

**Vergleich von GCM-simulierten  
und gemessenen Bodendruckfeldern  
über dem Nordatlantik und Europa**

**Diplomarbeit**

an der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Bern

vorgelegt von

Ramon Schwab

2004

Leiter der Arbeit:

Prof. Dr. Heinz Wanner

Geographisches Institut

## II

*Alles wahrhaft Grosse voll-  
zieht sich durch langsames,  
unmerkliches Wachstum.*

*Seneca*

Die gesamte Arbeit entstand mit frei und gratis erhältlicher Software. Software von Monopolfirmen wird prinzipiell nicht unterstützt.

- Betriebssystem: Linux* (Distribution: Mandrake; auf UNIX basierendes Gratisbetriebssystem)
- Satz und Layout: L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X* (sprich: 'latech'; nach den bewährten Regeln der Drucktechnik entwickeltes Satzsystem mit prozedural-programmiertechnischem Charakter)
- Statistische Berechnungen und Diagramme: R* (auf S und S+ basierende, zu statistischen Zwecken entwickelte Programmiersprache)
- Grafische Abbildungen (Karten): Grads* (speziell für die Analyse und Darstellung wissenschaftlicher Daten entwickeltes, interaktives Darstellungssystem)

# Vorwort

10 Jahre ist es her! Vor genau 10 Jahren habe ich den zweiten Bildungsweg eingeschlagen mit dem Ziel, Geographie zu studieren. Davon bin ich nie abgerückt und mit dem Ende dieser Arbeit ist das Zielband nun in Sichtweite.

Es war nicht einfach, von der Berufswelt auf die Schulbank zurückzukehren und ich musste mich wieder an Klassenzimmer und ans Schülersein gewöhnen. Mit der eidgenössischen C-Maturität stand dann die Tür zur Universität offen und ich konnte mit dem Geographiestudium beginnen. Dass ich später die Möglichkeit hatte, mich auf Klimatologie und Meteorologie zu spezialisieren verdanke ich vor allem Prof. Dr. Heinz Wanner. Ihm möchte ich an dieser Stelle für seine Unterstützung herzlich danken. Er stand mir stets mit gutem Rat zur Seite. Mein Dank geht auch an Dimitrios Gyalistras, der mir sämtliche Datensätze zur Verfügung gestellt und mich in die Arbeit eingeführt hat und Jürg Luterbacher, der mich jeweils mit wertvollen Tipps versorgt und die Arbeit begutachtet hat. Weiter möchte ich mich bei der gesamten KLIMET für die angenehme Zeit bedanken. Ich habe mich bei euch immer sehr wohl und gut aufgehoben gefühlt. Spezieller Dank geht an Pavel Michna und Erich Fischer, die mich auf humorvolle Art unterstützten. Besonderer Dank geht an Lisbeth Schwab, Simon Schwab und Sabine Kobel, die mir finanziell und mental beistanden.

Ich blicke auf ein Jahrzehnt voller Erfüllungen aber auch grossem Leid zurück. Ich erinnere mich an Augenblicke des Glücks und Momente der Traurigkeit und der Verzweiflung. Diese Arbeit widme ich meinem verstorbenem Vater Hans Schwab.

Ramon Schwab



# Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden im nordatlantisch-europäischen Raum mit den Abgrenzungen  $22.5^{\circ}$  N– $82.5^{\circ}$  N und  $92.5^{\circ}$  W– $42.5^{\circ}$  E die Bodendruckdaten von acht gekoppelten Klimamodellen (CCC1, CCC2, CCSR, CSIR, ECHAM3, ECHAM4, HAD2 und HAD3) mit dem Bodendruckdatensatz von K. Trenberth (Trenberth und Paolino 1980) über die Zeitperiode von 1961 bis 1990 verglichen. Die Untersuchung wird dabei in einen jährlichen und einen saisonalen (jahreszeitlichen) Vergleich gegliedert. Es werden nebst Bodendruckdifferenzfeldern und Standardabweichungsdifferenzfeldern verschiedene statistische Fehlermasse eingesetzt. So können die mittleren Abweichungen durch verschiedene Mittelwertmasse unterschiedlicher Aussagekraft differenziert beschrieben werden. Durch die Benutzung räumlicher Gütemasse sind Aussagen zur Struktur der Felder möglich.

Die Resultate zeigen die grösser werdenden Abweichungen der Modelldaten von den Messdaten mit zunehmender geographischer Breite. Dies gilt insbesondere ab dem 60. Breitengrad. Im Bereich des Azorenhochs stimmen die Modelle tendenziell besser mit den Messdaten überein als im Bereich des Islandtiefs, obwohl im Sommer alle Modelle das Azorenhoch unterschätzen. Ein Zusammenhang mit zu schwach simulierter Konvektion im Bereich der ITC wird vermutet. Im Winter und Frühling sind die Unterschiede in den Fehlerwerten zwischen den Modellen am grössten, währenddem sie im Sommer und Herbst deutlich kleiner ausfallen. Die Mittelung aller Bodendruckdifferenzfelder (Model Mean) zeigt im Nordosten des Untersuchungsraums (über Spitzbergen und Nordskandinavien) und über dem Mittelmeer eine Überschätzung des Bodendruckfelds, derweil westlich von Irland über dem Atlantik eine Unterschätzung vorliegt. Damit können die Ergebnisse von Lambert und Boer (2001) und Covey et al. (2003) grösstenteils bestätigt werden. Bei der Variabilität lässt sich im Mittel feststellen, dass sie im Bereich des Islandtiefs stärker unterschätzt wird als im Bereich des Azorenhochs. Über Westeuropa wird die Variabilität tendenziell überschätzt. Werden die Modelle separat betrachtet, liefert ECHAM4 die besten Übereinstimmungen mit den Messdaten und darf im Rahmen dieser Arbeit als bestes Modell bezeichnet werden. CCC1, CCSR und CSIR schneiden in dieser Untersuchung am schlechtesten ab. Die übrigen Modelle liegen dazwischen.

Der Vergleich der drei Modellfamilien CCC1 und CCC2, ECHAM3 und ECHAM4

sowie HAD2 und HAD3 zeigt nur beim CCC2 und ECHAM4 eine Verbesserung in der Übereinstimmung mit den Messdaten gegenüber deren Vorgängermodellen CCC1 beziehungsweise ECHAM3. HAD2 schneidet besser als HAD3 ab. HAD2 ist ein flusskorrigiertes Modell und HAD3 ist dagegen ein nicht flusskorrigiertes Modell. Zu den Auswirkungen der Flusskorrektur auf die Datenqualität lassen sich keine sinnvollen Aussagen machen, da HAD3 das einzige nicht flusskorrigierte Modell in dieser Arbeit ist.

Durch die Untersuchung auf regionaler Ebene wird letztlich der IPCC-Forderung nach vermehrter regionaler Auswertung von GCMs entsprochen (IPCC 2001a).

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>X</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage . . . . .	1
1.2 Klimamodellierung . . . . .	3
1.3 Zielsetzungen der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Daten und Methoden</b>	<b>9</b>
2.1 Analyse- und Modelldaten . . . . .	9
2.1.1 Canadian Global Coupled Climate Model 1 . . . . .	10
2.1.2 Canadian Global Coupled Climate Model 2 . . . . .	10
2.1.3 Center for Climate System Research . . . . .	11
2.1.4 Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation . . . . .	11
2.1.5 ECMWF Model, modified in HAMBURG/Large Scale Geostrophic Ocean GCM . . . . .	12
2.1.6 ECMWF Model, modified in HAMBURG/Isopycnal Ocean Model . . . . .	12
2.1.7 Hadley Centre Climate Model 2 . . . . .	12
2.1.8 Hadley Centre Climate Model 3 . . . . .	13
2.2 Methoden . . . . .	13
2.2.1 Eingrenzung des Untersuchungsraums . . . . .	13
2.2.2 Vergleichsmethodik . . . . .	14

<b>3</b>	<b>Resultate</b>	<b>19</b>
3.1	Jährliche Mittel . . . . .	19
3.1.1	Druckfelder . . . . .	19
3.1.2	Anomalien . . . . .	21
3.1.3	Variabilität . . . . .	24
3.1.4	Zusammenfassende Fehlerübersicht der jährlichen Betrachtung . . .	26
3.2	Saisonale Mittel . . . . .	27
3.2.1	Winter . . . . .	28
3.2.1.1	Druckfelder . . . . .	28
3.2.1.2	Anomalien . . . . .	30
3.2.1.3	Variabilität . . . . .	32
3.2.1.4	Zusammenfassende Fehlerübersicht im Winter . . . . .	34
3.2.2	Frühling . . . . .	35
3.2.2.1	Druckfelder . . . . .	35
3.2.2.2	Anomalien . . . . .	37
3.2.2.3	Variabilität . . . . .	41
3.2.2.4	Zusammenfassende Fehlerübersicht im Frühling . . . . .	42
3.2.3	Sommer . . . . .	43
3.2.3.1	Druckfelder . . . . .	43
3.2.3.2	Anomalien . . . . .	45
3.2.3.3	Variabilität . . . . .	47
3.2.3.4	Zusammenfassende Fehlerübersicht im Sommer . . . . .	49
3.2.4	Herbst . . . . .	50
3.2.4.1	Druckfelder . . . . .	50
3.2.4.2	Anomalien . . . . .	52
3.2.4.3	Variabilität . . . . .	54
3.2.4.4	Zusammenfassende Fehlerübersicht im Herbst . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>59</b>
4.1	Eingrenzung des Untersuchungsraums . . . . .	59
4.2	Gesamtübersicht . . . . .	60
4.3	Diskussion einiger Aspekte der Modelle . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>71</b>
	<b>Referenzen</b>	<b>73</b>



<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	IX
<b>A Ergänzendes Material</b>	<b>81</b>
<b>B Resultate im Nordpazifik</b>	<b>89</b>
B.1 Druckfelder . . . . .	89
B.2 Anomalien . . . . .	91
B.3 Variabilität . . . . .	94
B.4 Zusammenfassende Übersicht . . . . .	96
<b>C Diskussion (Nordpazifik)</b>	<b>99</b>
C.1 Modellmittelung . . . . .	99
C.2 Vergleich mit dem nordatlantisch-europäischen Raum . . . . .	102
<b>D Schlussfolgerungen und Ausblick (Nordpazifik)</b>	<b>105</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Volumenvergleich Erde-Atmosphäre . . . . .	2
1.2	Vergleich zwischen Modellrechnungen und Beobachtungen des Temperaturanstiegs seit 1860 . . . . .	4
2.1	Geographische Lage von Azorenhoch und Islandtief . . . . .	14
3.1	Mittlere, jährliche Bodendruckfelder und Standardabweichungen . . . . .	20
3.2	Bodendruckanomalien bezüglich des Jahresmittels . . . . .	22
3.3	Differenzfelder der Standardabweichungen bezüglich des Jahresmittel . . . . .	25
3.4	Mittlere Bodendruckfelder und Standardabweichungen im Winter . . . . .	29
3.5	Bodendruckanomalien im Winter . . . . .	31
3.6	Differenzfelder der Standardabweichungen im Winter . . . . .	33
3.7	Mittlere Bodendruckfelder und Standardabweichungen im Frühling . . . . .	36
3.8	Bodendruckanomalien im Frühling . . . . .	38
3.9	Differenzfelder der Standardabweichungen im Frühling . . . . .	40
3.10	Mittlere Bodendruckfelder und Standardabweichungen im Sommer . . . . .	44
3.11	Bodendruckanomalien im Sommer . . . . .	46
3.12	Differenzfelder der Standardabweichungen im Sommer . . . . .	48
3.13	Mittlere Bodendruckfelder und Standardabweichungen im Herbst . . . . .	51
3.14	Bodendruckanomalien im Herbst . . . . .	53
3.15	Differenzfelder der Standardabweichungen im Herbst . . . . .	55
4.1	Bodendruckdifferenzfelder aus dem Mittel aller acht Modelle für das Jahresmittel, für das Wintermittel, für das Sommermittel und Differenzfeld der Standardabweichungen bezüglich des Jahresmittels . . . . .	61
4.2	Zonale Jahresmittel, zonale Wintermittel und zonale Sommermittel aller Modelle . . . . .	63
4.3	Kombinierte Abbildung: Übersichtsdarstellung der $W_{AN}$ und der $r$ sowie Rangierungen nach den beiden Fehlermassen . . . . .	65

A.1	Bodendruckdifferenzfeld aus dem Mittel aller acht Modelle für das Frühlingsmittel . . . . .	82
A.2	Bodendruckdifferenzfeld aus dem Mittel aller acht Modelle für das Herbstmittel . . . . .	83
A.3	Zonale Frühlingsmittel aller Modelle . . . . .	84
A.4	Zonale Herbstmittel aller Modelle . . . . .	84
A.5	Effektive Werte der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Bodendruckdifferenzfelder ( $W_{AN}$ ) jeweils nach Modell und Jahreszeit dargestellt.	87
A.6	Effektive Werte des räumlichen Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) jeweils nach Modell und Jahreszeit dargestellt. . . . .	88
B.1	Mittlere, jährliche Bodendruckfelder und Standardabweichungen . . . . .	90
B.2	Bodendruckanomalien bezüglich des Jahresmittels . . . . .	92
B.3	Differenzfelder der Standardabweichungen bezüglich des Jahresmittel . . . .	95
C.1	Differenzfelder des Bodendrucks gebildet aus dem Mittel (Model Mean) aller acht Modelle und den Analysedaten . . . . .	100
C.2	Zonale Jahresmittel der Analysedaten und aller verwendeten Modelldaten .	101

# Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Jahresmittels . . . . .	27
3.2	Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Wintermittels . . . . .	35
3.3	Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Frühlingsmittel . . . . .	43
3.4	Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Sommermittels . . . . .	50
3.5	Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Herbstmittels . . . . .	57
A.1	Rangierung der Klimamodelle nach dem Anteil erklärter räumlicher Varianz der Bodendruckmuster ( $EV$ ) in der Gesamtübersicht. . . . .	85
A.2	Rangierung der Klimamodelle nach der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Standardabweichungsdifferenzfelder ( $W_{SD}$ ) in der Gesamtübersicht. . . . .	85
A.3	Rangierung der Klimamodelle nach dem mittleren Fehler der Bodendruckdifferenzfelder ( $\bar{m}_{AN}$ ) in der Gesamtübersicht. . . . .	86
A.4	Rangierung der Klimamodelle nach dem mittleren Fehler der Standardabweichungsdifferenzfelder ( $\bar{m}_{SD}$ ) in der Gesamtübersicht. . . . .	86
B.1	Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Jahresmittels . . . . .	97
C.1	Rangierung der Klimamodelle nach allen verwendeten Fehlermassen im Untersuchungsraum . . . . .	102
C.2	Rangierung der Klimamodelle nach allen verwendeten Fehlermassen im nordatlantisch-europäischen Raum . . . . .	103



# Abkürzungsverzeichnis

AGCM	Atmosphere General Circulation Model
AH	Azorenhoch
AMIP	Atmospheric Model Intercomparison Project
AOGCM	Atmosphere-Ocean General Circulation Model
CCC1	Canadian Global Coupled Climate Model 1
CCC2	Canadian Global Coupled Climate Model 2
CCSR	Center for Climate System Research
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CSIR	Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation
ECHAM3	ECMWF Model, modified in HAMburg/Large Scale Geostrophic Ocean GCM
ECHAM4	ECMWF Model, modified in HAMburg/Isopycnal Ocean Model
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
GCM	General Circulation Model
GRADS	Grid Analysis and Display System
HAD2	Hadley Centre Climate Model 2
HAD3	Hadley Centre Climate Model 3
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IS92a-f	IPCC-Szenarien a bis f (Emissionsszenarien)
IT	Islandtief
ITC	Intertropical Convergence Zone
LSG	Large Scale Geostrophic Ocean GCM (siehe ECHAM3)
NAO	North Atlantic Oscillation
NIES	National Institute of Environmental Studies
OGCM	Ocean General Circulation Model
OMIP	Ocean Model Intercomparison Project
OPYC	Isopycnal Ocean Model (siehe ECHAM4)
PINGO	Procedural INterface for Grib formatted Objects
QBO	Quasi-Biennial Oscillation
R	Rhomboidale Truncation

SLP	Sea Level Pressure
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
T	Trianguläre Truncation
UNEP	United Nations Environment Programme
WMO	World Meteorological Organization



# Kapitel 1

## Einleitung

Die Modellierung des Klimasystems der Erde und deren Auswertung stehen im Zentrum dieser Arbeit. Dabei wird einerseits eine systematische Überprüfung der Güte von Klimamodellen angestrebt und andererseits dem gegenwärtigen Trend zur regionalen Klimamodellierung Rechnung getragen. Der erste Abschnitt dieses Kapitels liefert eine Übersicht zum aktuellen Stand der Forschung bezüglich der anthropogenen Klimabeeinflussung und weist auf die Verantwortung der Allgemeinheit hin. Der zweite Abschnitt befasst sich mit Klimamodellen und den verschiedenen Modelltypen, wobei grundsätzliche Begriffe erläutert und einige Probleme aufgezeigt werden. Im letzten Abschnitt sind die Ziele dieser Arbeit aufgelistet.

### 1.1 Ausgangslage

Neueste Studien zeigen, dass der Sommer 2003 bei weitem der wärmste seit mindestens 500 Jahren war (Luterbacher et al. 2004) und es stellt sich die Frage, inwieweit anthropogene Einflüsse den Klimawandel mitbestimmen. Der Begriff des Klimawandels darf dabei nicht fälschlicherweise mit menschengemachter Klimaänderung gleichgesetzt werden. Natürliche Ursachen führen seit jeher zu Klimawandel. Dieser kann Schwankungen um einen mittleren Zustand, Sequenzen von raschen oder langsamen Übergängen beinhalten und wird in diese drei Typen unterschieden (Wanner 2002). Schwankungen des Klimas können sowohl durch natürliche als auch durch menschliche Faktoren verursacht werden (Wanner et al. 2000). Es gibt Belege, dass der Grossteil der Erwärmung der vergangenen 50 Jahre auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist und die globale Erwärmung der Erdatmosphäre heute nicht mehr allein durch die natürliche Variabilität erklärt werden kann (IPCC 2001a). Abbildung 1.2 zeigt den Zusammenhang von natürlichem und anthropogenem Forcing<sup>1</sup>. Aus der Erkenntnis, dass die Klimaänderung globale Probleme bewirken

---

<sup>1</sup>Forcing bezieht sich in diesem Zusammenhang auf Antrieb oder Antriebsfaktor (IPCC 2001b).



**Abbildung 1.1:** Preisgekrönte Grafik des Physikers Adam Nieman. Der Inhalt der kleinen Kugel entspricht dem Volumen der gesamten Atmosphäre bei normalem Luftdruck auf Meereshöhe (mit freundlicher Genehmigung von Adam Nieman, Nieman 2003).

kann, wurde 1988 gemeinsam von der Welt-Meteorologie-Organisation (WMO) und dem Umwelt-Programm der Vereinten Nationen (UNEP) der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) gegründet. Es handelt sich um ein Konsortium von hunderten von Wissenschaftlern, deren Hauptaufgabe einerseits in der Bewertung der verfügbaren wissenschaftlichen und sozioökonomischen Informationen zur Klimaänderung besteht und andererseits die Suche nach Möglichkeiten zur Vermeidung der Klimaänderung und zur Anpassung daran beinhaltet (IPCC 2001b). Die Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung ist dabei von zentraler Bedeutung.

Der Einfluss des Menschen auf das Klima gilt zwar grösstenteils als gesichert (IPCC 2001a), aber die Folgen seines Handelns sind schwierig abzuschätzen. Weil Prognosen immer auf Annahmen beruhen, sind sie zwangsläufig mit Unsicherheiten verbunden und eröffnen dadurch kritischen Betrachtern eine Angriffsfläche. Der Volumenvergleich in Abbildung 1.1 von Adam Nieman zeigt, dass der Inhalt unserer Atmosphäre im Vergleich zur Erdkugel klein ist. Deshalb und gerade wegen den Unsicherheiten von Prognosen sollte auf das Abenteuer Klimaänderung nicht eingegangen werden, da eine solche niemals wieder durch den Menschen rückgängig gemacht werden könnte. Das bedeutet nicht, dass beispielsweise auf die Nutzung fossiler Brennstoffe generell verzichtet werden soll, aber der Umgang mit ihnen muss möglichst sparsam erfolgen, was auf Grund des enormen Sparpotentials problemlos möglich ist (Lazarus et al. 1993). Die Hauptverantwortung liegt

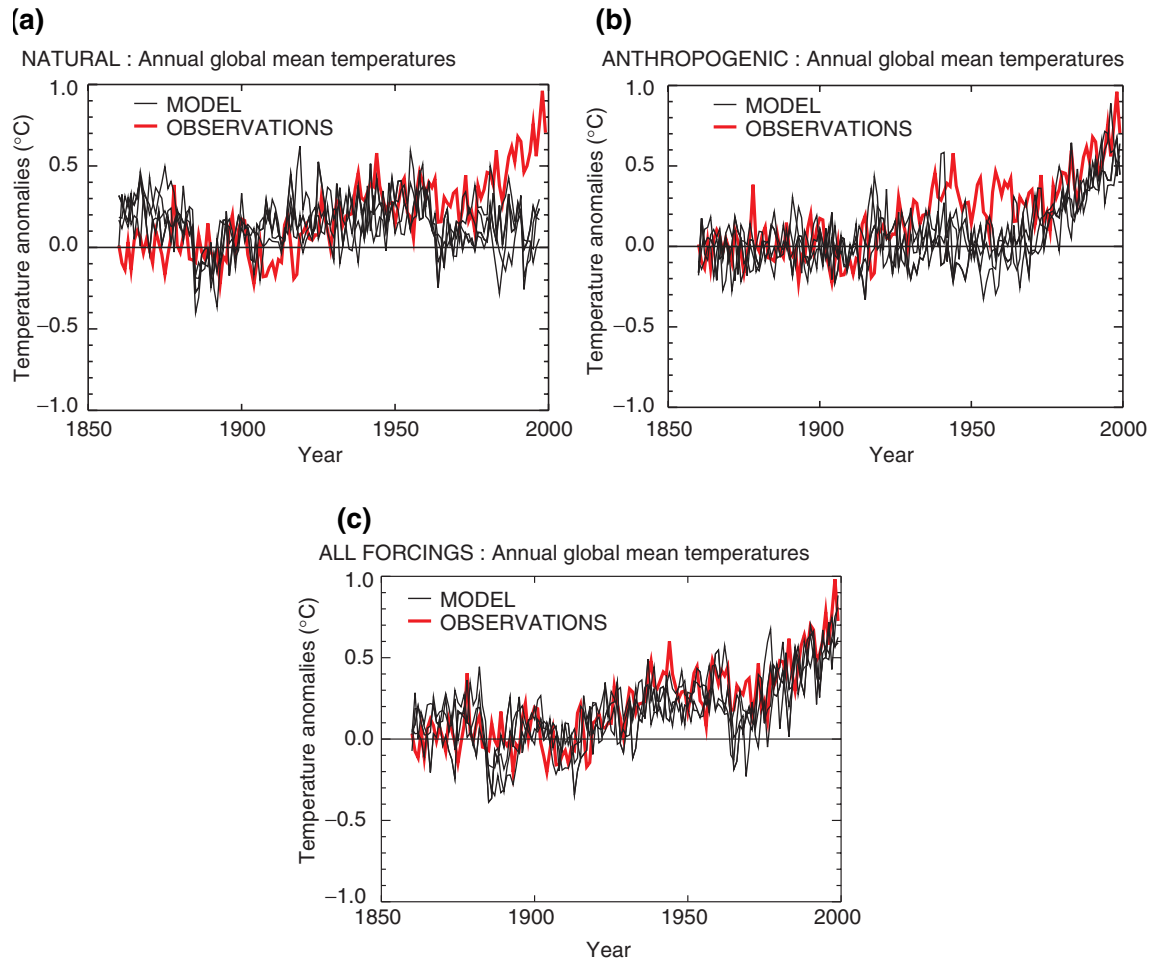
bei der Bevölkerung und erfordert deren Eigeninitiative. Zwar steigt die Sensibilität der Öffentlichkeit gegenüber Umweltfragen nach Naturkatastrophen etwas an, wir haben aber trotzdem zur Kenntnis zu nehmen, dass nicht nur einige Entscheidungsträger, sondern auch die Mehrheit der Gesellschaft offensichtlich gewillt ist, das Wagnis einer globalen Erwärmung mit all ihren Risiken in Kauf zu nehmen (Stauffer 2003).

## 1.2 Klimamodellierung

In den vergangenen 420'000 Jahren kann kein vergleichbarer CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Atmosphäre nachgewiesen werden, wie er seit Beginn der industriellen Revolution im 18. Jahrhundert stattgefunden hat (Petit et al. 1999). Diese Tatsache erschwert die Abschätzung der Klimaentwicklung mit statistischen Methoden erheblich und macht den Einsatz von Klimamodellen unentbehrlich. Nur mit Computersimulationen lassen sich die Folgen einer Störung des Systems durch anthropogene Treibhausgasemissionen richtig einschätzen (Cubasch 2002). Klimamodelle sind letztlich nichts anderes als Computerprogramme, welche die physikalischen Abläufe aller am Klima beteiligten Prozesse simulieren. Aufgrund der Komplexität und Nichtlinearität des Klimasystems können solche Modelle einzig mit Hilfe der leistungsfähigsten Computer erfolgversprechende Prognosen machen. Aktuelle Hochleistungscomputer erreichen eine maximale Verarbeitungsgeschwindigkeit von ungefähr 40 Billionen Operationen pro Sekunde (40 Teraflops). Würde alles Wissen, das man heute über die physikalischen Prozesse des Klimasystems hat, in ein Klimamodell einfließen, wäre zur Zeit auf Grund der Rechenleistung kein Computer in der Lage, die Berechnungen durchzuführen (IPCC 2001a). Dadurch sind Klimamodellen bezüglich der Zuverlässigkeit ihrer Prognosen technische Grenzen gesetzt und es müssen bei der Nutzung von Computerressourcen Kompromisse eingegangen werden. Dies äussert sich einerseits in der beschränkten horizontalen Auflösung der globalen Modelle von typischerweise 250–500 km (Cubasch 2002) und andererseits in der Vereinfachung von physikalischen Teilprozessen, wie bei der Ozeansimulation oder der Meer-Eis-Dynamik<sup>2</sup>. Prozesse, die innerhalb einer Gitterzelle ablaufen, wie z.B. die Wolkenbildung, werden aus den Werten an den Rändern der Gitterzelle über bekannte meteorologische Gesetzmässigkeiten parametrisiert. Klimamodelle stellen einzelne Subsysteme des gesamten Klimasystems in getrennten Modellen dar, die bei Bedarf gekoppelt werden. Atmosphäre und Ozean gelten als die wichtigsten Subsysteme des Klimasystems, in und zwischen denen hochdynamische Zirkulationspro-

---

<sup>2</sup>Der Ozean kann als einzelne Schicht, als Mehrschichtozean (Mischungsschichtozean) oder als vollständig dynamischer Ozean simuliert werden. Ebenso kann die Meer-Eis-Dynamik in den Polarregionen nur auf Grund der Wasseroberflächentemperatur oder thermodynamisch mit variabler Verteilung und Dicke des Eises separat in einem Eismodell berechnet werden. Für weitere Informationen siehe Lambert und Boer (2001) oder Stocker (2002).



**Abbildung 1.2:** Vergleich zwischen Modellrechnungen und Beobachtungen des Temperaturanstiegs seit 1860. Die rote Linie zeigt den beobachteten, die schwarzen Linien den durch die Modelle simulierten Temperaturverlauf. Der Antrieb der Modelle erfolgt oben links (a) durch natürliches Forcing, oben rechts (b) durch anthropogenes Forcing und unten (c) in Kombination beider Forcings. Die Darstellung zeigt, dass der Temperaturanstieg der vergangenen Jahre nicht allein mit natürlichen Ursachen erklärt werden kann. (IPCC 2001a).

zesse ablaufen. Klimamodelle, die diese Prozesse global abbilden, werden als globale Zirkulationsmodelle oder kurz GCMs (General Circulation Models) bezeichnet. Ein globales Atmosphärenmodell wird mit AGCM (Atmosphere General Circulation Model), ein globales Ozeanmodell mit OGCM (Ocean General Circulation Model) abgekürzt. Die Kopplung beider Modelle wird als global gekoppeltes Atmosphären-Ozean-Modell (Global Coupled Atmosphere-Ocean Model) bezeichnet und mit AOGCM abgekürzt. In dieser Arbeit werden die Abkürzungen GCM und AOGCM synonym verwendet.

Die Aussagekraft von Klimamodellen hängt zwangsläufig mit der Güte zusammen, mit welcher sie über lange Zeiträume reale Klimazustände zu simulieren vermögen. Aus diesem Grund wird in einem ersten Schritt in einem sogenannten Kontrollexperiment ein Modell mit natürlichen Rahmenbedingungen, d.h. ohne anthropogene Einflüsse, laufen gelassen, um die Stabilität der Klimasimulation zu testen. Bei älteren gekoppelten Modellen hat sich gezeigt, dass bei längerer Simulationszeit unrealistische Klimazustände erreicht werden (Cubasch et al. 1995). Aus diesem Grund erfolgte während der Simulation an der Schnittstelle Ozean-Atmosphäre ein Ausgleich der Wärme-, Süßwasser- und gegebenenfalls der Impulsflüsse (Flusskorrektur). Die Flusskorrektur hat keine physikalische Grundlage und ist daher umstritten (Gregory und Mitchell 1997). In der zweiten Hälfte der neunziger Jahre konnten zwar noch Unterschiede in den Daten zwischen flusskorrigierten und nicht flusskorrigierten Modellen festgestellt werden, aber die Differenzen liessen sich statistisch nicht mehr eindeutig auf die Flusskorrektur selbst zurückführen (siehe beispielsweise Fanning und Weaver 1997a, Fanning und Weaver 1997b oder Gregory und Mitchell 1997). Bei neueren Modellen kann auf Grund der höheren Auflösung auf die Flusskorrektur verzichtet werden. Heute gelten Resultate beider Modelltypen als gleichwertig (IPCC 2001a; Covey et al. 2004). In einem zweiten Schritt werden die Daten aus Modellsimulationen über vergangene Jahre mit gemessenen Daten verglichen. Dadurch findet die eigentliche Überprüfung oder nach Mikolajewicz et al. (2002) Validierung statt. Zu diesem Zweck wurde 1995 das internationale Forschungsprojekt CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) ins Leben gerufen. Ein Überblick dazu bietet Covey et al. (2003). Ziel des Projekts ist es, Daten von gekoppelten Klimasimulationen zu sammeln, zu archivieren und Wissenschaftlern für Modellvalidierungen zur Verfügung zu stellen. Es gibt zahlreiche ähnliche Projekte, darunter auch das AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) für Atmosphärenmodelle und das OMIP (Ocean Model Intercomparison Project) für Ozeanmodelle. Neuere Modellvergleiche zeigen, dass die heutigen Klimamodelle das vergangene und gegenwärtige Klima auf globaler Ebene gut simulieren (Gates et al. 1999; Lambert und Boer 2001; Covey et al. 2003) und den Vorhersagen vertraut werden kann (IPCC 2001a) (siehe auch Abbildung 1.2).

Globale Prognosen sagen allerdings wenig über die Klimaänderungen auf regionaler Ebene aus. Daher gehen aktuellere Bemühungen in Richtung der regionalen Klimamodellierung (IPCC 2001a). Die hierbei zum Einsatz kommenden regionalen Klimamodelle (Regional Climate Models, RCMs) werden in GCMs eingebettet und erhalten die Randbedingungen von den globalen Modellen (dynamisches Downscaling). Eine andere Möglichkeit für regionale oder lokale Prognosen bietet das statistische Downscaling. Dabei wird versucht eine statistische Beziehung zwischen regionalen beziehungsweise lokalen Klimavariablen (z.B. Bodendruck oder Temperatur) und grossräumigen Bedingungen aus der Beobachtung abzuleiten. Dann werden solche Beziehungen auf die Ergebnisse der glo-

bal gekoppelten Modelle angewandt, um regionale und lokale Klimaprognosen abzuleiten. Ausführliche Informationen können in Wanner et al. (2000) und IPCC (2001a) gefunden werden. All diese Methoden sind direkt von der Qualität und der Güte der GCMs abhängig. Aus diesem Grund ist ein Modellvergleich von GCMs auf regionaler Ebene unabdingbar.

### 1.3 Zielsetzungen der Arbeit

Ein Klimamodell erstellt Prognosen für viele verschiedene Variablen (z.B. Druck, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Niederschlag), die jeweils mit Messdaten verglichen werden können, sofern entsprechende Messdatensätze vorhanden sind. Viele der bisherigen Studien befassen sich auf regionaler Ebene mehrheitlich mit dem Vergleich der Bodentemperatur (z.B. Delworth 1996, Giorgi und Francisco 2000 oder Stephenson und Pavan 2003). Anderen Variablen wurde bislang weniger Aufmerksamkeit gewidmet. In dieser Arbeit werden nun Bodendruckfelder von acht verschiedenen GCMs mit Messdaten über die Zeitperiode von 1961 bis 1990 im nordatlantisch-europäischen Raum überprüft. Dabei werden folgende Ziele verfolgt:

- Die Daten von acht Klimamodellen sollen mit einem Messdatensatz verglichen und bezüglich ihrer Güte ausgewertet werden, um allgemeine Stärken und Schwächen der Modelle aufzuzeigen. Dies erfordert die Verwendung unterschiedlicher Fehlermasse, damit die Auswertung auf verschiedenen Ebenen stattfinden kann. So können die mittleren Abweichungen durch verschiedene Mittelwertmasse unterschiedlicher Aussagekraft differenziert beschrieben werden und durch die Benutzung räumlicher Gütemasse Aussagen zur Struktur der Felder gemacht werden. Zusätzlich zur Untersuchung der jährlichen Mittel erlaubt die saisonale (jahreszeitliche) Auswertung einen differenzierteren Vergleich.
- Es soll, sofern die Resultate es zulassen, eine Rangierung der Modelle bezüglich der einzelnen Fehlermasse erstellt und sowohl ein bestes wie auch ein schlechtestes Modell gefunden werden. Hier gilt speziell, dass eine Rangierung nur im Zusammenhang mit den benutzten Fehlermassen im definierten Untersuchungsraum und bezüglich der verwendeten Variablen über die Periode von 1961 bis 1990 interpretiert werden darf.
- Die Modelle derselben Modellfamilie sollen miteinander verglichen werden. Zu diesem Zweck werden sechs Datensätze von drei verschiedenen Modellfamilien verwendet (siehe Abschnitt 2.1), wobei jeweils zwischen dem älteren Vorgängermodell und dem neueren Nachfolgemodell eine technische Weiterentwicklung steht. Hier geht es um die Frage, ob bei neueren Modellen auch eine Verbesserung in der Übereinstimmung der Simulationsdaten mit den Messdaten auf regionaler Ebene festzustellen ist.

- Mit dieser Arbeit soll ein allgemeiner Beitrag an die Validierung von Klimamodellen auf regionaler Ebene geleistet werden, wie es vom IPCC gefordert wird (IPCC 2001a). Aus diesem Grund soll die Auswertung systematischen Charakter haben.

Letztlich sollen nicht nur Aussagen zu den einzelnen Modellen vorliegen, sondern, wie dies bei Vergleichsstudien üblich ist (z.B. Gates et al. 1999 oder Lambert und Boer 2001), mit Hilfe von Mittelwertbildungen aller verwendeten Modelldatensätze (Model Mean) Gesamtaussagen gemacht werden können. Dazu ist sowohl eine Mittelung der Differenzfelder wie auch die Bildung von zonalen Mitteln in Abschnitt 4.2 vorgesehen.





# Kapitel 2

## Daten und Methoden

Die Modelldatensätze der unten genannten Klimamodelle und der Messdatensatz wurden freundlicherweise von D. Gyalistras zur Verfügung gestellt. Im ersten Teil dieses Kapitels werden die Daten und Modelle systematisch vorgestellt. Der zweite Teil widmet sich der Methodik, wobei zwischen dem Verfahren zur Eingrenzung des nordatlantisch-europäischen Raums und der eigentlichen Vergleichsmethodik unterschieden wird.

### 2.1 Analyse- und Modelldaten

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Bodendruckdatensätze (SLP) folgender acht globaler Zirkulationsmodelle (General Circulation Models GCMs) verwendet: die beiden ‘Canadian Global Coupled Climate Model 1‘ und ‘Canadian Global Coupled Climate Model 2‘ des ‘Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis‘, das japanische Modell des ‘Center for Climate System Research‘ der Universität Tokyo, das australische Modell der ‘Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation‘, die beiden ‘ECMWF Model, modified in HAMBURG/Large Scale Geostrophic Ocean GCM‘ und ‘ECMWF Model, modified in HAMBURG/Isopycnal Ocean Model‘ des Max-Planck Instituts für Meteorologie in Hamburg und die beiden ‘Hadley Centre Climate Model 2‘ und ‘Hadley Centre Climate Model 3‘ des ‘Hadley Centre for Climate Prediction and Research‘ in Exeter und Bracknell.

Sämtliche Datensätze wurden vorgängig auf Vollständigkeit überprüft (Kernen und Gyalistras 2002). Als Referenzdaten dienen die Analysedaten von ‘Trenberth’s Northern Hemisphere Monthly Sea-Level Pressure‘ (Trenberth und Paolino 1980). Ihre Qualität wurde ebenfalls mehrfach überprüft und wird besonders im nordatlantisch-europäischen Raum als gut bezeichnet (Jones et al. 1999). Sowohl Modelldaten wie Messdaten sind SLP-Monatsmittel der Nordhemisphäre von 22.5° N bis 87.5° N und liegen gegittert für die 30-jährige Periode von 1961 bis 1990 vor. Die Modelldaten wurden vorgängig alle auf

ein  $5^\circ \times 5^\circ$ -Gitter uminterpoliert, damit die Maschenweite mit jener der Referenzdaten übereinstimmt (Kernen und Gyalistras 2002). Die Umrechnung erfolgte mit dem ‘Procedural INterface for GRIB formatted Objects’ (PINGO), welches von der ‘Deutschen Klimarechenzentrum GmbH’ entwickelt wurde (Waszkewitz et al. 2001).

### 2.1.1 Canadian Global Coupled Climate Model 1

Die erste Version des kanadischen Modells (im Folgenden mit CCC1 in der Literatur auch mit CGCM1 abgekürzt) und dessen Kontrolllauf sind in Flato et al. (2000), Boer et al. (2000a) sowie Boer et al. (2000b) beschrieben. Die atmosphärische Komponente des Klimamodells stützt auf das Atmosphärenmodell AGCM2 und wird in McFarlane et al. (1992) beschrieben. Es handelt sich um ein spektrales Modell mit einer T32-Auflösung<sup>1</sup>. Dies entspricht hier einer horizontalen Auflösung von  $3.75^\circ \times 3.75^\circ$ , also einer Maschenweite von etwa 417 km am Äquator. Die Atmosphäre ist in 10 Schichten<sup>2</sup> aufgelöst. Für den Ozean wird ein  $1.8^\circ \times 1.8^\circ$ -Gitter mit 29 Schichten verwendet. Das Modell ist flusskorrigiert und umfasst sowohl den Wärme- wie den Süßwasserfluss zwischen Ozean und Atmosphäre. Der Kontrolllauf fand über 150 Jahre statt (Lambert und Boer 2001). Es wird der Modelllauf des IS92a-Szenarios<sup>3</sup> verwendet, bei dem die Simulation nebst dem Greenhouse-Gas Forcing die Sulfat-Aerosole miteinbezieht. Bis zum Jahr 1990 dient der beobachtete  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre der Simulation als Forcing-Grundlage, danach rechnet das Modell mit einem jährlichen  $\text{CO}_2$ -Anstieg von 1% (Flato et al. 2000).

### 2.1.2 Canadian Global Coupled Climate Model 2

Eine detaillierte Beschreibung der zweiten Version des kanadischen Modells (im Folgenden mit CCC2 in der Literatur auch mit CGCM2 abgekürzt) findet sich in Flato und Boer (2001). Dieses Modell basiert auf der ersten Version CCC1 (siehe Abschnitt 2.1.1). Es rechnet ebenfalls mit einer atmosphärischen T32/10L-Auflösung und einem  $1.8^\circ \times 1.8^\circ$ -Gitter mit 29 Schichten im Ozean. Die Flusskorrektur umfasst den Wärme- und Süßwasserfluss. Die Hauptunterschiede zum Vorgängermodell liegen zum einen in der Parametrisierung der Ozeandurchmischung. Das bisherige horizontal-vertikale Durchmischungsschema wur-

---

<sup>1</sup>Die Auflösung von Klimamodellen wird beschränkt durch die maximal mögliche, mathematische Auflösung sog. harmonischer Wellen. Diese können triangulär (T) oder rhomboidal (R) begrenzt (truncated) sein. T32 steht für 32 aufgelöste Wellen mit triangulärer Truncation. Für weitere Ausführungen wird auf Krüger (2002) und Stocker (2002) verwiesen.

<sup>2</sup>Bei Klimamodellen erfolgt die vertikale Unterteilung in Schichten (Abkürzung ‘L’ von Levels).

<sup>3</sup>Es gibt verschiedene vom IPCC beschriebene Szenarien für die zukünftige Emissionsentwicklung, auf die sich Klimaexperimente bei der Berechnung stützen. 1992 wurden sechs Emissionszenarien IS92a-f definiert. IS92a gilt als mittleres Szenario (‘weiter wie bisher’). Nähere Angaben können bei IPCC (1992) gefunden werden.

de durch eine Isopyknen-Parametrisierung<sup>4</sup> ersetzt (Gent und McWilliams 1990). Weiter wurde die Meer-Eis-Dynamik auf neuen Grundlagen (Flato und Hibler 1992) berechnet und die Flusskorrektur justiert. Der Kontrolllauf fand über 150 Jahre statt (Lambert und Boer 2001). Hier wird der Modelllauf des SRES-Szenario B2<sup>5</sup> verwendet, bei dem die Sulfat-Aerosole mitberücksichtigt sind.

### 2.1.3 Center for Climate System Research

Das japanische Modell der Universität Tokyo (im Folgenden mit CCSR in der Literatur auch mit CCSR/NIES abgekürzt) ist in Emori et al. (1999) beschrieben. Es arbeitet mit einer T21/L20-Auflösung. Das entspricht hier einer horizontalen Auflösung von  $5.6^\circ \times 5.6^\circ$ , also einer Maschenweite von etwa 622 km am Äquator. Die Maschenweite ist damit etwas grösser als die vorgenommene Umrechnung aller Modelldaten auf ein  $5^\circ \times 5^\circ$ -Gitter. Für die Ozeankomponente wird das NIES-Modell (National Institute of Environmental Studies) verwendet. Es arbeitet mit einer T42/L17-Auflösung. Das entspricht hier einer horizontalen Auflösung von  $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ , also einer Maschenweite von rund 311 km am Äquator. Bei der Flusskorrektur wird der Wärme- und Süßwasserfluss berücksichtigt. Der Kontrolllauf fand über 200 Jahre statt (Lambert und Boer 2001). Die vorliegenden Daten beziehen sich auf den Modelllauf des IS92a-Szenarios, bei dem die Sulfat-Aerosole mitberücksichtigt sind.

### 2.1.4 Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation

Das australische Modell (im Folgenden mit CSIR in der Literatur auch mit CSIRO abgekürzt) wird in Gordon und O'Farrell (1997) beschrieben. Es arbeitet mit einer atmosphärischen R21/L9-Auflösung, was hier einer horizontalen Auflösung von  $3.2^\circ \times 5.6^\circ$  (lat  $\times$  lon) entspricht. Die Maschenweite beträgt demnach in West-Ost-Richtung rund 625 km und in Nord-Süd-Richtung etwa 350 km am Äquator. Beim Ozeanmodell wird horizontal dieselbe Auflösung verwendet, in der Vertikalen jedoch mit 21 Schichten gerechnet. Die Flusskorrektur umfasst neben dem Wärme- und Süßwasserfluss auch den Impulsfluss. Für den Kontrolllauf wurden 100 Jahre simuliert (Lambert und Boer 2001). Hier wird der Modelllauf des SRES-Szenarios B2 verwendet. Neben dem Greenhouse-Gas Forcing sind auch die Sulfat-Aerosole mitberücksichtigt.

---

<sup>4</sup>Die simulierte Durchmischung des Ozeans folgt diffusionsartig dem Dichtegradienten des Meerwassers. Isopyknen sind Linien gleicher Dichte. Für weitere Informationen siehe Kleinen (2000).

<sup>5</sup>Die Emissionsszenarien wurden später auf 40 erweitert. Siehe Nakicenovic und Swart (2000)

### 2.1.5 ECMWF Model, modified in HAMburg/Large Scale Geostrophic Ocean GCM

Das dritte am Max-Planck Institut entwickelte Modell (im Folgenden mit ECHAM3 in der Literatur auch mit ECHAM3/LSG abgekürzt) wird in Cubasch et al. (1995), Cubasch et al. (1997) und Voss et al. (1998) beschrieben. Es handelt sich um ein modifiziertes Modell des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), das ursprünglich in der operationellen Wettervorhersage verwendet wurde. Es arbeitet mit einer atmosphärischen T21/L19-Auflösung (siehe Abschnitt 2.1.3). Die Ozeankomponente wird durch das LSG-Modell (Large Scale Geostrophic Ocean Model) betrieben und hat ebenfalls eine T21/L11-Auflösung. Das Modell ist flusskorrigiert und umfasst nebst dem Wärme- und Süßwasserfluss auch den Impulsfluss. Der Kontrolllauf fand über 100 Jahre statt (Lambert und Boer 2001). Es wird der Modelllauf des IS92a-Szenarios ohne Berücksichtigung der Sulfat-Aerosole verwendet.

### 2.1.6 ECMWF Model, modified in HAMburg/Isopycnal Ocean Model

Das vierte Modell des Max-Planck Instituts (im Folgenden mit ECHAM4 in der Literatur auch mit ECHAM4/OPYC3 abgekürzt) wird in Röckner et al. (1999) beschrieben. Es basiert wie sein Vorgänger auf dem Modell des ECMWF, arbeitet aber mit einer höheren atmosphärischen T42/L19-Auflösung (siehe NIES-Modell in Abschnitt 2.1.3) in Zeitschritten von 24 Minuten. Für die Ozeankomponente wird das OPYC3-Modell (Isopycnal Ocean Model) eingesetzt (Oberhuber 1993), welches ebenfalls mit einer T42-Auflösung rechnet, in der Vertikalen jedoch 11 Schichten verwendet. Die Flusskorrektur umfasst den Wärme- und Süßwasserfluss. Der Kontrolllauf fand über 240 Jahre statt (Lambert und Boer 2001). Hier wird der Modelllauf des IS92a-Szenarios ohne Berücksichtigung der Sulfat-Aerosole verwendet.

### 2.1.7 Hadley Centre Climate Model 2

Das zweite Modell des Hadley Centre for Climate Prediction and Research (im Folgenden mit HAD2 in der Literatur auch mit HadCM2 abgekürzt) ist in Johns et al. (1997) beschrieben. Die atmosphärische Auflösung wird mit T42/L19 angegeben und entspricht hier einer horizontalen Auflösung von  $2.5^\circ \times 3.75^\circ$  (lat  $\times$  lon), also einer Maschenweite von etwa 278 km in West-Ost-Richtung und 417 km in Nord-Süd-Richtung am Äquator. Die Ozeankomponente arbeitet mit derselben Auflösung, verwendet jedoch 20 vertikale Schichten. Die beiden Modelle werden einmal pro Tag gekoppelt und über den Wärme- und Süßwasserfluss flusskorrigiert. Der Kontrolllauf fand über 1085 Jahre statt (Lambert und Boer 2001). Hier wird der Modelllauf des IS92a-Szenarios ohne Berücksichtigung der Sulfat-Aerosole verwendet.

### 2.1.8 Hadley Centre Climate Model 3

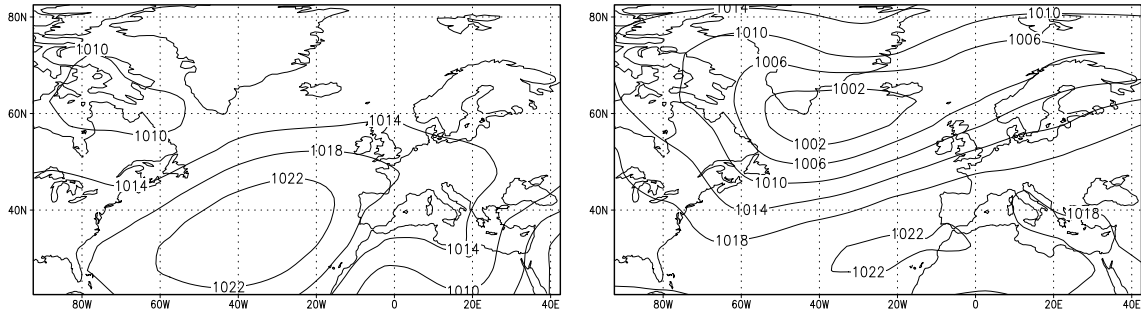
Das dritte Modell des Hadley Centre for Climate Prediction and Research (im Folgenden mit HAD3 in der Literatur auch mit HadCM3 abgekürzt) ist in Gordon et al. (2000) beschrieben. Die atmosphärische Auflösung entspricht jener des Vorgängermodells. Der Hauptunterschied zum HAD2 liegt einerseits in der höheren Auflösung des Ozeanmodells und andererseits in der nicht mehr verwendeten Flusskorrektur. Die Ozeanauflösung von  $1.25^\circ \times 1.25^\circ$  entspricht einer Maschenweite von ungefähr 139 km am Äquator und kommt damit den Wettervorhersagemodellen mit einer durchschnittlichen T106-Auflösung (Cubasch et al. 1995) sehr nahe. Das gilt bei diesem Modell als Hauptgrund für die nicht mehr benutzte Flusskorrektur (Gordon et al. 2000). Es ist somit die einzige hier verwendete Simulation ohne Flusskorrektur. Der Kontrolllauf fand über 400 Jahre statt (Lambert und Boer 2001). Hier wird der Modelllauf des SRES-Szenarios B2 verwendet. Nebst dem Greenhouse-Gas Forcing sind auch die Sulfat-Aerosole mitberücksichtigt.

## 2.2 Methoden

Zunächst muss aus den nordhemisphärischen Daten der Untersuchungsraum Nordatlantik-Europa eingegrenzt werden. Dabei gilt das besondere Augenmerk den klimamitbestimmenden Aktionszentren Azorenhoch (AH) und Islandtief (IT), deren Lagen sich im Jahresverlauf absolut und relativ zueinander verändern (Hastenrath 1985; Davis et al. 1997; Wanner et al. 2000; Portis et al. 2001). Abbildung 2.1 zeigt das gemittelte (1961-1990) SLP-Feld mit den ausgeprägten Druckgebieten im Juli und Januar. In den Sommermonaten bewegen sich AH und IT westwärts und nähern sich der ostamerikanischen Küste an, während sie im Winter weiter im Osten liegen und sich dabei meridional annähern (Wanner et al. 2000).

### 2.2.1 Eingrenzung des Untersuchungsraums

Ein Blick in die Literatur zeigt ein gemischtes Bild: zwar gibt es bislang einige Untersuchungen zu den beiden Druckgebilden AH und IT, doch die meisten Studien beschreiben mehrheitlich die Druckzentren und deren Verschiebung als die eigentliche räumliche Ausdehnung. So suchte beispielsweise Sahsamanoglou (1990) nach den Druckkernen des AHs und ITs im Bereich  $20^\circ \text{N} - 40^\circ \text{N}$  und  $50^\circ \text{W} - 20^\circ \text{W}$  beziehungsweise  $55^\circ \text{N} - 70^\circ \text{N}$  und  $60^\circ \text{W} - 10^\circ \text{E}$ . Diese Eingrenzung ist zweifellos zu eng, da in der vorliegenden Arbeit unter anderem auch die räumliche Ausdehnung betrachtet werden soll. Davis et al. (1997) beschränkten sich auf das AH und suchten in einem erweiterten Bereich von  $10^\circ \text{N} - 70^\circ \text{N}$  und  $120^\circ \text{W} - 40^\circ \text{E}$  nach Werten von 1020 hPa und höher. Mit einem mathematischen Algorithmus suchten Mächel et al. (1998) nach der Lage von AH und IT und gaben dabei den



**Abbildung 2.1:** Geographische Lage von Azorenhoch und Islandtief im Juli (links) und Januar (rechts) gemittelt über den Zeitraum von 1961 bis 1990 mit dem Messdatensatz aus Trenberth und Paolino (1980).

geographischen Raum von  $20^{\circ}\text{N}$ – $70^{\circ}\text{N}$  und  $55^{\circ}\text{W}$ – $5^{\circ}\text{W}$  vor. Ebenfalls einen Suchalgorithmus verwendeten Serreze et al. (1997), wobei sie sich allerdings auf das IT konzentrierten. Bei Studien, die sich mit der NAO befassen, wählte beispielsweise Hurrell (1995) den Bereich  $20^{\circ}\text{N}$ – $80^{\circ}\text{N}$  und  $90^{\circ}\text{W}$ – $40^{\circ}\text{E}$ , welcher in dieser Arbeit die Grundlage bilden soll.

Der Koordinatenursprung der Datensätze liegt jeweils von vier Gitterpunkten umgeben in der Maschenmitte. Bei einem  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ -Gitter heisst das, dass, wenn der Bereich von Hurrell (1995) abgedeckt werden soll, die nördliche Begrenzung bei  $82.5^{\circ}\text{N}$  und die westliche Begrenzung bei  $92.5^{\circ}\text{W}$  zu liegen kommt. Der südliche Rand liegt zwangsläufig bei  $22.5^{\circ}\text{N}$  (siehe Abschnitt 2.1). Im Osten stellt sich die Frage, ob die winterliche Bodenantizyklone beziehungsweise das sommerliche Hitzetief über Nordasien berücksichtigt werden soll. Kobel und Gyalistras (2002) schlagen  $62.5^{\circ}\text{E}$  als östliche Begrenzung vor. Dadurch könnten jedoch Teile der nordasiatischen Druckgebilde abgetrennt werden, was gerade im Westen beim IT und AH verhindert werden soll. Stützt man sich auf Hurrell (1995), liegt die östliche Abgrenzung bei  $42.5^{\circ}\text{E}$ , was hier übernommen wird. Der Betrachtungsraum wird daher mit folgenden Grenzen definiert:  $22.5^{\circ}\text{N}$ – $82.5^{\circ}\text{N}$  und  $92.5^{\circ}\text{W}$ – $42.5^{\circ}\text{E}$ .

## 2.2.2 Vergleichsmethodik

Aus den Modelldaten werden aus den Monatsmitteln jeweils die jährlichen sowie die saisonalen Mittel gebildet und mit den Analysedaten (Trenberth und Paolino 1980) verglichen. Dabei gliedert sich die Untersuchung im ersten Schritt in den Vergleich der Boden druckanomalien und der Standardabweichungen. Erstere geben Auskunft über die effektive Abweichung in Hektopascal (hPa) der Modelldaten von den Messdaten. Die Standardabweichungen werden als Mass für die Variabilität benutzt und haben ebenfalls die Einheit hPa. Mit den Differenzfelder aus den Standardabweichungen können Aussagen zur simulierten Variabilität der Klimamodelle gemacht werden.

Mathematisch gesehen wird beim Berechnen der Differenzfelder an jedem Gitterpunkt des Feldes die mittlere Abweichung ( $mA$ ) über die Zeit ermittelt. Sie wird mit folgender Formel berechnet:

$$mA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (2.1)$$

Dabei steht  $n$  für die Anzahl der Datenpunkte,  $x_i$  für die von den GCMs simulierten Datenpunkte und  $y_i$  für die Messdatenpunkte. Die Gleichung liefert im vorliegenden Fall ein zweidimensionales Feld. Die Ergebnisse können positive oder negative Werte annehmen. Sind sie positiv (negativ), wird von einer Überschätzung (Unterschätzung) gesprochen. Soll der Mittelwert über die Fläche gebildet werden, so wird Formel 2.1 zu

$$\bar{m}_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(\cos \varphi_i) \quad (2.2)$$

modifiziert und mit dem Cosinus der entsprechenden geographischen Breite gewichtet. Stellt man sich den Untersuchungsraum auf der Erdoberfläche vor, so liegen sowohl die nördlichen Eckpunkte ( $82.5^\circ \text{ N}/92.5^\circ \text{ W}$  und  $82.5^\circ \text{ N}/42.5^\circ \text{ E}$ ) wie die südlichen ( $22.5^\circ \text{ N}/92.5^\circ \text{ W}$  und  $22.5^\circ \text{ N}/42.5^\circ \text{ E}$ ) jeweils  $135^\circ$  (Längengrade) auseinander. Werden die effektiven Distanzen berechnet, erhält man im ersten Fall 1962 km und im zweiten 13884 km. Das heisst, mit zunehmender Breite liegen pro Flächeneinheit mehr Datenpunkte und es kommt zu einer 'Überbewertung' der hohen Breiten. Aus diesem Grund erfolgt in Formel 2.2 die Gewichtung mit dem Cosinus. Die Berechnungssoftware PINGO (Waszkewitz et al. 2001) berücksichtigt diesen Sachverhalt. Als Resultat erhält man das gewichtete Flächenmittel  $\bar{m}_F$ . Es entspricht dem mittleren Fehler über das Feld, der durch ein Modell verursacht wird. Dieses Fehlermass wird bei der Untersuchung sowohl bei den Bodendruckanomalien wie auch den Variabilitätsdifferenzen benutzt und tabellarisch aufgelistet. Es wird darauf hingewiesen, dass das gewichtete Flächenmittel immer im Zusammenhang mit dem Differenzfeld gesehen werden muss, da ein einzelner Mittelwert wenig über die Qualität eines zweidimensionalen Datensatzes aussagen kann. Werden die jeweiligen Maximal- und Minimalabweichungen tabelliert (siehe zum Beispiel Tabelle 3.1) können in Kombination mit der noch zu besprechenden Wurzel aus dem quadratischen Fehler und dem Differenzfeld Aussagen gemacht werden.

Im zweiten Schritt wird nebst der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler ( $WMQ$ ) der räumliche Korrelationskoeffizient  $r$  und der Anteil erklärter räumlicher Varianz ( $EV$ ) berechnet, um Aussagen über die Unterschiede in den Mustern machen zu können. Ersterer dient der Ergänzung zum oben beschriebenen gewichteten Flächenmittel und wird beim Vergleich der Bodendruckanomalien ( $W_{AN}$ ) und der Variabilitätsdifferenzen ( $W_{SD}$ ) eingesetzt. In der Untersuchung werden anstelle des  $WMQ$ s die vorhergenannten Kürzel verwendet. Hier steht ersatzweise für beide Varianten die Formel bezüglich des

Vergleichs der Bodendruckanomalien:

$$W_{AN} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2.3)$$

Dies ist die ungewichtete Formel. Wird ein Wert stellvertretend für das gesamte Feld gesucht, muss wie in Formel 2.2 mit dem Cosinus der geographischen Breite gewichtet werden. Der  $WMQ$  hat den Vorteil, dass er nur positive Werte annehmen kann. Durch die Quadrierung erhalten grössere Abweichungen mehr Gewicht als beim mittleren Fehler. Dies muss bei der Interpretation berücksichtigt werden.

Für den Feldervergleich dient der räumliche Korrelationskoeffizient  $r$ . Er wird gebildet aus dem Quotienten der Kovarianz ( $Cov$ ) und der Wurzel aus dem Produkt der Varianzen ( $Var$ ) der beiden zu vergleichenden Felder.

$$r(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{Cov(\vec{x}, \vec{y})}{\sqrt{Var(\vec{x}) \cdot Var(\vec{y})}} \quad (2.4)$$

Die Kovarianz und die Varianz (hier nur für  $x$ ) werden wie folgt berechnet:

$$Cov(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2.5)$$

$$Var(\vec{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.6)$$

eingesetzt in Formel 2.4 ergibt:

$$r(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.7)$$

Der Korrelationskoeffizient kann nur Werte von  $-1$  bis  $+1$  annehmen.  $-1$  bedeutet gegenteilige Korrelation,  $0$  keine Korrelation und  $+1$  völlige Korrelation. Im Folgenden gilt demnach: je näher der Wert bei  $+1$  liegt, desto besser korrelieren die Muster der betreffenden Modelldaten mit den Analysedaten.

Das Verhältnis aus mittlerem quadratischem Fehler ( $MQ$ ) und der Varianz der Analysedaten ( $Var(\vec{y})$ ) bildet den Anteil erklärter räumlicher Varianz ( $EV$ ). Der Quotient wird von der Konstanten  $1$  subtrahiert:

$$EV = 1 - \frac{MQ}{Var(\vec{y})} \quad (2.8)$$

Für den mittleren quadratischen Fehler ( $MQ$ ) und die Varianz der Analysedaten ( $Var(\vec{y})$ ) werden verwendet:

$$MQ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (2.9)$$



$$Var(\bar{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.10)$$

Formel 2.9 und 2.10 eingesetzt in 2.8 ergibt:

$$EV = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.11)$$

Die erklärte Varianz gibt in dieser Untersuchung denjenigen Varianzanteil an, der auf die Varianz der Analysedaten zurückzuführen ist. Es ist ein Mass für die Güte der Simulationsdaten. Die Subtraktion von der Konstanten 1 führt im Resultat zu Werten, die kleiner oder im besten Fall gleich 1 sind. Das ermöglicht eine einfache Umrechnung in %. Bei einem Ergebnis von 0 entsprechen sich die Werte von  $MQ$  und  $Var(\bar{y})$ , bei  $-1$  ist der  $MQ$  bereits doppelt so gross. Die weiter oben erwähnte Gewichtung mit dem Cosinus der geographischen Breite gilt auch bei diesem Fehlermass, wenn das Untersuchungsgebiet mit einem Wert repräsentiert werden soll.

Im Vergleich mit anderen Studien (Gates et al. 1999; Covey et al. 2000; Lambert und Boer 2001; Covey et al. 2003; Stephenson und Pavan 2003) ist es bei Modellvalidierungen unüblich Signifikanzniveaus von statistischen Tests in den Abbildungen darzustellen. Trotzdem werden hier in den Bodendruckdifferenzfeldern zusätzlich zwei Signifikanzniveaus (95% und 99%) des Wilcoxon-Tests berechnet und eingetragen. Bei den Differenzfeldern der Standardabweichungen wird die übliche Praxis übernommen und auf eine Darstellung verzichtet. Der Wilcoxon-Test ist ein nichtparametrischer Test. Das hat den Vorteil, dass die Daten verteilungsfrei sein dürfen, da nur die Ranginformationen zur Berechnung der Prüfgrösse verwendet werden; allerdings neigen nichtparametrische Verfahren zu konservativeren Entscheidungen bezüglich der  $H_0$ -Hypothese ( $H_0$  wird seltener verworfen). Im Zentrum steht die Frage, ob die Anomalien signifikant von den möglichen Eigenschwankungen der Analysedaten von Trenberth und Paolino (1980) abweichen oder nicht.

$$H_0 : \mu_{Mod} = \mu_{Ref} \quad H_1 : \mu_{Mod} \neq \mu_{Ref} \quad (2.12)$$

Bei Ablehnung der Nullhypothese  $H_0$  kann mit 95% beziehungsweise 99% Sicherheit gesagt werden, dass die Anomalien auf Abweichungen der Modelldaten zurückzuführen sind und nicht innerhalb des (zufälligen) Schwankungsbereich der Messdaten liegen. In den Grafiken sind die p-Werte 0.01 (99%-Signifikanzniveau) und 0.05 (95%-Signifikanzniveau) des Wilcoxon-Tests eingezeichnet. Die Vorgehensweise wurde von Schönwiese (2000) und Hüsler und Piot (1999) übernommen. Für weitere Informationen wird auf diese Publikationen verwiesen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Untersuchung bezüglich des mathematisch-formalen Zugangs auf zwei verschiedenen Herangehensweisen basiert. Einerseits werden die Unterschiede in den Amplituden ermittelt und andererseits die räumliche

Struktur der Felder verglichen. Rein methodisch kann jedes Fehlermass im Feld dargestellt oder stellvertretend als gewichteter Mittelwert angegeben werden. In der vorliegenden Arbeit wird beides zur Illustration verwendet, jedoch werden nicht alle Fehlermasse in allen Unterkapiteln benutzt.

# Kapitel 3

## Resultate

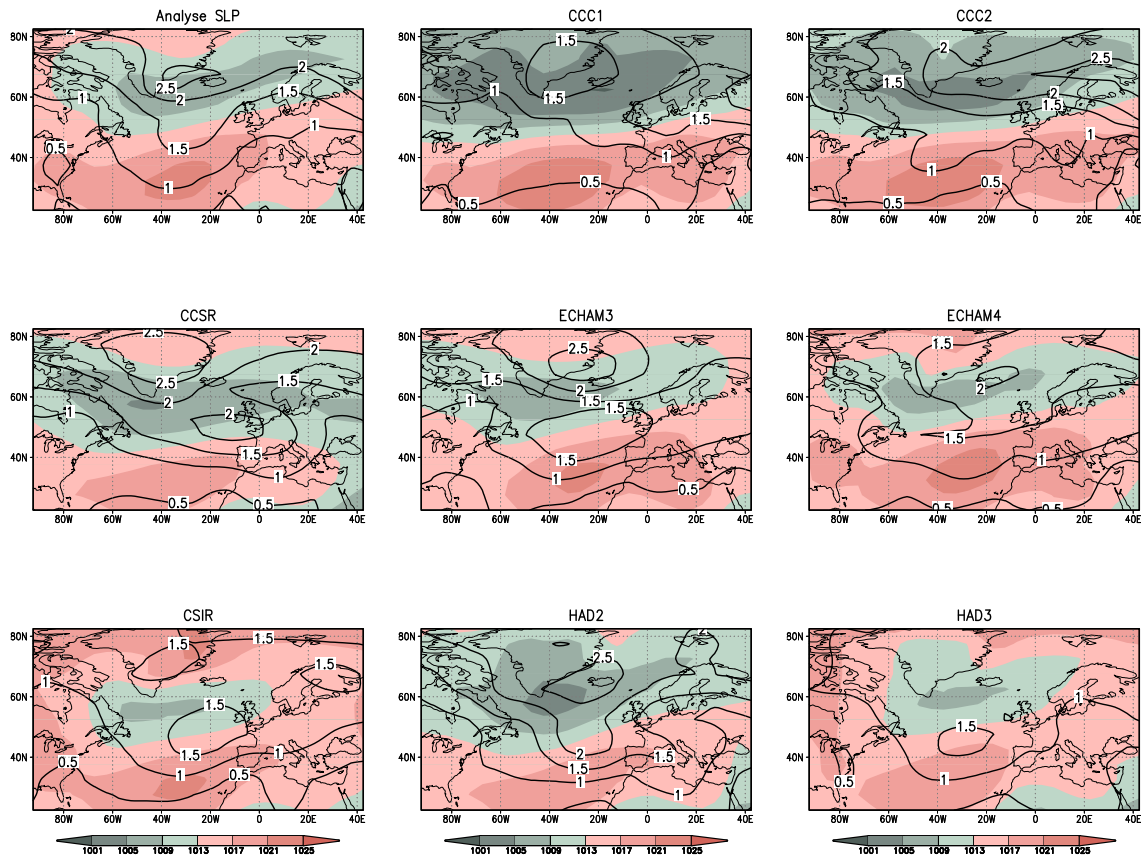
Der Vergleich von simulierten Daten mit den Analysedaten hat hier systematischen Charakter und gliedert sich in die Untersuchung der jährlichen und saisonalen Mittel. Der Schwerpunkt liegt dabei in den Betrachtungen der Bodendruck- und Variabilitätsdifferenzen. Für die exakten Maximalabweichungen der in den Grafiken dargestellten Anomalien und der anderen Fehlermasse wird auf die jeweilige Tabelle im letzten Unterabschnitt verwiesen. Die Begriffe Bodendruckfeld und Druckfeld, Bodendruckanomalie und Anomalie, Bodendruckvariabilität, Variabilität und Standardabweichungen sowie Analysedaten, Messdaten und Referenzdaten werden im Folgenden als Synonyme verwendet. Die Besprechungsreihenfolge entspricht der in Abbildung 3.2 dargestellten Modellordnung. Die Reihenfolge in den Übersichtsabbildungen jeweils zu Beginn des Abschnitts wurde so gewählt, dass die Modellefamilien paarweise nebeneinander platziert sind und dadurch die direkte Vergleichsmöglichkeit vereinfacht wird.

### 3.1 Jährliche Mittel

#### 3.1.1 Druckfelder

Einen einführenden Überblick gibt Abbildung 3.1. Farblich dargestellt sind die Jahresmittel der Bodendruckfelder und konturiert die dazugehörigen Standardabweichungen der Analysedaten und der verwendeten Klimamodelle über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990. Der Isolinienabstand beträgt 4 hPa beim Bodendruck und 0.5 hPa bei der Standardabweichung. Es wird vorweggenommen, dass bei der saisonalen Untersuchung (siehe Abschnitt 3.2) der Isolinienabstand der Standardabweichung aus Übersichtsgründen doppelt so gross gewählt ist.

Wird zunächst der Bodendruck betrachtet, zeigen die Referenzdaten in den hohen Breiten den langgestreckten Bereich tieferen Drucks des ITs. Die längliche Form bis über Nordeuropa ist eine Folge der Mittelung, da während den Wintermonaten nebst dem west-



**Abbildung 3.1:** Mittlere, jährliche Bodendruckfelder in hPa (schattiert) und Standardabweichungen (konturiert) der Analysedaten (oben links) und der verwendeten Klimamodelle über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990. Der Isolinienabstand beträgt 4 hPa bei den Bodendruckfeldern und 0.5 hPa bei den Standardabweichungen.

lich von Island gelegenen Kern des ITs (siehe Abbildung 2.1) gelegentlich ein Sekundärzentrum östlich von  $0^\circ$  beobachtet werden kann (Sahsamanoglou 1990; Wanner et al. 2000). Das AH liegt westlich von Marokko und erreicht in seinem Kern rund 1022 hPa. Über Nordgrönland, nahe der westlichen Begrenzung des Untersuchungsraums steigt der mittlere Bodendruck über 1013 hPa. Die grösste Variabilität zeigen die Analysedaten in den hohen Breiten und im Bereich des ITs, während sie südlich und in der Region des AHs kleiner ist. Die Ursachen liegen einerseits in der relativ zum AH stärker ausgeprägten Amplitude bezüglich des Bodendrucks im zeitlichen Verlauf und andererseits im vergleichsweise grösseren Wanderradius des ITs (Sahsamanoglou 1990; Wanner et al. 2000), so dass an einem Raumpunkt im Mittel grössere Druckschwankungen zu beobachten sind. Grundsätzlich ist dieser Nord-Süd-Trend bei allen Modellen festzustellen, obwohl deutliche Unterschiede auszumachen sind.

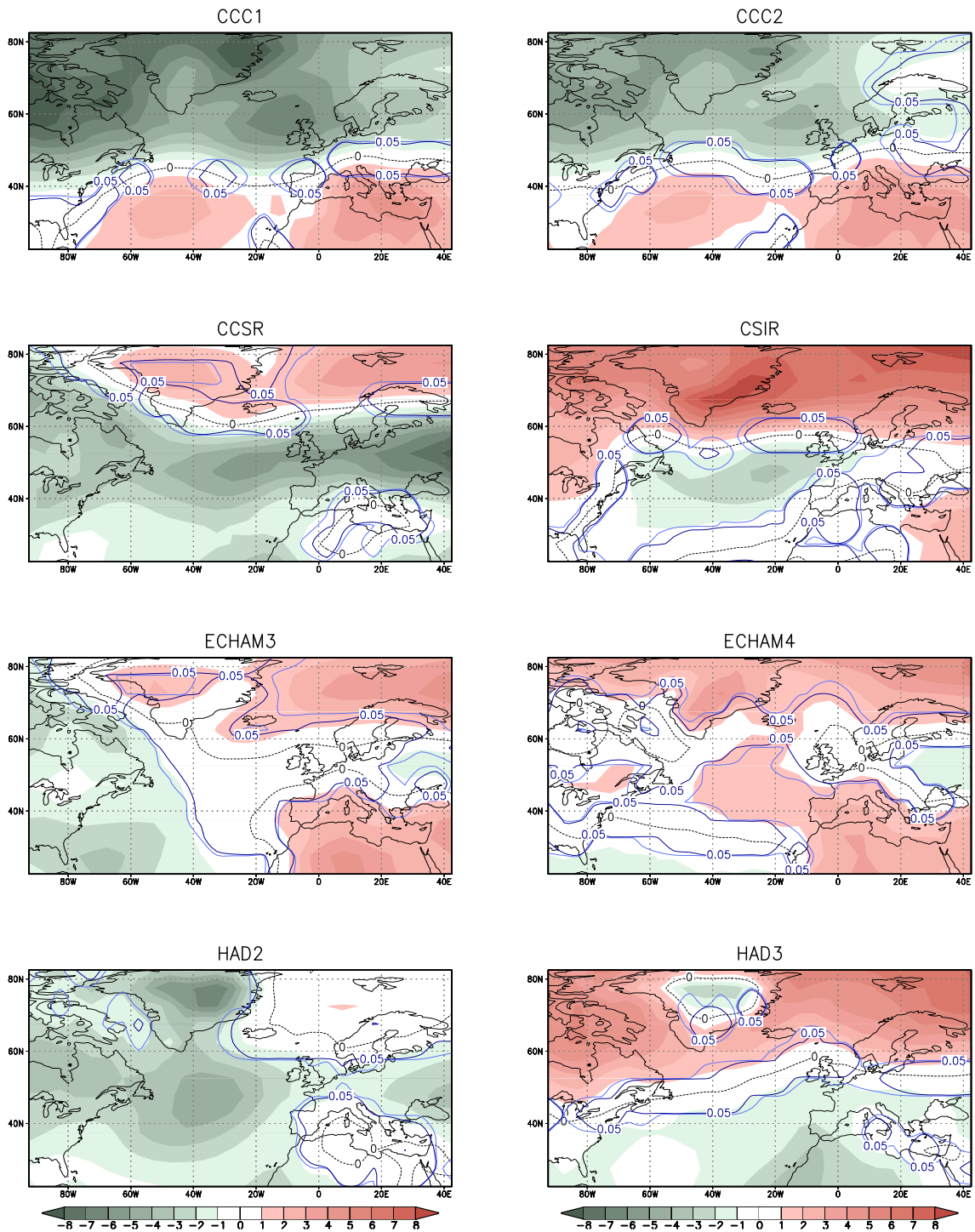
CCC1 und CCC2 zeigen im Bereich zwischen den Druckzentren und des AHs ein

ähnliches Muster. Ersteres simuliert die Region des ITs in einem weiteren Bereich und im Vergleich zu den Messdaten mit zu tiefem Druck. In den hohen Breiten liegen bei beiden Modellen sämtliche Werte unterhalb von 1013 hPa. Beide zeigen die grosse Variabilität des ITs, simulieren jedoch die grössten Standardabweichungen über Nordosteuropa. Beim CCSR findet man den niedrigsten Druck bei der Südspitze Grönlands. Im Unterschied zu den Messdaten zieht sich das Band tieferen Drucks durch den gesamten Untersuchungsraum. Beim CSIR ist der Bereich des ITs kleiner und zu südlich gelegen. Über Ostgrönland werden Werte über 1021 hPa erreicht. Bei beiden Modellen kann nebst dem Variabilitätsmaximum über Grönland ein weiterer Bereich erhöhter Variabilität nahe Frankreich und den Britischen Inseln ausgemacht werden. ECHAM3 und ECHAM4 scheinen die Druckwerte angemessener wiederzugeben, wenn auch beim ECHAM3 das AH ostwärts verschoben ist und beim ECHAM4 in den hohen Breiten, besonders über Grönland, höherer Bodendruck festgestellt werden kann. Ersteres simuliert die grösste Variabilität im Südosten Grönlands und beim neueren ECHAM4 liegt das Variabilitätsmaximum bei Island. Zwischen HAD2 und HAD3 gibt es vor allem im Bereich des ITs markante Unterschiede. Während beim HAD2 die Region tieferen Drucks ein viel grösserer Bereich abdeckt, simuliert HAD3 im Westen Werte deutlich über 1013 hPa. Bezüglich der Analysedaten dürfte beim HAD2 tendenziell eine Unterschätzung und beim HAD3 eine Überschätzung des Bodendruckfeldes vorliegen. Interessanterweise erreicht beim HAD3 die Standardabweichung im Untersuchungsraum nie den Wert 2. Demnach dürften die niederen Breiten im Gegensatz zu den hohen bezüglich der Variabilität deutlich besser simuliert werden (siehe Abbildung 3.3).

### 3.1.2 Anomalien

Abbildung 3.2 zeigt die Differenzfelder des Bodendrucks in hPa, gebildet aus den jeweiligen Modelldaten und den Referenzdaten bezüglich des Jahresmittels. Positive Werte bedeuten eine Überschätzung durch das Modell. Das heisst, das Modell simuliert an der betreffenden Stelle das Druckfeld mit höheren Werten gegenüber den Messdaten. Entsprechend weisen negative Werte auf eine Unterschätzung hin. Dies gilt auch für den Bereich des ITs. Wird in diesem Zusammenhang von Unterschätzung gesprochen, sind im Folgenden ausschliesslich die Druckwerte gemeint. Eingezeichnet sind zusätzlich die p-Werte 0.05 (dunkelblaue, dickere Linie) und 0.01 (hellblaue, dünnere Linie) des Wilcoxon-Test. Es kann festgestellt werden, dass in Regionen geringer Differenzen meistens keine Signifikanz gegeben ist. Das gilt für alle Modelle und wird sinnvollerweise nicht mehr im Einzelnen wiederholt.

Beim CCC1 und CCC2 zeigen sich die deutlichsten signifikanten Abweichungen in den mittleren Breiten. Ersteres unterschätzt mit einer Differenz von gut 7 hPa grosse Teile des Bodendruckfeldes über Nordgrönland, der Baffininsel und der Hudson Bay. Über



**Abbildung 3.2:** Bodendruckanomalien (Modelldaten–Messdaten) in hPa im nordatlantisch-europäischen Raum bezüglich des Jahresmittels über die Periode von 1961 bis 1990. Überschätzungen durch das betreffende Klimamodell sind rot schattiert, Unterschätzungen grün. Dunkelblaue Linien stellen den p-Wert 0.05 (95%-Signifikanzniveau) und hellblaue Linien den p-Wert 0.01 (99%-Signifikanzniveau) des Wilcoxon-Tests dar.

Ostgrönland liegt ein kleiner Bereich mit Werten um  $-9$  hPa. Generell sind die Druckwerte in der Region des ITs deutlich zu tief. Von der Tendenz her sieht es beim CCC2 ähnlich aus, nur werden nicht ganz so grosse Abweichungen erreicht. Die tiefsten Werte liegen mit  $-6$  hPa wiederum über Ostgrönland. Die niederen Breiten mit dem AH werden verhältnismässig gut wiedergegeben. Über dem östlichen Mittelmeer liegen die Abweichungen bei maximal rund  $+4$  hPa. Die Nulllinien verlaufen bei beiden Modellen ähnlich. Beim CCC1 kommt sie leicht südlicher zu liegen. Sie markiert meistens Gebiete mit niedriger oder keiner Signifikanz. CCSR und CSIR zeigen im Vergleich mit den vorherigen Modellen ein umgekehrtes Bild. Mit Ausnahme des Nordwestens beim CCSR wird das Bodendruckfeld in den hohen Breiten von beiden Modellen überschätzt. Beim CSIR werden die Abweichungen mit mehr als  $+8$  hPa über Südostgrönland und dem Nordosten des Untersuchungsraums am deutlichsten, während die grössten negativen Abweichungen in einem Band über Südengland mit Werten um  $-5$  hPa und im Osten mit Werten um  $-8$  hPa beim CCSR zu finden sind. Gute Resultate liefert das CSIR über Mitteleuropa und dem Alpenraum. Bemerkenswert ist das Bild von ECHAM3: während bei den bisher besprochenen Klimamodellen tendenziell eine breitenkreisparallele Grenze zwischen positiven und negativen Anomalien vorliegt, neigt ECHAM3 zu einer eher meridional verlaufenden Grenze. Eine saisonale Betrachtung dürfte in diesem Zusammenhang interessant sein. Signifikante Überschätzungen liegen über Nordeuropa und der gesamten Mittelmeerregion vor. Sie erreichen Maximalwerte über dem zentralen Nordafrika und im Nordosten. Bei Florida und nördlich der Hudson Bay können grössere Negativanomalien ausgemacht werden. Beim ECHAM4 dominieren die positiven Anomalien. Das Bodendruckfeld wird in den hohen Breiten ebenso überschätzt wie im gesamten Mittelmeerraum. Mit rund  $+4$  hPa über Südgrönland und über  $+5$  hPa im Nordosten des Untersuchungsraums liegen die grössten Abweichungen in der Polarregion. Im Alpenraum wird bei einem Gitterpunkt die  $+2$  hPa-Isolinie überschritten. Im Bereich des AHs zeigen sich nur geringfügige Abweichungen und über grossen Teilen des Nordwestatlantiks und Nordostamerikas liegen sie zwischen  $0$  hPa und  $+1$  hPa. Wie oben erwähnt, resultieren beim HAD2 mehrheitlich Negativwerte. Die deutlichste Abweichung liegt bei diesem Modell über Ostgrönland mit Werten unter  $-6$  hPa. Ein weiterer Bereich mit Unterschätzungen von knapp  $-5$  hPa liegt über dem zentralen Nordatlantik. Das Bodendruckfeld im Mittelmeerraum und Nordeuropas wird gut simuliert. Zumindest können die geringen Differenzen in dieser Region auf Grund der nicht gegebenen Signifikanz nicht mehr als Modellfehler bezeichnet werden. Nordwestlich von Norwegen liegen in einem kleinen Bereich die grössten jedoch nicht signifikanten positiven Abweichungen in der Darstellung. Beim HAD3 fallen zum einen die teils deutlichen Überschätzungen in den hohen Breiten und zum anderen der inselhaft Bereich negativer Werte über Grönland auf. Maximalwerte befinden sich im Nordosten und über den kanadischen Inseln, während das Bodendruckfeld über Zentralgrönland mit

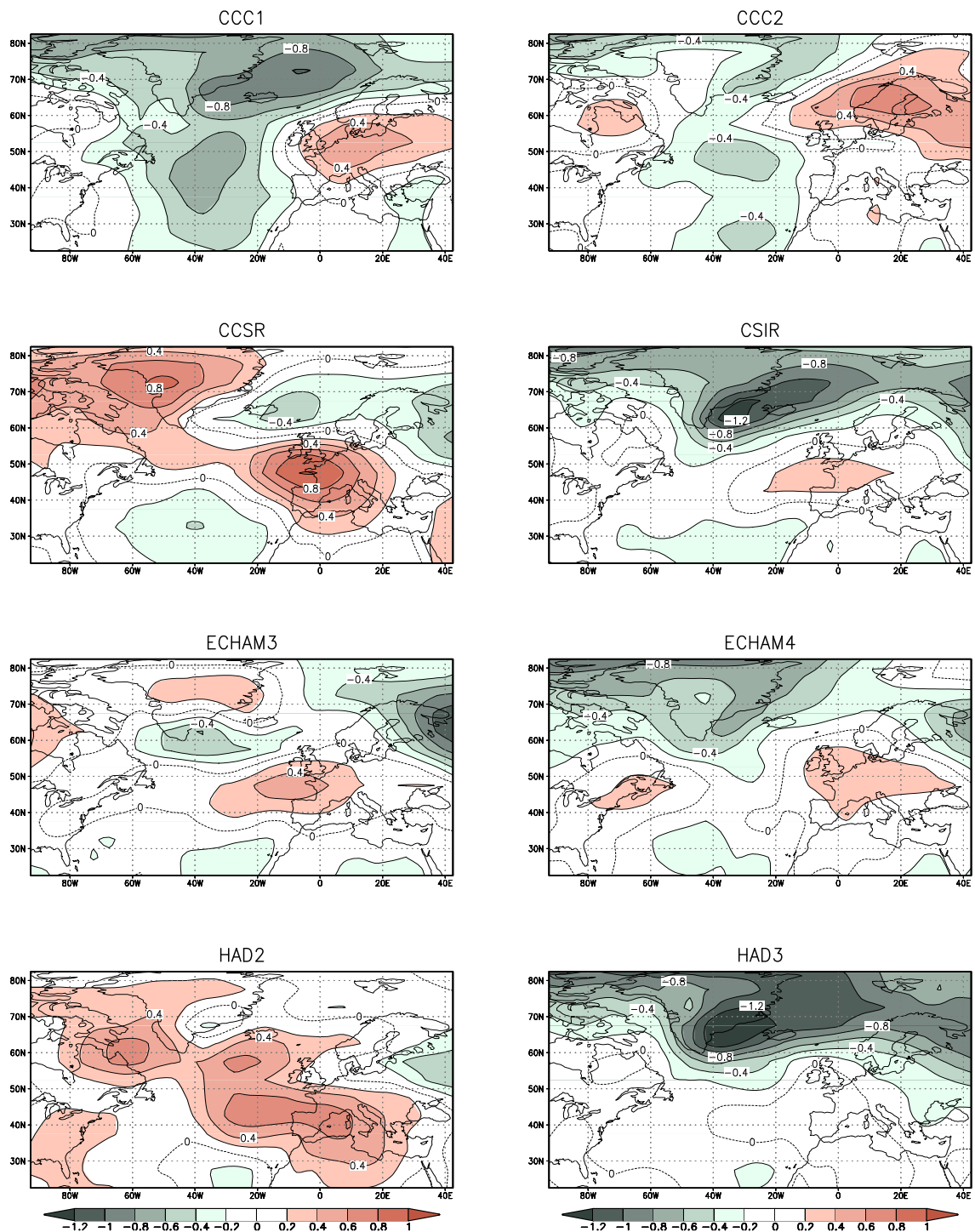
rund -2 hPa unterschätzt wird. Grössere negative Abweichungen befinden sich einzig über Nordwestafrika. Im östlichen Mittelmeerraum stimmen die Simulationsdaten gut mit den Messdaten überein.

### 3.1.3 Variabilität

In der folgenden Abbildung 3.3 sind die Differenzfelder der Standardabweichungen bezüglich des Jahresmittels über die Untersuchungsperiode dargestellt. Positive Werte bedeuten eine Überschätzung und negative eine Unterschätzung der Bodendruckvariabilität durch das betreffende Klimamodell. Werte zwischen -0.2 hPa und +0.2 hPa wurden nicht farbig unterlegt.

Beim CCC1 liegen die grössten Abweichungen in den hohen Breiten und im mittleren Nordatlantik. Insbesondere die Variabilität des ITs wird deutlich unterschätzt. Nordöstlich von Island ist ein kleiner Bereich mit einem Negativwert von rund -1 hPa auszumachen. Dagegen wird die Variabilität des Bodendruckfelds über dem nördlichen Mitteleuropa überschätzt. Über Deutschland, den Beneluxstaaten und dem nordöstlichen Frankreich werden Werte von über +0.4 hPa erreicht. Die Variabilität über den Britischen Inseln, der Mittelmeerregion und Teilen Skandinaviens werden gut simuliert. Einzig über dem östlichen Mittelmeer ist eine geringfügige Unterschätzung festzustellen. Interessant ist, dass sowohl beim IT wie auch beim AH die Variabilität durch das Modell unterschätzt wird. Vergleicht man mit dem CCC2, fällt auf, dass die Unterschätzung in den vorhergenannten Bereichen grösstenteils immer noch vorhanden ist, aber weniger deutlich ausfällt. Über Europa liegen positive Abweichungen von über +0.6 hPa. Dieser Bereich scheint im Vergleich zum CCC1 weiter nördlich zu liegen. Gesamthaft ist der Flächenanteil von Werten zwischen -0.2 hPa und +0.2 hPa beim CCC2 grösser als beim CCC1. Das CCSR tendiert in den hohen Breiten und über Westeuropa zu einer Überschätzung. Bei Westgrönland werden Werte von +0.8 hPa und über Westfrankreich sogar Werte von +1.0 hPa erreicht. Negativwerte befinden sich über Island und östlich davon sowie im Bereich des AHs. Vom CSIR wird die Variabilität des ITs deutlich unterschätzt. Westlich von Island liegt ein Kerngebiet mit Werten von -1.2 hPa. Hingegen fällt die Überschätzung über Europa mit Werten um +0.2 hPa geringer aus als bei den vorangehenden Modellen. ECHAM3 und ECHAM4 zeigen besonders in den hohen Breiten einige Unterschiede. Ersteres tendiert im Norden und Nordwesten des Untersuchungsraums, abgesehen von der Südspitze Grönlands, zu einer leichten Überschätzung, während sich ECHAM4 deutlich gegenteilig verhält und ganz im Nordwesten Werte von -0.8 hPa erreicht. Auf den ersten Blick scheint das ältere ECHAM3 differenzierter zu simulieren. Über West- und Nordwesteuropa liegt bei beiden Modellen ein Bereich mit positiven Werten, doch fallen diese beim ECHAM4 geringer aus. Interessant sind die beiden Hadley Modelle. Während sich beim HAD2 grösstenteils po-





**Abbildung 3.3:** Differenzfelder der Standardabweichungen bezüglich des Jahresmittels über die Periode von 1961 bis 1990. Positive Werte sind rot schattiert und bedeuten eine Überschätzung der Variabilität durch das betreffende Klimamodell. Negative Werte sind grün schattiert und bedeuten eine Unterschätzung. Der Isolinienabstand beträgt 0.2hPa.

sitive Abweichungen zeigen, sind beim HAD3 fast nur Negativwerte festzustellen. HAD2 überschätzt sowohl die Variabilität des ITs wie auch die des AHs. Bezüglich des ITs zeigen sich zwei Kernbereiche mit Werten von mindestens +0.6 hPa. Beim HAD3 fällt die deutliche Unterschätzung der Variabilität in den hohen Breiten auf. Westlich von Island liegen die Tiefstwerte bei -1.5 hPa. Mit Ausnahme des CSIRs werden bei keinem anderen Modell tiefere Abweichungen im Untersuchungsraum im Zusammenhang mit Abbildung 3.3 festgestellt. Dagegen wird die Variabilität im Bereich des AHs sehr gut simuliert. Im Unterschied zu den restlichen Modellen liegt hier keine nennenswerte Abweichung vor.

### 3.1.4 Zusammenfassende Fehlerübersicht der jährlichen Betrachtung

In Tabelle 3.1 sind die verwendeten Fehlermasse aufgelistet. Nebst den maximalen Abweichungen ( $-AN$ ,  $+AN$ ,  $-SD$  und  $+SD$ ) aus den bisher besprochenen Differenzfeldern sind die dazugehörigen gewichteten Mittelwerte ( $\bar{m}_{AN}$  und  $\bar{m}_{SD}$ ), die jeweilige Wurzel aus den mittleren quadratischen Fehler ( $W_{AN}$  und  $W_{SD}$ ), die räumliche Korrelation ( $r$ ) und der Anteil erklärter räumlicher Varianz ( $EV$ ) eingetragen. Es wird darauf hingewiesen, dass die mittleren Fehler ( $\bar{m}_{AN}$  und  $\bar{m}_{SD}$ ) nicht unproblematisch sind, da sie grosse Abweichungen wegmitteln können. Sie müssen mit den anderen Fehlern und den Differenzfeldern kombiniert betrachtet werden. Nähere Angaben zur Verwendung sind in Abschnitt 2.2.2 aufgeführt. Denen im Text verwendeten Fehlerkürzel wird im singulären Gebrauch der männliche Artikel vorangestellt. Ausnahmen bilden die räumliche Korrelation und der Anteil erklärter räumlicher Varianz, denen der weibliche Artikel vorangestellt wird. Es werden nicht alle Werte aus der Tabelle kommentiert.

Von den acht verwendeten Klimamodellen unterschätzen vier das mittlere Bodendruckfeld; zwei überschätzen die mittlere Variabilität. CCC2, ECHAM3 und HAD3 liefern mit -0.27 hPa, +0.03 hPa und +0.04 hPa beim  $\bar{m}_{AN}$  die besten Resultate. Das CCSR weicht mit -2.01 hPa im Mittel am deutlichsten von den Messdaten ab. Betrachtet man den  $W_{AN}$  zusammen mit den Differenzfeldern (siehe Abbildung 3.2), so müssen zumindest die Resultate vom CCC2 und HAD3 relativiert werden. Ein  $W_{AN}$  von 2.66 hPa beziehungsweise 2.22 hPa weist auf ausgeprägte Anomalien hin. ECHAM4 erreicht beim  $W_{AN}$  mit 1.58 hPa vor ECHAM3 mit 1.92 hPa das beste Ergebnis, während CCC1 mit 3.74 hPa und CCSR mit 2.94 hPa die schlechtesten Resultate liefern. Letzteres simuliert aber beispielsweise das Druckfeld im Mittelmeerraum treffender als die beiden ECHAM-Modelle. Bei der Variabilität wird von der HAD3-Simulation mit einem Wert von 0.41 hPa der grösste  $W_{SD}$  erreicht und liegt damit knapp vor der CCC1-Simulation. ECHAM3 schneidet bei diesem Fehlermass vor CCC2 und ECHAM4 am besten ab. Bei der räumlichen Korrelation und der erklärten Varianz sind die Ergebnisse von ECHAM4 und HAD2 mit einer  $r$  von +0.93 und einer  $EV$  von +0.85 beziehungsweise +0.93 und +0.87 hervorzuheben. Eine  $r$

**Tabelle 3.1:** Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Jahresmittels der Analysedaten:  $-AN$  maximale negative Bodendruckanomalie in hPa;  $+AN$  maximale positive Bodendruckanomalie in hPa;  $\bar{m}_{AN}$  mittlere Bodendruckanomalie in hPa (gewichtetes Flächenmittel der Anomalien);  $W_{AN}$  Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Bodendruckanomalien in hPa (gewichtet);  $-SD$  maximale negative Standardabweichungsdifferenz in hPa;  $+SD$  maximale positive Standardabweichungsdifferenz in hPa;  $\bar{m}_{SD}$  mittlere Standardabweichungsdifferenz in hPa (gewichtetes Flächenmittel der Standardabweichungsdifferenzen);  $W_{SD}$  Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Standardabweichungsdifferenzen in hPa (gewichtet);  $r$  räumliche Korrelation der simulierten und gemessenen Bodendruckmuster und  $EV$  Anteil erklärter räumlicher Varianz der simulierten Bodendruckmuster. Die Doppellinien dienen der Übersicht und trennen die Fehlermasse der Bodendruckanomalien, der Standardabweichungen (Variabilität) und der räumlichen Güte voneinander ab.

Mod	$-AN$	$+AN$	$\bar{m}_{AN}$	$W_{AN}$	$-SD$	$+SD$	$\bar{m}_{SD}$	$W_{SD}$	$r$	$EV$
CCC1	-9.21	+4.62	-1.22	3.74	-1.01	+0.58	-0.23	0.39	+0.89	+0.69
CCC2	-6.34	+4.31	-0.27	2.66	-0.75	+0.74	-0.06	0.26	+0.91	+0.77
CCSR	-8.39	+4.08	-2.01	2.94	-0.65	+1.02	+0.06	0.33	+0.84	+0.68
CSIR	-3.32	+9.35	+1.02	2.76	-1.28	+0.38	-0.19	0.34	+0.73	+0.29
ECH3	-3.30	+4.71	+0.03	1.92	-1.16	+0.54	-0.06	0.25	+0.86	+0.69
ECH4	-2.06	+5.09	+0.80	1.58	-1.01	+0.35	-0.10	0.27	+0.93	+0.85
HAD2	-6.85	+1.06	-1.69	2.18	-0.57	+0.75	+0.18	0.31	+0.93	+0.87
HAD3	-3.91	+7.08	+0.04	2.22	-1.52	+0.20	-0.21	0.41	+0.81	+0.48

über +0.90 wird ebenfalls von CCC2 erreicht. Beim CSIR liegt mit +0.73 die tiefste Korrelation vor. Dieses Modell unterliegt den anderen auch bei der  $EV$ . Mit einem Wert von lediglich +0.29 fällt die  $EV$  mehr als dreimal schlechter aus als bei den besten Modellen. Beim HAD3 fällt dieses Fehlermass rund zweimal schlechter aus als bei ECHAM4 und HAD2.

### 3.2 Saisonale Mittel

Bei der saisonalen Untersuchung werden die vier Jahreszeiten separat betrachtet. Das ermöglicht eine differenziertere Überprüfung der Klimamodelle, da bei der Jahresmitteilung die Gefahr besteht, dass sich saisonal bedingte Anomalien wegmitteln. Die Vorgehensweise bleibt gleich. Nach den Differenzfeldern folgt im dritten Teil die zusammenfassende Fehlerübersicht. Es werden die üblichen Monatszuweisungen, beginnend mit dem Winter

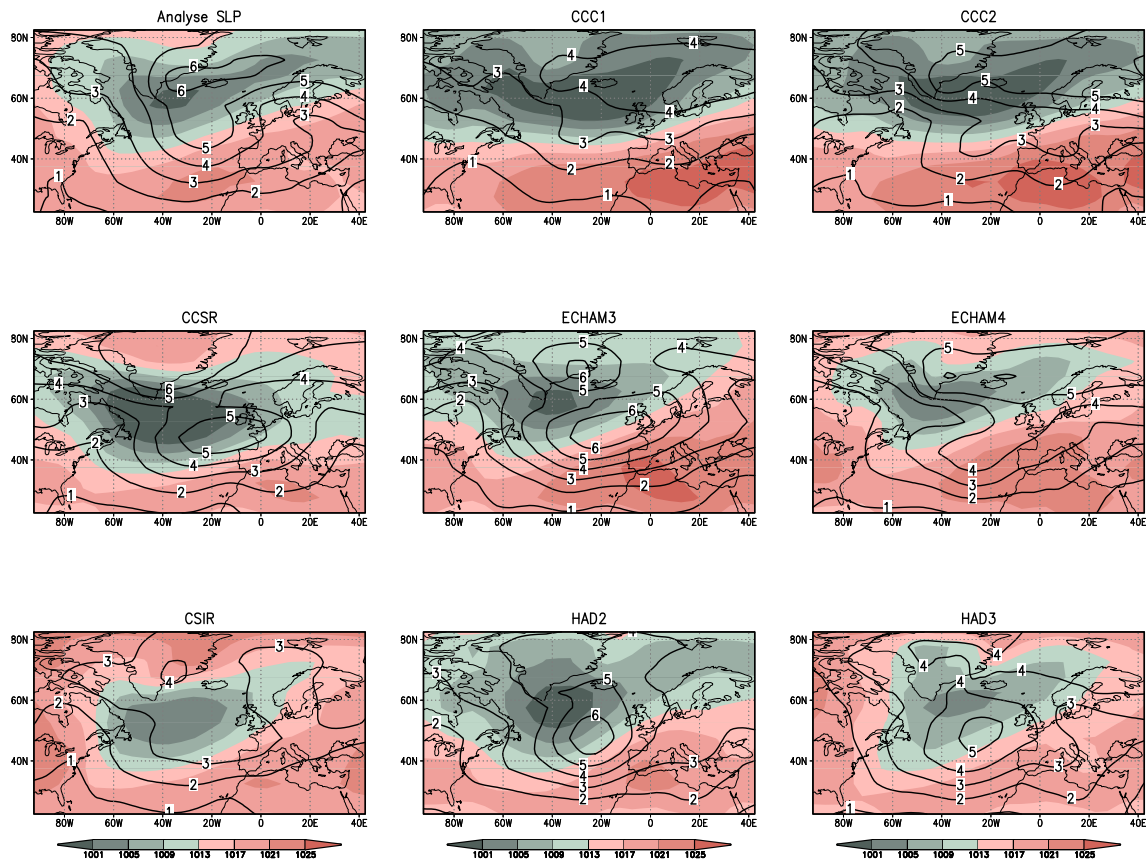
(Dezember, Januar und Februar), verwendet.

### 3.2.1 Winter

#### 3.2.1.1 Druckfelder

In Abbildung 3.4 sind die mittleren Bodendruckfelder in hPa und die Standardabweichungen im Winter dargestellt. Die Analysedaten zeigen das ausgeprägte IT mit dem Kernbereich südöstlich der Südspitze Grönlands sowie dessen Ausläufer bis Nordskandinavien. Das AH liegt abgeschwächt über dem Atlantik westlich von Marokko. Die Standardabweichungen erreichen im Winter im Vergleich mit den anderen Jahreszeiten ein Maximum. In einem West-Ost verlaufenden Band nördlich von Island werden die grössten Werte erreicht. Ein zweites, weniger stark ausgeprägtes Variabilitätszentrum mit Maximalwerten um 5.5 hPa liegt westlich von Irland im Atlantik. Diese südwärts gewandte Ausstülpung widerspiegelt die mittlere Lage der Westwindzone zwischen IT und AH im östlichen Nordatlantik im Winter. Mit abnehmender Breite werden die Standardabweichungen im Untersuchungsraum grundsätzlich kleiner, wenn auch in unterschiedlichem Masse im Vergleich zwischen Ozean und Kontinent.

Beim CCC1 ist das IT wesentlich ausgeprägter. Der Kernbereich erstreckt sich von der Baffininsel, über Island und Schottland bis an die Küste Norwegens. Das Bodendruckfeld erreicht in den hohen Breiten nie Werte über 1013 hPa. Der subtropische Hochdruckgürtel ist deutlich sichtbar, obwohl der Kernbereich des AHs nicht eindeutig auszumachen ist. Maximale Druckwerte werden über Nordafrika und dem östlichen Mittelmeer simuliert. Die Variabilität ist im Vergleich zu den Messdaten weniger gross und die Maximalwerte liegen zwischen Island und Norwegen. Der Kernbereich des ITs ist beim CCC2 zwar kleiner, aber das Bodendruckfeld der hohen Breiten ist jenem von CCC1 ähnlich. Die Standardabweichungen sind beim CCC2 grösser und erreichen Werte von 5.5 hPa über Südostgrönland und 6 hPa im Nordosten des Untersuchungsraums. Das CCSR simuliert das IT südlicher. Im Norden Grönlands werden Druckwerte von beinahe 1021 hPa erreicht. Das AH ist schwächer ausgeprägt und die höchsten Druckwerte liegen über Nordafrika. Bei der Variabilität lassen sich zwei Zentren erkennen. Über Zentralgrönland liegt die Standardabweichung zwischen 7 hPa und 8 hPa und im östlichen Nordatlantik nahe Grossbritannien und Frankreich erreicht sie Werte über 5 hPa. Beim CSIR fällt das zu südlich gelegene und zu schwach ausgeprägt IT auf. Der Kernbereich liegt gegenüber den Analysedaten ungefähr  $10^\circ$  südlicher. In den hohen Breiten dagegen liegen die Druckwerte fast ausschliesslich über 1013 hPa und erreichen mit mehr als 1022 hPa über Nordgrönland die höchsten Werte im Untersuchungsraum. Im Bereich des AHs zeigen sich Maximalwerte um 1021 hPa über Marokko und Algerien. Die grösste Standardabweichung kann im Südosten Grönlands ausgemacht werden. ECHAM3 simuliert die Lage des ITs angemess-



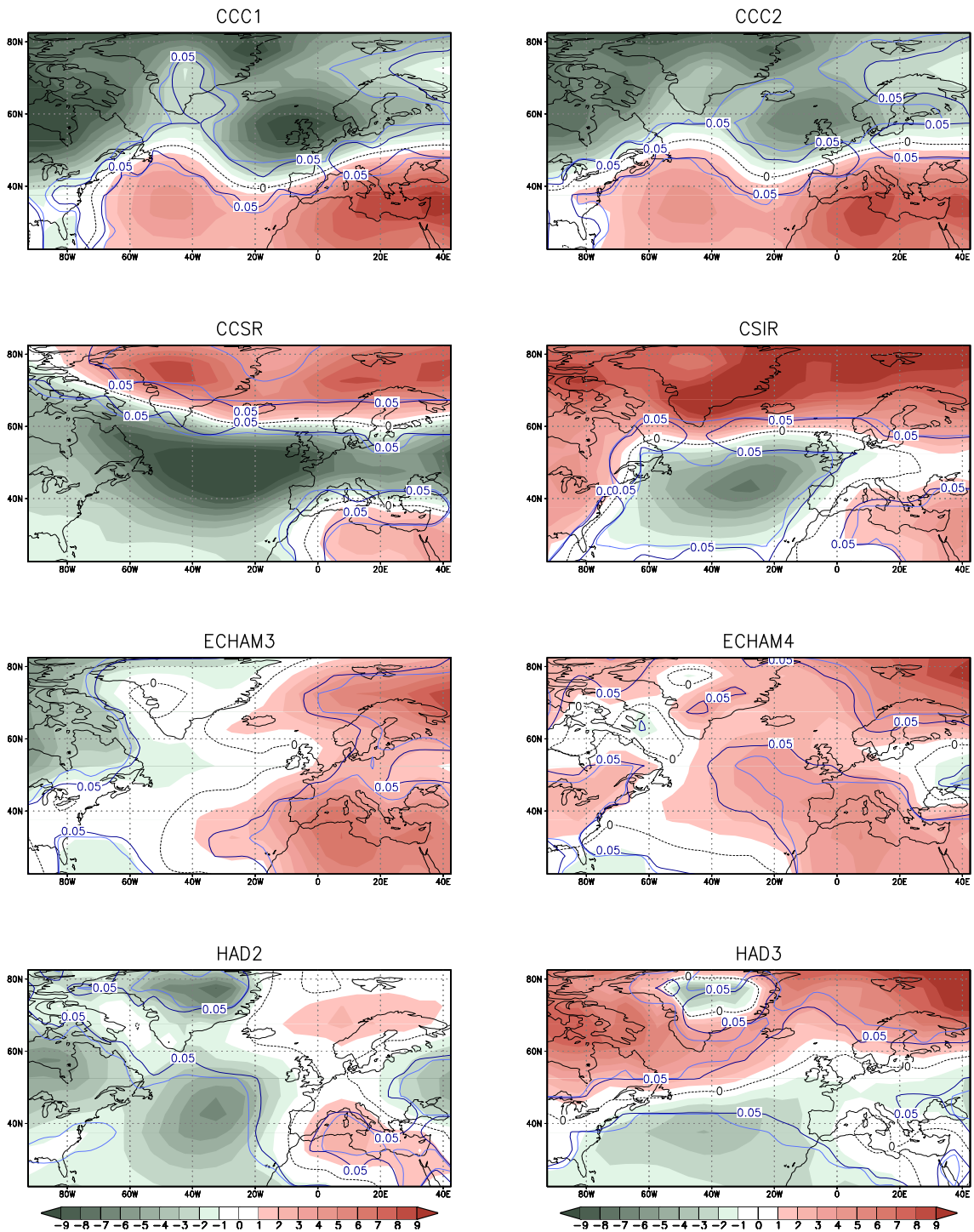
**Abbildung 3.4:** Mittlere Bodendruckfelder im Winter in hPa (schattiert) und Standardabweichungen (konturiert) der Analysedaten (oben links) und der verwendeten Klimamodelle über die Untersuchungsperiode von 1961 und 1990. Der Isolinienabstand beträgt 4 hPa bei den Bodendruckfeldern und 1 hPa bei den Standardabweichungen.

sen, im Gegensatz zu den Messdaten liegen jedoch die Druckwerte nördlich davon immer unter 1013 hPa. Das Bodendruckfeld östlich des AHs wird zweifellos überschätzt (siehe Abbildung 3.5). Die grössten Werte liegen über Algerien und dem westlichen Mittelmeer. Ähnlich wie das CCSR zeigt das ECHAM3 zwei Variabilitätszentren. Ein Zentrum liegt bei der Küste Südostgrönlands und das zweite westlich von Grossbritannien. Beim ECHAM4 werden im Bereich des ITs nicht ganz so tiefe Druckwerte erreicht, jedoch scheint die räumliche Ausdehnung abgesehen vom Nordosten vergleichsweise gut zu sein. Die grösste Variabilität mit Werten um 6 hPa ist in einem kleinen Bereich nordöstlich von Island auszumachen. Die bei den Analysedaten erwähnte Ausstülpung wird von ECHAM4 deutlich simuliert, verläuft aber von Nordost in südwestlicher Richtung. HAD2 und HAD3 geben in etwa die Position des Kernbereichs des ITs wieder. Ersteres tendiert zu einem ausgeprägteren IT, simuliert demnach das Bodendruckfeld mit zu tiefem Druck, während HAD3 sich eher umgekehrt verhält. Der Bereich des AHs ist beim HAD2 ebenfalls stärker aus-

geprägt als beim HAD3. Die Variabilitätszentren liegen bei beiden Modellen westlich von Grossbritannien im östlichen Nordatlantik. HAD3 zeigt zusätzlich einen Bereich erhöhter Variabilität über Zentralgrönland und im Nordosten des Untersuchungsraums.

### 3.2.1.2 Anomalien

In Abbildung 3.5 sind die Bodendruckdifferenzfelder für den Winter dargestellt. Beim CCC1 wird das Bodendruckfeld in grossen Teilen der hohen Breiten unterschätzt. Über der Hudson Bay liegen mit mehr als 10 hPa die grössten negativen Abweichungen. Ein zweiter Bereich mit deutlich negativer Anomalie liegt bei den Britischen Inseln. Hingegen weicht das Modell im Kernbereich des ITs (siehe Abbildung 3.4) nicht signifikant von den Messdaten ab. Positive Anomalien sind im Bereich des AHs und über dem östlichen Mittelmeer auszumachen. Das CCC2 zeigt ein ähnliches Muster. Zwar sind die Abweichungen etwas kleiner und die Nulllinie leicht nach Norden verschoben, aber die Unterschätzungen der hohen Breiten fallen nach wie vor deutlich aus. Die grössten positiven Abweichungen liegen über Tunesien und Syrien. Beim CCSR fällt die markante Unterschätzung im Nordatlantik zwischen Neufundland und den Britischen Inseln auf. Die Werte liegen im Zentrum bei -12 hPa. Im Norden des Untersuchungsraums, besonders über Grönland und nördlich von Skandinavien liegen positive Anomalien mit Werten von maximal +8.4 hPa. Die Nulllinie verläuft im Westteil nahe des nördlichen Polarkreises. Beim CSIR liegen nördlich vom 60. Breitengrad nur positive Anomalien vor. Mit Werten von +11 hPa über Südgrönland und +10 hPa über Spitzbergen sind die Abweichungen zum Teil massiv. Das Bodendruckfeld des östlichen Mittelmeerraums wird dagegen nur leicht überschätzt und über Mitteleuropa schneidet das Modell gut ab. Der einzige Bereich negativer Werte liegt im Atlantik. ECHAM3 zeigt im Winter wie schon beim Jahresmittel (siehe Abschnitt 3.1.2) eine meridional verlaufende Grenze zwischen positiven und negativen Anomalien. Im Westen, besonders über der westlichen Hudson Bay, sind die Werte negativ und über Nordafrika, Europa und der Barentsee positiv. In Teilen Osteuropas liegen die Anomalien unter dem 95%-Signifikanzniveau. Das Bodendruckfeld über dem Atlantik wird grösstenteils gut simuliert. Besonders das Kerngebiet des ITs stimmt mit den Analysedaten recht genau überein (Nulllinie). Kein anderes Modell erreicht in dieser Saison über dem Atlantik bessere Werte. Beim neueren ECHAM4 liegen einzig an der Südostküste der Baffininsel, über der Karibik und nordöstlich des Schwarzen Meeres schwach ausgeprägte Unterschätzungen vor. Ansonsten zeigt das Modell positive Abweichungen. Über der Iberischen Halbinsel und dem westlichen Mittelmeer sowie über der Barentsee liegen die lokalen Maxima. In weiten Bereichen des Atlantiks können die Anomalien zwar nicht mehr mit Bestimmtheit auf Modellabweichungen zurückgeführt werden, doch liegt über dem Ostatlantik und der Biskaya im Gegensatz zum ECHAM3 eine signifikante Abweichung vor. HAD2 schneidet



**Abbildung 3.5:** Bodendruckanomalien (Modelldaten–Messdaten) in hPa im nordatlantisch-europäischen Raum im Winter über die Periode von 1961 bis 1990. Überschätzungen durch das betreffende Klimamodell sind rot schattiert, Unterschätzungen grün. Dunkelblaue Linien stellen den  $p$ -Wert 0.05 (95%-Signifikanzniveau) und hellblaue Linien den  $p$ -Wert 0.01 (99%-Signifikanzniveau) des Wilcoxon-Tests dar.



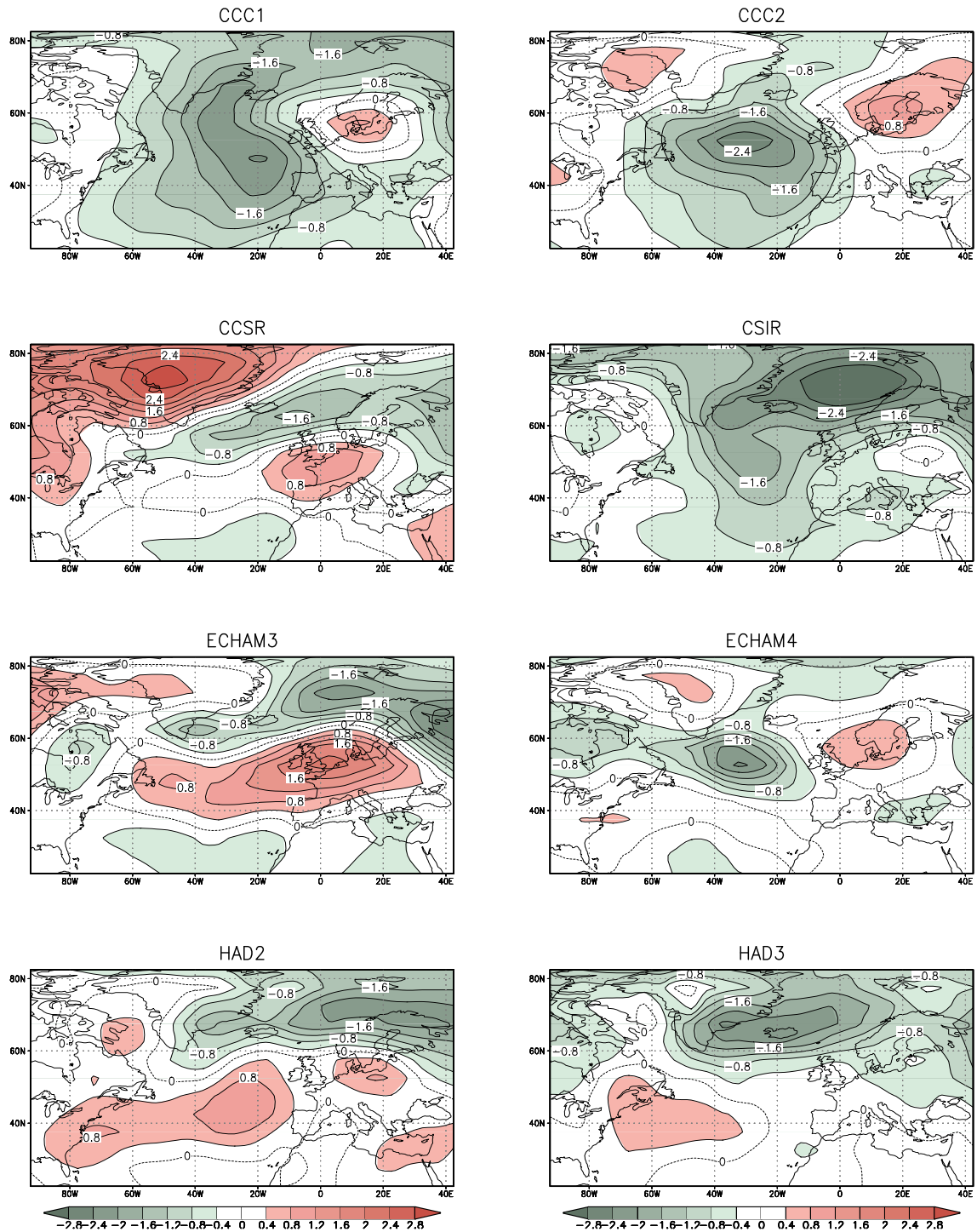
über Mittel- und Nordeuropa gut ab. Die Anomalie bei Nordskandinavien ist nicht signifikant. Dagegen wird das Bodendruckfeld des gesamten Mittelmeers überschätzt. Negative Abweichungen sind über Nordgrönland, der Hudson Bay, dem Atlantik und Osteuropa auszumachen. HAD3 modelliert das Bodendruckfeld Mitteleuropas ebenfalls treffend. Im Unterschied zum HAD2 stimmen über dem Mittelmeerraum die Simulationsdaten ausgezeichnet mit den Analysedaten überein, während über Skandinavien und dem nördlichen Eismeer zum Teil massive Überschätzungen vorliegen. Ab dem 60. Breitengrad liegen mit Ausnahme des Bereichs negativer Werte über Zentralgrönland nur positive Anomalien vor. In den niederen Breiten wird der Bereich des AHs unterschätzt.

### 3.2.1.3 Variabilität

Beim Betrachten von Abbildung 3.6 wird darauf hingewiesen, dass die Skala nicht mit jener von Abbildung 3.3 übereinstimmt. Aus Übersichtsgründen wurde bei der saisonalen Betrachtung eine Differenz von 0.4 hPa zwischen den Isolinien gewählt. Die weissen Bereiche liegen demnach zwischen -0.4 hPa und +0.4 hPa.

CCC1 unterschätzt die Variabilität im Winter in weiten Bereichen des nördlichen Atlantiks. Im Kerngebiet des ITs liegen die Werte bei -2 hPa und westlich von Frankreich sogar bei -2.4 hPa. Negative Anomalien sind zudem über Grönland, dem nördlichen Eismeer, Osteuropa und dem gesamten Mittelmeerraum zu finden. Einzig bei Dänemark können nennenswerte positive Abweichungen ausgemacht werden. Im Osten Kanadas und der USA werden die Werte angemessen wiedergegeben. Beim CCC2 ist der flächenmässige Anteil negativer Abweichungen gegenüber dem CCC1 kleiner, aber mit Tiefstwerten von -2.7 hPa westlich der Britischen Inseln liegen sie tiefer. Beide Modelle unterschätzen demnach die Wintervariabilität der Druckzentren AH und IT deutlich. Beim neueren Modell werden auch bei den positiven Anomalien höhere Werte erreicht. Über Südsandinavien liegen die Abweichungen bei +1 hPa und über der Baffin Bay bei +0.5 hPa. Das Bodendruckfeld des Mittelmeerraums wird im Unterschied zum CCC1 jedoch besser wiedergegeben. Beim CCSR wird die Variabilität im Nordwesten des Untersuchungsraums deutlich überschätzt. Mit Maximalwerten über 2.8 hPa fallen die Abweichungen bei Westgrönland markant zu hoch aus. Weitere positive Anomalien sind über Westeuropa und dem Nahen Osten auszumachen. Die Standardabweichungen des Mittelmeerraums und des zentralen Nordatlantiks werden gut wiedergegeben. Unterschätzungen liegen bei Island, über Nordskandinavien und im Bereich des AHs vor. Mit rund -1.6 hPa sind sie südöstlich von Island am grössten. Beim CSIR ist im gesamten Gebiet keine erwähnenswerte positive Abweichung festzustellen. Dagegen unterschätzt das Modell die Variabilität in weiten Bereichen des Mittelmeeres, des Atlantiks und der hohen Breiten. Mit Werten um -3.6 hPa werden zwischen Island und Spitzbergen die grössten negativen Abweichungen erreicht. Über





**Abbildung 3.6:** Differenzfelder der Standardabweichungen im Winter über die Periode von 1961 bis 1990. Positive Werte sind rot schattiert und bedeuten eine Überschätzung der Variabilität durch das betreffende Klimamodell. Negative Werte sind grün schattiert und bedeuten eine Unterschätzung. Der Isolinienabstand beträgt 0.4 hPa.

Polen, Teilen der Türkei, dem Nahen Osten, Ägypten und Nordostamerika wird das Bodendruckfeld angemessen wiedergegeben. ECHAM3 unterschätzt die Variabilität vor allem im Bereich der Barentsee, des nördlichen Eismeer und im Kerngebiet des ITs. Weitere negative Anomalien liegen über der Hudson Bay, zwischen Florida und Nordwestafrika im Atlantik und über Kreta, sowie südlich davon. Während die Variabilität in Teilen des Mittelmeerraums befriedigend wiedergegeben wird, sind nördlich des Alpenbogens, über den Britischen Inseln und westlich im Atlantik deutliche positive Anomalien zu sehen. In deren Kern werden Werte von +2.1 hPa erreicht. Überzeugend sind die Resultate beim ECHAM4. Abgesehen von der deutlichen Anomalie im Nordatlantik mit Zentrumswerten um -2.4 hPa und dem Bereich über der Hudson Bay mit Werten von -1.1 hPa, weicht die Simulation im gesamten Untersuchungsraum nur wenig von den Analysedaten ab. Nennenswerte positive Anomalien liegen über Ostgrönland und dem nördlichen Mitteleuropa. Im Allgemeinen liefert das Modell für Europa und insbesondere den Alpenraum sehr gute Ergebnisse. HAD2 unterschätzt die Variabilität im Nordosten des Untersuchungsraums. Über Nordskandinavien liegen die Abweichungen bei -2.3 hPa und nordwestlich von Island bei -1.4 hPa. Die positiven Anomalien sind weniger stark ausgeprägt und erreichen im Bereich zwischen IT und AH im Ostatlantik und über Westpolen lokale Maxima. Weniger ausgeprägte Überschätzungen können über dem östlichen Mittelmeer und der Baffin Bay ausgemacht werden. Die Variabilität wird im Bereich des AHs und dem westlichen Mittelmeer sehr gut wiedergegeben. Beim HAD3 wird die Variabilität im Bereich des ITs mit Werten um -2.4 hPa deutlich unterschätzt. Im Vergleich mit HAD2 schneidet das Modell bezüglich der Variabilität in den hohen Breiten schlechter ab. Dagegen wird die südliche Hälfte des Untersuchungsraums mit Ausnahme der schwachen Anomalie bei der Küste Ostamerikas mit Maximalwerten von +0.8 hPa gut wiedergegeben. Die Variabilität über Südeuropa und dem Mittelmeerraum wird von HAD3 ausgezeichnet simuliert.

#### 3.2.1.4 Zusammenfassende Fehlerübersicht im Winter

Im Winter können bei einigen Modellen beachtliche Abweichungen beziehungsweise Fehlerwerte festgestellt werden (siehe Tabelle 3.2). Jedes Modell weicht bei den Bodendruckanomalien betragsmässig mindestens in einem Punkt um rund 8 hPa (HAD2) von den Messdaten ab. Beim CCC1, CCSR, CSIR und HAD3 erreichen die Abweichungen zweistellige Werte. Drei Modelle unterschätzen im Winter das mittlere Bodendruckfeld. HAD3 erreicht mit +0.16 hPa den kleinsten und CCSR mit -2.15 hPa den grössten  $\bar{m}_{AN}$ . Die Überschätzungen in den hohen Breiten vermögen die negative Anomalie im Atlantik nicht auszugleichen (siehe Abbildung 3.5). Die vier Modelle CCC1, CCC2, CCSR und CSIR schneiden beim  $W_{AN}$  besonders schlecht ab. ECHAM4, HAD2 und HAD3 erreichen bessere Werte, obwohl der Mindestfehler von 2.56 hPa (HAD2) bereits auf deutliche Anomalien

hinweist. Beim HAD3 ist zu beachten, dass die markante Höchstabweichung von +10 hPa und der im Vergleich dazu niedrige  $W_{AN}$  von 2.56 hPa in diesem Fall nur durch die sehr nördlich gelegene Anomalie erklärt werden kann. Die mittlere Variabilität wird im Winter von zwei Modellen überschätzt und beim  $W_{SD}$  werden in keiner anderen Jahreszeit grössere Werte erreicht. Mit 0.53 hPa ist der Fehler beim ECHAM4 am kleinsten und mit 1.05 hPa beim CSIR am grössten.

Die räumliche Korrelation mit dem Wintermittel der Analysedaten ist interessanterweise bei den meisten Modellen vergleichbar mit jener bezüglich des jährlichen Mittels (siehe Abschnitt 3.1.4). Mit einer  $r$  von +0.94 erreicht ECHAM4 vor HAD2 und CCC2 den höchsten Wert. Beim CSIR und CCSR ist die  $r$  mit +0.71 beziehungsweise +0.74 am tiefsten. Bei der erklärten Varianz liegen die Resultate von CSIR und HAD3 im ähnlich tiefen Bereich wie bei der jährlichen Betrachtung, allerdings sind die Plätze vertauscht. ECHAM4 schneidet auch hier zusammen mit HAD2 am besten ab.

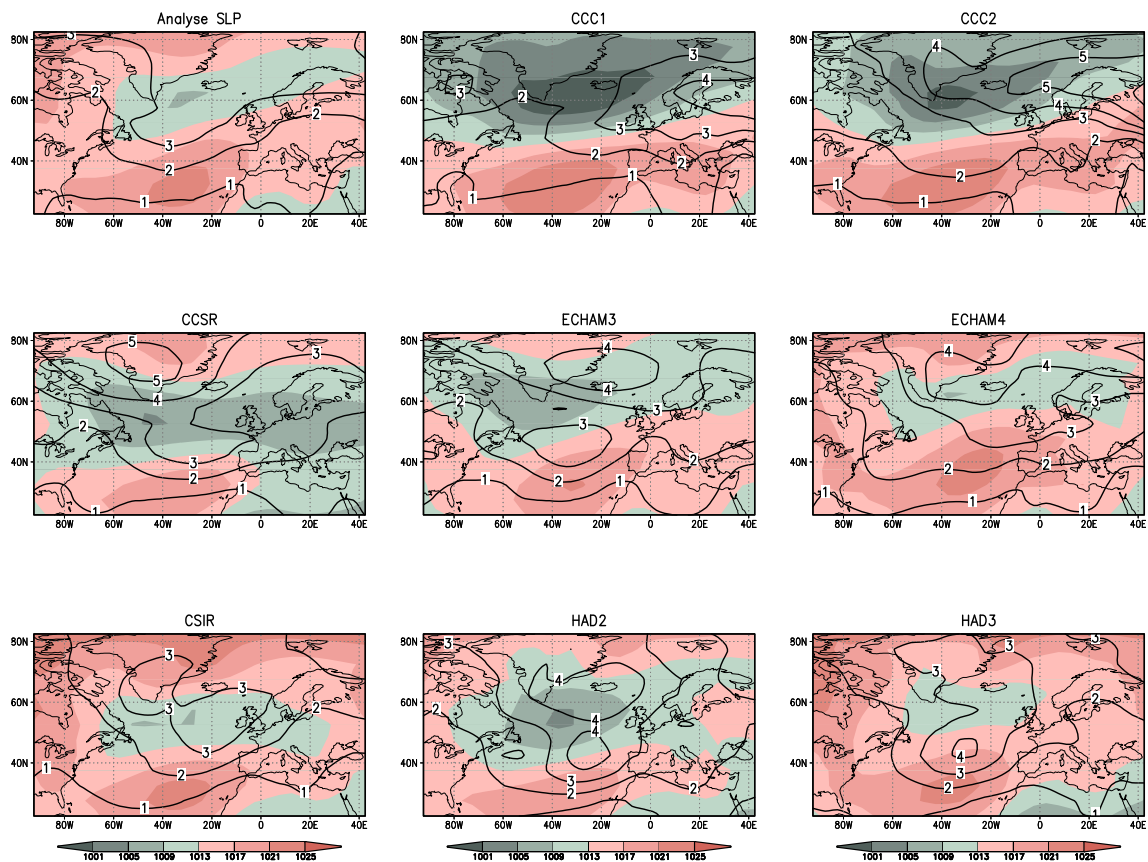
**Tabelle 3.2:** Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Wintermittels der Analysedaten. Für die Erklärung der Abkürzungen wird auf Tabelle 3.1, Seite 27 verwiesen.

Mod	$-AN$	$+AN$	$\bar{m}_{AN}$	$W_{AN}$	$-SD$	$+SD$	$\bar{m}_{SD}$	$W_{SD}$	$r$	$EV$
CCC1	-11.36	+9.57	-0.24	5.17	-2.43	+0.87	-0.79	1.02	+0.88	+0.68
CCC2	-8.62	+4.31	+0.69	4.64	-2.72	+1.01	-0.46	0.82	+0.91	+0.73
CCSR	-12.32	+8.50	-2.15	4.95	-1.77	+3.03	+0.07	0.79	+0.74	+0.55
CSIR	-7.33	+12.73	+1.28	4.26	-3.62	+0.35	-0.77	1.05	+0.71	+0.42
ECH3	-6.02	+8.72	+1.33	3.25	-2.78	+2.14	-0.13	0.77	+0.89	+0.79
ECH4	-2.32	+9.82	+1.83	2.66	-2.49	+0.76	-0.23	0.53	+0.94	+0.87
HAD2	-8.06	+2.89	-1.51	2.56	-2.33	+1.19	+0.03	0.64	+0.93	+0.87
HAD3	-4.43	+10.06	+0.16	2.96	-2.52	+0.78	-0.27	0.66	+0.84	+0.48

## 3.2.2 Frühling

### 3.2.2.1 Druckfelder

Im Unterschied zum Winter (siehe Abbildung 3.4) ist im Frühling das IT deutlich schwächer ausgeprägt, wie die Analysedaten in Abbildung 3.7 zeigen. Der mittlere Druck im Kernbereich beträgt 1009 hPa. Zudem liegen im Südosten des Untersuchungsraums, namentlich über der Sahara und dem Roten Meer, die Druckwerte unter 1013 hPa, was mit der nordwärts wandernden ITC erklärt werden kann. Als Folge der westwärtigen Verschiebung des AHs ist das Druckfeld über Europa abgeschwächt und wird im Sommer die tiefsten Werte erreichen (siehe Abbildung 3.10). Die Standardabweichungen sind im



**Abbildung 3.7:** Mittlere Bodendruckfelder im Frühling in hPa (schattiert) und Standardabweichungen (konturiert) der Analysedaten (oben links) und der verwendeten Klimamodelle über die Untersuchungsperiode von 1961 und 1990. Der Isolinienabstand beträgt 4 hPa bei den Bodendruckfeldern und 1 hPa bei den Standardabweichungen.

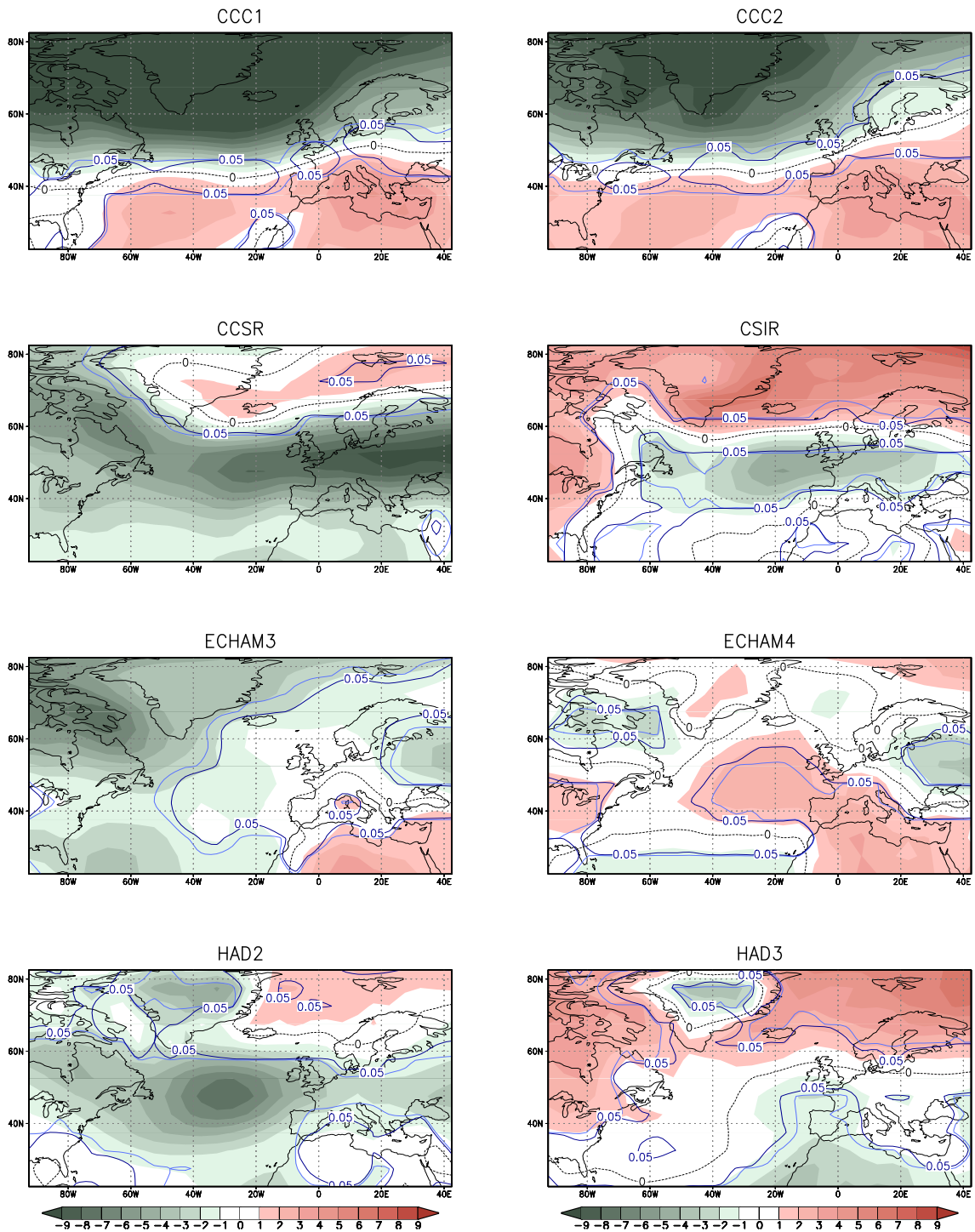
Vergleich mit dem Winter kleiner, nehmen aber genauso gegen Süden ab.

Beim CCC1 ist das IT mit einem Kerndruck von 997 hPa deutlich ausgeprägt. Ab 50° N wird das Bodendruckfeld im gesamten Untersuchungsraum mit Werten unter 1013 hPa simuliert. Selbst über Grönland liefert das Modell im Vergleich mit den Messdaten massiv zu tiefe Werte, wie uns Abbildung 3.8 zeigen wird, während umgekehrt beim AH und über dem Mittelmeerraum die Druckwerte höher wiedergegeben werden. Die grösste Variabilität kann über Südfinnland ausgemacht werden. Bezüglich der räumlichen Verteilung von Tief- und Hochdruck ähneln sich CCC1 und CCC2. Letzteres simuliert das Bodendruckfeld der hohen Breiten mit leicht höheren Werten. In den niederen Breiten sind die Unterschiede kleiner. Interessant ist, dass das CCC2 über Island und Nordskandinavien grössere Standardabweichungen als das ältere Modell zeigt. Beim CCSR ist der Bereich des ITs in eine Tiefdruckrinne eingebettet, die sich von der Hudson Bay über Nordeuropa hinweg erstreckt. Mit Ausnahme des Südwestens der Iberischen Halbinsel simuliert

das Modell die Bodendruckwerte Europas und des Mittelmeerraums unter 1013 hPa. Die grössten Standardabweichungen sind über Westgrönland zu finden. Beim CSIR liegt das IT deutlich südlicher als bei den Analysedaten und das Druckfeld über Island und der Südspitze Grönlands dürfte deutlich überschätzt werden. Die Lage des AHs und dessen Stärke dürften angemessen mit den Messdaten übereinstimmen. Die Variabilität erreicht westlich von Irland, über Südgrönland und im Nordosten des Untersuchungsraums die grösste Ausprägung und scheint ebenfalls angemessen wiedergegeben zu werden. Beim ECHAM3 liegt der Kernbereich des ITs an der Südspitze Grönlands. Ähnlich dem Muster von CCSR erstreckt sich von West nach Ost eine Tiefdruckrinne, die aber über Europa nördlicher verläuft. Die Variabilität ist bei Island am grössten, erreicht zudem östlich von Neufundland im Atlantik, und kaum auszumachen südöstlich der Spitze Grönlands, lokale Maxima. ECHAM4 korreliert vom Muster her mit den Analysedaten zusammen mit HAD2 am besten (siehe Tabelle 3.3). Besonders der Bereich des ITs stimmt gut überein, während das AH etwas nördlicher wiedergegeben wird. Die Standardabweichung erreicht im Südosten Grönlands Werte um 4 hPa und ist im Nordosten mit Werten über 5 hPa am grössten. HAD2 modelliert die Kernzone des ITs westlich von Schottland im Atlantik. Der Bereich tieferen Drucks verbindet sich über Mitteleuropa mit jenem der Sahara und dem Nahen Osten, wodurch über Europa ein differenziertes Bodendruckfeld entsteht. Der Kern des AHs liegt westlich der Kanarischen Inseln und ist im Vergleich mit den Messdaten etwas weniger ausgeprägt. Die grösste Variabilität kann über Island und westlich der Biskaya ausgemacht werden. Beim HAD3 wird das IT in einer verhältnismässig kleinen Region wiedergegeben. In den hohen Breiten liegen die Druckwerte häufig über 1017 hPa. Der Kern des AHs ist wie beim HAD2 westlich der Kanaren zu finden, in seiner Stärke aber deutlicher ausgeprägt.

### 3.2.2.2 Anomalien

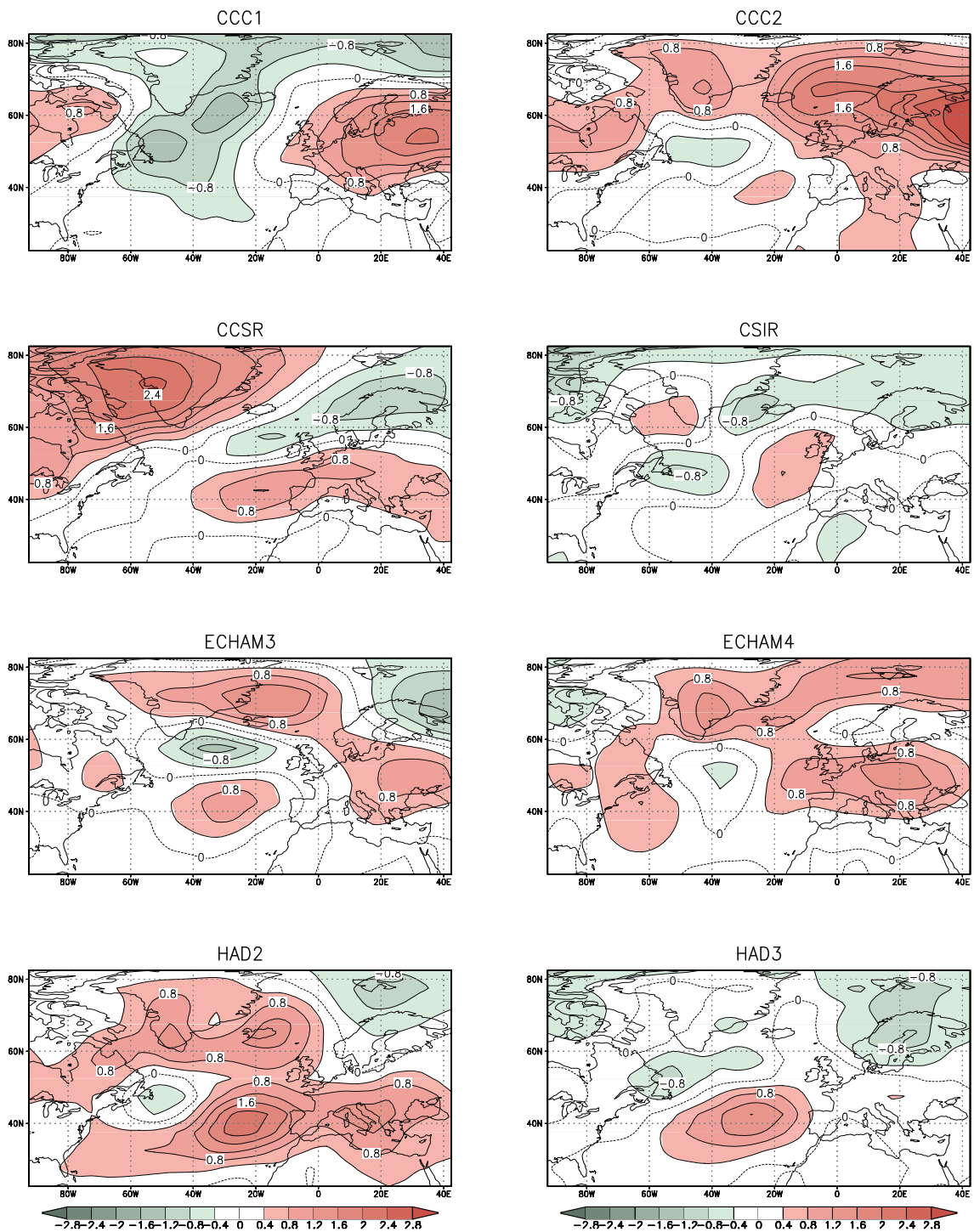
Die extreme Unterschätzung des Bodendruckfelds der hohen Breiten durch die Modelle CCC1 und CCC2 in Abbildung 3.8 ist augenfällig. Bei keinem anderen Modell und weder beim jährlichen noch beim saisonalen Vergleich sind grössere Abweichungen zu finden. Die tiefsten Werte beim CCC1 mit -15 hPa liegen nahe der Küste über Ostgrönland. Beim CCC2 können zwei Minima mit einer Abweichung von jeweils rund -11 hPa ausgemacht werden. Beide sind über Grönland lokalisiert. Eines stimmt bezüglich der Lage mit jenem von CCC1 überein, das zweite liegt etwas küstenferner im Westen der Insel. Das Bodendruckfeld der niederen Breiten wird bei beiden Modellen deutlich besser simuliert. Maximale positive Abweichungen mit Werten von etwas mehr als +4 hPa beim CCC1 und Werten von knapp unter +4 hPa beim CCC2 können über dem östlichen Mittelmeer ausgemacht werden. Die Nulllinie verläuft beim neueren Modell etwas nördlicher. CCSR zeigt



**Abbildung 3.8:** Bodendruckanomalien (Modelldaten–Messdaten) in hPa im nordatlantisch-europäischen Raum im Frühling über die Periode von 1961 bis 1990. Überschätzungen durch das betreffende Klimamodell sind rot schattiert, Unterschätzungen grün. Dunkelblaue Linien stellen den  $p$ -Wert 0.05 (95%-Signifikanzniveau) und hellblaue Linien den  $p$ -Wert 0.01 (99%-Signifikanzniveau) des Wilcoxon-Tests dar.

vor allem in den mittleren Breiten zum Teil deutliche Unterschätzungen des Bodendruckfelds. Mit Werten von rund +2 hPa fallen die Anomalien über Osteuropa am deutlichsten aus. Im Westen des Untersuchungsraums und in den niederen Breiten liegen mit Ausnahme über Jordanien nur signifikante Unterschätzungen vor. Bei Island und Spitzbergen findet man positive Abweichungen, wobei nur in einem kleinen Bereich südlich von Spitzbergen Signifikanz erreicht wird. Über Grönland sind die Unterschiede zwischen Messdaten und Modelldaten am kleinsten. Beim CSIR wird das Bodendruckfeld der hohen Breiten teilweise massiv überschätzt. Ein lokales Maximum mit Abweichungen von +6 hPa liegt in einem Band bei der Südküste Grönlands, während ganz im Nordosten des Untersuchungsraums mehr als +8 hPa erreicht werden. Im Ostatlantik und über Westeuropa unterschätzt das Modell das Druckfeld mit maximal -5 hPa. Eine kleine Negativanomalie ist zudem bei Neufundland zu finden. Der Mittelmeerraum und die niederen Breiten werden im Allgemeinen gut wiedergegeben. ECHAM3 simuliert die grössten negativen Abweichungen im Westen des Untersuchungsraums. Über der Baffininsel liegt das Minimum mit rund -8 hPa. Positive, signifikante Abweichungen sind über Afrika, dem Nahen Osten sowie in einem kleinen Bereich bei Korsika auszumachen. Das Bodendruckfeld Mitteleuropas und des Ostatlantiks wird angemessen wiedergegeben. ECHAM4 liefert die besten Ergebnisse in den hohen Breiten. Einzig über der Baffininsel sind die Abweichungen mit -2.5 hPa signifikant. Über Grönland, dem nördlichen Eismeer und Spitzbergen sind keine signifikanten Abweichungen festzustellen. Hervorzuheben ist der Kernbereich des ITs. Dort stimmt die Simulation mit den Analysedaten überein, was bei keinem anderen Modell zutrifft. Weitere, negative Anomalien sind über Osteuropa und dem Atlantik nahe der Südgrenze des Untersuchungsraums zu finden. Überschätzt wird das Bodendruckfeld des Ostatlantiks, des Mittelmeerraums und Nordafrikas mit maximal +3 hPa. Bei HAD2 befinden sich negative Anomalien mit lokalen Minima über Grönland, südöstlich der Hudson Bay, im zentralen Nordatlantik und über Osteuropa. Die Abweichungen betragen der Reihe nach -5 hPa, -4 hPa, -7 hPa und -3 hPa. Über Skandinavien und dem südlichen Mittelmeerraum liefert die Simulation angemessene Resultate. Im Nordosten neigt das Modell zu Überschätzungen, erreicht jedoch nur in zwei kleinen Bereichen östlich von Grönland das 95%-Signifikanzniveau. HAD3 liefert besonders in den mittleren Breiten, dem östlichen Mittelmeer und im Südwestteil des Untersuchungsraums gute Ergebnisse, während das Druckfeld der hohen Breiten mit Ausnahme Grönlands durchgehend überschätzt wird. Die grössten Abweichungen liegen mit knapp +7 hPa im Nordosten und mit -4 hPa über Zentralgrönland. Die Anomalie über Grönland fällt etwas kleiner als im Winter aus (siehe Abbildung 3.5).





**Abbildung 3.9:** Differenzfelder der Standardabweichungen im Frühling über die Periode von 1961 bis 1990. Positive Werte sind rot schattiert und bedeuten eine Überschätzung der Variabilität durch das betreffende Klimamodell. Negative Werte sind grün schattiert und bedeuten eine Unterschätzung. Der Isolinienabstand beträgt 0.4 hPa.



### 3.2.2.3 Variabilität

Wie eingangs des Kapitels erwähnt, ist die Variabilität im Frühling im Vergleich zum Winter bereits weniger ausgeprägt. Sie wird im Sommer minimal (siehe Abbildung 3.10). In Abbildung 3.9 sind die Differenzfelder der Standardabweichungen im Frühling dargestellt. Beim CCC1 wird die Variabilität vor allem über Europa überschätzt. Die grössten Werte um +2 hPa werden im Osten erreicht, über der Hudson Bay liegen sie bei +0.8 hPa. Die Variabilität in den niederen Breiten wird im Allgemeinen gut wiedergegeben, wobei besonders die Iberische Halbinsel, das östliche Mittelmeer und Teile Afrikas erwähnt werden müssen. Unterschätzungen sind in den hohen Breiten und im Nordatlantik zu finden. Im Bereich des ITs betragen die Abweichungen zwischen -1.2 hPa und -1.5 hPa. Beim CCC2 liegen mehrheitlich Überschätzungen der Variabilität vor. Die positiven Anomalien liegen in einem Band, das sich von Ontario und Quebec über Grönland, Island und Nordeuropa hinweg in Richtung Osten erstreckt. Lokale Maxima mit Werten um +1 hPa, +1.2 hPa und +3.2 hPa liegen der Reihe nach über Nordostquebec, Südgrönland und ganz im Osten. Weniger starke, positive Abweichungen sind westlich von Spanien, über dem zentralen Mittelmeer und Libyen zu finden. Die einzige, negative Anomalie liegt östlich von Neufundland. Das CCSR überschätzt die Variabilität des Bodendruckfelds über dem Ostatlantik, Mitteleuropa und dem Schwarzen Meer und im gesamten Nordwesten des Untersuchungsraums. Der Maximalwert liegt mit +2.5 hPa im Westen Grönlands. Unweit des Maximalwerts, in der Kernzone des ITs, stimmt das Modell gut mit den Messdaten überein. Östlich davon schliesst eine Zone negativer Abweichungen mit Zentrum über Nordskandinavien an. Der Bereich des AHs sowie die niederen Breiten im Allgemeinen, werden grösstenteils gut modelliert. Das CSIR überzeugt durch geringe Differenzen gegenüber den Analysedaten. Die Variationsbreite von 2.1 hPa zwischen Minimal- und Maximalwert ist vergleichsweise klein und wird nur von ECHAM4 übertroffen. Ersterer liegt ganz im Nordwesten des Untersuchungsraums und der Maximalwert westlich der Biskaya. Negative Anomalien befinden sich in den hohen Breiten sowie bei Neufundland, während im Südwesten Grönlands und westlich von Frankreich positive Abweichungen zu finden sind. Die Variabilität über Teilen Nordostamerikas und Grönlands, des Bereichs des AHs sowie Mitteleuropas und des Mittelmeerraums werden durch die Simulation gut repräsentiert. ECHAM3 zeigt Unterschätzungen im Nordosten und im südlichen Kerngebiet des ITs mit jeweils Werten um -1.4 hPa. Dazwischen erstrecken sich von Grönland, über Südschandinavien nach Osteuropa positive Anomalien mit Maximalwerten um +1.6 hPa bei Ostgrönland. Westlich von Spanien liegt eine weitere Anomalie. Die Variabilität des AHs und des Druckfelds über Westeuropa wird gut wiedergegeben. Wie weiter oben erwähnt ist die Variationsbreite im Frühling beim ECHAM4 am kleinsten. Die Variabilität wird in grossen Teilen der hohen Breiten, über Mittel- und Westeuropa sowie bei Quebec vom

Modell mit Werten von maximal +1.4 hPa überschätzt. Negative Anomalien sind schwach ausgeprägt bei der Baffininsel und im nördlichen Zentralatlantik zu finden. Mittelskandinavien, der südliche Mittelmeerraum und der Bereich des AHs werden gut simuliert. Beim HAD2 dominieren positive Anomalien. Sie sind über Quebec, Südgrönland, Island, dem Ostatlantik sowie Mittel- und Südeuropa zu finden und erreichen mit knapp +2.2 hPa ihre stärkste Ausprägung im Ostatlantik. Negative Anomalien liegen bei Neufundland und über Spitzbergen mit einem Minimum von -1 hPa. Dieses Modell überschätzt die Variabilität beider Druckzentren im Atlantik. HAD3 zeigt ein ähnlich überzeugendes Bild wie das CSIR, jedoch fällt die Variationsbreite mit 2.6 hPa deutlicher aus. Der Minimalwert liegt mit -1 hPa beim Nordkap, der Maximalwert mit +1.6 hPa westlich von Spanien im Atlantik. Grosse Teile im Untersuchungsraum stimmen mit den Analysedaten überein. Besonders zu erwähnen ist dabei Westgrönland, der Mittelmeerraum und die Region der grossen Seen in Nordamerika.

### 3.2.2.4 Zusammenfassende Fehlerübersicht im Frühling

Beim CCC1 wird mit einem  $-AN$ -Wert von -15 hPa die betragsmässig grösste Abweichung überhaupt erreicht. Dies wurde bereits erwähnt. Betrachtet man nun den  $\bar{m}_{AN}$  von -2 hPa und das Differenzfeld in Abbildung 3.8, so wird, mit dem Hintergrundwissen, dass sich die nördliche Begrenzung des Untersuchungsraums nur über rund 2000 km erstreckt, deutlich, wie massiv diese Abweichung ist. Gesamthaft wird das mittlere Bodendruckfeld im Frühling von drei Modellen überschätzt. HAD3 liefert mit +0.21 hPa den kleinsten und CCSR mit -3.26 hPa den grössten  $\bar{m}_{AN}$ . Beim  $W_{AN}$  sind die Unterschiede zwischen den Modellen gross. Mit 5.51 hPa schneidet das CCC1 am schlechtesten ab. Dieser Wert wird durch kein anderes Modell und zu keiner anderen Jahreszeit übertroffen. Am anderen Ende befinden sich ECHAM4 mit einem Fehler von 1.56 hPa und HAD3 mit 1.96 hPa. Der Fehler von CCC1 ist über dreimal grösser als jener vom ECHAM4. Bei der Variabilität fällt der hohe  $+SD$ -Wert von +3.46 hPa auf. Dieser Wert wird von keinem anderen Modell und zu keiner anderen Jahreszeit übertroffen. Den kleinsten  $W_{SD}$  liefert CSIR mit 0.37 hPa, während sich beim CCC2 der  $+SD$ -Wert bemerkbar macht und den grössten  $W_{SD}$  von 0.81 hPa mitverursacht.

Die Resultate der räumlichen Korrelation fallen bei fünf Modellen schlechter aus als im Winter. ECHAM4 mit +0.88 gefolgt von HAD2 und HAD3 mit jeweils +0.84 liefern die besten Ergebnisse. Das Bodendruckfeld von CCC1 korreliert am wenigsten mit jenem der Analysedaten. Ähnlich sieht es bei der erklärten Varianz aus. Man kann bezüglich der Werte zwei Gruppen bilden: ECHAM4, HAD2 und HAD3 erreichen eine  $EV$  von  $\geq +0.70$ . Diese drei Modelle bilden die erste Gruppe und schneiden bei diesem Mass deutlich besser ab als die übrigen fünf der zweiten Gruppe. Der schlechteste Wert wird von CCC1

erreicht.

**Tabelle 3.3:** Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Frühlingmittels der Analysedaten. Für die Erklärung der Abkürzungen wird auf Tabelle 3.1, Seite 27 verwiesen.

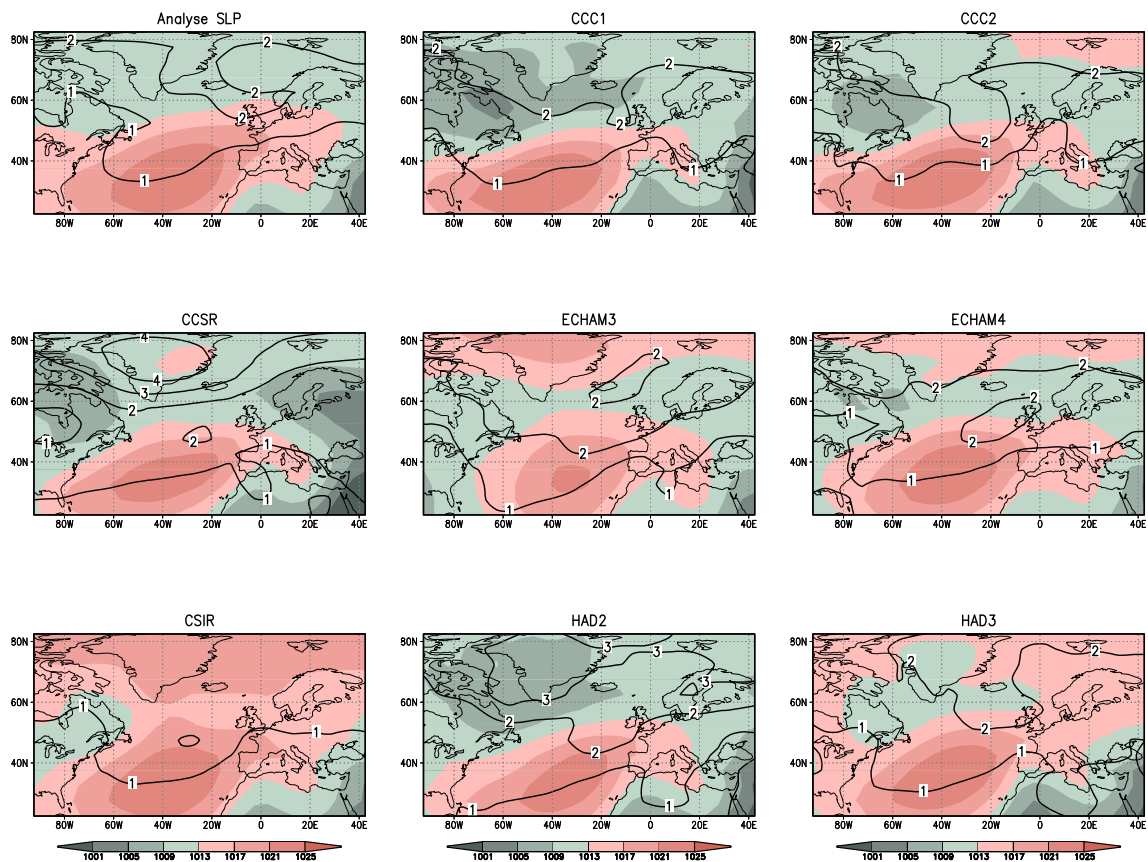
Mod	$-AN$	$+AN$	$\bar{m}_{AN}$	$W_{AN}$	$-SD$	$+SD$	$\bar{m}_{SD}$	$W_{SD}$	$r$	$EV$
CCC1	-15.22	+4.14	-2.07	5.51	-1.48	+2.06	-0.03	0.67	+0.68	+0.42
CCC2	-11.12	+3.84	-0.83	4.26	-0.59	+3.46	+0.46	0.81	+0.71	+0.47
CCSR	-9.90	+2.37	-3.26	4.15	-1.07	+2.47	+0.29	0.71	+0.75	+0.55
CSIR	-5.12	+8.79	+0.27	2.38	-1.35	+0.81	-0.13	0.37	+0.76	+0.57
ECH3	-7.60	+3.65	-1.46	2.54	-1.51	+1.59	+0.12	0.47	+0.78	+0.57
ECH4	-3.48	+3.40	+0.39	1.56	-0.63	+1.40	+0.30	0.50	+0.88	+0.75
HAD2	-7.94	+2.19	-1.88	2.63	-0.95	+2.17	+0.49	0.72	+0.84	+0.71
HAD3	-3.91	+6.56	+0.21	1.96	-0.98	+1.61	+0.03	0.44	+0.84	+0.70

### 3.2.3 Sommer

#### 3.2.3.1 Druckfelder

Die Analysedaten (siehe Abbildung 3.10) zeigen im Sommer einen zweigeteilten Untersuchungsraum. Ungefähr nördlich vom 50. Breitengrad liegen die Bodendruckwerte unter 1013 hPa, südlich davon höher. Nur die Sahara und der Nahe Osten bilden eine Ausnahme. Da der Isolinienabstand 4 hPa beträgt, erscheint das Bodendruckfeld der hohen Breiten homogen, was östlich von Island grösstenteils zutrifft. Die niedrigsten Druckwerte, die des ITs, liegen mit knapp 1010 hPa beim Südende der Baffininsel. Dass das IT im Sommer dort lokalisiert ist, zeigt auch Abbildung 2.1. Im Innern Grönlands reichen die Druckwerte nahe an die 1013 hPa-Isolinie. Das AH liegt im Vergleich mit den Wintermonaten weiter westlich, ist aber mit über 1024 hPa Kerndruck stärker ausgeprägt. Das Bodendruckfeld Europas ist flacher als im Winter. Die Variabilität fällt im Vergleich mit den übrigen Jahreszeiten im Sommer am kleinsten aus und erreicht ein lokales Maximum von 2.2 hPa über Schottland, den Maximalwert von 2.4 hPa in der Nordostecke. In diesem Abschnitt wird auf die schwächere Sommervariabilität nur am Rande eingegangen.

Beim CCC1 stimmt die mittlere Lage des ITs mit den Analysedaten überein, obwohl es stärker simuliert wird. Gegenüber den Messdaten liegt die Grenze zwischen Hoch- und Tiefdruck südlicher, ist das AH in seiner Form etwas länglicher und das Bodendruckfeld Europas etwas schwächer modelliert. Das Bild von CCC2 zeigt bei Spitzbergen ein Bereich mit Druckwerten über der 1013 hPa Grenze, während das IT, wie schon beim CCC1, bezüglich der Lage angemessen mit den Analysedaten übereinstimmt. Da aber das IT



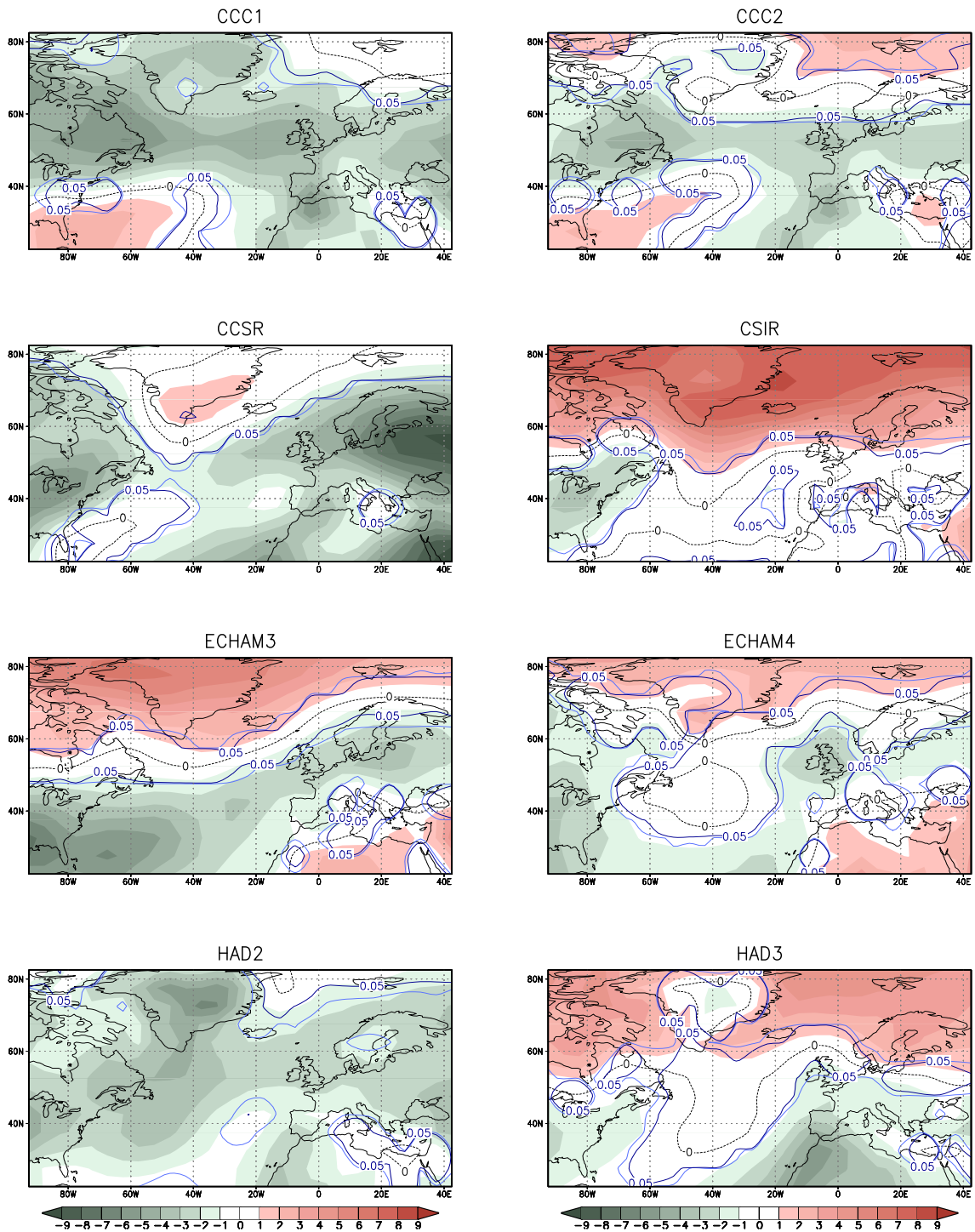
**Abbildung 3.10:** Mittlere Bodendruckfelder im Sommer in hPa (schattiert) und Standardabweichungen (konturiert) der Analysedaten (oben links) und der verwendeten Klimamodelle über die Untersuchungsperiode von 1961 und 1990. Der Isolinienabstand beträgt 4 hPa bei den Bodendruckfeldern und 1 hPa bei den Standardabweichungen.

stärker ausgeprägt ist und das AH beim Modell leicht nördlicher liegt, ist der Druckgradient zwischen IT und AH etwas grösser. Beim CCSR erreichen die Druckwerte über Ostgrönland Werte von mehr als 1013 hPa. Das AH liegt nördlicher als bei den Messdaten und im Osten Europas ist das Druckfeld deutlich tiefdruckbestimmt. Mit Werten von maximal 4.7 hPa über Grönland wird bei diesem Modell die höchste Variabilität im Sommer unter allen Modellen simuliert, während das folgende CSIR mit dem grössten Wert von 2 hPa den tiefsten Maximalwert unter allen Simulationen modelliert. CSIR verhält sich in den hohen Breiten invers gegenüber den Analysedaten und berechnet ab dem 60. Breitengrad alle Druckwerte über 1013 hPa. Bei Ostgrönland liegen die Werte sogar über 1020 hPa. Das AH und der Mittelmeerraum dürfte jedoch gut wiedergegeben werden (siehe Abbildung 3.11). ECHAM3 und ECHAM4 simulieren ganz im Norden ebenfalls Werte über 1013 hPa, berücksichtigen aber das schwach ausgeprägte IT. Beim ECHAM3 ist das AH schwächer ausgeprägt und der Osten der USA liegt unter Tiefdruck. Diese Fehler wurden offenbar

beim ECHAM4 korrigiert. Das AH wird stärker simuliert und die Druckverteilung über Europa stimmt zumindest räumlich gut mit den Messdaten überein. HAD2 simuliert, abgesehen von der Südostecke, im Nordwesten die niedrigsten Druckwerte. Das AH ist in einem kleineren Bereich lokalisiert als beim vorherigen Modell, unterliegt den Analysedaten in seinem Kern jedoch nur um 1 hPa. Die Variabilität erreicht über Grönland mit knapp 3.4 hPa das Maximum. Beim HAD3 überwiegen flächenmässig die Werte über 1013 hPa. Der Bereich des ITs ist im Vergleich zum HAD2 kleiner und bezüglich der Lage weiter östlich gelegen als bei den Messdaten. Das AH dürfte gut wiedergegeben werden, wie im Folgenden gezeigt wird.

### 3.2.3.2 Anomalien

In Abbildung 3.11 sind die Differenzfelder der Sommermittel dargestellt. CCC1 zeigt vor allem in den mittleren Breiten Unterschätzungen des Bodendruckfelds. Im Nordosten bei Spitzbergen, im Bereich des AHs und im südöstlichen Mittelmeerraum sind die Differenzen minimal. Im Südwesten bei Florida liegt die einzige signifikante Überschätzung. Beim CCC2 ist das Bild differenzierter. Ganz im Norden können positive, in den mittleren Breiten negative und in den niederen Breiten tendenziell wieder positive Anomalien ausgemacht werden. Dazwischen, besonders in den hohen Breiten, liegen Zonen guter Übereinstimmung. Ausnahmen der vorher beschriebenen Abfolge bilden zwei Negativanomalien über Grönland und den Kanarischen Inseln. Beim CCSR liegt die einzige positive Anomalie mit Maximalwerten von rund +1.5 hPa bei der Südostküste Grönlands. Das Bodendruckfeld Restgrönlands wird dagegen gut wiedergegeben. Über Osteuropa, dem Roten Meer und den grossen Seen Nordamerikas liegen mit bis zu -10 hPa ganz im Südosten zum Teil massive Unterschätzungen vor. Über dem Mittelmeer bei Griechenland und östlich von Florida wird das Druckfeld angemessen simuliert. Beim CSIR fallen die deutlichen Abweichungen in den hohen Breiten auf. Nahe der Küste Ostgrönlands werden Werte von rund +8 hPa erreicht. Beim vorherigen Modell wurden zwar mit -10 hPa grössere Abweichungen festgestellt, aber CSIR fällt insofern aus der Reihe, als ab ungefähr dem 70. Breitengrad alle Abweichungen mindestens +6 hPa betragen. Das war bei der Beschreibung des Druckfelds im vorherigen Abschnitt (siehe Abbildung 3.10) bereits abzusehen. ECHAM3 neigt im Norden ebenfalls zu Überschätzungen des Bodendruckfelds. Die Abweichungen sind im Vergleich zum CSIR mit dem Maximalwert bei Ostgrönland mit +6.3 hPa jedoch kleiner. Weitere positive Anomalien liegen über der Sahara und dem Nahen Osten und erreichen zumindest im Untersuchungsraum keine markanten Abweichungen. Unterschätzungen können bei Florida, westlich von Spanien und über der Ostsee ausgemacht werden, wobei erstere Anomalie ganz im Westen mit -7.2 hPa die grösste Abweichung erreicht. Die Tendenz zur Überschätzung des Bodendruckfelds in den hohen Breiten, kann auch beim



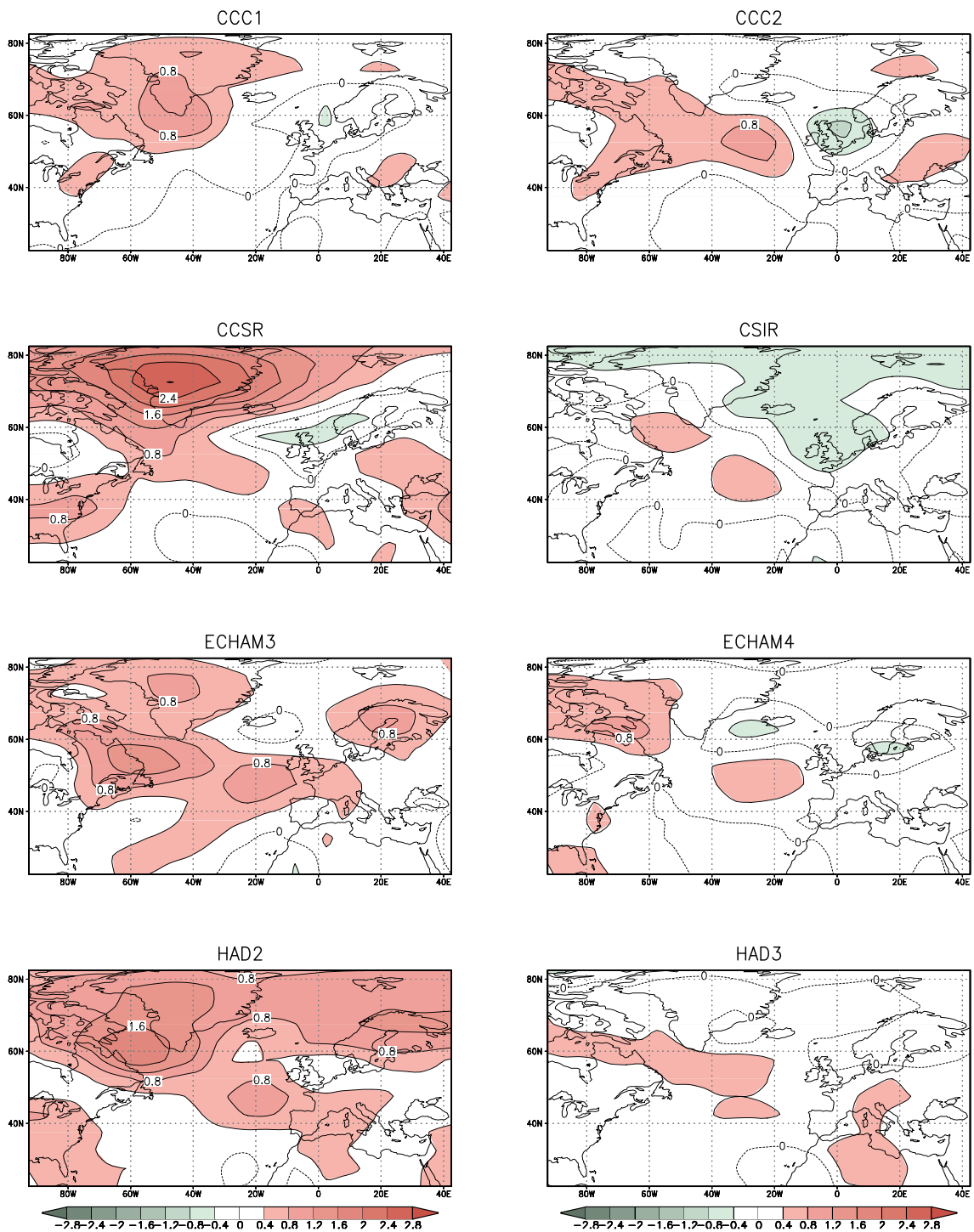
**Abbildung 3.11:** Bodendruckanomalien (Modelldaten–Messdaten) in hPa im nordatlantisch-europäischen Raum im Sommer über die Periode von 1961 bis 1990. Überschätzungen durch das betreffende Klimamodell sind rot schattiert, Unterschätzungen grün. Dunkelblaue Linien stellen den  $p$ -Wert 0.05 (95%-Signifikanzniveau) und hellblaue Linien den  $p$ -Wert 0.01 (99%-Signifikanzniveau) des Wilcoxon-Tests dar.

ECHAM4 festgestellt werden. Gegenüber den beiden vorangehenden Modellen fallen die Anomalien mit höchsten  $+3.3$  hPa nordwestlich von Grönland deutlich kleiner aus. Über der Davisstrasse, Nordskandinavien und dem nördlichen Mittelmeerraum sowie östlich von Neufundland und südlich von Island stimmt die Simulation gut mit den Analysedaten überein. Auch über dem Alpenraum und Mitteleuropa sind die Differenzen gering, jedoch liegt dort die Signifikanz unter 95%. Beim HAD2 können keine nennenswerte positive Anomalien gefunden werden. Mit Ausnahme zwei kleiner Bereiche bei Nordostgrönland und Ägypten wird das Bodendruckfeld im gesamten Untersuchungsraum um maximal  $-6.5$  hPa unterschätzt. Dieser Wert darf aber nicht überinterpretiert werden, denn flächenmässig liegen die Abweichungen in grossen Bereichen zwischen  $-1$  hPa und  $-3$  hPa. Im Mittelmeerraum betragen die grössten Differenzen  $-2$  hPa. HAD3 zeigt ein ganz anderes Bild. Ungefähr nördlich des 60. Breitengrads sind mit Ausnahme Grönlands nur Überschätzungen und südlich des 50. Breitengrads häufig Unterschätzungen des Bodendruckfelds zu finden. Über Zentralgrönland liegt wie in den anderen Jahreszeiten eine negative Anomalie. Sie ist im Sommer mit  $-1.1$  hPa am wenigsten ausgeprägt. Über grossen Teilen des Atlantiks stimmen die Simulationsdaten gut mit den Messdaten überein, während die Abweichungen im mitteleuropäischen Raum und dem Mittelmeer zwischen  $0$  hPa und  $-3$  hPa betragen. Die deutlichste negative Anomalie mit Abweichungen um  $-5.5$  hPa liegt östlich der Kanarischen Inseln.

### 3.2.3.3 Variabilität

Die Variabilität ist im Sommer am kleinsten und das wirkt sich entsprechend auf die Differenzfelder aus. In Abbildung 3.12 ist auf den ersten Blick augenfällig, dass rote Schattierungen, also Überschätzungen der Variabilität durch die Klimamodelle, in den Grafiken dominieren. Bei einigen Simulationen sind keine grünen Flächen zu finden und mit wenigen Ausnahmen liegen die Isolinien deutlich weiter auseinander als im Winter, wodurch die einleitende Aussage bestätigt wird. Grosse, weisse Flächen dürfen nicht prinzipiell als bessere Simulationsergebnisse interpretiert werden, da auf Grund der kleineren Sommervariabilität die Fehlerwerte entsprechend geringer ausfallen.

CCC1 zeigt die grössten positiven Anomalien im Bereich des ITs und an der Südspitze Grönlands. Über Westeuropa, Nordskandinavien und dem Ostatlantik stimmen die Modelldaten mit den Analysedaten mehrheitlich überein. Über der Nordsee liegt die einzige nennenswerte Negativanomalie mit Kernwerten um  $-0.4$  hPa. Sie ist beim CCC2 ausgeprägter und erreicht eine Maximalabweichung von rund  $-0.9$  hPa. Positive Anomalien können bei diesem Modell westlich der Britischen Inseln im Atlantik, bei Neufundland und der Hudsonstrasse gefunden werden. Kleinere liegen über Osteuropa und beim Nordkap. Teile Mitteleuropas und der Bereich des AHs wird angemessen wiedergegeben. Die



**Abbildung 3.12:** Differenzfelder der Standardabweichungen im Sommer über die Periode von 1961 bis 1990. Positive Werte sind rot schattiert und bedeuten eine Überschätzung der Variabilität durch das betreffende Klimamodell. Negative Werte sind grün schattiert und bedeuten eine Unterschätzung. Der Isolinienabstand beträgt 0.4 hPa.



grössten positiven Abweichungen in dieser Saison simuliert das CCSR mit Maximalwerten von +2.8 hPa über Westgrönland und liegt damit sogar höher als die von den Analysedaten in dieser Saison erreichte Maximalvariabilität. Das heisst, das Modell überschätzt die Variabilität in diesem Bereich um mehr als das Doppelte, was bei den ohnehin geringen Standardabweichungen im Sommer als schwerwiegend eingestuft werden muss. Bei Schottland liegt mit -0.6 hPa eine negative Anomalie. Das CSIR unterschätzt die Variabilität der hohen Breiten. Die grösste Abweichung mit -0.8 hPa liegt östlich von Spitzbergen. Bei keinem anderen Modell kann eine ähnlich grosse Fläche mit Negativwerten gefunden werden. Positive Anomalien liegen über der Davisstrasse und dem zentralen Atlantik, während im Mittelmeerraum gute Ergebnisse vorliegen. ECHAM3 weicht mit maximal +1.5 hPa von den Messdaten ab und überschätzt die Variabilität in grossen Teilen des Atlantiks und des Nordwestens des Untersuchungsraums. Über Skandinavien und Westeuropa können weitere positive Abweichungen gefunden werden. ECHAM4 zeigt die grösste positive Anomalie im Bereich des ITs. Die Variabilität des AHs wird gut wiedergegeben. Ebenso stimmen die Modelldaten über Südostgrönland, den Britischen Inseln und Teilen Skandinaviens und Mitteleuropas mit den Messdaten überein. Südwestlich von Island und über Südschweden liegen schwach ausgeprägte Unterschätzungen. HAD2 zeigt besonders in den hohen Breiten teilweise markante Überschätzungen der Variabilität. Mit Maximalwerten von rund +1.9 hPa sind sie zwar kleiner als beim CCSR, erfahren aber flächenmässig eine grössere Ausdehnung. Ebenso zeigen sich positive Anomalien über dem Ostatlantik, Südwesteuropa und über den USA. HAD3 schneidet besser als sein Vorgänger ab. Nennenswerte Überschätzungen liegen über der Hudsonstrasse, dem Atlantik, Nordafrika und Italien. Nordeuropa und Teile Grönlands werden gut simuliert.

### 3.2.3.4 Zusammenfassende Fehlerübersicht im Sommer

Im Sommer fallen der  $W_{AN}$  und der  $W_{SD}$  im Mittel am kleinsten aus; die räumliche Korrelation und die erklärte Varianz erreichen die höchsten Werte (siehe Tabelle 3.4). Mit einem  $-AN$ -Wert von -9.94 hPa beim CCSR und einem  $+AN$ -Wert von +8,19 hPa beim CSIR können auch im Sommer deutliche Anomalien festgestellt werden. Beim  $\bar{m}_{AN}$  ist der Fehler von ECHAM4 mit -0.39 hPa am kleinsten, währenddem CCSR mit -2.72 hPa die grösste mittlere Abweichung zeigt. ECHAM4 und CCSR bilden auch beim  $W_{AN}$  die beiden Enden: Ersteres schneidet mit 1.64 hPa am besten und letzteres mit 3.61 hPa am schlechtesten ab. Die mittlere Variabilität wird vom CSIR als einziges Modell unterschätzt. Gleichzeitig erreicht es beim  $\bar{m}_{SD}$  mit -0.03 hPa den besten Wert. HAD2 liefert mit +0.53 hPa die grösste mittlere Variabilitätsabweichung. Beim  $W_{SD}$  weist ECHAM4 mit 0.28 das beste Resultat auf und liegt damit knapp vor CSIR und HAD3 mit jeweils 0.29. CCSR und HAD2 zeigen mit 0.69 beziehungsweise 0.66 die grössten Fehler.

**Tabelle 3.4:** Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Sommermittels der Analysedaten. Für die Erklärung der Abkürzungen wird auf Tabelle 3.1, Seite 27 verwiesen.

Mod	$-AN$	$+AN$	$\bar{m}_{AN}$	$W_{AN}$	$-SD$	$+SD$	$\bar{m}_{SD}$	$W_{SD}$	$r$	$EV$
CCC1	-6.06	+3.04	-1.91	2.86	-0.42	+1.18	+0.41	0.33	+0.94	+0.87
CCC2	-4.74	+2.29	-0.97	1.88	-0.90	+1.07	+0.15	0.34	+0.95	+0.90
CCSR	-9.94	+1.46	-2.72	3.61	-0.60	+2.82	+0.41	0.69	+0.93	+0.84
CSIR	-3.39	+8.19	+1.23	3.03	-0.81	+0.77	-0.03	0.29	+0.82	+0.60
ECH3	-7.25	+6.25	-1.00	3.00	-0.45	+1.48	+0.36	0.49	+0.80	+0.36
ECH4	-3.71	+3.85	-0.39	1.64	-0.60	+1.05	+0.13	0.28	+0.94	+0.85
HAD2	-6.46	+0.57	-2.04	2.34	-0.14	+1.94	+0.53	0.66	+0.97	+0.95
HAD3	-5.53	+5.01	-0.44	2.11	-0.50	+0.68	+0.20	0.29	+0.91	+0.82

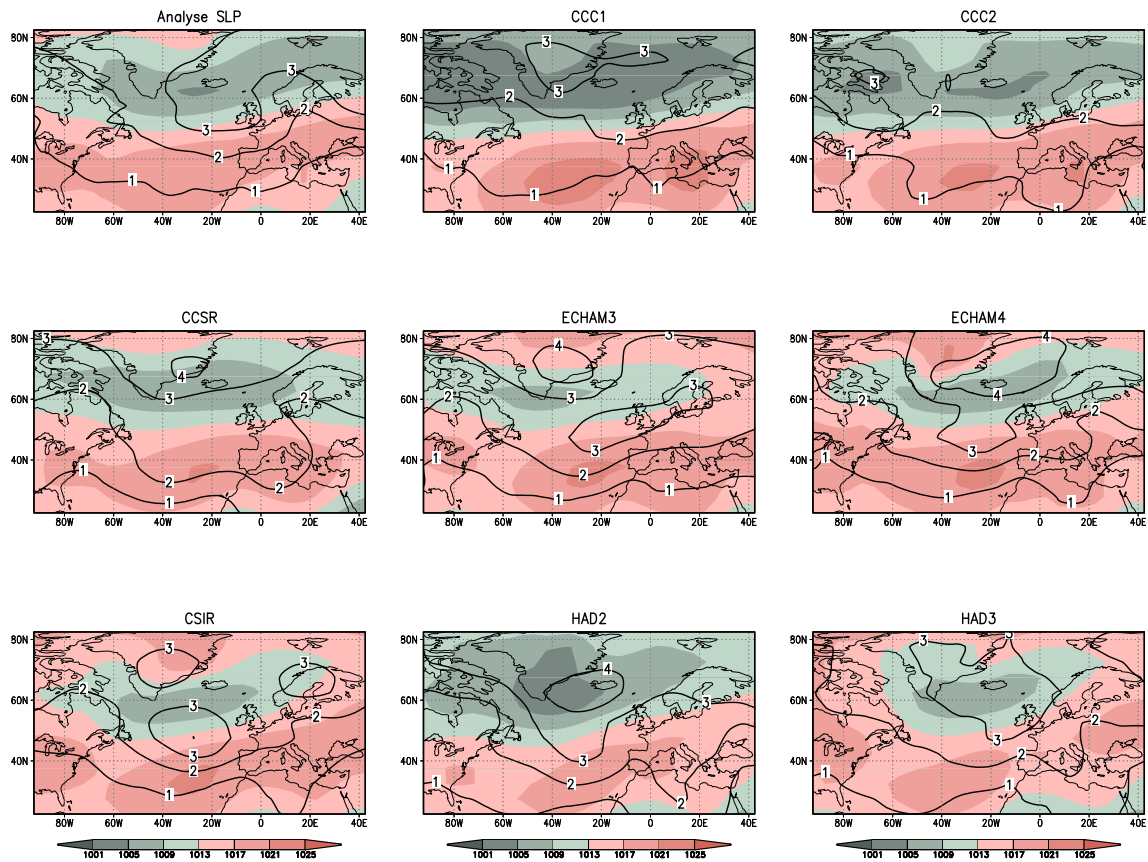
Die räumliche Korrelation erreicht bei allen Modellen Werte von mindesten +0.80. Bei sechs Modellen liegt sie sogar über +0.90. Die beste Übereinstimmung mit +0.97 liefert HAD2, derweil das Bodendruckfeld der ECHAM3-Simulation mit +0.80 korreliert. Bei der erklärten Varianz weist wiederum HAD2 mit +0.95 das beste Ergebnis auf, während CSIR mit +0.60 und ECHAM3 mit +0.36 weniger gut abschneiden.

### 3.2.4 Herbst

#### 3.2.4.1 Druckfelder

Das Bodendruckfeld der Analysedaten (siehe Abbildung 3.13) ist im Vergleich zum Sommer differenzierter. Das IT liegt mit dem Zentrum südwestlich von Island deutlich näher bei Europa und die Tiefdruckrinne bis über Nordskandinavien ist bereits gut sichtbar. Sie wird im Winter wiederum ihre stärkste Ausprägung erreichen (siehe Abbildung 3.4). Das AH ist mit knapp 1021 hPa Kerndruck etwas schwächer als in der vorangegangenen Saison. Die Variabilität erreicht mit rund 3.5 hPa ein lokales Maximum südlich von Island und mit 3.9 hPa im Nordosten den höchsten Wert im Untersuchungsraum. Der Maximalwert ist um 1.5 hPa grösser als das entsprechende Sommermaximum.

Beim CCC1 ist die Tiefdruckrinne deutlich modelliert und erstreckt sich von der Bafininsel über Südgrönland bis nach Nordskandinavien. Im Unterschied zu den Messdaten sind im Nordteil nur Werte unter 1013 hPa zu finden. Im Südteil kann nebst dem AH ein zweiter Bereich mit höherem Druck über dem zentralen Mittelmeer ausgemacht werden. Sein Kerndruck ist mit 1021.9 hPa nur um 1.1 hPa tiefer als jener des AHs. Die Variabilität ist über Südostgrönland am stärksten. Beim CCC2 ist die Tiefdruckrinne etwas weniger stark ausgeprägt als bei seinem Vorgänger. Mit 1004 hPa ist der tiefste Wert südöstlich von Island zu finden. Der Kerndruck des AHs beträgt 1021.9 hPa und der oben erwähnte



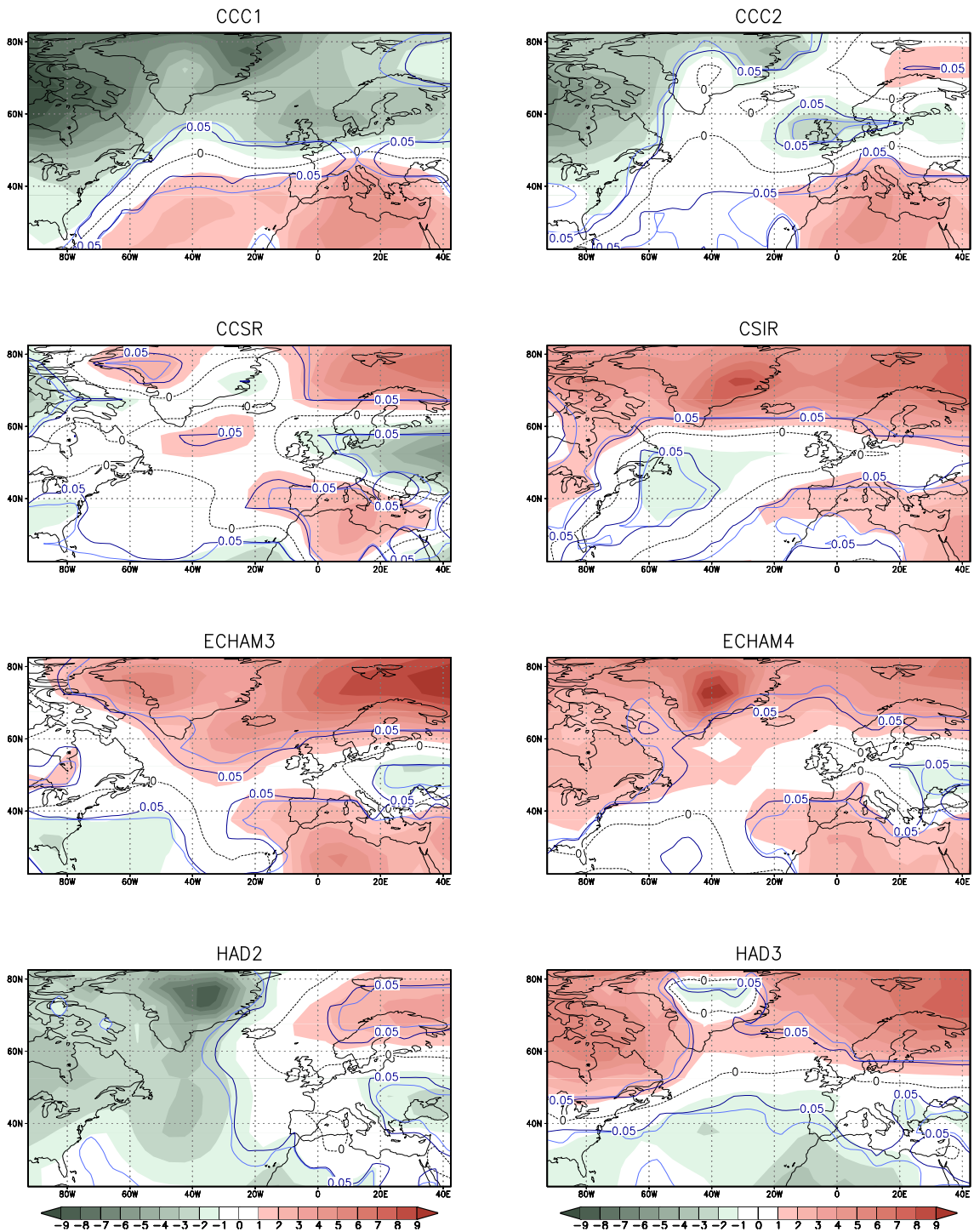
**Abbildung 3.13:** Mittlere Bodendruckfelder im Herbst in hPa (schattiert) und Standardabweichungen (konturiert) der Analysedaten (oben links) und der verwendeten Klimamodelle über die Untersuchungsperiode von 1961 und 1990. Der Isolinienabstand beträgt 4 hPa bei den Bodendruckfeldern und 1 hPa bei den Standardabweichungen.

zweite Bereich über dem Mittelmeer ist beim CCC2 mit 1021.1 hPa gegenüber dem AH nur um 0.8 hPa kleiner. Die grösste Variabilität zeigt das Modell im Süden der Baffininsel mit einem Wert von rund 3 hPa. Das CCSR berechnet ganz im Norden Druckwerte über 1013 hPa und dürfte dadurch zumindest im Nordwesten näher an die Messdaten heran kommen. Ähnliches gilt für die Tiefdruckbereiche im Westteil und für das AH, welches im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Modellen weniger stark simuliert ist. Das Variabilitätsmaximum kann mit einem Wert von 4.1 hPa bei Ostgrönland gefunden werden. Beim CSIR ist der Tiefdruckbereich räumlich gesehen kleiner und südlicher gelegen als beim CCSR und mit einem Tiefstwert von 1006 hPa auch hinsichtlich des Druckschwächer ausgeprägt. Bei der Variabilität zeigen sich lokale Zentren über Skandinavien, Grönland und dem Atlantik. Der gesamte Tiefdruckbereich liegt beim ECHAM3 eher westlich und der Kern des ITs ist bei der Südspitze Grönlands lokalisiert. Das AH ist im Westen etwas schwächer als bei den Analysedaten, während über dem Mittelmeerraum

der Bodendruck höher berechnet wird. Die grösste Variabilität mit einem Höchstwert von 4.4 hPa liegt über Grönland. ECHAM4 modelliert die Tiefdruckrinne zwar schwächer als die Messdaten, aber sie erstreckt sich im Unterschied zum ECHAM3 von der Baffininsel bis über Nordskandinavien. Im Innern Grönlands liefert ECHAM4 Bodendruckwerte bis 1021.5 hPa, welche in dieser Region von keinem anderen Modell übertroffen werden. Das AH wird ähnlich wiedergegeben wie beim Vorgängermodell. Das Variabilitätsmaximum mit einem Wert von knapp 5 hPa ist nordöstlich von Island zu finden. Beim HAD2 ist das IT stark ausgeprägt und nördlich vom 60. Breitengrad liegen alle Bodendruckwerte unter 1013 hPa. Die bei den Analysedaten beobachtete Tiefdruckrinne, hat beim HAD2 zusätzlich eine deutlich meridionale Ausdehnung, was besonders über Grönland zu grösseren Druckdifferenzen führt. Das AH und das Bodendruckfeld Europas ist vergleichsweise schwächer simuliert. Die grösste Variabilität ist bei Island auszumachen. Das neuere HAD3 berechnet den Tiefdruckbereich schwächer als sein Vorgänger. Die Lage des ITs stimmt zwar einigermaßen mit den Messdaten überein, doch liegen die Druckwerte westlich und östlich davon über 1013 hPa. Das AH ist im Unterschied zum HAD2 westlicher zentriert, während über Osteuropa höhere Drücke zu beobachten sind. Mit Werten um 3.5 hPa wird die Variabilität bei Island maximal.

#### 3.2.4.2 Anomalien

Beim Betrachten der Anomalien in Abbildung 3.14 zeigt CCC1 ein zweigeteiltes Bild. Ungefähr nördlich vom 50. Breitengrad liegen Unterschätzungen und südlich davon, mit Ausnahme der Region um Florida, Überschätzungen des Bodendruckfelds. Die grösseren negativen Anomalien sind im Nordwesten der Baffin Bay, über Ostgrönland und Schottland zu finden und erreichen der Reihe nach Druckdifferenzen von -10 hPa, -8.2 hPa und -4.5 hPa. Positive Anomalien liegen über dem südlichen Mittelmeerraum und im Bereich des AHs, wobei erstere mit knapp +5 hPa am deutlichsten abweicht. Die drei erwähnten Negativanomalien können auch beim CCC2 erkannt werden, sie weichen jedoch mit Werten von -6.3 hPa, -4.2 hPa und -2.5 hPa weniger stark von den Analysedaten ab. Über Südgrönland, Island und im Bereich des AHs schneidet das Modell gut ab, während das Bodendruckfeld im Mittelmeerraum mit maximal +4.5 hPa überschätzt wird. Beim CCSR sind im Nordosten des Untersuchungsraums, südwestlich von Island, über Nordwestgrönland und dem Mittelmeerraum positive Abweichungen zu sehen. Im Alpenraum, in Teilen Südostgrönlands und Islands sowie über Ostkanada stimmen die Modelldaten mit den Messdaten überein. Im Osten Europas betragen die Abweichungen maximal -6 hPa. Nördlich vom 60. Breitengrad wird das Bodendruckfeld vom CSIR durchgehend überschätzt. Mit Abweichungen von +8.5 hPa über Ostgrönland und +7.5 hPa im Nordosten fallen diese deutlich aus. Ebenso liegen positive Anomalien über dem Mittelmeerraum und dem Na-

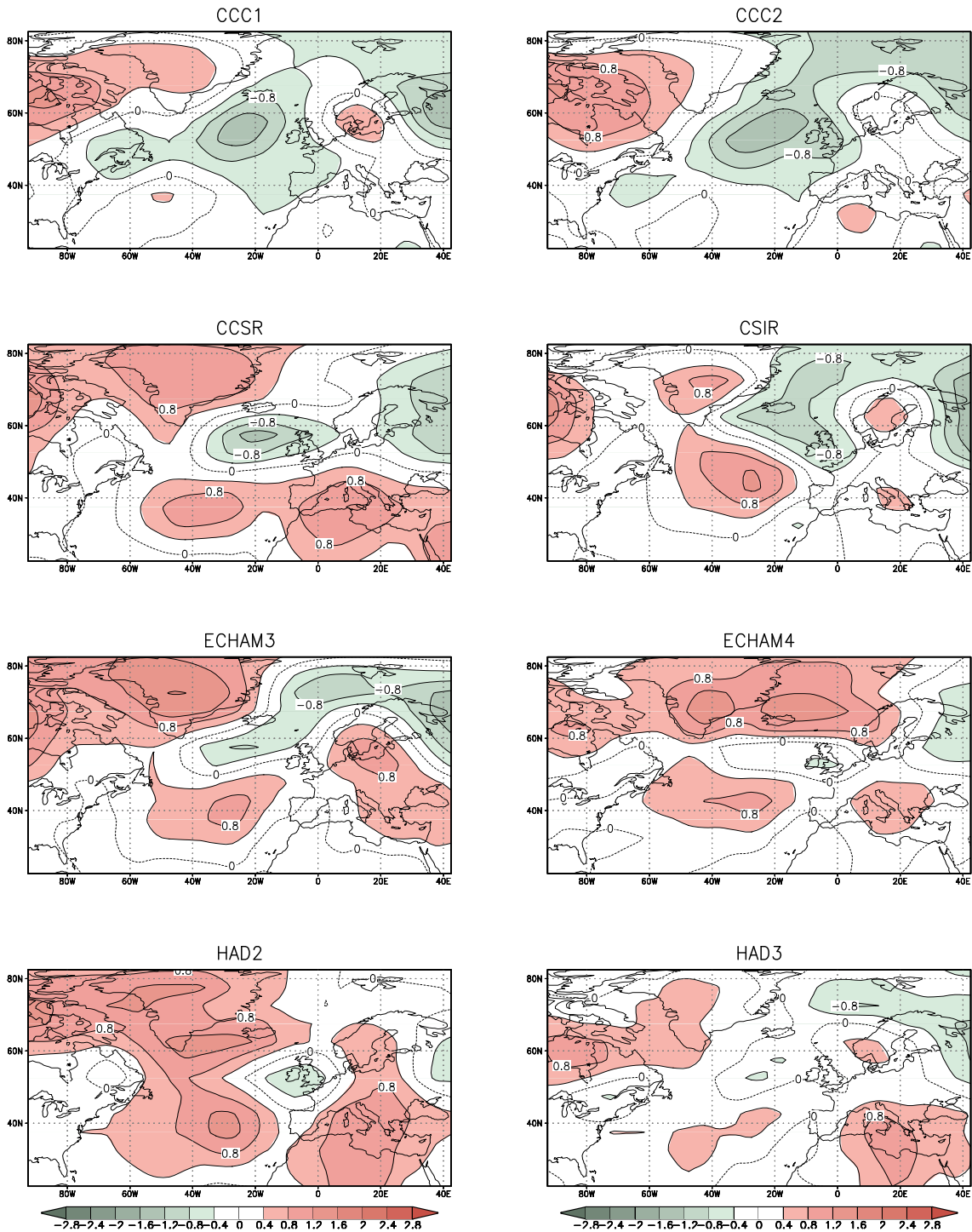


**Abbildung 3.14:** Bodendruckanomalien (Modelldaten–Messdaten) in hPa im nordatlantisch-europäischen Raum im Herbst über die Periode von 1961 bis 1990. Überschätzungen durch das betreffende Klimamodell sind rot schattiert, Unterschätzungen grün. Dunkelblaue Linien stellen den p-Wert 0.05 (95%-Signifikanzniveau) und hellblaue Linien den p-Wert 0.01 (99%-Signifikanzniveau) des Wilcoxon-Tests dar.

hen Osten. Bei den Britischen Inseln und der Ostküste Nordamerikas simuliert das Modell gute Werte. Im Westatlantik liegt eine schwache negative Anomalie. ECHAM3 überschätzt grösstenteils das Bodendruckfeld der hohen Breiten und zeigt die maximale Abweichung mit +9.9 hPa im Nordosten. Über Ostgrönland und Nordafrika werden Werte um +5.6 hPa beziehungsweise +5.2 hPa erreicht. Im Westen Kontinentaleuropas stimmt das Modell angemessen mit den Analysedaten überein. Gleiches gilt für Neufundland und den Nordwesten der Hudson Bay. Über Osteuropa liegen die grössten Abweichungen bei -2.2 hPa. ECHAM4 überschätzt nördlich vom 60. Breitengrad das Bodendruckfeld durchgehend. Mit Werten bis +10,2 hPa ist über Grönland die grösste positive Anomalie im Herbst unter allen Modellen zu finden. Weitere positive Anomalien liegen über Ostkanada, dem südlichen Mittelmeerraum und dem Atlantik westlich von Spanien. Die einzige nennenswerte Negativanomalie mit Werten von -2 hPa kann über Osteuropa ausgemacht werden. Die Simulation stimmt im westlichen Bereich des AHs und Nordwesten Europas gut mit den Analysedaten überein. Beim HAD2 wird das Bodendruckfeld im westlichen Teil des Untersuchungsraums unterschätzt. Die grösste negative Anomalie liegt über Grönland, gefolgt von lokalen Anomalien im Südwesten der Hudson Bay und westlich von Neufundland. Ihre Abweichungen betragen der Reihe nach -8.6 hPa, -3.8 hPa und -3.2 hPa. Schwächer ausgeprägte negative Anomalien liegen über dem Schwarzen Meer und südlich der Kanarischen Inseln. Überschätzungen mit Maximalwerten um +3.5 hPa sind im Nordosten zu finden, während das Bodendruckfeld über Island, Südkandinavien, den Britischen Inseln und dem westlichen Mittelmeerraum gut wiedergegeben wird. Beim HAD3 können im nördlichen Drittel abgesehen von Grönland nur positive Anomalien festgestellt werden. Das Differenzfeld deckt sich somit in dieser Region bezüglich des Musters mit den anderen Jahreszeiten. Das Druckfeld weicht über Grönland mit höchstens -2.1 hPa von den Analysedaten ab. Die grösste negative Abweichung ist südlich der Kanarischen Inseln mit -3.8 hPa zu sehen. Über Westeuropa liefert das Modell gute Ergebnisse.

### 3.2.4.3 Variabilität

In Abbildung 3.15 können beim CCC1 vor allem in der nördlichen Hälfte Unterschiede zu den Analysedaten festgestellt werden. Im Nordosten unterschätzt das Modell die Variabilität mit Werten bis -1.5 hPa und im Nordatlantik bis -1.4 hPa. Nördlich der Hudson Bay liegt eine positive Anomalie mit Maximalwerten von +1.3 hPa. Eine weitere erwähnenswerte Anomalie mit Abweichungen bis 0.8 hPa kann bei Dänemark gesehen werden. In den niederen Breiten stimmt die simulierte Variabilität angemessen mit den Messdaten überein. Besonders im östlichen Mittelmeerraum werden gute Resultate erzielt. Bei der CCC2-Simulation zeigen sich wie bei seinem Vorgänger im Nordatlantik und im Nordosten negative und nördlich der Hudson Bay positive Anomalien. Die Negativanomalie über



**Abbildung 3.15:** Differenzfelder der Standardabweichungen im Herbst über die Periode von 1961 bis 1990. Positive Werte sind rot schattiert und bedeuten eine Überschätzung der Variabilität durch das betreffende Klimamodell. Negative Werte sind grün schattiert und bedeuten eine Unterschätzung. Der Isolinienabstand beträgt 0.4 hPa.

dem Atlantik erreicht mit  $-1.5$  hPa eine leicht stärkere Ausprägung als die entsprechende beim CCC1. Die beiden anderen Anomalien weichen weniger stark von den Analysedaten ab. Im Bereich der westlichen und nördlichen Mittelmeerküste sowie über Teilen Südkanindiens und Osteuropas schneidet das Modell gut ab. Gute Resultate werden ebenfalls über Grönland, Neufundland und Florida erreicht. Beim CCSR liegen negative Anomalien westlich von Schottland und über Nordosteuropa mit Höchstabweichungen von  $-1.4$  hPa beziehungsweise  $-1.1$  hPa und positiven Anomalien über Grönland, Nordkanada, dem Mittelmeerraum und dem Zentralatlantik mit lokalen Maxima in der gleichen Reihenfolge von  $+1.2$  hPa,  $+1.4$  hPa,  $+1.2$  hPa, und  $+1.1$  hPa. Die Variabilität im Osten Nordamerikas wird gut wiedergegeben. Das CSIR unterschätzt die Variabilität über den Britischen Inseln, Island und im Nordosten des Untersuchungsraums. Die Maximaldifferenz von  $-1.5$  hPa ist über der Barentsee zu finden. Positive Anomalien mit einer Abweichung von mindesten  $+0.9$  hPa liegen über Grönland, dem Atlantik und nordwestlich der Hudson Bay, während kleinere über Skandinavien und Süditalien lokalisiert sind. Die Variabilität der niederen Breiten wird im Allgemeinen gut modelliert. ECHAM3 überschätzt die Variabilität im Nordwesten und simuliert die grösste positive Anomalie mit einem Maximalwert von  $+1.6$  hPa über Westgrönland. Weitere positive Anomalien liegen über Zentraleuropa und dem Atlantik. In einem Band, das südlich von Island beginnt und über Spitzbergen weiter nach Osten reicht, wird die Variabilität unterschätzt. Die Modelldaten stimmen hingegen über der Iberischen Halbinsel, Nordafrika und der Ostküste der USA gut mit den Analysedaten überein. Beim ECHAM4 wird die Variabilität in grossen Teilen der hohen Breiten überschätzt. Über Südgrönland und bei Island werden mit jeweils  $+1.5$  hPa die grössten Abweichungen festgestellt. Kleinere Anomalien liegen über dem Atlantik und Südeuropa. Nennenswerte negative Abweichungen sind einzig über den Britischen Inseln und Nordosteuropa zu finden. Die Variabilität im Osten der USA und im südlichen Bereich des AHs sowie über Teilen Europas wird durch die Simulation gut repräsentiert. Beim HAD2 können zwei grössere Gebiete mit positiven Abweichungen ausgemacht werden. Eines erstreckt sich vom Nordwesten des Untersuchungsraums über den Atlantik bis zum AH, während das andere von Nordafrika bis nach Skandinavien reicht. Dazwischen liegt über den Britischen Inseln eine negative Anomalie mit Tiefstwerten um  $-0.7$  hPa. Bei Spitzbergen, über Finnland und Quebec schneidet das Modell gut ab. Gegenüber seinem Vorgänger können bei HAD3 weniger ausgedehnte Anomalien beobachtet werden. Überschätzungen liegen im Norden Kanadas, über der Davisstrasse und dem Mittelmeerraum, Unterschätzungen im Norden Skandiavien.



### 3.2.4.4 Zusammenfassende Fehlerübersicht im Herbst

Ähnlich wie im Frühling kann beim CCC1 ein  $-AN$ -Tiefstwert von  $-10.23$  hPa festgestellt werden (siehe Tabelle 3.5). Überraschend ist der hohe  $+AN$ -Wert von  $+10.18$  hPa beim ECHAM4. Es handelt sich allerdings um eine kleinflächige Anomalie, deren Einfluss auf den  $W_{AN}$  mit einem Wert von  $2.14$  hPa nur gering ausfallen dürfte. Grösser sind die Auswirkungen beim  $\bar{m}_{AN}$ . ECHAM4 schneidet hier am schlechtesten ab, währenddem beim CCSR mit  $+0.02$  hPa und CCC2 hPa mit  $0.04$  hPa die kleinsten mittleren Abweichungen resultieren. Der  $W_{AN}$  ist mit  $1.84$  hPa beim CCSR am kleinsten und mit  $3.47$  hPa beim CCC1 am grössten. Die mittlere Variabilität wird von zwei Modellen unterschätzt. Mit einer Abweichung von  $+0.01$  hPa erreicht CSIR das beste Ergebnis, währenddem beim HAD2 mit  $+0.49$  hPa die grösste Differenz resultiert. Beim  $W_{SD}$  liefert HAD mit  $0.64$  hPa das schlechteste und HAD3 mit  $0.41$  hPa das beste Resultat. Das heisst, dass bei diesem Fehlermass alle Modelle innerhalb einer Bandbreite von lediglich  $0.23$  hPa liegen.

Wie schon im Sommer (siehe Tabelle 3.4) erreichen bei der räumlichen Korrelation alle Modelle mindesten den Wert  $0.80$ . Fünf Modelle erzielen Werte von mindesten  $+0.90$ . Am besten korrelieren mit  $+0.93$  die Simulationsdaten von HAD2 mit dem Bodendruckfeld der Analysedaten. Bei der  $EV$  sind die Unterschiede grösser. Das beste Ergebnis mit  $+0.86$  liefert HAD2. Dessen Nachfolger HAD3 schneidet mit einer  $EV$  von  $+0.36$  am schlechtesten ab.

**Tabelle 3.5:** Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Herbstmittels der Analysedaten. Für die Erklärung der Abkürzungen wird auf Tabelle 3.1, Seite 27 verwiesen.

Mod	$-AN$	$+AN$	$\bar{m}_{AN}$	$W_{AN}$	$-SD$	$+SD$	$\bar{m}_{SD}$	$W_{SD}$	$r$	$EV$
CCC1	$-10.23$	$+4.98$	$-0.68$	$3.47$	$-1.52$	$+1.30$	$-0.12$	$0.47$	$+0.90$	$+0.73$
CCC2	$-6.30$	$+4.52$	$+0.04$	$2.12$	$-1.47$	$+1.22$	$-0.12$	$0.52$	$+0.92$	$+0.83$
CCSR	$-6.13$	$+6.83$	$+0.02$	$1.84$	$-1.38$	$+1.44$	$+0.26$	$0.59$	$+0.90$	$+0.79$
CSIR	$-1.80$	$+8.50$	$+1.29$	$2.38$	$-1.51$	$+1.38$	$+0.01$	$0.46$	$+0.87$	$+0.66$
ECH3	$-2.21$	$+9.94$	$+1.27$	$2.67$	$-1.44$	$+1.61$	$+0.21$	$0.53$	$+0.82$	$+0.47$
ECH4	$-1.97$	$+10.18$	$+1.37$	$2.14$	$-0.80$	$+1.54$	$+0.21$	$0.46$	$+0.92$	$+0.79$
HAD2	$-8.60$	$+3.47$	$-1.36$	$2.06$	$-0.75$	$+1.44$	$+0.49$	$0.64$	$+0.93$	$+0.86$
HAD3	$-3.80$	$+7.76$	$+0.23$	$2.48$	$-0.85$	$+1.00$	$+0.20$	$0.41$	$+0.80$	$+0.36$



# Kapitel 4

## Diskussion

In diesem Kapitel werden einige Resultate analysiert und mit Ergebnissen anderer Studien verglichen. Es ist zu sagen, dass kaum Untersuchungen existieren, die in dieser Region und in vergleichbarem Umfang Bodendruckfelder von GCMs ausgewertet haben. Verschiedene Arbeiten benutzen zwar ähnliche Untersuchungsräume, konzentrieren sich jedoch auf die Bodentemperatur oder den Niederschlag. Als einzige direkte Vergleichsmöglichkeit bietet sich die Forschungsarbeit von Kobel und Gyalistras (2002) an, bei der drei Modelle mit dem hier verwendeten Messdatensatz überprüft wurden. Ansonsten erfolgt die Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext soweit möglich im Rahmen der internationalen Vergleichsprojekte CMIP und AMIP, auf die sich das IPCC bei der Modellvalidierung hauptsächlich bezieht (IPCC 2001a). Im ersten Abschnitt wird auf die Eingrenzung des Untersuchungsraums eingegangen. Im zweiten Abschnitt erfolgt die Gesamtübersicht bevor im dritten Abschnitt einige Hauptprobleme der Modelle im einzelnen diskutiert werden. Die Unterschiede in den Modelldaten auf Grund der verschiedenen Emissionsszenarien spielen bis 1990 eine untergeordnete Rolle (IPCC 2001a) und werden daher in der Diskussion nicht berücksichtigt.

### 4.1 Eingrenzung des Untersuchungsraums

Die Selektion des Untersuchungsraums ist zweifelsfrei entscheidend für die Ergebnisse aller Fehlermasse. So würde beispielsweise ein Ausschliessen der Breiten nördlich von  $60^\circ$  N bei einigen Modellen zu deutlich besseren Resultaten beim  $W_{AN}$  führen, da in Polnähe häufig markante Anomalien vorliegen (siehe zum Beispiel Abbildung 3.8) und somit deren Einflüsse auf die Berechnungen entfallen würden.

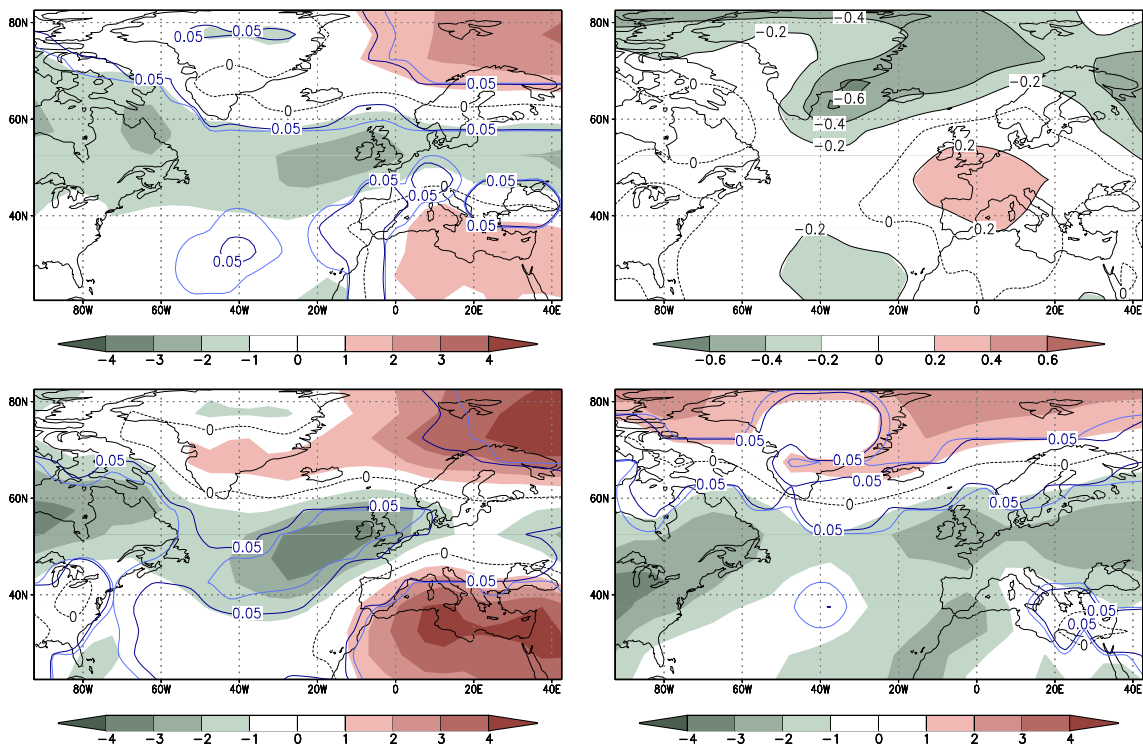
Die Gliederung der Erdoberfläche in Regionen zwecks Modellvalidierung wird vom IPCC als grundsätzliches Problem beschrieben. Eine Region wird dabei vage als Bereich von  $10^4 \text{ km}^2$  bis  $10^7 \text{ km}^2$  definiert (IPCC 2001a). Die Arbeit von Giorgi und Francisco

(2000), in welcher die Kontinente in Subregionen eingeteilt werden, dient dem IPCC als Vorlage. Diese Studie wiederum nimmt Bezug auf die Raumeinteilung von Kittel et al. (1998), ohne aber deren exakte Gliederung zu übernehmen, wenngleich teilweise dieselbe Namensgebung für Subräume verwendet wird. So wird etwa Nordeuropa bei Giorgi und Francisco (2000) in den Grenzen  $48^\circ\text{N}$ – $75^\circ\text{N}$  und  $10^\circ\text{W}$ – $40^\circ\text{E}$  definiert, derweil Kittel et al. (1998) dieselbe Region mit  $50^\circ\text{N}$ – $80^\circ\text{N}$  und  $20^\circ\text{W}$ – $60^\circ\text{E}$  angeben. Eine weitere Studie grenzt Nordeuropa mit  $47.5^\circ\text{N}$ – $67.5^\circ\text{N}$  und  $10^\circ\text{W}$ – $40^\circ\text{E}$  ab (Ruosteenoja et al. 2003). Bei all diesen Untersuchungen werden andere Variablen als der Bodendruck betrachtet, was gegebenenfalls unterschiedliche Raumgliederungen erfordert und dadurch den Anspruch nach einer einheitlich definierten Einteilung schwierig macht. Kobel und Gyalistras (2002) verwenden denselben Bodendruckmessdatensatz, grenzen den nordatlantisch-europäischen Raum im Westen und Osten jedoch bei  $62.5^\circ\text{W}$  bzw.  $62.5^\circ\text{E}$  ab. Die nördliche und südliche Abgrenzung entspricht der hier verwendeten.

Obwohl die beiden Untersuchungsräume ähnliche Ausmasse haben, weichen die Resultate, wie noch gezeigt wird, teils deutlich voneinander ab, sofern Berechnungsfehler ausgeschlossen sind. Dies verdeutlicht die eigentliche Problematik und muss bei der Interpretation von Ergebnissen stets beachtet werden. Die Raumgliederung unterliegt nicht zuletzt der subjektiven Sichtweise, wie Giorgi und Francisco (2000) zugeben. Neuere Arbeiten im Rahmen des CMIPs zeigen jedoch den Trend hin zu regionalen Vergleichen (siehe beispielsweise Stephenson und Pavan 2003, Ruosteenoja et al. 2003 oder Tebaldi et al. 2004), was eine einheitliche Gliederung der Erdoberfläche für Modellvergleichszwecke sinnvoll machen würde. Die Vorgehensweise zur Eingrenzung wurde unter Abschnitt 2.2.1 beschrieben und scheint im Vergleich mit anderen Studien gerechtfertigt.

## 4.2 Gesamtübersicht

Im Allgemeinen können die Resultate des CMIPs (Covey et al. 2003) bestätigt werden: Das Bodendruckdifferenzfeld aus der Mittelung (Model Mean) aller acht Modelle (siehe Abbildung 4.1 oben links) zeigt im Jahresmittel im Vergleich mit den Analysedaten eine Unterschätzung des Bodendruckfelds in den mittleren Breiten und eine Überschätzung im Mittelmeerraum. Die positive Anomalie im Nordosten des Untersuchungsraums ist bei Covey et al. (2003) ebenfalls zu finden. Im Nordwesten jedoch weichen beide Untersuchungen voneinander ab. Der Grund könnte bezüglich des Jahresmittels in dem vom CMIP nicht verwendeten CCC2 liegen, weil dieses Modell das Bodendruckfeld über Kanada und Grönland massiv unterschätzt (siehe Abbildung 3.2). Allerdings erreichen die Abweichungen in diesem Bereich praktisch keine nennenswerte Signifikanz, so dass die Verwendung unterschiedlicher Referenzdaten als mögliche Fehlerquelle überprüft werden müsste. Covey et al. (2003) benutzen die Re-Analysedaten des ECMWF (Gibson et al. 1997) anstelle der



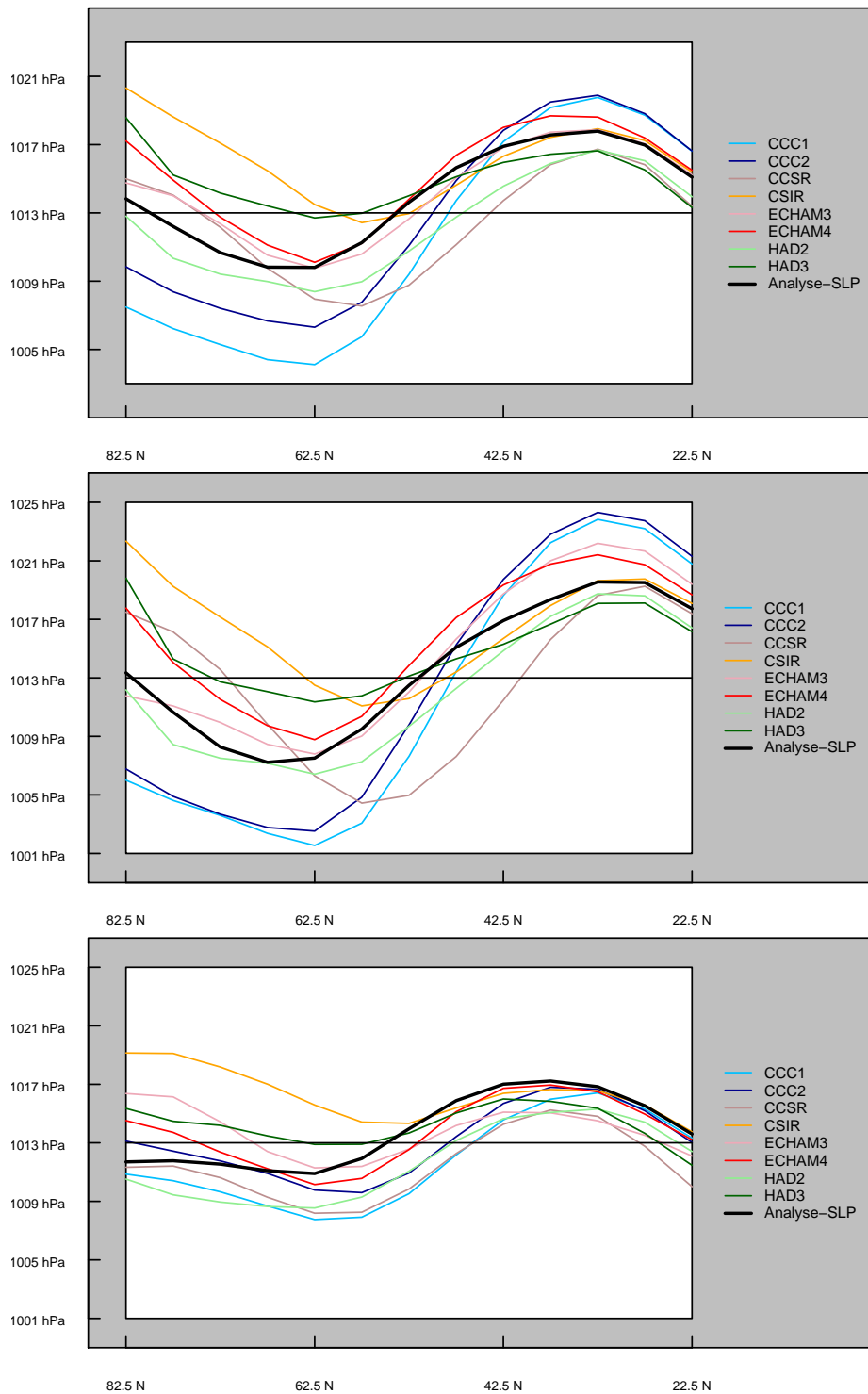
**Abbildung 4.1:** Differenzfelder des Bodendrucks in hPa gebildet aus dem Mittel (Model Mean) aller acht Modelle und den Analysedaten über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990 für das Jahresmittel (oben links), für das Wintermittel (unten links) und für das Sommermittel (unten rechts). Dunkelblaue Linien stellen den  $p$ -Wert 0.05 (95%-Signifikanzniveau) und hellblaue Linien den  $p$ -Wert 0.01 (99%-Signifikanzniveau) des Wilcoxon-Tests dar. Oben rechts ist das Differenzfeld der Standardabweichungen in hPa (Model Mean) bezüglich des Jahresmittels dargestellt.

hier verwendeten Messdaten (Trenberth und Paolino 1980). Ein Vergleich der Bodendruckfelder und der zonalen Jahresmittel zeigen jedoch eine sehr genaue Übereinstimmung der beiden Referenzdatensätze (siehe Abbildung 4.1 und 4.2). Im Winter zeigt sich ein ähnliches Bild: Das gemittelte Bodendruckdifferenzfeld aller acht Modelle zeigt nördlich von Skandinavien und über dem Mittelmeerraum positive Anomalien, während westlich der Britischen Inseln der Bodendruck unterschätzt wird. Die Ergebnisse zeigen damit eine gute Übereinstimmung mit den Resultaten von Lambert und Boer (2001) und Gates et al. (1999). Der Hauptunterschied liegt wie beim jährlichen Mittel im Bereich Grönlands und der kanadischen Inseln im Nordwesten des Untersuchungsraums. Im Unterschied zu Lambert und Boer (2001) und Gates et al. (1999), welche dieselben Re-Analysedaten wie Covey et al. (2003) verwenden, zeigen die hiesigen Resultate in dieser Region nur geringfügige Abweichungen von den Messdaten (siehe Abbildung 4.1 unten links). Die weiter oben

erwähnte Unsicherheit bezüglich der Referenzdaten bleibt auch im Winter bestehen, da die Fehlerwerte im Nordwesten des Untersuchungsraums grösstenteils keine Signifikanz erreichen. Wird das von Lambert und Boer (2001) nicht verwendete CCC2 von der Mittelwertbildung ausgeschlossen und das Differenzfeld erneut berechnet (nicht dargestellt), ergibt sich eine bessere Übereinstimmung. Covey et al. (2002) weisen auf Unsicherheiten von Re-Analysedaten hin. Diese Angelegenheit kann hier nicht abschliessend beantwortet werden. Dazu müsste eine erneute Auswertung mit den Re-Analysedaten von Gibson et al. (1997) vorgenommen werden. Im Sommer ist die Übereinstimmung mit Lambert und Boer (2001) in den hohen Breiten sehr genau (siehe Abbildung 4.1 unten rechts). Sowohl der Trend zunehmender Überschätzung des Bodendruckfelds gegen den Nordpol hin wie der Bereich geringer Abweichung über Zentralgrönland können bestätigt werden. In den mittleren und niederen Breiten jedoch wird das Bodendruckfeld hier deutlicher unterschätzt als bei Lambert und Boer (2001). Dies ist lediglich auf die Auswahl der hier verwendeten Modelle zurückzuführen, wie ein Vergleich der zonalen Mittel im Sommer (siehe Abbildung 4.2) beider Studien zeigt.

Die Variabilität fällt gemittelt über alle Modelle bei den vom CMIP verwendeten Simulationen in Teilen des Untersuchungsraums fast doppelt so gross aus. Das dürfte hauptsächlich mit den von Covey et al. (2003) verwendeten Modellen zusammen hängen, da die Lage der jeweiligen Variabilitätsmaxima gut mit den hiesigen Resultaten übereinstimmt. Einzelne Fehlerwerte der Modelle bezüglich der Variabilitätsabweichungen existieren zwar bei IPCC (2001a) und Covey et al. (2003). Sie repräsentieren allerdings die gesamte Erdoberfläche und fallen dadurch meistens geringer aus als in dieser Arbeit. Dies lässt sich relativ einfach mit dem Untersuchungsraum erklären, da die Variabilität gegen die Pole zu generell mit grösseren Unsicherheiten von den Modellen simuliert wird (Lambert und Boer 2001; Covey et al. 2003). Einzig bei ECHAM3 und ECHAM4 lässt sich eine angemessene Übereinstimmung mit IPCC (2001a) feststellen. In Abbildung 4.1 ist rechts das Differenzfeld der Standardabweichungen aus allen Modellen bezüglich des jährlichen Mittels dargestellt.

Die vom CMIP beobachtete grösser werdende Streuung der Modelle im zonalen Jahresmittel mit zunehmender Breite kann hier ebenso bestätigt werden (siehe Abbildung 4.2). Obwohl hier nur ein Teil der Nordhemisphäre betrachtet wird, stimmen einige Modelle gut mit den Ergebnissen von Covey et al. (2003) überein. Daraus lässt sich schliessen, dass bei diesen Simulationen die Unsicherheiten im Bereich des Aleutentiefs und nördlich davon in der gleichen Grössenordnung liegen dürften. In den Wintermonaten ist die Streuung wesentlich grösser als im Sommer (siehe Abbildung 4.2 Mitte und unten). Vor allem die Simulation des ITs scheint demnach mit grossen Unsicherheiten verbunden zu sein, da sich dessen stärkste Ausprägung in den Wintermonaten manifestiert. Dazu kommt, dass einige Modelle das IT zu südlich simulieren und dadurch einen wesentlich grösseren Druck-



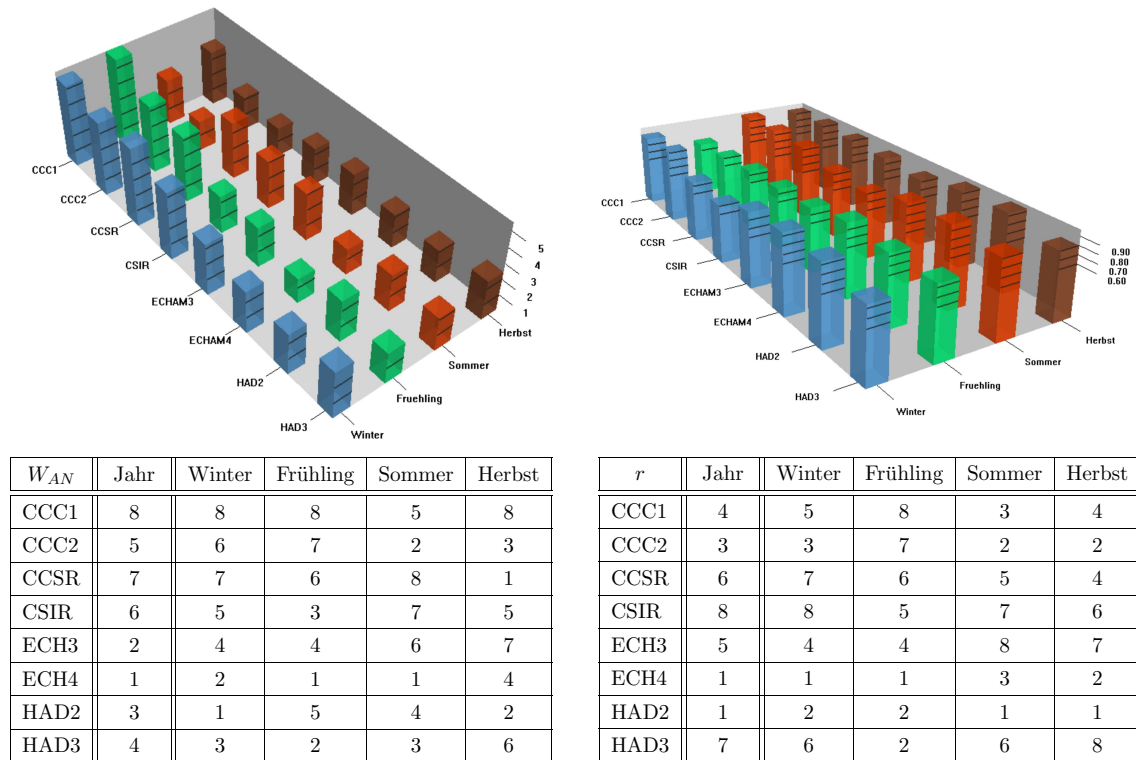
**Abbildung 4.2:** Zonale Jahresmittel (oben), zonale Wintermittel (Mitte) und zonale Sommermittel (unten) aller verwendeter Modelle über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990.

gradienten zwischen AH und IT aufweisen. Als Beispiele sind CCC1 und CCC2 zu nennen, die ausser im Sommer immer die grösste Druckdifferenz unter allen hier verwendeten Modellen zwischen AH und IT aufweisen. In diesem Zusammenhang wäre ein Vergleich der Temperatur- und Niederschlagsfelder dieser Modelle aufschlussreich, um die Folgen der verstärkten Zonalität zwischen den Druckzentren zu studieren (siehe Abschnitt 6). Interessant ist die Situation beim AH im Sommer. Obwohl die Modelle dicht beieinander liegen simulieren alle das AH zu schwach. Das heisst, dass die Subsidenz im Bereich des subtropischen AHs durchgehend zu klein ausfällt. Es fehlt an Masse. Dies würde ein zu geringer konvektiver Auftrieb im Bereich der innertropischen Konvergenzzone (ITC) bedingen und eine zu schwach ausgeprägte Passatzirkulation zur Folge haben. Diese Vermutung wird gestützt durch das von Lambert und Boer (2001) festgestellte Niederschlagsdefizit vieler Modelle im Bereich der ITC, was auf geringere Konvektion hinweist. Das trifft insbesondere auf die Modelle CCSR und HAD2 zu (siehe Abschnitt 4.3).

In den meisten Studien werden Differenzfelder und zonale Mittel ausgewertet und interpretiert. Das Erstellen einer Rangierung scheint unüblich, wird aber im Folgenden bezüglich zweier Fehlermasse gemacht, um damit ein Gesamtüberblick zu erhalten. Die nicht rangierten Fehlermasse sind tabelliert im Anhang aufgeführt. Es sei betont, dass die Rangierung auf Grund der verwendeten Fehlermasse, des betrachteten Untersuchungsraums und der verglichenen Variablen Bodendruck zustande kommt und nur in diesem Zusammenhang gültig ist. Abbildung 4.3 zeigt in der oberen Hälfte links die effektiven Werte der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Bodendruckdifferenzfelder ( $W_{AN}$ ) und rechts die effektiven Werte des räumlichen Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) jeweils getrennt nach Modellen und Jahreszeiten. Sie dienen der qualitativen Übersicht. In der unteren Hälfte ist links die Rangierung nach dem  $W_{AN}$  und rechts nach dem  $r$  tabelliert. In den Tabellen ist zusätzlich die Rangierung bezüglich der jährlichen Untersuchung eingetragen.

Beim  $W_{AN}$  kann festgestellt werden, dass die Abweichungen im Winter tendenziell grösser ausfallen als im Sommer und Herbst und die Modelle in zwei Gruppen unterteilt werden können. ECHAM3, ECHAM4, HAD2 und HAD3 bilden die erste Gruppe mit geringeren Fehlerwerten, während die restlichen vier Modelle deutlich schlechter abschneiden. Die Hauptursache ist zwar beim IT zu finden, das im Winter stärker ausgeprägt ist, aber die Begründungen sind unterschiedlich: Beim CCC1 und CCC2 können die grossen Fehler auf Grund der zu starken Ausprägung des ITs erklärt werden, beim CCSR auf Grund der Ausprägung und der zu südlichen Lage und beim CSIR nur auf Grund der zu südlichen Lage (siehe Abbildung 3.4). Im Frühling sind die Unterschiede in den Fehlerwerten zwischen den Modellen am deutlichsten (siehe auch Tabelle 3.3), derweil sie im jahreszeitlichen Verlauf beim CCC2 am meisten variieren. Bei der  $r$  sind die Unterschiede weniger gut sichtbar. Sie fällt vor allem beim CCC1 und CCC2 im Frühling tief aus,





**Abbildung 4.3:** Kombinierte Abbildung: In der oberen Hälfte sind links die effektiven Werte der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Bodendruckdifferenzfelder ( $W_{AN}$ ) und rechts die effektiven Werte des räumlichen Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) jeweils nach Modell und Jahreszeit dargestellt. Die unterschiedliche Neigung wurde aus Übersichtsgründen gewählt. Im Anhang sind diese beiden Grafiken in grösserer Ausführung dargestellt. In der unteren Hälfte ist links die Rangierung nach dem  $W_{AN}$  und rechts nach dem  $r$  tabelliert. In den Tabellen ist zusätzlich die Rangierung bezüglich der jährlichen Untersuchung eingetragen.

was auf Grund des entsprechend hohen  $W_{AN}$  in dieser Jahreszeit erwartet werden konnte. ECHAM4 liefert vor HAD2 bei beiden Fehlermassen die besten Ergebnisse. Die letzten Plätze teilen sich CCC1 und CSIR. Über alle Fehlermasse betrachtet (siehe auch im Anhang A), kann im Rahmen dieser Arbeit ECHAM4 als bestes Modell bezeichnet werden, während sich CCC1, CCSR und CSIR die hintersten Ränge teilen.

Werden die Modellfamilien untereinander verglichen, lässt sich feststellen, dass sowohl beim  $W_{AN}$  wie bei der  $r$  zwischen ECHAM3 und ECHAM4 die offensichtlichste Verbesserung vorliegt. Dies kann mit der verbesserten Auflösung des neueren Modells erklärt werden (siehe Abschnitt 2.1). Beim  $W_{SD}$  sind die Differenzen geringer (siehe Tabelle

A.2 im Anhang). CCC1 schneidet schlechter ab als CCC2, aber die Unterschiede sind weniger deutlich als bei ECHAM3 und ECHAM4. Wie in den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 erklärt, arbeiten beide Modelle mit derselben Auflösung. Offenbar wirken sich die Verbesserungen beim Ozeanmodell weniger stark auf die Resultate aus als eine höhere Auflösung. Zwischen HAD2 und HAD3 ist es umgekehrt. Zwar sind die Ergebnisse vom HAD3 beim  $\bar{m}_{AN}$ , beim  $\bar{m}_{SD}$  und beim  $W_{SD}$  besser als jene vom HAD2, aber die beiden mittleren Fehler sind weniger aussagekräftige Fehlermasse (siehe Abschnitt 2.2.2) als die übrigen, bei denen HAD2 bessere Werte liefert. HAD2 überzeugt vor allem beim räumlichen Vergleich und schneidet gesamthaft besser als HAD3 ab. Die Flusskorrektur scheint sich beim HAD2 auszuzahlen. Auf die Flusskorrektur wird in Abschnitt 4.3 nochmals eingegangen.

### 4.3 Diskussion einiger Aspekte der Modelle

Beim CCC1 und CCC2 sind die Bodendruckdifferenzen zwischen AH und IT unter allen geprüften Modellen im Jahresverlauf am grössten (siehe Abbildung 4.2) und kommen hauptsächlich im Winter und Frühling zustande. Die extreme Unterschätzung des Bodendrucks führt zu erhöhter Zonalität im Vergleich mit den Messdaten und hat vermutlich die Variabilitätsüberschätzung in der divergenten Auslaufzone der beiden Druckzentren über Europa zur Folge (siehe Abbildung 3.3). Auf Grund des beim CCC2 weniger stark unterschätzten Sekundärzentrums des ITs (siehe Abbildung 3.1 und 3.2), scheint die Auslaufzone beim neueren Modell nördlicher zu verlaufen und die deutlichere Variabilitätsüberschätzung über Skandinavien zur Folge zu haben. Die allgemein höhere Variabilität gegenüber dem Vorgängermodell ist ein generelles Merkmal vom CCC2. Offenbar wurde das Modell dahingehend modifiziert, die Variabilität leicht verstärkt zu simulieren. Die durchgehende Negativanomalie der mittleren Breiten beim CCSR muss als bedeutende Abweichung eingestuft werden. Dies zeigt sich beim  $W_{AN}$ , der noch grösser als beim CSIR ausfällt, obwohl das australische Modell die grösste Anomalie unter allen Modellen im jährlichen Mittel aufweist (siehe Tabelle 3.1). Der Grund liegt in der verhältnismässig grossen Fläche, über die sich diese Anomalie beim CCSR erstreckt. Die West-Ost-Ausdehnung des Untersuchungsraums beträgt auf dem 50. Breitengrad knapp 10000 km. Das ist rund fünf mal mehr als die Distanz zwischen den Eckpunkten der nördlichen Begrenzung (siehe Abschnitt 2.2.2). Die Anomalie kommt hauptsächlich auf Grund des zu weit südlich und mit zu tiefem Druck simulierten ITs zustande. Diese südwärtige Verschiebung ist vermutlich eine direkte Folge des zu schwach modellierten AHs und kann ausser im Herbst in allen Jahreszeiten festgestellt werden (siehe Abbildung 4.2 und Anhang). Ein Vergleich mit Lambert und Boer (2001) und Covey et al. (2003) zeigt beim CCSR im Winter eine geringere Bodendruckunterschätzung des AHs als im Sommer, was hier bestätigt werden kann. Bei Lambert und Boer (2001) zeigt sich ein entsprechendes Verhalten auf der südlichen

Hemisphäre: Im Südsommer (Nordwinter) wird der Bodendruck im Bereich des subtropischen Hochdruckgürtels deutlicher unterschätzt als im Südwinter (Nordsommer). Ebenso fällt der Niederschlag im Bereich der ITC zu gering aus, was auf eine zu schwach ausgeprägte Konvektion hinweist. In Abschnitt 4.2 wird auf dieses Problem im Allgemeinen eingegangen. Beim CSIR wird das IT zwar noch südlicher als beim CCSR modelliert. Es ist jedoch deutlich schwächer ausgeprägt, wodurch nur eine geringe Unterschätzung des Bodendruckfelds über dem Atlantik resultiert. Durch das schwache und zu südlich gelegene IT einerseits und des zu stark berechneten Bodendrucks über Grönland andererseits, ergibt sich beim CSIR die markante positive Anomalie über Südostgrönland und folglich eine ebenso deutliche Variabilitätsunterschätzung in derselben Region. Bei diesem Modell kann die südliche Lage des ITs im Unterschied zum CCSR nicht mit dem AH erklärt werden, da dessen Stärke gut mit den Messdaten übereinstimmt. Der Grund dürfte hauptsächlich im überschätzten Grönlandhoch liegen. ECHAM3 simuliert im Mittel das AH etwas östlicher und das IT leicht westlicher im Vergleich mit den Analysedaten. Dadurch lässt sich die im Abschnitt 3.1.2 beschriebene tendenziell meridional verlaufende Grenze zwischen positiven und negativen Anomalien erklären. Die durchgehende Überschätzung des Bodendruckfelds der hohen Breiten beim ECHAM4 dürfte zumindest im westlichen Teil mit dem zu stark simulierten Grönlandhoch zusammenhängen. Es wäre zumindest eine mögliche Erklärung für die Variabilitätsunterschätzung im Bereich entlang der nördlichen Begrenzung des Untersuchungsraums. Ein Zusammenhang mit der Dynamik des ITs ist weniger wahrscheinlich, da die jährliche Wanderung des Druckzentrums vom ECHAM4 gut wiedergegeben wird und das Bodendruckfeld im Sommer im Bereich des ITs sogar leicht unterschätzt wird. Wäre ein Zusammenhang gegeben, müsste tendenziell keine oder eine geringe Variabilitätsüberschätzung im oben genannten Bereich vorliegen. Ob die simulierte Meer-Eis-Dynamik eine Rolle spielt, kann hier nicht beantwortet werden. Die deutliche Variabilitätsüberschätzung beim HAD2 über Spanien und dem östlichen Atlantik kommt vor allem im Frühling zustande (siehe Abbildung 3.9). Wird Abbildung 3.7 mit einbezogen, zeigt sich im Unterschied zu den Messdaten ein zu südlich gelegenes und zu schwach ausgeprägtes AH. Dadurch ist wie beim CCSR das IT und der Bereich der Westerlies nach Süden verschoben. Der in Abschnitt 3.1.2 erwähnte inselhaftige Bereich über Zentralgrönland beim HAD3 dürfte trotz separat modellierter Orografie (Toniazzi et al. 2004) aus der Druckreduktion auf Meereshöhe entstehen. Anders als zwischen CCC1 und CCC2 oder ECHAM3 und ECHAM4 scheint zwischen HAD2 und HAD3 ein grundsätzlicher Unterschied zu liegen. Die Hauptursache dürfte in der nicht mehr verwendeten Flusskorrektur von HAD3 liegen. Lambert und Boer (2001) betonen eine bessere Übereinstimmung mit Messdaten bei flusskorrigierten Modellen. Neuste Studien widersprechen dem und weisen auf stabile Klimasimulationen nicht flusskorrigierter Modelle hin (siehe Abschnitt 1.2 und Covey et al. 2004). Diese Aussage lässt sich in dieser Arbeit nicht sinnvoll überprüfen,

da nebst HAD3 nur flusskorrigierte Simulationen verwendet werden. Im Vergleich mit den übrigen Modellen kann einzig festgestellt werden, dass über alle Fehlermasse hinweg HAD3 nicht zu den besten Modellen zählt (siehe Abschnitt 4.2).

Bei Kobel und Gyalistras (2002) erreicht ECHAM4 vor CCC1 und HAD3 die grösste räumliche Korrelation. Werden nur diese drei Modelle betrachtet (siehe Tabelle 3.1, entspricht dies den hiesigen Resultaten. Grosse Unterschiede können bei der erklärten Varianz festgestellt werden. Derweil die Differenz beim HAD3 durch die unterschiedlichen Betrachtungsräume erwartet werden kann, ist dies beim CCC1 viel schwieriger. Mit einem Wert von knapp +0.1 hPa bei Kobel und Gyalistras (2002) und rund +0.7 hPa in der vorliegenden Arbeit liegt die Unstimmigkeit bei 0.6 hPa. Durch die gewählte westliche Begrenzung bei  $62.5^\circ$  W wandert der Kernbereich des ITs im Spätfrühling (Messdaten) aus dem Untersuchungsraum von Kobel und Gyalistras (2002) hinaus. Da bei Kobel und Gyalistras (2002) nebst der räumlichen Korrelation die erklärte Varianz im April am kleinsten ist, besteht die Vermutung, dass die CCC1-Simulation die Wanderung des ITs zu früh vollzieht. Diese Annahme wird mit den hier ebenfalls schlechtesten Werten der beiden Fehlermasse im Frühling gestützt (siehe Tabelle 3.3). Durch die unter Abschnitt 2.2.1 begründete westliche Begrenzung bei  $92.5^\circ$  W bleibt das IT während des ganzen Jahres innerhalb des Untersuchungsraums, wodurch die Fehler weniger deutlich ausfallen.

## Kapitel 5

# Schlussfolgerungen

Der in dieser Arbeit vollzogene Modellvergleich basiert auf verschiedenen Fehlermassen und hat tendenziell systematischen Charakter. Dies ist im Sinne des internationalen Vergleichsprojekts CMIP (Covey et al. 2003) und bildet eine mögliche Ausgangslage für weiterführende Arbeiten. Durch die Untersuchung auf regionaler Ebene kann der IPCC-Forderung nach vermehrter regionaler Auswertung von GCMs entsprochen werden (IPCC 2001a).

- Bezüglich des Bodendrucks kann gezeigt werden, dass die Abweichungen der Daten der verwendeten Klimamodelle (CCC1, CCC2, CCSR, CSIR, ECHAM3, ECHAM4, HAD2 und HAD3) von den Messdaten und die Streuung der Modelle untereinander mit zunehmender geographischer Breite grösser werden. Dies gilt insbesondere ab dem 60. Breitengrad. Im Bereich des Azorenhochs stimmen die Modelle tendenziell besser mit den Messdaten überein als im Bereich des Islandtiefs, obwohl im Sommer alle Modelle das Azorenhoch unterschätzen. Die Mittelung aller Bodendruckdifferenzfelder (Model Mean) zeigt im Nordosten des Untersuchungsraums (über Spitzbergen und Nordskandinavien) und über dem Mittelmeer eine Überschätzung des Bodendruckfelds, derweil westlich von Irland über dem Atlantik eine Unterschätzung vorliegt. Damit können die Ergebnisse von Lambert und Boer (2001) und Covey et al. (2003) bestätigt werden. Im Bereich des Islandtiefs sowie im Winter und Frühling sind die Unterschiede in den Fehlerwerten zwischen den Modellen am grössten, während sie im Sommer und im Herbst deutlich kleiner sind. Durch die Mittelung aller Standardabweichungsdifferenzfelder kann gezeigt werden, dass die Variabilität im Bereich des Islandtiefs stärker unterschätzt wird als im Bereich des Azorenhochs. Über Westeuropa wird die Variabilität tendenziell überschätzt. Gesamthaft gesehen ist die räumliche Korrelation im Frühling am tiefsten und im Herbst am höchsten.

- Durch die Rangierung der Modelle kann festgestellt werden, dass ECHAM4 am besten abschneidet und im Rahmen dieser Arbeit als bestes Modell bezeichnet werden darf. Diese Aussage stützt sich auf die verwendeten Fehlermasse und hat nur Gültigkeit im definierten Untersuchungsraum mit den Abgrenzungen  $22.5^{\circ}$  N– $82.5^{\circ}$  N und  $92.5^{\circ}$  W– $42.5^{\circ}$  E bezüglich der Variablen Bodendruck über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990. Am schlechtesten schneiden in diesem Zusammenhang die Modelle CCC1, CCSR und CSIR ab.
- Die Auswertung des Vergleichs der drei Modellfamilien CCC1 und CCC2, ECHAM3 und ECHAM4 sowie HAD2 und HAD3 liefert unterschiedliche Resultate. Die Modelle CCC2 und ECHAM4 zeigen gegenüber ihren Vorgängermodellen eine Verbesserung in der Übereinstimmung mit den Messdaten. Das CCC2 arbeitet gegenüber dem Vorgängermodell CCC1 unter anderem mit einem verbesserten Ozeanmodell. Beim ECHAM4 dürfte die Verbesserung gegenüber ECHAM3 hauptsächlich auf die grössere Auflösung zurückzuführen sein. HAD2 schneidet in dieser Arbeit besser als sein Nachfolgemodell HAD3 ab. HAD2 ist ein flusskorrigiertes Modell, derweil beim HAD3 auf die Flusskorrektur verzichtet wurde. Auf die heute gültige Auffassung, dass die Resultate flusskorrigierter und nicht flusskorrigierter Modelle gleichwertig sind (IPCC 2001a; Covey et al. 2004) kann nicht sinnvoll eingegangen werden, da HAD3 das einzige im Vergleich verwendete nicht flusskorrigierte Modell ist. Es lässt sich nur feststellen, dass diese Auffassung im Rahmen dieser Arbeit bezüglich HAD3 nicht unterstützt werden kann.

## Kapitel 6

# Ausblick

Die fortlaufende Weiterentwicklung von Klimamodellen bedingt einerseits die regelmässige und systematische Überprüfung ihrer Güte, andererseits gäbe es eine ganze Reihe weiterführender Arbeiten im Zusammenhang mit Modellvalidierungen sowohl auf regionaler wie auf globaler Ebene. Von besonderem Interesse im nordatlantisch-europäischen Raum wäre ein Vergleich bezüglich der Simulation der NAO (North Atlantic Oscillation), um in der Folge möglichst verlässliche Aussagen über die zukünftige Entwicklung dieser für das Klima Europas wichtigen internen Systemoszillation machen zu können. Zwar existieren bereits einige Studien, die sich mit der Simulation der NAO in verschiedenen Klimamodellen auseinandersetzen, aber die Validierung erfolgt häufig auf der Grundlage der Temperaturverteilung und weniger auf den Bodendruckfeldern. Eine vertiefende Untersuchung wäre in diesem Zusammenhang sinnvoll.

Der Vergleich von Bodendruckfeldern allein ist zwar bezüglich einer rein mathematisch-systematischen Modellvalidierung berechtigt und notwendig. Aus klimatologischer Sicht wäre es jedoch von grösserem Interesse, die vertikale Komponente der Atmosphäre mitzuberechnen, da sich gerade in den höheren Schichten wichtige Prozesse abspielen. Man denke beispielsweise an die Jetstreams oder das stratosphärische Windsystem der QBO (Quasi-Biennial Oscillation), deren Erforschung auch mit Hilfe von Klimaexperimenten erfolgt. Modellvergleiche von Vertikalschnitten der Atmosphäre und Druckfeldern verschiedener Levels oder Geopotentiale könnten wertvolle Hinweise liefern. Dabei sollte die Untersuchung nicht nur auf den Druck beschränkt sondern auf Variablen wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung etc. ausgeweitet werden, um sinnvolle Interpretationen zu ermöglichen.

Die Ergebnisse aus Modellvergleichen in Subräumen können von besonderem Interesse für weiterführende Forschungsprojekte wie beispielsweise die Alpen- und Gebirgsforschung sein. Die in diesem Zusammenhang häufig eingesetzten regionalen Klimamodelle beziehen die Randbedingungen von globalen Zirkulationsmodellen (dynamisches Downs-

caling) und sind auf verlässliche Initialwerte angewiesen. Aus diesem Grund wäre eine generelle Erweiterung des Modellvergleichs auf verschiedene Variablen und Niveaus zweckmässig. Allenfalls könnte eine engere Begrenzung des Untersuchungsraums als sinnvoll erachtet werden, da einige Modelle auf lokaler Ebene bessere Resultate erzielen als auf der grösseren regionalen Skala. Das müsste jedoch in Abhängigkeit der Fragestellung und der Methode von Fall zu Fall entschieden werden, denn beim statistischen Downscaling bilden beispielsweise die grossräumigen (eventuell überregionalen) Randbedingungen die Ausgangslage, was möglicherweise eine gewisse Grösse des Untersuchungsraums bedingt.

Ganz allgemein ist die Aussagekraft einer Modellvalidierung nur so gut, wie die verwendeten Referenzdaten. Eine Überprüfung der Ergebnisse mit anderen Messdatensätzen kombiniert mit einer Vertiefung in die Arbeitsweise von Klimamodellen wäre angebracht, wodurch die Interpretationsbasis wesentlich erweitert werden könnte. Zumindest müsste die Validierung mit den vom CMIP und AMIP verwendeten Re-Analysedaten erfolgen. Ein möglicher Beitrag an diese Projekte wäre dadurch nicht auszuschliessen.

Der Einfluss der regionalen Begrenzung auf die Resultate müsste genauer überprüft und anhand mehrerer Beispiele berechnet werden. Es wäre ebenso sinnvoll, den Modellvergleich über eine längere Zeitperiode zu vollziehen. Die Beschränkung auf die Jahre 1961 bis 1990 ist nicht ganz unproblematisch, da beispielsweise das Islandtief (Sahsamanoglou 1990) und das Azorenhoch längerfristigen Schwankungen unterworfen sind, wie Wanner et al. (2000) anhand der in diesem Zusammenhang wichtigen NAO aufzeigen.



# Literatur

- Boer, G. J., G. Flato, und D. Ramsden (2000b). A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate to the twenty-first century. *Climate Dynamics* **16**, 427–450.
- Boer, G. J., G. Flato, M. C. Reader, und D. Ramsden (2000a). A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: experimental design and comparison with the instrumental record for the twentieth century. *Climate Dynamics* **16**, 405–425.
- Covey, C., A. Abe-Ouchi, G. J. Boer, B. A. Boville, U. Cubasch, L. Fairhead, G. M. Flato, H. Gordon, E. Guilyardi, X. Jiang, T. C. Johns, H. Le Treut, G. Madec, G. A. Meehl, R. Miller, A. Noda, S. B. Power, E. Roeckner, G. Russell, E. K. Schneider, R. J. Stouffer, L. Terray, und J.-S. von Storch (2000). The seasonal cycle in coupled ocean-atmosphere general circulation models. *Climate Dynamics* **16**, 775–787.
- Covey, C., K. M. AchutaRao, M. Fiorino, P. J. Gleckler, K. E. Taylor, und M. F. Wehner (2002). Intercomparison of Climate Data Sets as a Measure of Observational Uncertainty. *PCMDI Report* **69**, 1–38.
- Covey, C., K. M. AchutaRao, P. J. Gleckler, T. J. Phillips, K. E. Taylor, und M. F. Wehner (2004). Coupled ocean-atmosphere climate simulations compared with simulations using prescribed sea surface temperature. *Global and Planetary Change* **41**, 1–14.
- Covey, C., M. A. Krishna, U. Cubasch, P. Jones, S. J. Lambert, M. E. Mann, T. J. Phillips, und K. E. Taylor (2003). An Overview of Results from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). *Global and Planetary Change* **37** (1-2), 103–133.
- Cubasch, U. (2002). *Klima. Das Experiment mit dem Planeten Erde, Begleitband und Katalog zur Sonderausstellung des Deutschen Museums vom 7.11.2002 bis 15.6.2003*, chapter Perspektiven der Klimamodellierung, S. 151–159. Hauser, W., München.
- Cubasch, U., B. D. Santer, und G. C. Hegerl (1995). Klimamodelle - wo stehen wir?

- Physikalische Blätter* **51**, 269–276.
- Cubasch, U., R. Voss, G. C. Hegerl, J. Waszkewitz, und T. J. Crowley (1997). Simulation of the influence of solar radiation variations on the global climate with an ocean-atmosphere general circulation model. *Climate Dynamics* **13**, 757–767.
- Cubasch, U., J. Waszkewitz, G. Hegerl, und J. Perlwitz (1995). Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Climatic Change* **31**, 273–304.
- Davis, R. E., B. P. Hayden, D. A. Gay, W. L. Phillips, und G. V. Jones (1997). The North Atlantic Subtropical Anticyclone. *Journal of Climate* **10**, 728–744.
- Delworth, T. L. (1996). North Atlantic interannual variability in a coupled ocean-atmosphere model. *Journal of Climate* **9**, 2356–2375.
- Emori, S., T. Nozawa, A. Abe-Ouchi, A. Numaguti, M. Kimoto, und T. Nakajima (1999). Coupled ocean-atmosphere model experiments of future climate change with an explicit representation of sulfate aerosol scattering. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **77**, 1299 – 1307.
- Fanning, A. F. und A. J. Weaver (1997a). A Horizontal Resolution and Parameter Sensitivity Study of Heat Transport in an Idealized Coupled Climate Model. *Journal of Climate* **10**, 2469–2478.
- Fanning, A. F. und A. J. Weaver (1997b). On the role of flux adjustments in an idealized coupled climate model. *Climate Dynamics* **13**, 691–701.
- Flato, G. M. und G. J. Boer (2001). Warming Asymmetry in Climate Change Simulations. *Geophysical Research Letters* **28**, 195–198.
- Flato, G. M., G. J. Boer, W. G. Lee, N. A. McFarlane, D. Ramsden, M. C. Reader, und A. Weaver (2000, October). The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis global coupled model and its climate. *Climate Dynamics* **16**, 451–467.
- Flato, G. M. und W. D. Hibler (1992). Modelling Pack Ice as a Cavitating Fluid. *Journal of Physical Oceanography* **22**, 626–651.
- Gates, W. L., J. S. Boyle, C. Covey, C. G. Dease, R. S. Doutriaux, C. M. Drach, M. Fiorino, P. J. Gleckler, J. J. Hnilo, S. M. Marlais, T. J. Phillips, G. L. Potter, B. D. Santer, K. R. Sperber, K. E. Taylor, und D. N. Williams (1999). An Overview of the Results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). *Bulletin of the American Meteorological Society* **80**, 29–55.
- Gent, P. R. und McWilliams (1990). Isopycnal mixing in ocean circulation models.

*Journal of Physical Oceanography* **20**, 150–155.

- Gibson, J. K., P. Kallberg, S. Uppala, A. Noumura, A. Hernandez, und E. Serrano (1997). ERA Description: ECMWF Re-Analysis Project Report Series No. 1. Technical report, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, UK, 77 pp.
- Giorgi, F. und R. Francisco (2000). Uncertainties in regional climate change predictions: A regional analysis of ensemble simulations with the HADCM2 coupled AOGCM. *Climate Dynamics* **16**, 169–182.
- Gordon, C., C. Cooper, C. A. Senior, H. Banks, J. M. Gregory, T. C. Johns, J. F. B. Mitchell, und R. A. Wood (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustment. *Climate Dynamics* **16**, 147–168.
- Gordon, H. B. und S. P. O’Farrell (1997). Transient climate change in the CSIRO coupled model with dynamic sea ice. *Monthly Weather Review* **125**, 875–907.
- Gregory, J. M. und J. F. B. Mitchell (1997). The climate response to CO<sub>2</sub> of the Hadley Centre coupled AOGCM with and without flux adjustment. *Geophysical Research Letters* **24**, 1943–1946.
- Hastenrath, S. (1985). *Climate and Circulation of the tropics*. D. Reidel, Dordrecht.
- Hüsler, J. und M. Piot (1999). Einführung in die angewandte Statistik. Universität Bern, Institut für mathematisches Statistik und Versicherungslehre.
- Hurrell, J. W. (1995). Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science* **269**, 676–679.
- IPCC (1992). *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment* (Cambridge University Press, Cambridge 2000 Aufl.). Houghton, J. T. and Callander, B. A. and Varney, S. K.
- IPCC (2001a). *Climate Change 2001: Synthesis Report. Summary for Policymakers* (Cambridge University Press, Cambridge UK Aufl.). Robert, T. W. and Albritton, D. L. and Barker, T. and Bashmakov, I. A. and Canziani, O. and Christ, R. and Cubasch, U. and Davidson, O. and Gitay, H. and Griggs, D. and Halsnaes, K. and Houghton, J. and House, J. and Kundzewicz, Z. and Lal, M. and Leary, N. and Magadza, C. and McCarthy, J. J. and Mitchell, J. F. B. and Moreira, J. R. and Munasinghe, M. and Noble, I. and Pachauri, R. and Pittock, B. and Prather, M. and Richels, R. G. and Robinson, J. B. and Sathaye, J. and Schneider, S. and Scholes, R.

and Stocker, T. and Sundararaman, N. and Swart, R. and Taniguchi, T. and Zhou, D.

IPCC (2001b). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, Cambridge UK Aufl.). Houghton, J.T and Ding, Y. and Griggs, D. J. and Noguer, M. and van der Linden, P. J. and Dai, X. and Maskell, K. and Johnson, C. A.

Johns, T., R. E. Carnell, J. F. Crossley, J. M. Gregory, J. F. B. Mitchell, C. A. Senior, S. F. B. Tett, und R. A. Wood (1997). The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spinup and validation. *Climate Dynamics* **13**, 103–134.

Jones, P. D., T. D. Davies, D. H. Lister, V. Slonosky, T. Jónsson, L. Barring, P. Jönsson, P. Maheras, F. Kolyva-Machera, M. Barriendos, J. Martin-Vide, R. Rodriguez, M. J. Alcoforado, H. Wanner, C. Pfister, J. Luterbacher, R. Rickli, E. Schuepbach, E. Kaas, T. Schmith, J. Jacobeit, und B. C. (1999). Monthly mean pressure reconstructions for Europe for the 1780-1995 period. *International Journal of Climatology* **19**, 347–364.

Kernen, R. und D. Gyalistras (2002). GCMDAT Version 1.1 A Database of General Circulation Model Results. Universität Bern, Geographisches Institut, KLIMET. <http://sinus.unibe.ch/kernen/work/gcm/overview.html> (letztmals besucht am 17. Januar 2004).

Kittel, T. G. F., F. Giorgi, und G. A. Meehl (1998). Intercomparison of regional biases and doubled CO<sub>2</sub>-sensitivity of coupled atmosphere-ocean general circulation model experiments. *Climate Dynamics* **14**, 1–15.

Kleinen, T. C. (2000). *Zeitverhalten der Thermohalinen Zirkulation unter Einfluss des anthropogenen Treibhauseffektes*. Dissertation, Universität Potsdam, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.

Kobel, M. und D. Gyalistras (2002). Vergleich von GCM-simulierten und gemessenen Bodendruckfeldern über dem Nordatlantik und Europa. Universität Bern, Geographisches Institut, KLIMET.

Krüger, K. D. (2002). *Untersuchung von Transportprozessen in der Stratosphäre: Simulationen mit einem globalen Zirkulationsmodell*. Dissertation, Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften.

- Lambert, S. J. und G. J. Boer (2001). CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. *Climate Dynamics* **17**, 83–106.
- Lazarus, M., L. Greber, J. Hall, C. Bartels, S. Bernow, E. Hansen, P. Raskin, und D. von Hippel (1993). Towards a Fossil Free Energy Future: The Next Energy Transition. Technical report, Stockholm Environmental Institute Boston Center, Boston. A Technical Analysis for Greenpeace International.
- Luterbacher, J., D. Dietrich, E. Xoplaki, M. Grosjean, und H. Wanner (2004). European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500. *Science* **303**, 1499–1503.
- McFarlane, N. A., G. J. Boer, J.-P. Blanchet, und M. Lazare (1992). The Canadian Climate Centre Second-Generation General Circulation Model and Its Equilibrium Climate. *Journal of Climate* **5**, 1013–1044.
- Mächel, H., A. Kapala, und H. Flohn (1998). Behaviour of the Centres of Action Above the Atlantik Since 1881. Part I: Characteristics of Seasonal and Interannual Variability. *International Journal of Climatology* **18**, 1–22.
- Mikolajewicz, U., M. Gröger, E. Maier-Reimer, G. Schurgers, M. Vizcaino, und A. Wingham (2002). Paläo-Modellierung des letzten Eiszeitzyklus mit gekoppelten Modellen - transiente und Gleichgewichtsklimasimulationen. In: *Tagungsband Deutsches Klimaforschungsprogramm (DEKLIM), Kick-Off-Meeting 2002*, S. 46–49. Icoserv-International Communication Services, Lohmar.
- Nakicenovic, N. und R. Swart (2000). *Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge 2000.
- Nieman, A. (2003). Internetadresse von Adam Nieman: <http://www.adamnieman.co.uk/vos/index.html>. (letztmals besucht am 18. Februar 2004).
- Oberhuber, J. M. (1993). The OPYC Ocean General Circulation Model. Technical Report 10, Deutsches Klimarechenzentrum GmbH.
- Petit, J., J. Jouzel, D. Raynaud, N. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. Kotlyakov, M. Legrand, V. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman, und M. Stievenard (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* **399**, 429–436.

- Portis, D. H., J. E. , Walsh, M. El Hamly, und P. J. Lamb (2001). Seasonality of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate* **14**, 2069–2078.
- Röckner, E., L. Bengtsson, und J. Feichter (1999). Transient Climate Change Simulations with a Coupled Atmosphere-Ocean GCM Including the Tropospheric Sulfur Cycle. *Journal of Climate* **12**, 3004–3032.
- Ruosteenoja, K., T. R. Carter, K. Jylhä, und H. Tuomenvirta (2003). Future climate in world regions: an intercomparison of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios. Finnish Environment Institute.
- Sahsamanoglou, H. S. (1990). A Contribution to the study of action centres in the North Atlantic. *International Journal of Climatology* **10**, 247–261.
- Schönwiese, C. D. (2000). *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart.
- Serreze, M. C., F. Carse, und R. G. Barry (1997, March). Icelandic Low Cyclone Activity: Climatological Features, Linkages with the NAO, and Relationship with Recent Changes in the Northern Hemisphere Circulation. *Journal of Climate* **10** (3), 453–464.
- Stauffer, B. (2003). Ueberdenken der Zielsetzung? *ProClim-Flash* **27**, 1.
- Stephenson, D. B. und V. Pavan (2003). The North Atlantic Oscillation in coupled climate models: a CMIP1 evaluation. *Climate Dynamics* **20**, 381–399.
- Stocker, T. (2002). Einführung in die Klimamodellierung. Universität Bern, Physikalisches Institut.
- Tebaldi, C., R. L. Smith, D. Nychka, und L. O. Mearns (2004). Quantifying uncertainty in Projections of Regional Climate Change: A Bayesian Approach to the Analysis of Multimodel Ensembles. Submitted.
- Toniazzo, T., J. M. Gregory, und P. Huybrechts (2004). Climatic impact of a Greenland deglaciation and its possible irreversibility. *Journal of Climate* **17**, 21–33.
- Trenberth, K. und D. A. Paolino (1980). The Northern Hemisphere Sea-Level Pressure Data Set: Trends, Errors and Discontinuities. *Monthly Weather Review* **108**, 843–1086. Dataset: <http://dss.ucar.edu/datasets/ds010.1/docs/> (last visited: 17.Jan.2004).
- Voss, R., R. Sausen, und U. Cubasch (1998). Periodically synchronously coupled integrations with the atmosphere-ocean general circulation model ECHAM3/LSG. *Climate*

*Dynamics* **14**, 249–266.

Wanner, H. (2002). *Klimatologie 1: Klimadynamik, Klimawandel und Wetter*. Universität Bern, Geographisches Institut, KLIMET.

Wanner, H., D. Gyalistras, J. Luterbacher, R. Rickli, E. Salvisberg, und C. Schmutz (2000). *Klimawandel im Schweizer Alpenraum*. vdf Hochschulverlag AG, Zürich.

Waszkewitz, P., P. Lenzen, und N. Gillet (2001). *The PINGO package*. Max-Planck Institute for Meteorology.

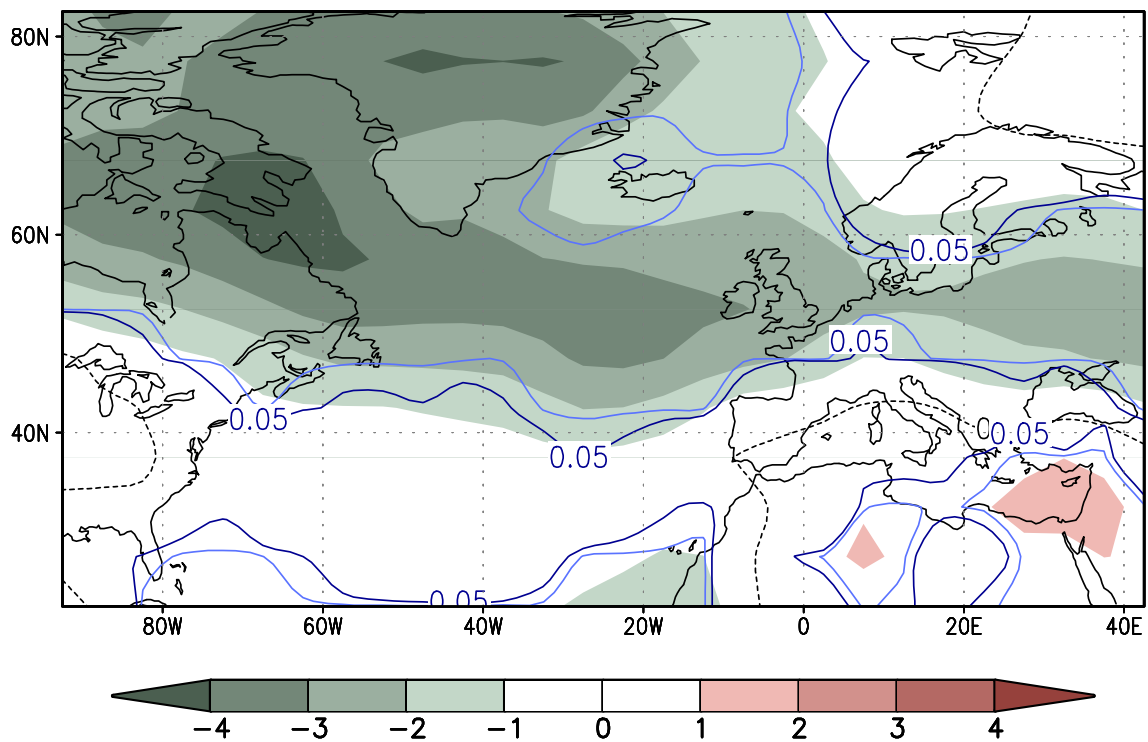




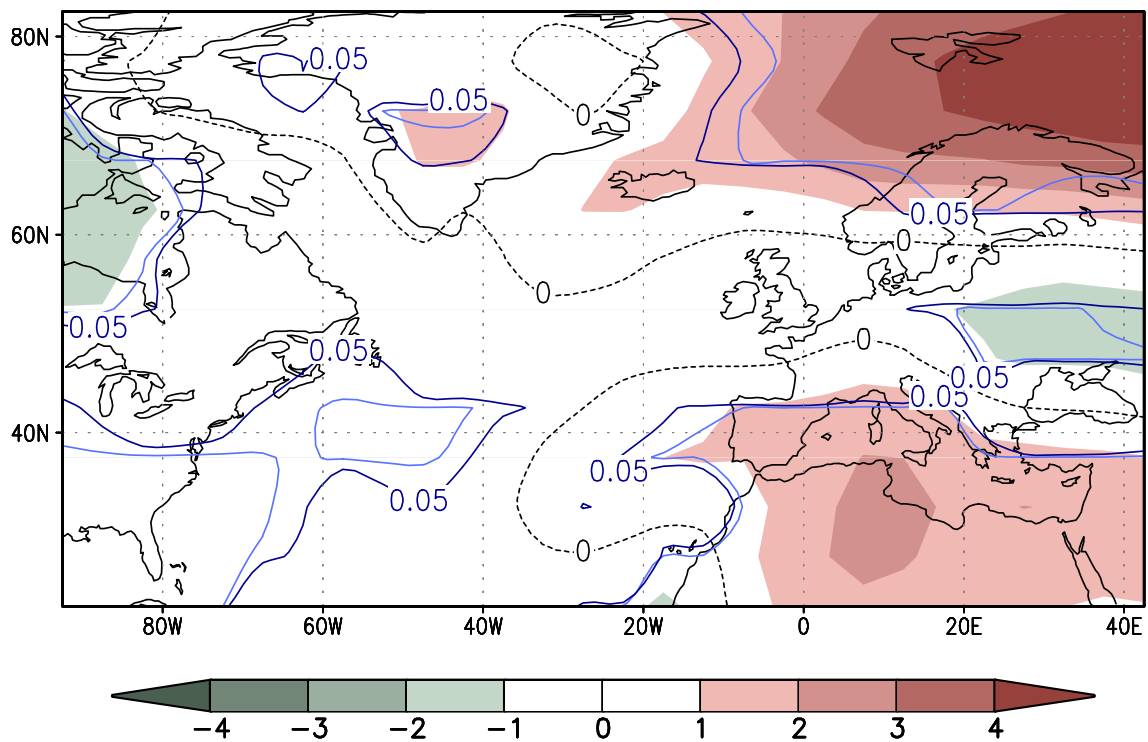
## Anhang A

# Ergänzendes Material

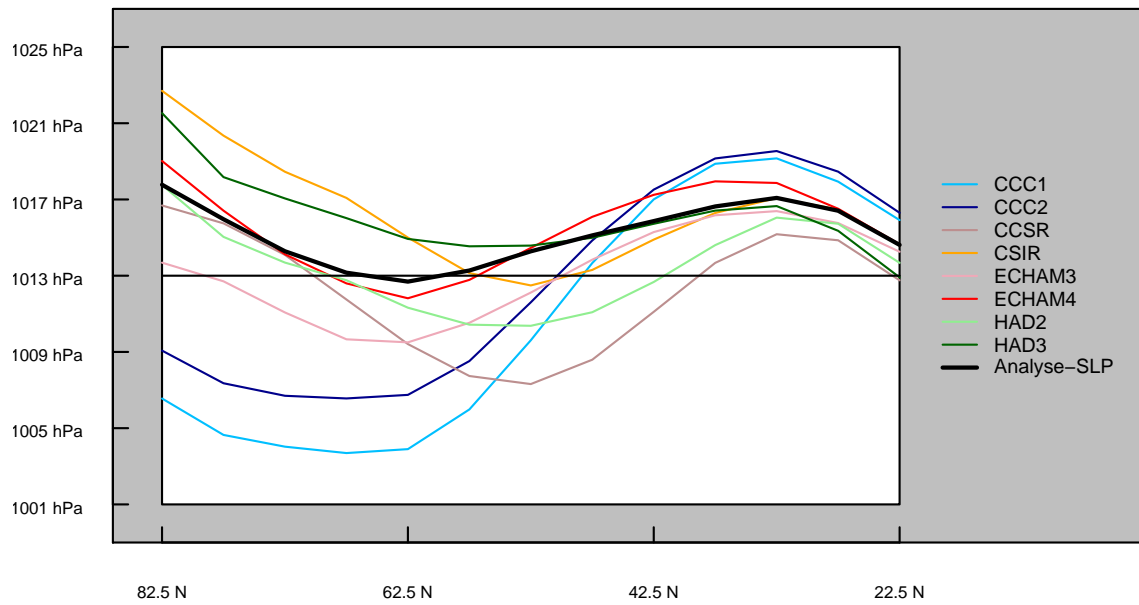
Im Folgenden werden nicht diskutierte Abbildungen und Tabellen aufgelistet. Sie sind jeweils mit einer Beschreibung versehen und werden nicht weiter kommentiert. Die beiden dreidimensionalen Abbildungen aus Abschnitt 4.2 werden am Schluss in vergrößerter Ausführung dargestellt. Danach folgen die Ergebnisse einer kleineren Paralleluntersuchung im nordpazifischen Raum. Von besonderem Interesse sind dabei das Aleutentief und das Hawaiihoch.



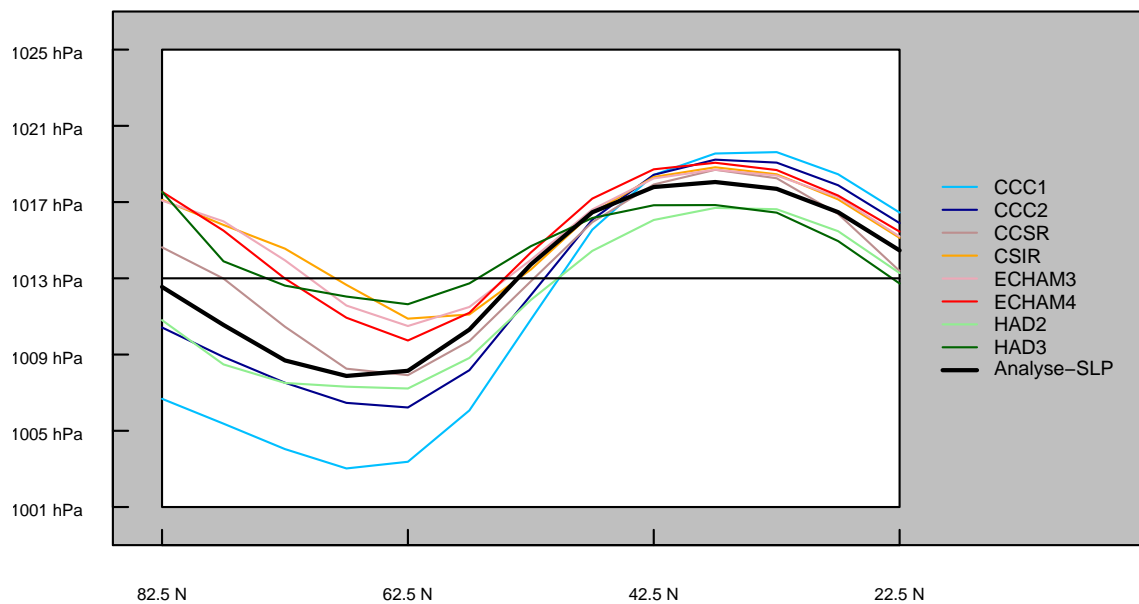
**Abbildung A.1:** Differenzfelder des Bodendrucks in hPa gebildet aus dem Mittel (Model Mean) aller acht Modelle und den Analysedaten über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990 für das Frühlingsmittel. Dunkelblaue Linien stellen den p-Wert 0.05 (95%-Signifikanzniveau) und hellblaue Linien den p-Wert 0.01 (99%-Signifikanzniveau) des Wilcoxon-Tests dar.



**Abbildung A.2:** Differenzfelder des Bodendrucks in hPa gebildet aus dem Mittel (Model Mean) aller acht Modelle und den Analysedaten über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990 für das Herbstmittel. Dunkelblaue Linien stellen den  $p$ -Wert 0.05 (95%-Signifikanzniveau) und hellblaue Linien den  $p$ -Wert 0.01 (99%-Signifikanzniveau) des Wilcoxon-Tests dar.



**Abbildung A.3:** Zonale Frühlingsmittel aller verwendeter Modelle über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990.



**Abbildung A.4:** Zonale Herbstmittel aller verwendeter Modelle über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990.

**Tabelle A.1:** Rangierung der Klimamodelle nach dem Anteil erklärter räumlicher Varianz der Bodendruckmuster (EV) in der Gesamtübersicht.

EV	Jahr	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
CCC1	4	5	8	3	5
CCC2	3	4	7	2	2
CCSR	6	6	6	5	3
CSIR	8	8	4	7	6
ECH3	4	3	4	8	7
ECH4	2	1	1	4	3
HAD2	1	1	2	1	1
HAD3	7	7	3	6	8

**Tabelle A.2:** Rangierung der Klimamodelle nach der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Standardabweichungsdifferenzfelder ( $W_{SD}$ ) in der Gesamtübersicht.

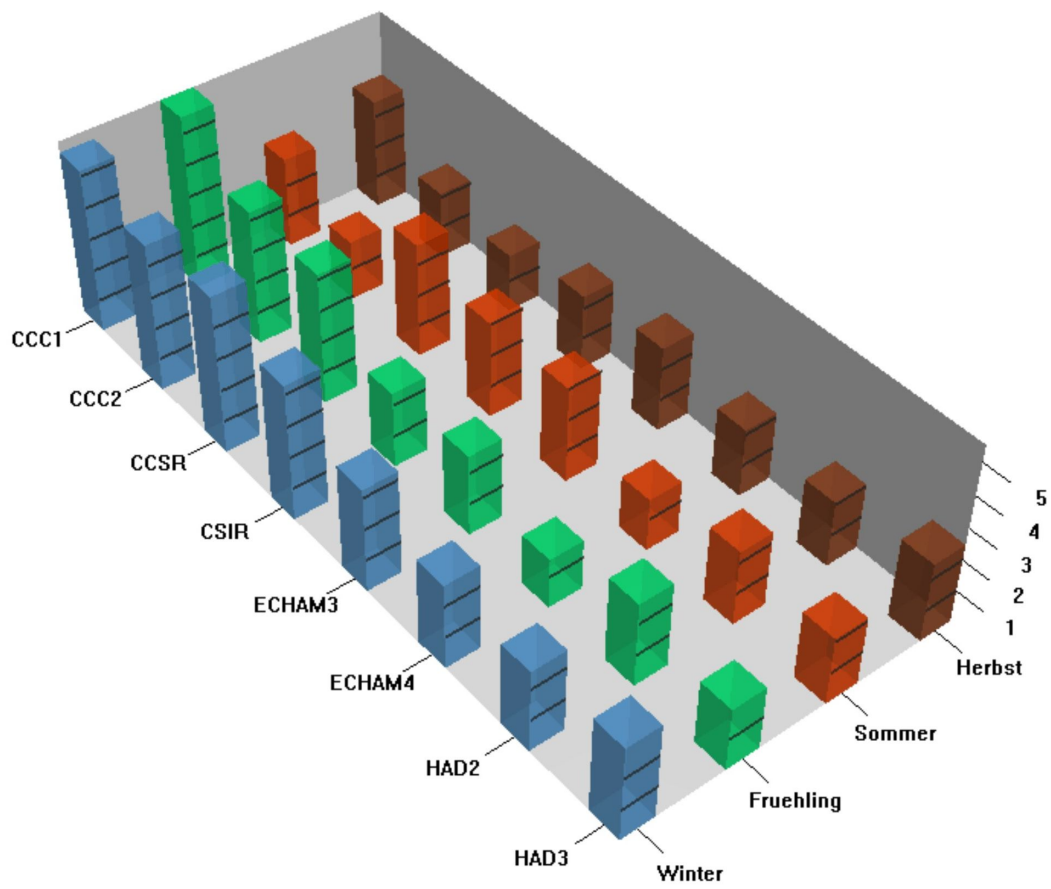
$W_{SD}$	Jahr	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
CCC1	7	7	5	4	4
CCC2	2	6	8	5	5
CCSR	5	5	6	8	7
CSIR	6	8	1	2	2
ECH3	1	4	3	6	6
ECH4	3	1	4	1	2
HAD2	4	2	7	7	8
HAD3	8	3	2	2	1

**Tabelle A.3:** Rangierung der Klimamodelle nach dem mittleren Fehler der Bodendruckdifferenzfelder ( $\bar{m}_{AN}$ ) in der Gesamtübersicht.

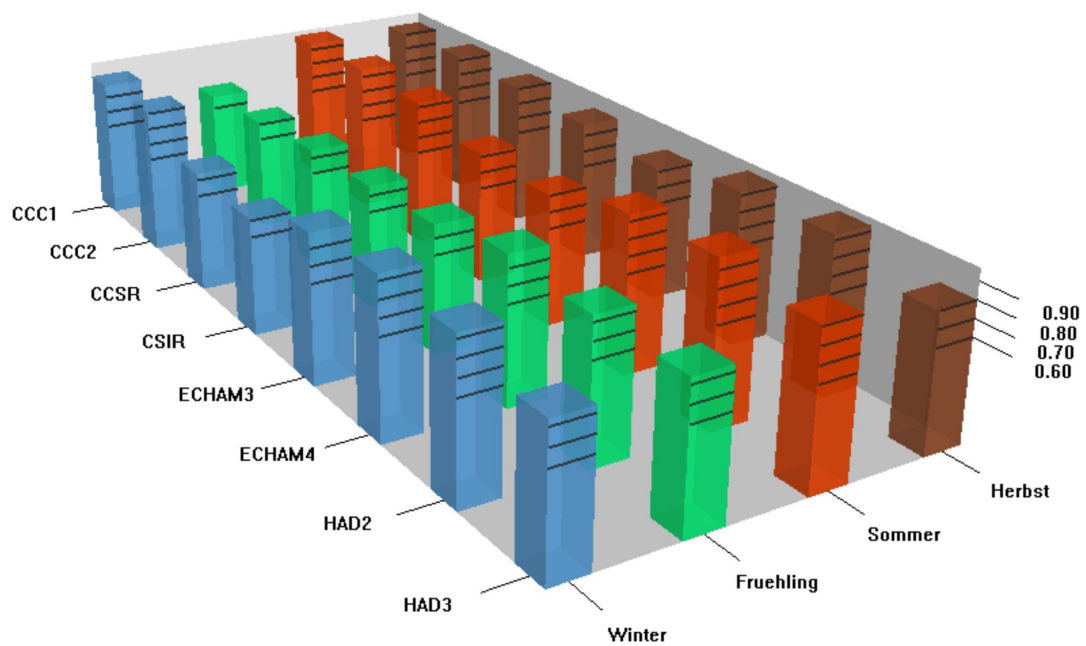
$\bar{m}_{AN}$	Jahr	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
CCC1	6	2	7	6	4
CCC2	3	3	4	3	2
CCSR	8	8	8	8	1
CSIR	5	4	2	5	6
ECH3	1	5	5	4	5
ECH4	4	7	3	1	8
HAD2	7	6	6	7	7
HAD3	2	1	1	2	3

**Tabelle A.4:** Rangierung der Klimamodelle nach dem mittleren Fehler der Standardabweichungsdifferenzfelder ( $\bar{m}_{SD}$ ) in der Gesamtübersicht.

$\bar{m}_{SD}$	Jahr	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
CCC1	8	8	1	6	2
CCC2	1	6	7	3	2
CCSR	1	2	5	6	7
CSIR	6	7	4	1	1
ECH3	1	3	3	5	5
ECH4	4	4	6	2	5
HAD2	5	1	8	8	8
HAD3	7	5	1	4	4



**Abbildung A.5:** Effektive Werte der Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Bodendruckdifferenzfelder ( $W_{AN}$ ) jeweils nach Modell und Jahreszeit dargestellt.



**Abbildung A.6:** Effektive Werte des räumlichen Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) jeweils nach Modell und Jahreszeit dargestellt.



## Anhang B

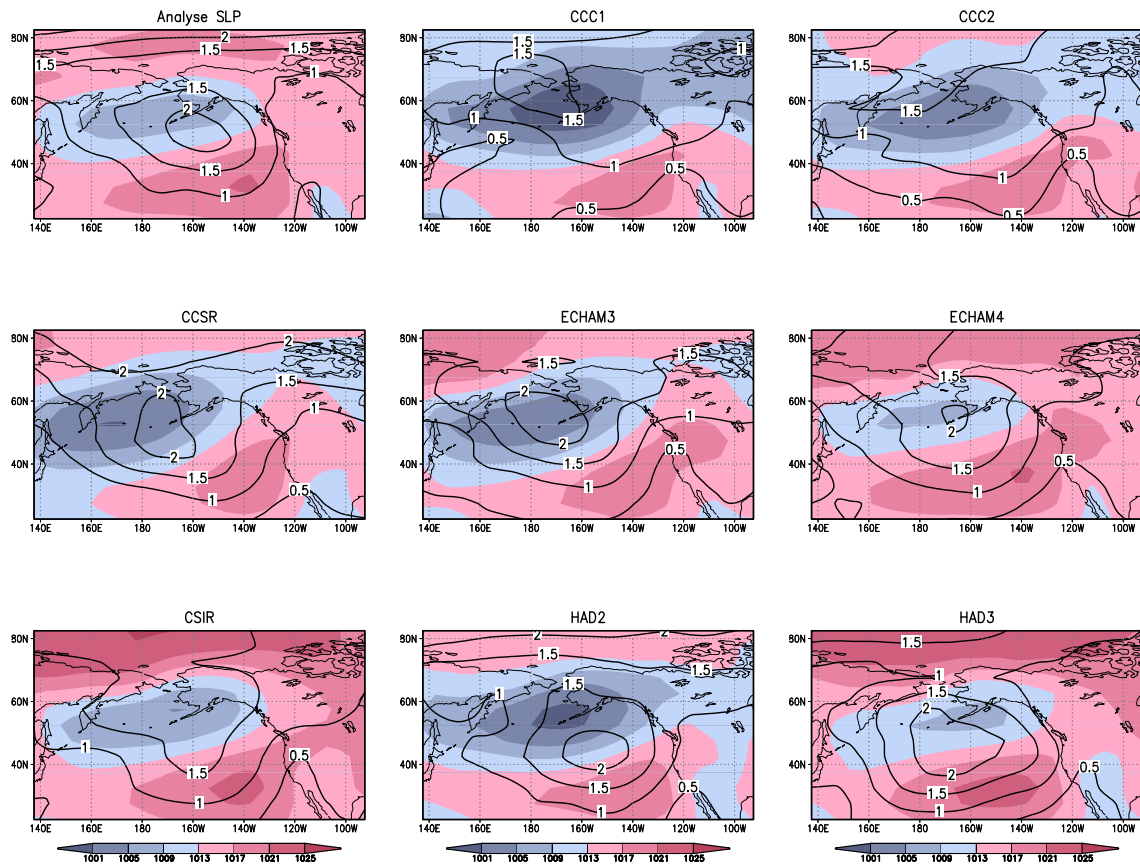
# Resultate im Nordpazifik

Im ersten Abschnitt wird auf die jährlichen Bodendruckfelder der Analysedaten und der verwendeten Modelle eingegangen. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt bei der Betrachtung der Bodendruck- und Standardabweichungsdifferenzfelder, die im zweiten und dritten Abschnitt beschrieben werden. Im letzten Abschnitt werden die Werte aller Fehlermasse in einer Tabelle zusammengefasst und einige davon kommentiert.

### B.1 Druckfelder

In Abbildung B.1 sind die mittleren, jährlichen Bodendruckfelder und die Standardabweichungen der Analysedaten und der verwendeten Klimamodelle bezüglich der Untersuchungsperiode von 1960 bis 1991 dargestellt. Die Analysedaten zeigen den länglichen Bereich des ATs, dessen Kerngebiet sich von den Aleuten bis zur Halbinsel Kamtschatka erstreckt und südöstlich davon, nahe der westamerikanischen Küste, das subtropische HH. Im Norden kann ein Bereich höheren Drucks festgestellt werden, der vor allem auf die Wintermonate zurückzuführen ist und sich in dieser Jahreszeit mit dem sibirischen Hoch verbindet. Im Sommer sind die Bodendruckwerte dieser Region wesentlich tiefer, weshalb die Variabilität erhöhte Werte erreicht. Das Variabilitätszentrum des ATs liegt mit über 2 hPa wenig südöstlich der Aleuten.

Beim CCC1 fällt auf, dass alle Bodendruckwerte nördlich des 50. Breitengrads unter 1013 hPa liegen. Damit dürfte das Bodendruckfeld in dieser Region deutlich unterschätzt werden (siehe Abbildung B.2). Der Bereich des HH ist flächenmässig gegenüber den Messdaten etwas kleiner und bezüglich des Bodendrucks etwas schwächer ausgeprägt. Die Variabilität erreicht die grössten Werte im Nordwesten des Untersuchungsraums und über der Tschuktschenhalbinsel. Das CCC2 simuliert den Bereich des ATs mit leicht höherem Druck als sein Vorgängermodell CCC1. Im Norden liegen die Bodendruckwerte über 1013 hPa und das HH erstreckt sich bis zu den Rocky Mountains über den nordamerika-



**Abbildung B.1:** Mittlere, jährliche Bodendruckfelder in hPa (schattiert) und Standardabweichungen (konturiert) der Analysedaten (oben links) und der verwendeten Klimamodelle über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990. Der Isolinienabstand beträgt 4 hPa bei den Bodendruckfeldern und 0.5 hPa bei den Standardabweichungen.

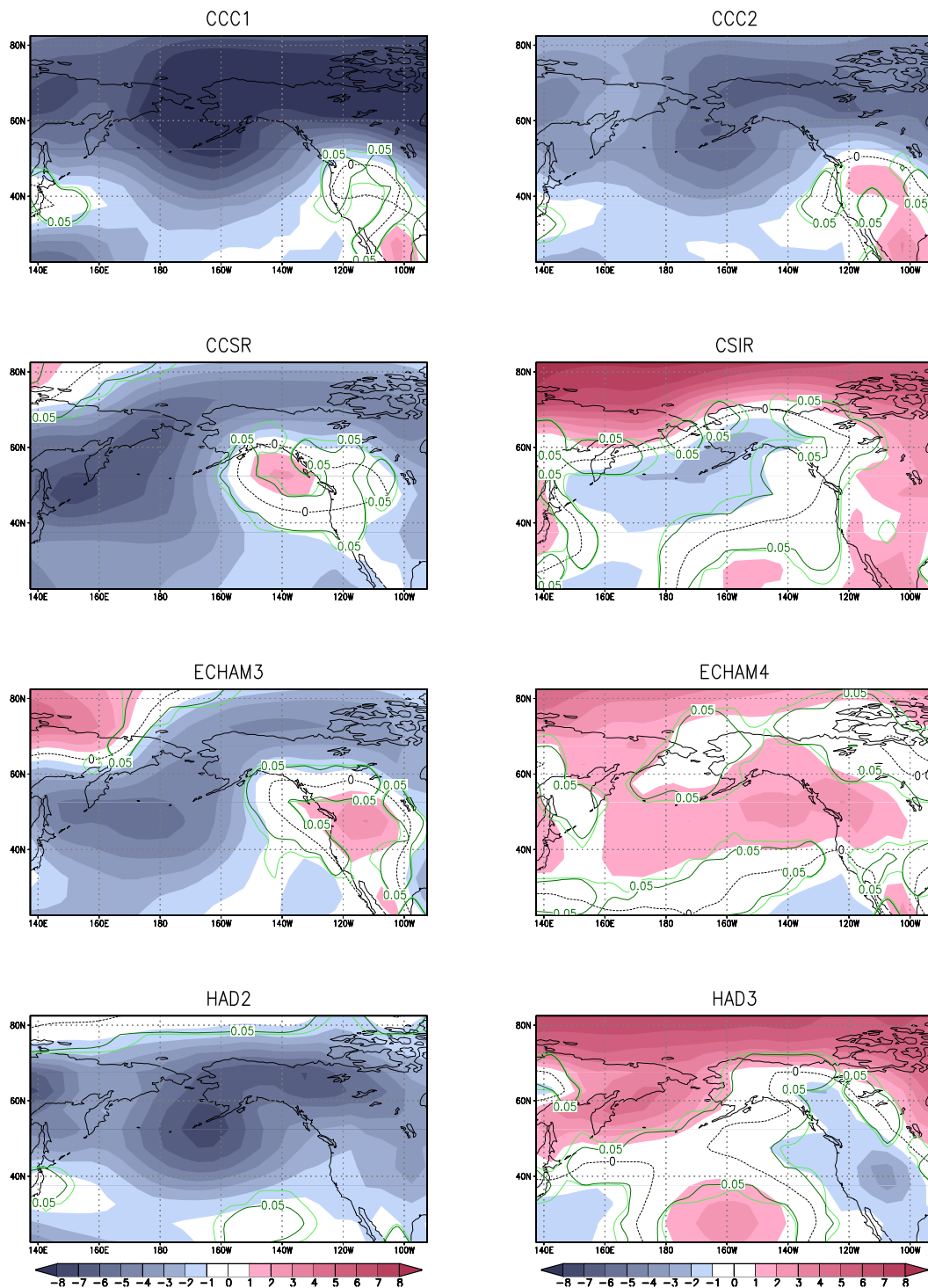
nischen Kontinenten. Die Variabilität erreicht in den hohen Breiten etwas höhere Werte als beim CCC1. Ganz im Nordwesten liegen sie über 2 hPa. Beim CCSR verläuft der Bereich tieferen Drucks von Südwesten nach Nordosten und die Kernregion des ATs liegt mit Werten um 1001 hPa gegenüber den Messdaten westlicher. Dadurch ist das HH leicht nach Osten gegen die nordamerikanischen Westküste hin verschoben. Ganz im Nordwesten des Untersuchungsraums werden Werte von rund 1017 hPa erreicht. Ein Variabilitätsmaximum mit Werten zwischen 2 hPa und 2.5 hPa liegt über dem Westende der Aleuten, während ähnliche Werte entlang der nördlichen Begrenzung ausgemacht werden können. Beim CSIR ist die flächenmässige Ausdehnung des ATs vergleichbar mit jener bei den Messdaten und bezüglich der Druckwerte dürfte in diesem Gebiet eine geringe Unterschätzung vorliegen. Ebenso wird der Bereich des HHs angemessen wiedergegeben. Ganz im Norden liegen die Bodendruckwerte bei 1025 hPa und damit ungefähr 20 hPa höher als im 24° südlicher gele-

genen Kerngebiet des ATs. Die Variabilität erreicht im gesamten Untersuchungsraum nie Werte von 2 hPa. ECHAM3 simuliert das AT gegenüber den Messdaten in einem grösseren Bereich und mit tieferem Druck. Der Tiefdruckbereich des Islandtiefs (IT) im Nordosten wird über den kanadischen Inseln mit Werten um 1013 hPa vom Tiefdruckbereich des ATs abgetrennt. Das HH erstreckt sich vom Nordostpazifik bis über den nordamerikanischen Kontinenten. Im Nordwesten liegen die Bodendruckwerte über 1017 hPa. Das Variabilitätsmaximum liegt mit Werten über 2 hPa südlich der Beringstrasse. Beim neueren ECHAM4 ist der Bereich des ATs im Vergleich zu den Messdaten in einem kleineren Bereich zu finden, stimmt aber hinsichtlich der Lage gut überein. Das HH wird dagegen in einem grösseren Bereich simuliert. In den hohen Breiten liegen die Werte bei 1020 hPa. Damit dürfte das Bodendruckfeld im gesamten Untersuchungsraum tendenziell überschätzt werden. Die grösste Variabilität kann in einer kleinen Region über den Aleuten ausgemacht werden. Ganz im Nordosten liegen die Werte zwischen 1 hPa und 1.5 hPa und damit deutlich tiefer als bei den Messdaten. Beim HAD2 stimmt die Kernregion des ATs mit den Analysedaten überein, aber der umgebende Bereich tieferen Drucks ist flächenmässig grösser und verbindet sich über Kanada mit der Tiefdruckregion des ITs. Die Bodendruckwerte des HHs erreichen knapp 1021 hPa und liegen damit nur wenig unter jenen der Referenzdaten. Das Variabilitätsmaximum des ATs liegt zu südlich, während die Variabilitätswerte entlang der nördlichen Begrenzung angemessen mit den Messdaten übereinstimmen. Die Unterschiede zum neueren HAD3 sind vor allem im Bereich des ATs augenfällig. Das Tiefdruckgebiet wird in einer kleineren Region simuliert und das HH ist stärker ausgeprägt als beim Vorgängermodell. In den hohen Breiten dürften die Bodendruckwerte jedoch deutlich zu hoch liegen.

## B.2 Anomalien

In Abbildung B.2 sind die Bodendruckdifferenzfelder dargestellt. Sie wurden aus den jeweiligen Modelldaten und den Messdaten gebildet. Die rot schattierten Bereiche bedeuten eine Überschätzung des Bodendruckfelds durch das betreffende Modell und blau schattierte entsprechend eine Unterschätzung. Wird in der Region des ATs von Unterschätzung gesprochen, so bezieht sich das ausschliesslich auf die Bodendruckwerte. Der Isobarenabstand beträgt 4 hPa. Zusätzlich sind die p-Werte 0.05 (dunkelgrüne, dickere Linien) und 0.01 (hellgrüne, dünnere Linien) des Wilcoxon-Tests eingetragen. Sie kennzeichnen die 95%- und die 99%-Signifikanzniveaus. Bei geringen Abweichungen zwischen Modell- und Messdaten ist häufig keine Signifikanz gegeben, daher wird dies nicht bei allen Modellen kommentiert.

Beim CCC1 wird das Bodendruckfeld in grossen Gebieten des Untersuchungsraums massiv unterschätzt. Die grössten negativen Abweichungen mit rund -11 hPa liegen über



**Abbildung B.2:** Bodendruckanomalien (Modelldaten–Messdaten) in hPa im nordpazifischen Raum bezüglich des Jahresmittels über die Periode von 1961 bis 1990. Überschätzungen durch das betreffende Klimamodell sind rot schattiert, Unterschätzungen blau. Dunkelgrüne Linien stellen den  $p$ -Wert 0.05 (95%-Signifikanzniveau) und hellgrüne Linien den  $p$ -Wert 0.01 (99%-Signifikanzniveau) des Wilcoxon-Tests dar.

Alaska und Nordwestkanada. Im Südosten kann eine weitere negative Anomalie ausgemacht werden. Positive Abweichungen liegen über Mexiko, während über Westamerika keine signifikanten Anomalien vorliegen. Das neuere CCC2 unterschätzt das Bodendruckfeld weniger stark als sein Vorgängermodell. Dennoch werden über Nordalaska Abweichungen von knapp -7 hPa erreicht. Positive Anomalien liegen über Mexiko und dem Westen der USA. In Unterschied zum CCC1 kann festgestellt werden, dass das Bodendruckfeld generell mit leicht höheren Werten simuliert wird. Beim CCSR können die grössten negativen Anomalien mit Werten zwischen -7 hPa und -8 hPa zwischen Hokkaido und der Halbinsel Kamtschatka festgestellt werden. Das Bodendruckfeld wird ebenso in grossen Bereichen der hohen Breiten unterschätzt. Ganz im Nordwesten des Untersuchungsraums zeigt sich eine positive Anomalie, die mindestens zu 95% auf Modellabweichungen zurückzuführen ist. Eine weitere signifikante positive Anomalie liegt über dem Alaska-Golf. Das CSIR unterschätzt den Bereich des ATs mit Tiefstwerten um -2.5 hPa über den Aleuten. Ansonsten dominieren positive Anomalien. Entlang der nördlichen Begrenzung wird das Bodendruckfeld massiv überschätzt. Im Nordwesten liegen die Abweichungen bei knapp +9 hPa. Weitere positive Anomalien kömmen über Japan, Zentralkanada und Mexiko festgestellt werden, währenddem das Bodendruckfeld über Teilen des Pazifiks und der Westküste Nordamerikas gut wiedergegeben wird. Beim ECHAM3 zeigt sich bezüglich der Unterschätzungen ein ähnliches Bild wie beim CCSR. Weite Teile des Bodendruckfelds der hohen Breiten werden unterschätzt und die grösste negative Anomalie mit Werten um -5.5 hPa liegt südöstlich der Halbinsel Kamtschatka über dem Nordwestpazifik. Positive Anomalien mit Werten von +4.5 hPa und +3 hPa können im Nordwesten des Untersuchungsraums beziehungsweise über Westamerika ausgemacht werden. Beim neueren ECHAM4 können fast nur positive Anomalien festgestellt werden. Die einzige signifikante Negativabweichung mit Werten von rund -2 hPa liegt westlich von Niederkalifornien über dem Ostpazifik. Dagegen liegen über weiten Gebieten des Nordpazifiks und der hohen Breiten Überschätzungen des Bodendruckfelds vor. Über Westkanada erreichen die Abweichungen Werte von +3 hPa und im Nordwesten des Untersuchungsraums ungefähr +4.5 hPa. Über der Beringstrasse, Zentralnordamerika und Teilen des Pazifiks stimmen die Modelldaten gut mit den Messdaten überein. HAD2 unterschätzt das Bodendruckfeld fast im gesamten Untersuchungsraum. Mit Werten von -7.5 hPa und -7 hPa liegen die grössten negativen Abweichungen über den Aleuten und Nordwestkanada. Signifikante positive Anomalien können keine gefunden werden. Beim Nachfolgemodell HAD3 zeigt sich tendenziell ein umgekehrtes Bild mit mehrheitlich positiven Anomalien. In den hohen Breiten wird das Bodendruckfeld mit Werten um +7 hPa deutlich überschätzt. Weitere positive Anomalien mit Werten von +4 hPa und +2 hPa liegen südlich des Ostzipfels von Russland über dem nahen Pazifik und über dem nördlichen Zentralpazifik. Über Westamerika wird das Bodendruckfeld mit Werten von -3.3 hPa unterschätzt. Eine weitere negative Anomalie

kann südöstlich von Japan festgestellt werden.

### B.3 Variabilität

Abbildung B.3 zeigt die Standardabweichungsdifferenzfelder bezüglich des Jahresmittels, gebildet aus der Differenz der jeweiligen Modelldaten und der Messdaten. Die roten Bereiche kennzeichnen Variabilitätsüberschätzungen und die blauen Bereiche Variabilitätsunterschätzungen durch das betreffende Modell. Der Isolinienabstand beträgt 0.2 hPa.

Beim CCC1 wird die Variabilität über weiten Teilen des Nordpazifiks und entlang der nördlichen Begrenzung des Untersuchungsraums unterschätzt. Die grössten negativen Abweichungen liegen dabei südlich der Aleuten und ganz im Nordwesten mit jeweils -0.9 hPa. Über der Beringstrasse und Westkanada wird die Variabilität des Bodendruckfelds mit Werten um +0.4 hPa beziehungsweise +0.5 hPa überschätzt. Das CCC2 zeigt ein ähnliches Bild wie sein Vorgängermodell, nur sind sowohl die positiven wie die negativen Abweichungen leicht nach Norden verschoben. Über den Aleuten und im Nordosten des Untersuchungsraums liegen mit rund -0.9 hPa und -0.8 hPa die grössten negativen Anomalien. Positive Anomalien liegen einerseits in einem länglichen Bereich, der sich vom Ochotskischen Meer bis über die Beringstrasse erstreckt und andererseits über Westkanada. Die Maximalabweichungen von rund +0.5 hPa werden nördlich der Beringstrasse erreicht. Beim CCSR wird die Bodendruckvariabilität vor allem in den hohen Breiten teilweise deutlich überschätzt. Die grösste positive Abweichung mit rund +0.9 hPa liegt dabei nordwestlich von Alaska. Ein weiteres lokales Maximum mit einem Wert von +0.6 hPa kann über dem Pazifik festgestellt werden. Nennenswerte negative Anomalien mit Werten um -0.4 hPa und -0.6 hPa liegen südöstlich der Aleuten über dem Pazifik und ganz im Nordwesten des Untersuchungsraums. Beim CSIR fallen die Variabilitätsunter- beziehungsweise überschätzungen meist geringer als beim CCSR aus. Einzig entlang der nördlichen Begrenzung erreichen sie mit -1 hPa grössere Werte. Ein lokales Minimum mit -0.5 hPa kann südlich der Aleuten ausgemacht werden. Von der Insel Sachalin über die Beringstrasse bis über Nordwestkanada erstreckt sich ein Bereich mit Variabilitätsüberschätzungen, deren Maximalwert mit +0.5 hPa über der Grenze zwischen Kanada und Alaska liegt. Eine weitere positive Anomalie mit Werten um +0.2 hPa kann in einem kleinen Bereich über dem nördlichen Zentralpazifik ausgemacht werden. ECHAM3 unterschätzt die Variabilität in den hohen Breiten und entlang der Westküste Nordameriks über dem Pazifik. Die grösste negative Abweichung mit einem Wert von -0.8 hPa wird dabei im Nordwesten des Untersuchungsraums erreicht. Die positiven Abweichungen liegen, ähnlich den bisherigen Modellen in einem Band, das sich von Russland über die Beringstrasse bis über Nordkanada erstreckt. Lokale Maxima mit +0.7 hPa und +0.6 hPa liegen dabei über Ostrussland und Nordostalaska. Beim ECHAM4 kann die Variabilitätsunterschätzung entlang der Westküste Nordame-

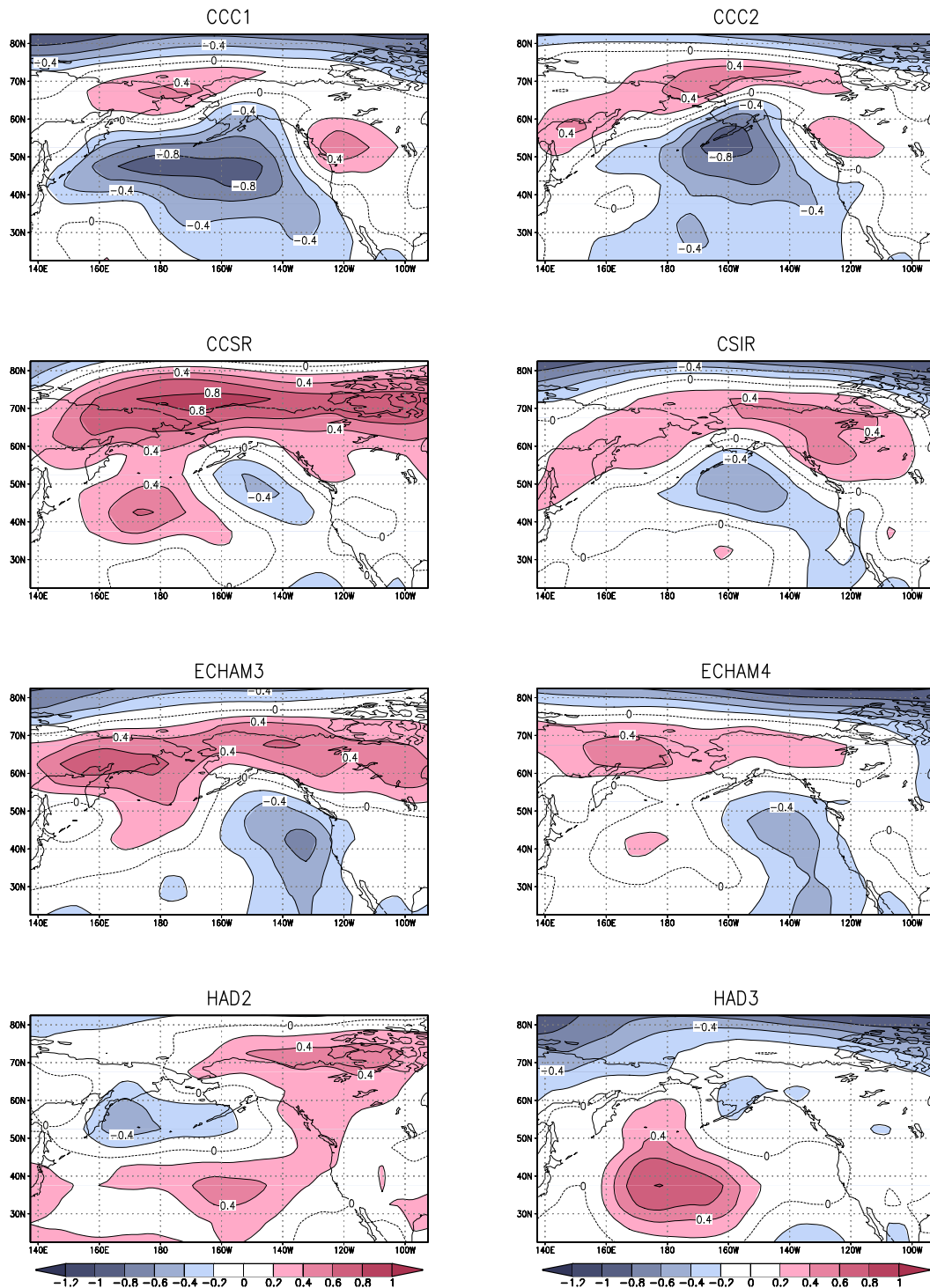


Abbildung B.3: Differenzfelder der Standardabweichungen bezüglich des Jahresmittels über die Periode von 1961 bis 1990. Positive Werte sind rot schattiert und bedeuten eine Überschätzung der Variabilität durch das betreffende Klimamodell. Negative Werte sind blau schattiert und bedeuten eine Unterschätzung. Der Isolinienabstand beträgt 0.2 hPa.

rikas über dem Pazifik ebenfalls festgestellt werden. Sie ist jedoch mit Tiefstwerten von  $-0.5$  hPa etwas schwächer ausgeprägt als beim Vorgängermodell. Weitere Negativanomalien können entlang der nördlichen Begrenzung mit Tiefstwerten von rund  $-1$  hPa ausgemacht werden. Die grösste positive Abweichung liegt mit einem Wert von  $+0.5$  hPa über Ostrussland. Über dem westlichen Nordpazifik wird die Variabilität in einem kleinen Bereich mit  $+0.2$  hPa überschätzt. Beim HAD2 zeigt sich ein anderes Bild. Während die bisherigen Modelle die Variabilität über Ostrussland meistens überschätzten, kann bei diesem Modell über dem Pazifik nahe der russischen Küste eine negative Anomalie mit Werten von rund  $-0.5$  hPa festgestellt werden. Eine weitere negative Abweichung mit  $-0.3$  hPa liegt im Nordwesten des Untersuchungsraums. Über weiten Teilen des Pazifiks und der Westküste Nordamerikas sowie über den kanadischen Inseln wird die Variabilität überschätzt. Lokale Maxima mit Werten von jeweils  $+0.5$  hPa liegen dabei im Bereich des HHs über dem Pazifik und über Nordwestkanada. HAD3 unterschätzt die Variabilität des Bodendruckfelds vor allem in den hohen Breiten mit Tiefstwerten um  $-1$  hPa. Kleinere nennenswerte Negativabweichungen liegen über Südalaska, Mexiko und bei der südlichen Begrenzung über dem Pazifik. Im Bereich des zentralen Nordpazifiks wird die Variabilität mit maximal  $+0.8$  hPa überschätzt.

## B.4 Zusammenfassende Übersicht

Tabelle B.1 zeigt die Werte der verwendeten Fehlermasse. Nebst den maximalen Abweichungen ( $-AN$ ,  $+AN$ ,  $-SD$  und  $+SD$ ) aus den bisher besprochenen Differenzfeldern sind die dazugehörigen gewichteten Mittelwerte ( $\bar{m}_{AN}$  und  $\bar{m}_{SD}$ ), die jeweilige Wurzel aus den mittleren quadratischen Fehler ( $W_{AN}$  und  $W_{SD}$ ), die räumliche Korrelation ( $r$ ) und der Anteil erklärter räumlicher Varianz ( $EV$ ) eingetragen. Die mittleren Fehler ( $\bar{m}_{AN}$  und  $\bar{m}_{SD}$ ) sind nicht unproblematisch, da sie grosse Abweichungen wegmitteln können. Sie müssen mit den anderen Fehlern und den Differenzfeldern kombiniert betrachtet werden. Nähere Angaben zur Verwendung sind in Abschnitt 2.2.2 aufgeführt. Denen im Text verwendeten Fehlerkürzel wird im singulären Gebrauch der männliche Artikel vorangestellt. Ausnahmen bilden die räumliche Korrelation und der Anteil erklärter räumlicher Varianz, denen der weibliche Artikel vorangestellt wird. Es werden nicht alle Werte aus der Tabelle kommentiert.

Die massive Negativanomalie ( $-AN$ ) von  $-11.1$  hPa beim CCC1 fällt aus der Reihe. Deutliche positive Anomalien ( $+AN$ ) sind mit  $+8.88$  hPa und  $+7.02$  hPa beim CSIR beziehungsweise beim HAD3 festzustellen. Drei Modelle überschätzen das mittlere Bodendruckfeld, während bei den restlichen fünf eine Unterschätzung vorliegt. Besonders deutlich ist der  $\bar{m}_{AN}$  beim CCC1 mit einem Wert von  $-3.75$  hPa, was mit der oben erwähnten negativen Abweichung erklärt werden kann. Dies zeigt sich auch beim  $W_{AN}$ , der mit  $4.94$  hPa



**Tabelle B.1:** Übersicht der verwendeten Fehlermasse bezüglich des Jahresmittels der Analysedaten:  $-AN$  maximale negative Bodendruckanomalie in hPa;  $+AN$  maximale positive Bodendruckanomalie in hPa;  $\bar{m}_{AN}$  mittlere Bodendruckanomalie in hPa (gewichtetes Flächenmittel der Anomalien);  $W_{AN}$  Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Bodendruckanomalien in hPa (gewichtet);  $-SD$  maximale negative Standardabweichungsdifferenz in hPa;  $+SD$  maximale positive Standardabweichungsdifferenz in hPa;  $\bar{m}_{SD}$  mittlere Standardabweichungsdifferenz in hPa (gewichtetes Flächenmittel der Standardabweichungsdifferenzen);  $W_{SD}$  Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler der Standardabweichungsdifferenzen in hPa (gewichtet);  $r$  räumliche Korrelation der simulierten und gemessenen Bodendruckmuster und  $EV$  Anteil erklärter räumlicher Varianz der simulierten Bodendruckmuster. Die Doppellinien dienen der Übersicht und trennen die Fehlermasse der Bodendruckanomalien, der Standardabweichungen (Variabilität) und der räumlichen Güte voneinander ab.

Mod	$-AN$	$+AN$	$\bar{m}_{AN}$	$W_{AN}$	$-SD$	$+SD$	$\bar{m}_{SD}$	$W_{SD}$	$r$	$EV$
CCC1	-11.11	+2.57	-3.74	4.94	-1.00	+0.55	-0.19	0.37	+0.82	+0.63
CCC2	-6.70	+3.14	-2.22	3.05	-0.88	+0.58	-0.15	0.31	+0.90	+0.78
CCSR	-7.61	+2.22	-2.85	3.51	-0.61	+0.90	+0.13	0.30	+0.90	+0.78
CSIR	-2.43	+8.88	+0.65	2.15	-0.97	+0.50	-0.00	0.25	+0.90	+0.78
ECH3	-5.54	+4.53	-1.75	2.66	-0.83	+0.75	-0.02	0.30	+0.91	+0.80
ECH4	-1.63	+4.94	+0.73	1.28	-1.05	+0.50	-0.09	0.25	+0.95	+0.88
HAD2	-7.52	+0.37	-2.76	3.38	-0.54	+0.52	+0.11	0.22	+0.94	+0.82
HAD3	-3.35	+7.02	+0.66	2.18	-1.05	+0.81	+0.01	0.29	+0.84	+0.71

beim CCC1 am höchsten ausfällt. CCC2, CCSR und HAD2 schneiden bei diesem Fehlermass eher schlecht ab. Das beste Ergebnis beim  $W_{AN}$  liefert mit 1.28 hPa ECHAM4 und distanziert sich damit klar von den übrigen Modellen. Der  $\bar{m}_{SD}$  fällt bei allen Modellen klein aus. Beim CSIR kann auf Grund der Rundung keine Differenz zu den Messdaten festgestellt werden (erst bei der dritten Nachkommastelle weicht das Modell minim ab).

Bei der räumlichen Korrelation erreichen sechs von acht Modellen einen Wert von mindesten +0.9. ECHAM4 liefert mit +0.95 vor HAD2 mit +0.94 die höchste  $r$ . Die tiefste  $r$  kann beim CCC1 mit einem Wert von +0.82 und beim HAD3 mit einem Wert von +0.84 ausgemacht werden. Bei der erklärten Varianz schneidet wiederum ECHAM4 mit einem Wert von +0.88 am besten ab. Die tiefste  $EV$  liefert mit +0.63 CCC1.



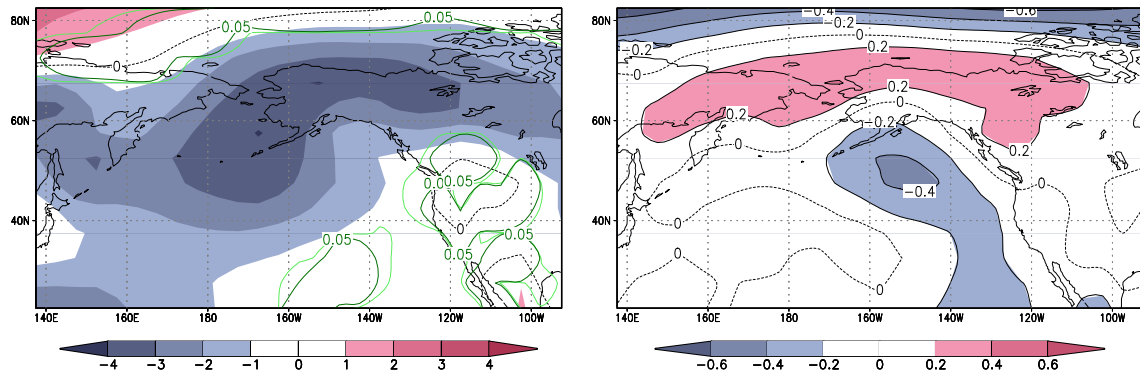
## Anhang C

# Diskussion (Nordpazifik)

Im Folgenden werden einige Resultate interpretiert und soweit möglich mit anderen Studien verglichen. Dazu stehen die Arbeiten von Lambert und Boer (2001) und Covey et al. (2003) im Vordergrund. Daneben wurden zu Vergleichszwecken dieselben Berechnungen im nordatlantisch-europäischen Raum durchgeführt. Diese Resultate werden jedoch nur in rangierter Form aufgeführt.

### C.1 Modellmittelung

In Abbildung C.1 ist links das Bodendruckdifferenzfeld in hPa gebildet aus dem Mittel (Model Mean) aller acht Modelle und den Messdaten und rechts das entsprechende Differenzfeld der Standardabweichungen in hPa bezüglich des Jahresmittels dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die acht Modelle im Mittel das Bodendruckfeld in weiten Teilen des Untersuchungsraums unterschätzen. Besonders im Bereich des ATs sind die Abweichungen mit Tiefstwerten von rund -4 hPa deutlich. Diese ausgeprägte Anomalie stimmt mit den Ergebnissen von Covey et al. (2003) gut überein. Dies gilt sowohl für die Lage der Anomalie wie auch für die Abweichungen selbst. Vergleicht man mit Lambert und Boer (2001) so dürfte die Anomalie vor allem auf Unterschätzungen des Bodendruckfelds im Winter zurückzuführen sein. Lambert und Boer (2001) haben die Modelle sowohl im Winter wie auch im Sommer mit Re-Analysedaten (Gibson et al. 1997) verglichen. Sie benutzen für ihren Vergleich allerdings noch andere Modelle, deshalb kann die oben beschriebene Anomalie nicht mit absoluter Sicherheit auf den Winter zurückgeführt werden. Die Vermutung liegt jedoch sehr nahe, da bei Lambert und Boer (2001) im Sommer tendenziell eine Überschätzung des Bodendruckfelds in dieser Region festgestellt werden kann. Eine saisonale (jahreszeitliche) Untersuchung wäre in diesem Zusammenhang interessant. Werden die Differenzfelder für den Bereich des Islandtiefs (IT) berechnet und gemittelt (nicht dargestellt), so wird das Bodendruckfeld nur leicht unterschätzt. Die Abweichun-



**Abbildung C.1:** Differenzfelder des Bodendrucks in hPa gebildet aus dem Mittel (Model Mean) aller acht Modelle und den Analysedaten über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990 für das Jahresmittel (links). Dunkelgrüne Linien stellen den  $p$ -Wert 0.05 (95%-Signifikanzniveau) und hellgrüne Linien den  $p$ -Wert 0.01 (99%-Signifikanzniveau) des Wilcoxon-Tests dar. Rechts ist das Differenzfeld der Standardabweichungen in hPa (Model Mean) bezüglich des Jahresmittels dargestellt.

gen fallen mit Tiefstwerten zwischen -1 hPa und -2 hPa viel kleiner aus. Die negativen Anomalien fallen zudem beim IT im Winter deutlicher aus als im Sommer.

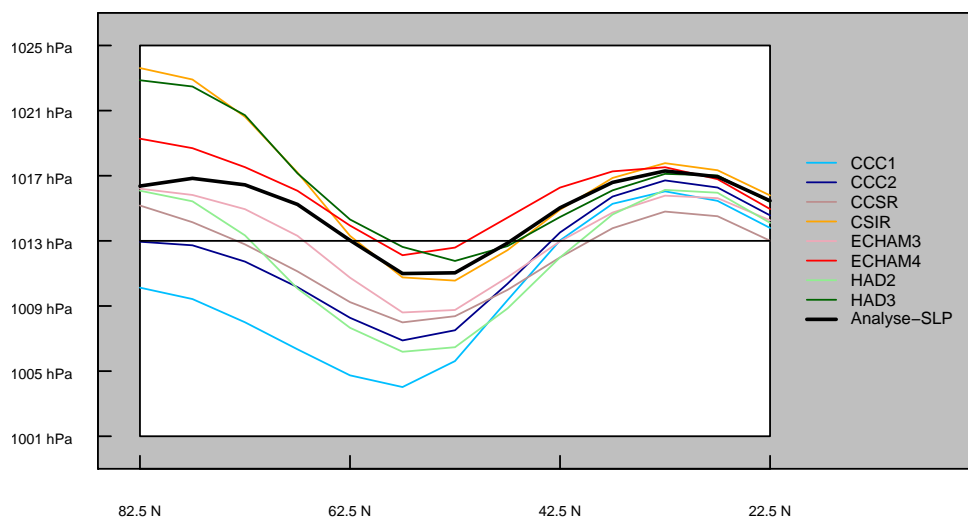
Die positive Anomalie im Nordwesten des Untersuchungsraums erreicht Höchstwerte von +2.4 hPa und stimmt damit ebenfalls mit den Resultaten von Covey et al. (2003) überein. Entlang der Westküste Nordamerikas und über dem nördlichen Ostpazifik stimmen die Modelldaten gut mit den Messdaten überein.

Die Variabilität wird über dem Ostzipfel Russlands, der Beringstrasse und Nordwestkanada von den Modellen im Mittel überschätzt (siehe Abbildung C.1 rechts). Dies hängt mit der oben erwähnte negativen Anomalie zusammen. Auf Grund der Ergebnisse von Lambert und Boer (2001) ist anzunehmen, dass das AT im Winter mit zu tiefem und im Sommer mit zu hohem Druck von den Modellen simuliert wird. Das bedeutet, dass das AT im Winter zu stark ausgeprägt ist und im Sommer entsprechend zu schwach. Diese Unterschiede äussern sich in der überschätzten Variabilität. Der grösste Wert liegt dabei mit +0.4 hPa über der Beringstrasse. Wird dieselbe Berechnung für das IT gemacht zeigt sich ein anderes Bild. Im Bereich des ITs wird die Variabilität tendenziell unterschätzt. Dies dürfte mit der verhältnismässig grossen Verschiebung des ITs im jährlichen Verlauf zusammenhängen (Sahsamanoglou 1990; Wanner et al. 2000), die bei einigen Modellen zu gering ausfällt. Dadurch fallen die Druckschwankungen im zeitlichen Verlauf an einem (gedachten) Raumpunkt kleiner als in Wirklichkeit aus, was zu einer Unterschätzung der Variabilität führen kann.

In Abbildung C.2 sind die zonalen Mittel der Analysedaten (schwarze Linie) und aller

verwendeten Modelle eingetragen. Es kann festgestellt werden, dass die Abweichungen der Modelle von den Messdaten mit zunehmender geographischer Breite grösser werden. Die Abweichungen der beiden Modelle CSIR und HAD3 sind nahe der nördlichen Begrenzung des Untersuchungsraums besonders deutlich. Diese zunehmende Streuung der Modelle gegen Norden wurde bereits von Gates et al. (1999) und Covey et al. (2003) festgestellt und kann hier bestätigt werden. Offenbar sind solche Unsicherheiten auch bei anderen Modellen auszumachen. Wird eine zonale Mittelung im Nordatlantik vorgenommen, kann dies ebenfalls festgestellt werden. Die Modelle haben Mühe mit der Simulation der komplexen Bodendruckverhältnisse der hohen Breiten und des Nordpols. So liegen beispielsweise bei Grönland Hochdruck (Grönlandhoch) und Tiefdruck (IT) nahe beieinander. In Folge der groben Auflösung von Klimamodellen kann daher eine geringfügige Verschiebung eines simulierten Druckzentrums gegenüber den Messdaten zu grossen Abweichungen führen.

In den mittleren und niederen Breiten stimmen die Modelldaten besser mit den Analysedaten überein (siehe Abbildung C.2). Es fällt auf, dass im Bereich des HHs die meisten Modelle zu einer Unterschätzung des Bodendruckfelds neigen. Nur gerade CSIR und ECHAM4 tendieren zu einer leichten Überschätzung. Werden die zonalen Mittel im Bereich des Azorenhochs (AH) berechnet, wird das Bodendruckfeld bezüglich des Jahresmittels nur von drei Modellen unterschätzt (nicht dargestellt). Der Vergleich der Messdaten der beiden Hochdruckgebiete zeigt, dass das AH zumindest über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990 gegenüber dem HH leicht stärker ausgeprägt ist. Möglicherweise fliesst diese Tatsache in die Simulationen ein, wird jedoch von einigen Modellen überbewertet.



**Abbildung C.2:** Zonale Jahresmittel der Analysedaten (schwarze Linie) und aller verwendeten Modelldaten über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990.

## C.2 Vergleich mit dem nordatlantisch-europäischen Raum

In Tabelle C.1 sind die Rangierungen der Modelle nach allen verwendeten Fehlermassen separat aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass der  $W_{AN}$ , der  $W_{SD}$ , die  $r$  und die  $EV$  aussagekräftigere Fehlermasse als die übrigen sind. Besonders die Anomalie minima beziehungsweise Anomalie maxima haben eine untergeordnete Bedeutung. In Tabelle C.2 sind die Rangierungen bezüglich derselben Fehlermasse im nordatlantisch-europäischen Raum mit den Abgrenzungen  $22.5^\circ\text{N}$ – $82.5^\circ\text{N}$  und  $92.5^\circ\text{W}$ – $42.5^\circ\text{E}$  zu Vergleichszwecken aufgeführt. Im Folgenden wird in dieser Hinsicht von der Vergleichsuntersuchung gesprochen.

Das CCC1 liefert in dieser Untersuchung die schlechtesten Resultate. Die Unterschätzung des Bodendruckfelds im Bereich des ATs liegt in der gleichen Größenordnung wie im Bereich des ITs. Durch die flächenmässig grosse Ausdehnung dieser Anomalie in der Region des ATs resultiert beim  $\bar{m}_{AN}$  eine deutliche negative Abweichung, die im nordatlantisch-europäischen Raum durch die leichte Überschätzung des Bodendruckfelds des AHs teilweise kompensiert wird. Aus diesem Grund schneidet CCC1 nebst den oben erwähnten aussagekräftigsten Fehlermassen auch beim  $\bar{m}_{AN}$  am schlechtesten ab. Interessant sind die schlechten Ergebnisse im Zusammenhang mit den räumlichen Gütemassen. Sie fallen bei der Vergleichsuntersuchung wesentlich besser aus. Dies ist jedoch nicht allein auf die CCC1-Simulation zurückzuführen. Die Modelle CCSR und CSIR liefern hier bei der  $r$  und der  $EV$  deutlich bessere Ergebnisse als im nordatlantisch-europäischen Raum. Dies dürfte vor allem beim CCSR mit den Abweichungen über den Kontinenten, die bei der Vergleichsuntersuchung mehr Fläche einnehmen, zusammenhängen. Bei diesem Mo-

**Tabelle C.1:** Rangierung der Klimamodelle nach allen verwendeten Fehlermassen im Untersuchungsraum bezüglich des Jahresmittels über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990. Für die Erklärungen der Abkürzungen wird auf Tabelle B.1, Seite 97 verwiesen.

Mod	$-AN$	$+AN$	$\bar{m}_{AN}$	$W_{AN}$	$-SD$	$+SD$	$\bar{m}_{SD}$	$W_{SD}$	$r$	$EV$
CCC1	8	3	8	8	6	4	8	8	8	8
CCC2	5	4	5	5	4	5	7	7	4	4
CCSR	7	2	7	7	2	8	6	5	4	4
CSIR	2	8	1	2	5	1	1	2	4	4
ECH3	4	5	4	4	3	6	3	5	3	3
ECH4	1	6	3	1	7	1	4	2	1	1
HAD2	6	1	6	6	1	3	5	1	2	2
HAD3	3	7	2	3	7	7	2	4	7	7

**Tabelle C.2:** Rangierung der Klimamodelle nach denselben Fehlermassen wie in Tabelle C.1 im nordatlantisch-europäischen Raum mit den Abgrenzungen  $22.5^{\circ} N$ – $82.5^{\circ} N$  und  $92.5^{\circ} W$ – $42.5^{\circ} E$  bezüglich des Jahresmittels über die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990. Für die Erklärungen der Abkürzungen wird auf Tabelle B.1, Seite 97 verwiesen.

Mod	$-AN$	$+AN$	$\bar{m}_{AN}$	$W_{AN}$	$-SD$	$+SD$	$\bar{m}_{SD}$	$W_{SD}$	$r$	$EV$
CCC1	8	4	6	8	4	5	8	7	4	4
CCC2	5	3	3	5	3	6	1	2	3	3
CCSR	7	2	8	7	2	8	1	5	6	6
CSIR	3	8	5	6	7	3	6	6	8	8
ECH3	2	5	1	2	6	4	1	1	5	4
ECH4	1	6	4	1	4	2	4	3	1	2
HAD2	6	1	7	3	1	7	5	4	1	1
HAD3	4	7	2	4	8	1	7	8	7	7

dell weichen die Bodendruckdaten über Europa teilweise deutlich von den Referenzdaten ab. Beim CSIR liegen die Probleme eher beim IT und dem Grönlandhoch. Dieses Modell unterschätzt die Variabilität im Bereich des ITs deutlich, was mit ein Grund ist, weshalb die  $EV$  im Mittel im nordatlantisch-europäischen Raum mit einem Werte von  $+0.29$  nicht einmal halb so gut wie im nordpazifischen Raum ausfällt. Eine separate Untersuchung der Bodendruckfelder nur über den Kontinenten wäre in dieser Hinsicht aufschlussreich. Zudem scheint dieses Modell das Sekundärzentrum (Sahsamanoglou 1990; Wanner et al. 2000) des ITs zu wenig zu berücksichtigen. Allgemein kann festgehalten werden, dass das CSIR in dieser Untersuchung generell besser als bei der Vergleichsuntersuchung abschneidet. Dies gilt besonders bei den beiden mittleren Fehlern  $\bar{m}_{AN}$  und  $\bar{m}_{SD}$  sowie bei den beiden mittleren quadratischen Fehlern  $W_{SD}$  und  $W_{AN}$ . In der Vergleichsuntersuchung können nördlich vom  $58.$  Breitengrad nur Überschätzungen des Bodendruckfelds gefunden werden. In dieser Untersuchung trifft dies erst ungefähr ab dem  $65.$  Breitengrad zu. Der Grund dürfte in einer Überbewertung und Überschätzung des Grönlandhochs liegen, was eine südwärtige Verschiebung des ITs und somit Bodendruckunterschätzungen in den mittleren Breiten zur Folge hat. Der Bereich des ATs wird zwar auch leicht unterschätzt, er stimmt aber bezüglich der Lage gut mit den Messdaten überein, woraus wiederum bessere Werte bei den räumlichen Gütemassen resultieren.

Über alle Fehlermasse betrachtet schneidet ECHAM4 in dieser Untersuchung am besten ab. Dies trifft auch im nordatlantisch-europäischen Raum zu. Dieses Modell vermag das Bodendruckfeld sowohl über den Kontinenten wie über den Ozeanen gut wiederzugeben. HAD2 liefert teilweise ebenfalls gute Resultate, insbesondere bei der Va-

riabilität und den räumlichen Gütemassen. Bei den Bodendruckanomalien können dagegen grosse Abweichungen festgestellt werden. Dies liegt vor allem an der enormen Unterschätzung des Bodendruckfelds im Bereich des ATs. Obwohl der gesamte Tiefdruckbereich der HAD2-Simulation räumlich gesehen weniger genau mit jenem der Messdaten übereinstimmt, wird doch ein besserer Wert bei der  $r$  erreicht als beispielsweise beim CSIR. Das kann damit begründet werden, dass beim HAD2 die Übereinstimmung in den mittleren und niederen Breiten etwas besser ausfällt als beim CSIR. Auf die Fläche umgerechnet macht das jedoch viel aus, da infolge des Zusammenhangs zwischen der Erdkrümmung und der Kartenprojektion die niederen Breiten deutlich mehr gewichtet werden müssen. HAD3 liefert ähnliche Ergebnisse wie im nordatlantisch-europäischen Raum. Die einzige Ausnahme bildet die *EV*, die bei der Vergleichsuntersuchung wesentlich schlechter ausfällt. Der Grund dürfte beim AH beziehungsweise beim HH liegen. Das AH wird mehr unterschätzt als das HH überschätzt wird.



## Anhang D

# Schlussfolgerungen und Ausblick (Nordpazifik)

- Im Allgemeinen kann festgestellt werden, dass die Abweichungen in den hohen Breiten grösser ausfallen als in den mittleren und niederen Breiten. Im Bereich des AT sind die Unterschiede zwischen den Modellen besonders gross. Im Mittel (Model Mean) wird jedoch das Bodendruckfeld des ATs massiv unterschätzt. Das heisst, das AT wird zu ausgeprägt simuliert. Damit stimmen die Ergebnisse gut mit jenen von Lambert und Boer (2001) und Covey et al. (2003) überein.
- Der Vergleich mit dem nordatlantisch-europäischen Raum zeigt, dass die Modelle das Bodendruckfeld des ATs wesentlich stärker unterschätzen als jenes des ITs. Das dürfte mit dem häufig überschätzten Grönlandhoch zusammenhängen, was zur Folge hat, dass der sehr nahe bei Grönland gelegene Bereich des ITs weniger stark unterschätzt wird. Das CCC1 unterschätzt sowohl den Bereich des ATs wie jener des ITs am deutlichsten unter allen Modellen. Beim CCSR kann in dieser Arbeit sowohl eine bessere räumliche Korrelation wie auch eine besserer erklärte Varianz festgestellt werden. Der Hauptgrund liegt vermutlich in der unterschiedlichen Meer-Land-Verteilung der beiden Untersuchungsräume. Das CSIR schneidet bei der räumlichen Korrelation wie bei der erklärten Varianz im nordpazifischen Raum wesentlich besser als im nordatlantisch-europäischen Raum ab. Dies ist einerseits auf die grössere Variabilitätsunterschätzung des ITs gegenüber dem AT zurückzuführen und andererseits wird das Sekundärzentrum des ITs nördlich von Skandinavien kaum simuliert, was die räumlichen Gütemasse entscheidend beeinflusst. Die Resultate der übrigen Modelle im nordpazifischen Raum sind mit jenen im nordatlantisch-europäischen Raum vergleichbar.
- Im Rahmen dieser Arbeit kann ECHAM4 als bestes Modell bezeichnet werden, was

im nordatlantisch-europäischen Raum auch zutrifft. Im Gegensatz zur Paralleluntersuchung kann hier mit CCC1 auch ein schlechtestes Modell benannt werden. Diese Aussagen stützen sich auf die verwendeten Fehlermasse und sind nur im Untersuchungsraum über die Periode von 1961 bis 1990 bezüglich des Bodendrucks gültig.

Die Untersuchung im nordpazifischen Raum hat im Vergleich mit jener im nordatlantisch-europäischen Raum gezeigt, dass die Ergebnisse bei einigen Modellen unterschiedlich ausfallen. In diesem Zusammenhang wären separate Vergleiche der Bodendruckfelder über den Kontinenten beziehungsweise über den Ozeanen aufschlussreich. Dies trifft insbesondere auf die Modelle CCSR und CSIR zu. Ein zusätzlicher Vergleich ausserhalb der markanten Druckzentren AT und IT (zum Beispiel weiter südlich) würde vermutlich zu wesentlich anderen Resultaten führen, da im Bereich dieser Aktionszentren die Abweichungen durch die Modelle meistens gross ausfallen.

Die Untersuchungsperiode von 1961 bis 1990 ist verhältnismässig kurz, da es im Bereich von Druckzentren längerfristige Schwankungen gibt, wie dies beispielsweise beim IT der Fall ist (Sahsamanoglou 1990). Aus diesem Grund müsste ein Vergleich über eine längere Zeitperiode wiederholt werden.

Die Untersuchung der Bodendruckfelder alleine ist zwar für eine systematische Modellüberprüfung zulässig. Da aber gerade in höheren Schichten wichtige klimatologische Prozesse ablaufen, sollte ein Vergleich auf mehreren Levels stattfinden. Dies würde auch Zonalschnitte ermöglichen, was äusserst interessant sein dürfte.