Vorhersagen für die oben angeführten Bereiche dargestellt. Wiederum bewirken die Dropsondenmessungen in den Prognosen unterschiedliche Ergebnisse, welche insgesamt geringfügig sind. Dennoch konnte der Prognosefehler durch Alldrop in Bereich Europa kurzzeitig um



etwa 20% gesenkt werden. Positive und negative Auswirkungen der zusätzlichen Beobachtungen gleichen sich etwa aus.

Die eingehende Untersuchung von zwei ausgewählten Fällen ergibt einen ersten Eindruck von der Auswirkung der Dropsondenmessungen. Selbst die Mittelwertbildung über zehn Prognosen kann noch nicht als statistisch relevant angesehen werden. Eine endgültige Aussage, welche Folgen die Dropsondenmessungen um Wirbelstürme für die Mittelfristvorhersage mit sich bringen, kann erst nach Auswertung einer größeren Anzahl von Prognosen gemacht werden. Innerhalb dieser Arbeit wurden Vorhersagen verschiedener Jahrgänge untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich Umstellungen im Modell auf die Wirkung der zusätzlichen Messungen übertragen können. Die Untersuchung von Prognosen einer Saison könnte weitere Aufschlüsse geben. Ein anderer Ansatzpunkt wäre die Auswertung bezüglich der geographischen Breite der zuletzt eingeflossenen Messungen. Anstatt der hier verwendeten starren Bereichseinteilung sollte die Verfolgung der Wettersysteme eine korrektere Bewertung ergeben, da die Verlagerungsgeschwindigkeit hier nicht berücksichtigt werden konnte.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Messungen aus den Wirbelstürmen auf die Mittelfristprognose keine qualitätsmindernde Wirkung erzielen. Die erhoffte Erhöhung der Vorhersagegüte blieb in den hier untersuchten Prognosen aus. Die in den Tropen stattgefundenen Messungen wurden auf Auswirkungen in mittleren Breiten geprüft. Die Informationen aus den Beobachtungen konnten sich vermutlich nur teilweise bis in die Westwindzone ausbreiten. Verbesserungen der Prognosequalität für Europa sind eher durch Zusatzmessungen aus dem Bereich westlich des Zielgebietes zu erwarten, da somit die Wirkung direkt mit der Strömung verlagert werden könnte. Aufschlussreiche Erkenntnisse aus dem aktuellen Forschungsbereich der zielgerichteten Beobachtungen können zukünftig erwartet werden.

# **Anhang A**

## **Tabellen**

st; Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	-0.11	-0.00	-0.18	-0.12	0.11	-0.12	1.14	1.89	3.20	1.68
00Z12AUG2004	-0.10	0.03	0.08	0.08	-0.01	0.01	-0.29	0.25	0.33	-0.12
00Z10SEP2004	0.06	0.04	0.04	-0.15	-0.15	-0.16	-0.12	0.01	0.08	0.16
00Z16SEP2004	0.02	0.01	0.00	0.09	-0.01	0.22	1.00	0.92	0.27	0.10
00Z11JUN2005	-0.01	-0.02	0.12	-0.07	-0.05	0.18	0.20	0.02	0.07	0.72
00Z05JUL2005	0.05	-0.02	0.09	0.16	0.54	0.38	0.50	0.56	0.19	0.10
00Z17SEP2005	-0.08	-0.03	0.01	-0.22	-0.10	0.08	-0.52	-0.40	0.16	0.43
00Z18SEP2005	0.09	-0.09	0.14	0.07	0.53	1.04	1.35	1.05	1.11	1.70
00Z23OKT2005	0.00	-0.10	-0.30	-0.23	-0.28	0.45	0.30	0.27	0.34	-0.00
00Z24OKT2005	-0.06	0.12	0.26	-0.01	-0.06	-0.09	-0.01	0.03	0.99	1.91

**Tabelle A.1:** Gemittelte Vorhersagefehlerreduzierung  $\mathcal{F}_n$  nach Gleichung 5.2 für den MSLP [hPa] im Gebiet *USA Ost*

Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	0.17	-0.38	-4.97	-6.57	0.55	1.53	4.63	11.54	20.39	21.56
00Z12AUG2004	-0.92	0.33	0.64	0.66	-0.07	0.13	-2.36	2.17	2.82	-0.94
00Z10SEP2004	0.09	-0.17	0.48	-1.05	-1.77	-2.13	-1.25	0.19	0.41	2.11
00Z16SEP2004	0.20	0.09	0.10	0.72	-0.10	1.80	8.50	7.69	2.51	1.04
00Z11JUN2005	1.32	-0.74	-1.61	-0.20	0.12	-2.20	-0.81	-2.75	-8.68	-5.58
00Z05JUL2005	0.03	-0.86	0.30	1.77	6.26	5.81	6.17	5.52	1.30	-1.28
00Z17SEP2005	-1.65	-0.84	-0.49	-3.62	-4.95	-3.30	-0.59	2.11	5.54	1.39
00Z18SEP2005	-1.13	-0.55	1.63	1.52	1.18	6.38	10.73	10.03	11.28	8.43
00Z23OKT2005	-0.30	-2.44	-2.53	-2.22	0.38	2.67	1.39	-2.91	-3.70	2.65
00Z24OKT2005	-0.22	-1.20	1.95	-2.26	-1.38	0.26	-2.04	-0.60	7.85	14.03

**Tabelle A.2:** Gemittelte Vorhersagefehlerreduzierung  $\mathcal{F}_n$  nach Gleichung 5.2 für die geopotentielle Höhe [gpm] im Gebiet *USA Ost*

st; Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	-0.08	0.03	0.17	-0.07	-0.10	0.25	-0.07	0.23	0.16	-0.42
00Z12AUG2004	0.01	0.04	-0.05	-0.28	-0.39	-0.36	-0.28	-0.53	-0.32	-0.44
00Z10SEP2004	0.06	-0.08	0.03	-0.04	-0.02	-0.05	0.09	0.10	0.02	-0.51
00Z16SEP2004	-0.01	0.01	0.07	0.20	0.37	0.56	0.23	0.09	-0.18	-0.74
00Z11JUN2005	0.04	0.10	-0.05	-0.41	-0.49	-0.61	-0.77	-0.47	-0.08	0.45
00Z05JUL2005	-0.02	-0.02	-0.13	0.06	-0.17	0.05	0.18	0.12	0.40	0.56
00Z17SEP2005	-0.05	-0.07	-0.07	-0.05	-0.30	-0.71	-0.53	-0.59	-0.81	-0.87
00Z18SEP2005	0.12	0.27	0.22	0.48	0.20	0.46	0.84	1.24	1.52	1.31
00Z23OKT2005	0.10	0.23	0.12	0.10	-0.33	-0.59	-0.01	0.47	0.53	0.60
00Z24OKT2005	0.23	-0.03	-0.10	0.25	0.69	0.63	0.71	0.66	0.90	0.75

**Tabelle A.3:** Gemittelte Vorhersagefehlerreduzierung  $\mathcal{F}_n$  nach Gleichung 5.2 für den MSLP [hPa] im Gebiet *Atlantik*

st; Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	0.71	-0.13	1.04	-0.67	-2.74	0.76	2.24	-0.78	-1.03	-5.32
00Z12AUG2004	0.14	0.34	-0.39	-2.32	-3.34	-3.26	-2.61	-4.52	-2.64	-3.74
00Z10SEP2004	0.37	-0.68	-0.67	-0.23	-0.10	-1.01	-0.12	0.75	1.47	-3.26
00Z16SEP2004	-0.08	0.05	0.57	1.81	3.17	4.70	1.93	0.64	-1.52	-6.23
00Z11JUN2005	1.72	1.54	-0.22	-1.32	-3.19	-5.14	-5.32	-4.32	-2.89	-1.04
00Z05JUL2005	0.35	0.98	1.31	1.79	0.00	0.37	2.28	1.46	2.38	9.64
00Z17SEP2005	-0.21	0.26	-0.80	-0.55	0.10	1.19	0.29	-2.29	-5.22	-3.12
00Z18SEP2005	0.74	2.14	1.54	2.51	2.43	2.65	6.67	9.85	3.15	1.10
00Z23OKT2005	-0.07	0.37	-0.49	-1.11	-4.40	-5.09	-1.65	3.79	5.20	8.16
00Z24OKT2005	-0.41	-1.02	-0.87	3.44	17.24	9.74	1.59	-0.53	3.55	6.26

**Tabelle A.4:** Gemittelte Vorhersagefehlerreduzierung  $\mathcal{F}_n$  nach Gleichung 5.2 für die geopotentielle Höhe [gpm] im Gebiet *Atlantik*

st; Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	-0.11	-0.00	-0.18	-0.12	0.11	-0.12	1.14	1.89	3.20	1.68
00Z12AUG2004	-0.10	0.03	0.08	0.08	-0.01	0.01	-0.29	0.25	0.33	-0.12
00Z10SEP2004	0.06	0.04	0.04	-0.15	-0.15	-0.16	-0.12	0.01	0.08	0.16
00Z16SEP2004	0.02	0.01	0.00	0.09	-0.01	0.22	1.00	0.92	0.27	0.10
00Z11JUN2005	-0.01	-0.02	0.12	-0.07	-0.05	0.18	0.20	0.02	0.07	0.72
00Z05JUL2005	0.05	-0.02	0.09	0.16	0.54	0.38	0.50	0.56	0.19	0.10
00Z17SEP2005	-0.08	-0.03	0.01	-0.22	-0.10	0.08	-0.52	-0.40	0.16	0.43
00Z18SEP2005	0.09	-0.09	0.14	0.07	0.53	1.04	1.35	1.05	1.11	1.70
00Z23OKT2005	0.00	-0.10	-0.30	-0.23	-0.28	0.45	0.30	0.27	0.34	-0.00
00Z24OKT2005	-0.06	0.12	0.26	-0.01	-0.06	-0.09	-0.01	0.03	0.99	1.91

**Tabelle A.5:** Gemittelte Vorhersagefehlerreduzierung  $\mathcal{F}_n$  nach Gleichung 5.2 für den MSLP [hPa] im Gebiet *Europa*

st; Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	0.17	-0.38	-4.97	-6.57	0.55	1.53	4.63	11.54	20.39	21.56
00Z12AUG2004	-0.92	0.33	0.64	0.66	-0.07	0.13	-2.36	2.17	2.82	-0.94
00Z10SEP2004	0.09	-0.17	0.48	-1.05	-1.77	-2.13	-1.25	0.19	0.41	2.11
00Z16SEP2004	0.20	0.09	0.10	0.72	-0.10	1.80	8.50	7.69	2.51	1.04
00Z11JUN2005	1.32	-0.74	-1.61	-0.20	0.12	-2.20	-0.81	-2.75	-8.68	-5.58
00Z05JUL2005	0.03	-0.86	0.30	1.77	6.26	5.81	6.17	5.52	1.30	-1.28
00Z17SEP2005	-1.65	-0.84	-0.49	-3.62	-4.95	-3.30	-0.59	2.11	5.54	1.39
00Z18SEP2005	-1.13	-0.55	1.63	1.52	1.18	6.38	10.73	10.03	11.28	8.43
00Z23OKT2005	-0.30	-2.44	-2.53	-2.22	0.38	2.67	1.39	-2.91	-3.70	2.65
00Z24OKT2005	-0.22	-1.20	1.95	-2.26	-1.38	0.26	-2.04	-0.60	7.85	14.03

**Tabelle A.6:** Gemittelte Vorhersagefehlerreduzierung  $\mathcal{F}_n$  nach Gleichung 5.2 für die geopotentielle Höhe [gpm] im Gebiet *Europa*

st: Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	-4.51 / 3.23	-2.08 / 1.00	-1.80 / 1.46	-0.98 / 1.23	-1.13 / 1.48	-0.85 / 1.66	-1.42 / 2.11	-1.40 / 2.55	-1.42 / 2.01	-2.17 / 2.46
00Z12AU02004	-3.40 / 1.34	-4.70 / 2.21	-6.34 / 2.75	-6.44 / 4.80	-3.79 / 5.20	-2.89 / 3.76	-1.63 / 2.20	-1.90 / 2.00	-2.31 / 2.81	-2.22 / 4.36
00Z10SEP2004	-0.90 / 0.39	-1.21 / 0.54	-1.12 / 0.69	-1.68 / 0.66	-3.90 / 1.00	-8.85 / 0.60	-11.15 / 1.03	-15.32 / 7.65	-9.75 / 4.28	-9.19 / 5.74
00Z16SEP2004	-1.47 / 1.66	-0.60 / 1.81	-2.83 / 3.67	-5.29 / 4.52	-4.20 / 3.36	-3.35 / 3.48	-3.55 / 2.70	-3.54 / 2.83	-3.55 / 2.32	-4.55 / 2.55
00Z11JUN2005	-3.61 / 3.67	-2.17 / 3.98	-1.78 / 4.17	-2.39 / 4.82	-2.98 / 4.27	-1.96 / 6.01	-3.66 / 7.23	-5.06 / 8.93	-6.51 / 11.35	-8.66 / 5.93
00Z05JUL2005	-2.77 / 1.27	-2.57 / 1.23	-2.33 / 1.05	-2.61 / 1.41	-2.61 / 1.41	-2.48 / 2.22	-2.63 / 1.48	-2.42 / 3.62	-2.80 / 5.04	-5.14 / 4.02
00Z17SEP2005	-1.77 / 1.73	-2.59 / 1.06	-1.96 / 1.02	-3.18 / 3.62	-2.00 / 3.48	-6.54 / 5.34	-5.55 / 6.01	-6.30 / 6.84	-4.76 / 4.55	-3.96 / 4.18
00Z18SEP2005	-0.42 / 1.13	-3.09 / 2.39	-3.10 / 3.54	-1.56 / 3.21	-3.96 / 3.24	-3.96 / 3.75	-4.16 / 5.85	-5.13 / 5.70	-4.53 / 7.93	-4.82 / 8.29
00Z23OKT2005	-5.50 / 1.20	-8.65 / 5.23	-6.99 / 5.05	-6.92 / 4.20	-3.96 / 8.08	-13.83 / 9.24	-7.26 / 7.31	-2.73 / 1.44	-2.96 / 2.46	-3.48 / 2.33
00Z24OKT2005	-4.70 / 5.76	-3.83 / 5.06	-3.56 / 7.39	-3.46 / 7.96	-2.28 / 3.06	-1.99 / 2.26	-1.63 / 1.87	-2.59 / 2.24	-1.77 / 2.28	-3.54 / 3.08

**Tabelle A.7:** Minimaler und maximaler Wert der Vorhersagefehlerberichtigung durch Alldrop  $\mathcal{F}$  nach Gleichung 5.1 des MSLP [hPa] im Bereich USA Ost

st: Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	-78.08 / 19.95	-19.60 / 23.60	-12.30 / 15.90	-8.70 / 8.30	-7.00 / 9.10	-6.30 / 17.00	-9.20 / 26.40	-18.80 / 35.30	-45.50 / 36.60	-77.30 / 45.20
00Z12AU02004	-17.50 / 7.80	-10.60 / 13.40	-24.70 / 23.40	-31.10 / 20.00	-15.80 / 17.40	-11.60 / 8.30	-13.40 / 17.00	-21.00 / 35.00	-31.20 / 36.30	-33.20 / 34.30
00Z10SEP2004	-4.40 / 3.80	-7.30 / 3.90	-7.50 / 7.00	-12.90 / 10.70	-22.20 / 11.10	-71.80 / 13.60	-60.90 / 10.90	-94.40 / 44.60	-68.70 / 34.50	-48.90 / 55.00
00Z16SEP2004	-9.90 / 19.60	-5.00 / 16.70	-12.60 / 30.60	-32.30 / 43.00	-40.90 / 35.00	-43.40 / 34.10	-38.00 / 41.50	-42.20 / 39.40	-30.80 / 34.70	-32.40 / 34.00
00Z11JUN2005	-14.20 / 21.20	-10.90 / 20.50	-12.40 / 22.10	-18.10 / 23.50	-24.00 / 29.30	-52.07 / 50.50	-57.10 / 45.80	-57.10 / 45.80	-43.80 / 64.10	-76.30 / 55.90
00Z05JUL2005	-16.20 / 9.90	-14.30 / 26.49	-21.30 / 13.90	-25.29 / 14.10	-16.94 / 18.20	-15.30 / 27.10	-12.80 / 29.70	-25.40 / 32.20	-31.90 / 45.70	-38.10 / 40.70
00Z17SEP2005	-12.90 / 13.80	-19.40 / 19.70	-15.10 / 16.40	-15.20 / 44.10	-23.47 / 59.60	-51.90 / 61.30	-60.10 / 48.57	-50.95 / 60.10	-30.30 / 111.90	-30.70 / 120.90
00Z18SEP2005	-7.80 / 11.39	-25.00 / 17.20	-25.60 / 23.90	-15.10 / 20.00	-28.02 / 15.79	-49.00 / 46.30	-64.70 / 71.30	-80.00 / 57.40	-39.50 / 67.30	-46.20 / 34.70
00Z23OKT2005	-42.50 / 18.30	-106.70 / 47.40	-52.10 / 60.50	-27.40 / 25.56	-82.29 / 43.31	-50.70 / 69.00	-55.60 / 31.60	-49.90 / 37.12	-75.23 / 66.80	-106.00 / 124.40
00Z24OKT2005	-81.50 / 39.50	-44.40 / 22.00	-18.25 / 42.40	-21.80 / 52.00	-37.70 / 42.10	-39.85 / 41.60	-44.00 / 54.60	-39.90 / 50.30	-77.20 / 55.10	-67.24 / 74.10

**Tabelle A.8:** Minimaler und maximaler Wert der Vorhersagefehlerberichtigung durch Alldrop  $\mathcal{F}$  nach Gleichung 5.1 der geopotentiellen Höhe [gpm] im Bereich USA Ost

st. Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	-1.23 / 0.67	-1.22 / 1.15	-2.44 / 2.48	-7.27 / 4.24	-8.32 / 4.77	-4.16 / 5.06	-5.04 / 4.75	-6.59 / 7.13	-9.90 / 8.19	-7.43 / 5.08
00Z12AUG2004	-0.69 / 0.58	-0.84 / 0.83	-0.98 / 1.08	-3.00 / 1.16	-7.86 / 4.18	-9.32 / 2.96	-8.35 / 3.32	-7.34 / 3.61	-4.46 / 3.02	-3.53 / 4.12
00Z10SEP2004	-0.39 / 0.45	-0.89 / 0.97	-1.16 / 1.32	-2.24 / 3.26	-1.94 / 2.42	-2.07 / 0.94	-1.69 / 1.61	-2.59 / 2.09	-3.27 / 2.41	-4.45 / 4.77
00Z16SEP2004	-0.63 / 0.47	-0.42 / 0.75	-0.53 / 0.67	-0.91 / 1.40	-1.32 / 2.11	-2.38 / 3.48	-3.88 / 4.10	-7.39 / 5.31	-9.06 / 5.87	-4.64 / 3.79
00Z11JUN2005	-0.79 / 0.85	-1.58 / 2.55	-1.88 / 2.31	-3.71 / 2.17	-4.00 / 2.05	-3.84 / 3.34	-5.05 / 3.29	-6.49 / 6.13	-10.69 / 11.35	-12.21 / 13.10
00Z05JUL2005	-2.51 / 1.72	-2.69 / 1.52	-3.66 / 1.29	-2.66 / 2.27	-3.82 / 2.38	-3.58 / 3.03	-3.15 / 3.73	-2.15 / 2.89	-3.43 / 4.03	-4.20 / 5.35
00Z17SEP2005	-0.83 / 1.59	-2.89 / 0.85	-1.91 / 2.14	-3.18 / 3.67	-4.36 / 5.51	-7.30 / 5.85	-8.16 / 6.15	-8.88 / 3.26	-11.65 / 9.38	-11.63 / 7.44
00Z18SEP2005	-1.32 / 3.44	-1.21 / 4.90	-1.80 / 5.52	-2.63 / 4.37	-3.39 / 6.01	-4.35 / 3.20	-4.12 / 5.31	-6.25 / 7.75	-7.51 / 11.96	-8.97 / 13.60
00Z23OKT2005	-1.72 / 1.81	-2.15 / 2.66	-2.27 / 4.72	-3.90 / 3.86	-6.22 / 5.46	-8.26 / 7.73	-7.33 / 8.07	-4.22 / 7.28	-4.20 / 7.75	-5.70 / 9.99
00Z24OKT2005	-1.32 / 3.25	-4.03 / 2.05	-6.92 / 7.39	-9.39 / 6.26	-6.21 / 8.62	-5.33 / 14.44	-5.92 / 13.63	-5.05 / 12.35	-3.88 / 13.21	-5.35 / 10.35

**Tabelle A.9:** Minimaler und maximaler Wert der Vorhersagefehlerberichtigung durch Alldrop  $\mathcal{F}$  nach Gleichung 5.1 der geopotentiellen Höhe [gpm] im Bereich Atlantik

st. Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	-14.70 / 10.40	-20.30 / 13.90	-17.60 / 23.20	-27.90 / 35.10	-46.50 / 40.80	-47.88 / 34.40	-56.00 / 53.80	-38.10 / 33.40	-73.20 / 43.00	-66.00 / 65.90
00Z12AUG2004	-5.90 / 4.40	-7.60 / 7.20	-9.50 / 9.70	-27.10 / 9.70	-73.50 / 37.20	-90.80 / 24.60	-74.60 / 29.80	-63.50 / 32.00	-40.00 / 26.20	-28.00 / 39.10
00Z10SEP2004	-4.00 / 4.10	-9.20 / 6.60	-13.80 / 14.70	-17.30 / 9.50	-19.70 / 11.50	-23.60 / 9.90	-17.20 / 13.10	-23.40 / 18.10	-37.80 / 18.10	-60.60 / 28.00
00Z16SEP2004	-5.70 / 5.10	-3.60 / 7.40	-4.50 / 6.20	-7.40 / 13.70	-11.00 / 20.50	-21.50 / 30.60	-33.70 / 40.50	-62.40 / 53.60	-82.80 / 49.60	-41.10 / 33.20
00Z11JUN2005	-15.40 / 21.20	-13.44 / 23.60	-42.70 / 22.00	-47.50 / 24.50	-45.80 / 31.50	-35.50 / 27.40	-46.70 / 37.00	-72.20 / 44.50	-112.10 / 70.10	-119.50 / 104.30
00Z05JUL2005	-9.40 / 8.50	-12.90 / 14.80	-17.39 / 27.80	-16.90 / 32.50	-17.90 / 21.10	-27.30 / 28.60	-22.80 / 37.00	-35.80 / 40.00	-56.30 / 82.14	-36.09 / 125.20
00Z17SEP2005	-7.60 / 8.00	-19.10 / 10.00	-24.30 / 28.70	-34.60 / 45.00	-20.92 / 33.93	-42.95 / 35.20	-64.35 / 54.34	-75.80 / 34.70	-93.69 / 52.10	-80.10 / 128.80
00Z18SEP2005	-13.50 / 16.80	-21.80 / 30.80	-16.60 / 37.00	-19.10 / 35.50	-25.90 / 39.40	-25.20 / 33.70	-47.30 / 70.20	-80.00 / 97.30	-116.60 / 103.40	-96.50 / 110.60
00Z23OKT2005	-13.42 / 12.80	-18.33 / 15.20	-15.40 / 18.70	-19.80 / 28.20	-43.90 / 28.50	-37.00 / 41.00	-35.30 / 38.10	-62.20 / 57.80	-69.37 / 69.40	-62.50 / 71.50
00Z24OKT2005	-23.90 / 18.00	-27.00 / 18.30	-35.50 / 22.90	-43.00 / 36.70	-44.60 / 72.40	-29.70 / 68.80	-31.40 / 55.50	-42.87 / 68.70	-81.90 / 96.20	-61.10 / 71.80

**Tabelle A.10:** Minimaler und maximaler Wert der Vorhersagefehlerberichtigung durch Alldrop  $\mathcal{F}$  nach Gleichung 5.1 der geopotentiellen Höhe [gpm] im Bereich Atlantik

st. Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	-1.23/ 0.67	-1.22/ 1.03	-2.44/ 1.74	-3.66/ 1.45	-5.81/ 3.62	-6.26/ 12.73	-2.31/ 11.42	-2.14/ 7.31	-4.39/ 4.59	-5.93/ 1.92
00Z12AUG2004	-0.36/ 0.22	-0.68/ 0.47	-0.87/ 1.08	-0.96/ 0.49	-1.12/ 0.24	-4.22/ 0.90	-1.37/ 1.54	-1.73/ 3.44	-2.63/ 2.07	-2.75/ 0.96
00Z10SEP2004	-0.19/ 0.44	-0.42/ 0.42	-1.01/ 0.48	-2.24/ 3.26	-1.92/ 1.69	-2.07/ 0.27	-0.42/ 0.50	-0.56/ 0.61	-0.29/ 0.61	-0.31/ 0.98
00Z16SEP2004	-0.28/ 0.32	-0.71/ 0.35	-0.68/ 0.57	-0.59/ 0.69	-1.10/ 0.90	-0.03/ 2.76	-3.45/ 3.89	-7.35/ 0.77	-9.06/ 0.64	-5.70/ 0.67
00Z11JUN2005	-0.30/ 0.11	-0.62/ 0.33	-0.34/ 0.48	-1.15/ 0.64	-1.70/ 0.17	-0.61/ 2.46	-2.88/ 3.11	-1.29/ 2.28	-1.53/ 3.69	-11.62/ 4.90
00Z05JUL2005	-0.07/ 0.37	-0.73/ 0.46	-0.09/ 0.76	-0.47/ 2.14	-0.75/ 1.61	-3.57/ 1.17	-0.65/ 3.73	-0.74/ 2.76	-0.76/ 2.56	-2.18/ 4.22
00Z17SEP2005	-1.26/ 0.92	-1.00/ 0.70	-1.34/ 1.17	-1.34/ 1.19	-1.10/ 0.67	-1.98/ 2.09	-8.16/ 1.99	-4.88/ 1.70	-4.98/ 4.13	-9.26/ 6.38
00Z18SEP2005	-0.36/ 0.52	-0.64/ 0.61	-1.05/ 0.81	-2.08/ 1.76	-2.26/ 6.01	-3.21/ 3.17	-5.51/ 4.10	-3.66/ 4.90	-2.55/ 4.86	-2.90/ 1.36
00Z23OKT2005	-0.85/ 1.39	-1.22/ 1.35	-1.24/ 3.08	-2.65/ 2.18	-3.16/ 3.25	-3.34/ 5.01	-6.38/ 6.97	-1.23/ 7.28	-2.18/ 8.00	-4.18/ 3.05
00Z24OKT2005	-0.27/ 1.13	-0.94/ 0.81	-4.34/ 1.56	-2.29/ 4.68	-4.61/ 6.52	-3.02/ 8.45	-5.92/ 6.92	-7.09/ 8.61	-2.65/ 12.66	-4.00/ 10.12

**Tabelle A.11:** Minimaler und maximaler Wert der Vorhersagefehlerberichtigung durch Alldrop  $\mathcal{F}$  nach Gleichung 5.1 des MSLP [hPa] im Bereich Europa

st. Zeitschritt	24	36	48	60	72	84	96	108	120	132
00Z18SEP2003	-14.70/ 10.40	-20.30/ 13.90	-17.30/ 16.40	-18.20/ 21.00	-46.50/ 10.90	-60.70/ 82.70	-10.60/ 54.10	-38.10/ 12.40	-9.30/ 19.50	-31.30/ 25.40
00Z12AUG2004	-3.30/ 2.30	-5.70/ 3.50	-5.70/ 9.70	-6.70/ 7.00	-10.40/ 1.10	-39.30/ 8.40	-12.50/ 15.00	-12.50/ 30.70	-20.30/ 16.50	-23.70/ 7.30
00Z10SEP2004	-3.90/ 4.10	-3.90/ 6.60	-7.00/ 5.70	-17.30/ 9.50	-19.60/ 10.00	-17.60/ 6.40	-17.20/ 14.90	-8.40/ 8.00	-13.10/ 9.50	-16.70/ 14.60
00Z16SEP2004	-1.50/ 2.60	-8.90/ 2.90	-7.60/ 5.20	-5.60/ 6.80	-8.70/ 8.70	-0.70/ 24.20	-31.60/ 33.90	-61.60/ 6.90	-82.80/ 5.50	-49.10/ 10.90
00Z11JUN2005	-2.30/ 1.60	-4.70/ 2.90	-4.10/ 3.20	-12.00/ 9.60	-13.00/ 16.40	-11.80/ 15.10	-19.19/ 24.30	-17.33/ 33.00	-15.80/ 54.10	-21.50/ 60.40
00Z05JUL2005	-5.20/ 5.90	-2.90/ 10.10	-10.70/ 15.60	-8.30/ 32.50	-6.60/ 30.80	-21.80/ 10.70	-20.80/ 16.90	-7.70/ 29.90	-10.70/ 27.20	-17.40/ 16.50
00Z17SEP2005	-13.50/ 2.80	-3.50/ 7.00	-10.40/ 20.70	-32.70/ 18.90	-25.40/ 16.60	-21.10/ 11.90	-36.60/ 24.70	-26.50/ 25.90	-47.60/ 18.80	-78.52/ 58.68
00Z18SEP2005	-12.40/ 7.00	-11.90/ 24.25	-11.28/ 18.30	-17.40/ 15.70	-37.80/ 29.80	-37.80/ 29.80	-6.96/ 45.51	-45.50/ 26.29	-28.60/ 26.40	-65.70/ 36.60
00Z23OKT2005	-8.50/ 9.40	-7.90/ 7.50	-13.30/ 18.30	-19.20/ 15.41	-32.80/ 16.00	-8.40/ 40.00	-23.76/ 45.86	-14.20/ 46.20	-25.10/ 58.50	-23.20/ 74.80
00Z24OKT2005	-3.70/ 11.50	-15.60/ 15.40	-19.50/ 10.20	-21.60/ 8.10	-44.60/ 27.92	-29.70/ 53.80	-25.22/ 35.30	-34.40/ 22.50	-23.13/ 94.30	-40.90/ 65.70

**Tabelle A.12:** Minimaler und maximaler Wert der Vorhersagefehlerberichtigung durch Alldrop  $\mathcal{F}$  nach Gleichung 5.1 der geopotentialen Höhe [gpm] im Bereich Europa



# Literatur

- Aberson, S. D. (2002). Two years of operational hurricane synoptic surveillance. *Weather and Forecasting* 17, 1101–1110.
- Aberson, S. D. (2003). Targeted observations to improve operational tropical cyclone track forecast guidance. *Monthly Weather Review* 131, 1613–1628.
- Avila, A. L. (2004). Tropical cyclone report tropical storm bonnie 3 -13 august 2004. Technical report. <<http://www.nhc.noaa.gov/2004bonnie.shtml>>.
- Burpee, R. W. (1996). The impact of omega dropwindsondes on operational hurricane track forecast models. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77, 925–933.
- Eady, E. T. (1949). Long waves and cyclone waves. *Tellus* 1, 33–52.
- Ertel, H. (1942). Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteorologische Zeitschrift* 59, 271–281.
- Hart, R. E. und J. L. Evans (2001). A climatology of the extratropical transition of atlantic tropical cyclones. *Journal of Climate* 14, 546–564.
- Hoskins, B. und P. Berrisford (1988). A potential vorticity perspective of the storm of 15–16 october 1987. *Weather* 43, 122–129.
- Hoskins, B. J. (1990). Theory of extratropical cyclones. *Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume* 5.
- Hoskins, B. J., M. E. McIntire und A. W. Robertson (1985). On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 111, 877–946.
- Hoskins, B. J. und P. J. Valdes (1990). On the existence of storm-tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences* 47, 1854–1864.
- Jones, S. C., P. A. Harr, J. Abraham, L. F. Bosart, P. J. Bowyer, J. L. Evans, D. E. Hanley, B. N. Hanstrum, R. E. Hart, F. Lalaurette, M. R. Sinclair, R. K. Smith und C. Thorncroft (2003). The extratropical transition of tropical cyclones: Forecast challenges, current understanding, and future directions. *Weather and Forecasting* 18, 1052–1092.

- Kalnay, E. (2003). *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*, Volume 1. Cambridge University Press.
- Lindzen, R. S. und B. Farrell (1980). A simple approximate result for the maximum growth rate of baroclinic instabilities. *Journal of the Atmospheric Sciences* 37, 1648–1654.
- Majumdar, S. und S. Aberson (2005). Noaa joint hurricane testbed (jht): Targeting strategies to improve hurricane track forecasts. 2nd year semi-annual report. january 31, 2005. <[www.aoml.noaa.gov/hrd/Landsea/jht/2003-2005reports/jht\\_midyear05\\_Majumbar.pdf](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/Landsea/jht/2003-2005reports/jht_midyear05_Majumbar.pdf)>.
- Majumdar, S. J., S. D. Aberson, C. H. Bishop, R. Buizza, M. S. Peng und C. A. Reynolds (2005). A comparison of adaptive observing guidance for atlantic tropical cyclones. *Manuskript eingereicht in Monthly Weather Review*.
- MetOffice, U. (UK). The great storm of 1987. Internetveröffentlichung. <http://www.metoffice.gov.uk/education/secondary/students/1987.html>.
- Morgan, M. C. und J. W. Nielsen-Gammon (1998). Using tropopause maps to diagnose midlatitude weather systems. *Monthly Weather Review* 126, 2555–2579.
- NCEP (2003). The gfs atmospheric model. Internetveröffentlichung. <<http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html>>.
- Pasch, R. J., D. P. Brown und E. S. Blake (2005). Tropical cyclone report hurricane charley 9 -14 august 2004. Technical report. <<http://www.nhc.noaa.gov/2004charley.shtml>>.
- Pedlosky, J. (2003). *Waves in the Ocean and Atmosphere*, Volume 1. Springer-Verlag.
- Stewart, S. R. (2005). Tropical cyclone report hurricane ivan 2 -24 september 2004. Technical report. <<http://www.nhc.noaa.gov/2004ivan.shtml>>.
- Szunyogh, I., Z. Toth, R. E. Morss, S. J. Majumdar, B. J. Etherton und C. H. Bishop (2000). The effect of targeted observations during the 1999 winter storm reconnaissance program. *Monthly Weather Review* 128, 3520–3537.
- Szunyogh, I., Z. Toth, A. Zimin, S. J. Majumdar und A. Persson (2002). Propagation of the effect of targeted observations: The 2000 winter storm reconnaissance program. *Monthly Weather Review* 130, 1144–1165.
- Toth, Z. und E. Kalnay (1993). Ensemble forecasting at ncep: The generation of perturbations. *Bulletin of the American Meteorological Society* 74, No. 12, 2317–2330.
- Toth, Z. und E. Kalnay (1997). Ensemble forecasting at ncep and the breeding method. *Monthly Weather Review* 125, 3297–3319.