

Esther Salvisberg

**Wetterlagenklimatologie – Möglichkeiten
und Grenzen ihres Beitrages zur
Klimawirkungsforschung im Alpenraum**



Geographisches Institut der Universität Bern 1996

Wetterlagenklimatologie - Möglichkeiten und Grenzen
ihres Beitrages zur Klimawirkungsforschung im
Alpenraum

GEOGRAPHICA BERNENSIA

Herausgeber Dozenten und Dozentinnen des Geographischen Institutes der Universität Bern

Reihe A African Studies Series

Reihe B Berichte über Exkursionen, Studienlager und Seminarveranstaltungen

Reihe E Berichte zu Entwicklung und Umwelt

Reihe G Grundlagenforschung

Reihe P Geographie für die Praxis

Reihe S Geographie für die Schule

Reihe U Skripten für den Universitätsunterricht

G51

Arbeitsgemeinschaft GEOGRAPHICA BERNENSIA in Zusammenarbeit mit der Geographischen
Gesellschaft von Bern
Hallerstrasse 12, Ch - 3012 Bern

- Verlag des Geographischen Institutes der Universität Bern -

Esther Salvisberg

Wetterlagenklimatologie - Möglichkeiten und Grenzen
ihres Beitrages zur Klimawirkungsforschung
im Alpenraum

Bern, GEOGRAPHICA BERNENSIA 1996
UNIVERSITY OF BERN, SWITZERLAND
INSTITUTE OF GEOGRAPHY
ISBN 3-906151-14-X

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes Nr. 31 (NFP 31, Projektnummer 4031-34226) "Klimaänderungen und Naturkatastrophen", Teilprojekt ALPCLIC (Alpin Climate Change) und wurde an der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern am 31. Oktober 1996 als Inauguraldissertation angenommen.

Der Druck der vorliegenden Arbeit wurde durch folgende Institutionen unterstützt:

- Stiftung Marchese Francesco Medici del Vascello
- Arbeitsgemeinschaft GEOGRAPHICA BERNENSIA

© 1996 by GEOGRAPHICA BERNENSIA, Universität Bern, ISBN 3-906151-14-X

Druck wälti druck, Zollikofen



Creative Commons Licences

Vorwort

Das Klima, als einer der stärksten und unmittelbar am meisten spürbaren Umweltfaktoren, prägt das wirtschaftliche, kulturelle und politische Gefüge einer Gesellschaft wie kaum ein anderer Umwelteinfluss. Entsprechend stark können Klimaänderungen das sozioökonomische Umfeld einer Gesellschaft prägen. Bereits kleine Schwankungen oder leichte Verschiebungen der Klimagürtel können grosse, ja katastrophale Folgen haben. Es ist deshalb wichtig, Untersuchungen über das Klima und dessen Änderungen durchzuführen. Gebirgsräume eignen sich besonders gut für Klimauntersuchungen, da sie auf engstem Raum verschiedene Klimatypen beheimaten und sich durch häufige extreme Wetterereignisse und Naturkatastrophen ausweisen.

Im Projekt ALPCLIC (**Alpin Climate Change**) des Nationalen Forschungsprogrammes NFP 31 "Klimaänderungen und Naturkatastrophen" (4031-34226) wurde unter der Leitung von Prof. Heinz Wanner abgeklärt, wie sensitiv der Alpenraum auf Änderungen im globalen Klimageschehen reagiert. Unter anderem wurde mittels Zeitreihenanalyse die Beziehung zwischen der Zirkulation über dem Nordatlantik und den Wetterlagen über Europa und im Alpenraum untersucht. Der Beitrag der vorliegenden Arbeit besteht darin, auf der Basis von GCM-Szenarien künftige regionale Klimaentwicklungen im Alpenraum präziser zu quantifizieren.

Mit dem Projekt ALPCLIC bot sich mir die Gelegenheit, mich mit Klimaänderungen und deren lokalen und regionalen Auswirkungen beschäftigen zu können. Für die finanzielle Unterstützung des Projektes danke ich dem schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der Wissenschaft.

Ohne die Unterstützung vieler hier nicht namentlich erwähnter Personen wäre die vorliegende Dissertation kaum in dieser Form zustande gekommen. Ihnen allen sei hiermit herzlich gedankt.

Folgende Personen haben einen speziellen Verdienst am Zustandekommen der vorliegenden Arbeit:

- Mein Betreuer Prof. Heinz Wanner, der das Projekt geleitet und ein Umfeld geschaffen hat, das mir ein konzentriertes Arbeiten am Thema ermöglichte. Trotz grosser anderweitiger Belastung konnte ich jederzeit mit seiner Hilfe rechnen.
- Dr. Ralph Rickli, der mich fachlich beraten und viele gute Ideen in die Arbeit eingebracht hat.
- Dr. Hans Kienholz für die inhaltlichen Ergänzungen sowie Gabi Hunziker und Frank M. Neidhöfer, welche die vorliegende Arbeit in einer vorangegangenen schriftlichen Fassung gelesen und von mehreren sprachlichen und grammatikalischen Unzulänglichkeiten befreit haben.
- Dr. Silvan Perego, der mir mit seinem Programm zur Extraktion von Daten ab CD die Arbeit erleichterte und mir auch beim Umgang mit den Tücken der Computertechnik zur Seite stand.

Ihnen allen gebührt ein besonderer Dank. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen der KLIMET (Gruppe für Klimatologie und Meteorologie) für Fach- und andere Diskussionen sowie bei Gabi Hunziker (Gruppe für Geomorphologie) für den interdisziplinären Gedankenaustausch. Für Hinweise und Klärungen im Zusammenhang mit den Alpenen Wetterlagen bin ich Prof. Max Schüepp zu Dank verpflichtet.

Schliesslich danke ich meinen Eltern sowie Renate, Theo, Tina und Nick Salvisberg und Gabi Hunziker für die vielen Aufmerksamkeiten und die moralische Unterstützung, die sie mir in dieser arbeitsreichen und nicht immer einfachen Zeit zukommen liessen. Ihnen möchte ich diese Dissertation widmen.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	V
INHALTSVERZEICHNIS	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VIII
TABELLENVERZEICHNIS	XI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XIII
ZUSAMMENFASSUNG	XVII
1 THEORETISCHE BETRACHTUNGEN ZUR ATMOSPHERISCHEN ZIRKULATION UND ZUM KLIMASYSTEM.....	1
1.1 Die Zirkulation der Mittelbreiten	1
1.1.1 Strömungsverhältnisse und Witterung der Mittelbreiten	1
1.2 Die Alpen und ihr Einfluss auf das Wettergeschehen.....	2
1.3 Das Klimasystem	4
2 SKALENKOPPLUNG UND DOWNSCALING	6
2.1 Das Skalenproblem	6
2.2 'Downscaling': Vom globalen zum regionalen Massstab.....	7
2.2.1 Theoretische oder dynamische Downscaling - Methoden.....	11
2.2.2 Halb-empirische Downscaling - Methoden.....	11
2.2.3 Empirische Downscaling - Methoden.....	13
2.3 Synoptisches Downscaling - der witterungsklimatologische Ansatz.....	14
3 MANUELLE KLASSIFIKATIONSTECHNIKEN UND DEREN ANWENDUNG IM SCHWEIZERISCHEN ALPENRAUM.....	16
3.1 Beschreibung der manuellen Wetterlagenklassifikationen	16
3.1.1 Die Wetterlagenklassifikation nach DZERDZEEVSKII	16
3.1.2 Katalog der Grosswetterlagen Europas nach HESS/BREZOWSKY	19
3.1.2.1 Gruppierung Europäischer Grosswetterlagen nach alpin-synoptischen Kriterien	21
3.1.3 Klassifikation der Wetterlagen in den Ostalpenländern nach LAUSCHER.....	23
3.1.4 Ein synoptisches Kalendarium für den Alpenraum von GRESSEL.....	25
3.1.5 Wettertypen für die Britischen Inseln nach LAMB	27
3.1.6 Wetterlagen der synoptischen Klassifikation nach SCHÜEPP.....	29
3.2 Eignung der Wetterlagenklassifikationen für das witterungsklimatologische Downscaling	32

4 KOPPLUNG EUROPÄISCHER UND ALPINER WETTERLAGEN.....	37
4.1 Zusammenhang der Wetterlagenklassifikationen nach SCHÜEPP und HESS/BREZOWSKY	37
5 RETROSPEKTIVE AUSWERTUNG DER ZEITREIHEN DER WETTERLAGENKLASSIFIKATIONEN NACH SCHÜEPP UND HESS/BREZOWSKY	44
5.1 Statistische Testverfahren zur Erkennung von Trends und Wendepunkten	46
5.1.1 Der S_1 -Lokationstrendtest nach COX und STUART.....	46
5.1.2 Der Wendepunkt-Test nach PETTITT	48
5.2 Zeitreihenanalyse der Wetterlagen nach SCHÜEPP	50
5.2.1 Statische Wetterlagenbetrachtung im Zeitraum 1945 bis 1994.....	50
5.2.2 Dynamische Betrachtung der Häufigkeiten der Wetterlagen	52
5.2.3 Persistenzanalyse trendbehafteter SCHÜEPP-Wetterlagen	57
5.3 Zeitreihenanalyse der alpin-synoptischen Gruppierung der HESS/BREZOWSKY- Grosswetterlagen.....	62
5.3.1 Statische Betrachtung über den Zeitraum 1881 bis 1990.....	62
5.3.2 Dynamische Betrachtung der Häufigkeiten der Zeitreihen	65
5.3.3 Persistenz der alpin-synoptischen Gruppen	68
6 AUTOMATISCHE KLASSIERUNG VON WETTERLAGEN.....	76
6.1 Datengrundlage	77
6.2 Automatische Klassierung der Alpenwetterlagen nach SCHÜEPP aus Gitternetzdaten	79
6.2.1 Methode zur Automatisierung der Klassifikation der SCHÜEPP-Wetterlagen	79
6.2.2 Vergleich der automatischen und der manuellen Wetterlagenklassifikation.....	87
6.2.2.1 Resultate der einzelnen Parameter.....	92
6.3 Automatische Klassifikation von HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen.....	102
6.3.1 Die Analogfall-Methode	102
6.3.1.1 Vorgängig zu bestimmende Grössen bei der Analogfall-Methode.....	104
6.3.1.2 Resultate der Analogfall-Methode	105
6.3.2 Klassierung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen mit Hilfe von Windrichtungssektoren an verschiedenen Gittermittelpunkten	113
6.3.2.1 Die Windrichtungs-Methode	113
6.3.2.2 Resultate.....	116
7 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	121
LITERATUR	125
ANHANG	129

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Grundriss der drei Grundformen der Strömung (Quelle: SCHÜEPP, 1979).....	1
Abb. 1.2: Die wichtigsten gebirgsmeteorologischen Phänomene unter besonderer Berücksichtigung der Alpen (abgeändert nach WANNER, 1988)	2
Abb. 1.3: Das Klimasystem mit Angabe von Reaktionszeiten auf bestimmte Störungen (Quelle: BENISTON, 1994)	4
Abb. 2.1: Einteilung der atmosphärischen Phänomene nach charakteristischer Horizontalausdehnung und Zeitdauer (abgeändert nach ORLANSKI, 1975 und BENISTON, 1994)	6
Abb. 2.2: Abweichungen der Jahresmitteltemperatur global und für die Station Grosser St. Bernhard, dargestellt als Abweichung vom Referenzwert der Periode 1951 - 1980 (Datenquelle: IPCC, 1992 und SCHÜEPP, 1994)	7
Abb. 2.3: Zur Erläuterung des Begriffs 'Downscaling'	8
Abb. 2.4: Die drei Ansätze zur Entwicklung regionaler Klimaszenarien aus globalen Daten.....	9
Abb. 2.5: Querschnitt durch die Alpen. Wahre Orographie und Orographie der beiden Spektralmodelle T-63 und T-106 (Quelle: BENISTON, 1994).....	10
Abb. 2.6: Halb-empirische Downscaling-Methoden.....	12
Abb. 2.7: Darstellung der Methode des Synoptischen Downscalings.....	14
Abb. 3.1: Die vier Zirkulationsgruppen der Wetterlagenklassifikation der Nordhemisphäre nach DZERDZEEVSKII (Quelle: DZERDZEEVSKII, 1962)	17
Abb. 3.2: Lage und Gebietsgrösse für die Wetterlagen nach SCHÜEPP (Quelle: KIRCHHOFER, 1971).....	29
Abb. 3.3: Gebietsgrösse der verschiedenen Wetterlagenklassifikationen.	34
Abb. 4.1: Anzahl Tage der HESS/BREZOWSKY-Zirkulationsformen, die während den Jahren 1945 bis 1992 den verschiedenen konvektiven SCHÜEPP-Wetterlagen zugeordnet wurden.....	38
Abb. 4.2: Relativer Anteil aller HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen an den einzelnen SCHÜEPP-Wetterlagen während den Jahren 1945 bis 1992	39
Abb. 4.3: Relativer Anteil der HESS/BREZOWSKY-Grosswettertypen an ausgewählten SCHÜEPP-Wetterlagen im Zeitraum 1945 bis 1992 für alle Jahreszeiten	40
Abb. 4.4: Relativer Anteil der SCHÜEPP-Wetterlagen, zusammengefasst nach Höhenströmung, an den einzelnen HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen, zusammengefasst zu den 8 alpin-synoptischen Gruppen.	41
Abb. 4.5: Relativer Anteil der einzelnen SCHÜEPP-Wetterlagen an den Tagen mit der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlage 'HM' für verschiedene Zeiträume	42
Abb. 5.1: 11-jährige gleitende Mittel der jährlichen Häufigkeiten der 8 alpin-synoptischen Gruppen der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen (Periode 1881-1994)	44
Abb. 5.2: Absolute Häufigkeit der drei Hauptgruppen der SCHÜEPP-Wetterlagen von 1945 bis 1994	45
Abb. 5.3.: Graphische Darstellung des sequentiellen Homogenitätstests nach PETTITT (1979).....	49
Abb. 5.4: Zeitlicher Verlauf der absoluten Häufigkeit pro Jahr der Gruppen der SCHÜEPP-Wetterlagen im Beobachtungszeitraum 1945 - 1994	52
Abb. 5.5.: Verlauf der 11-jährigen gleitenden Mittel der absoluten Häufigkeiten der beiden SCHÜEPP-Wetterlagen +Ho und -Nx in den vier Jahreszeiten, im Zeitraum 1945 bis 1995	53
Abb. 5.6: Anzahl Tage pro Jahr mit 1-, 2- und 3 ⁺ -tägigen Sequenzen der konvektiven Gruppe (+Hw, +Hn, +He, +Hs), im Beobachtungszeitraum 1945 bis 1994.....	58
Abb. 5.7: Anzahl Tage pro Jahr mit 1-, 2- und 3 ⁺ -tägigen Sequenzen der advektiven Gruppe (-Wx, +Nx, -Sx), im Beobachtungszeitraum 1945 bis 1994.....	58
Abb. 5.8: Mittlere Andauer der konvektiven Gruppe (+Hw, +Hn, +He, +Hs) und der advektiven Gruppe (-Wx, +Nx, -Sx) in der Zeitperiode 1945 bis 1994.....	60
Abb. 5.9: Anzahl Fälle pro Jahr der konvektiven Gruppe (+Hw, +Hn, +He, +Hs) mit einer Sequenzlänge von 5 und mehr Tagen, im Beobachtungszeitraum 1945 bis 1994.....	60

Abb. 5.10: Jahresgang der Gruppe 5 (Südlagen), aufgeteilt nach Dekaden (Quelle: RICKLI, 1995).....	64
Abb. 5.11: 11-jährige gleitende Mittel der absoluten Häufigkeit der alpin-synoptischen Gruppe 2, der Grosswetterlagen WA, WZ und WS über den Zeitraum 1881 bis 1992.....	66
Abb. 5.12: 11-jährige gleitende Mittel der absoluten Häufigkeit der alpin-synoptischen Gruppe 1 und 8 in den vier Jahreszeiten für den Zeitraum 1881 bis 1992.	66
Abb. 5.13: Relative Häufigkeit der alpin-synoptischen Gruppen der Hess-Brezowsky-Wetterlagen pro Jahr für den Zeitraum 1881 bis 1992.	67
Abb. 5.14: Mittlere Andauer in Tagen der Gruppen 1, 2, 7 und 8 der alpin-synoptischen Einteilung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen nach RICKLI (1995) für die Zeitperiode 1881-1992.....	69
Abb. 5.15: Absolute Häufigkeit der Tage pro Jahr die als 'unbestimmt' klassiert wurden, sowie Anzahl Tage pro Jahr mit den Sequenzlängen 1 Tag, 2 Tage und 3 Tage berechnet über alle Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY.....	71
Abb. 5.16: Absolutes Maximum der Andauer der Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY pro Jahr für den Zeitraum 1881 bis 1992.....	72
Abb. 5.17: Anzahl Tage pro Jahr mit 2 Tage dauernden Sequenzen der Gruppe 7 der alpin-synoptischen Gruppierung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen im Zeitraum 1881 bis 1992.....	74
Abb. 5.18: Maximale Andauer pro Jahr der Grosswetterlagen SWA und SWZ.....	74
Abb. 6.1: Pol-stereoskopisches 47x51 NMC-Gitternetz.....	78
Abb. 6.2: Schema zur Einteilung der 40 Wetterlagen nach SCHÜEPP in sechs Schritten (Quelle: SMA, 1985; leicht abgeändert)	80
Abb. 6.3: Bezeichnung der Variablen an und zwischen den einzelnen Gitterpunkten	81
Abb. 6.4: Schema zur Berechnung der mathematischen und der meteorologischen Windrichtung in den 4 Quadranten.....	83
Abb. 6.5: Quartile der Höhe der 500 hPa-Fläche für jeden Tag im Jahr. Die Werte basieren auf dem Mittelwert der Werte von 1951 bis 1970 über dem Punkt 45° N 10° E (Quelle: SMA, 1995).....	86
Abb. 6.6: Anteil der automatisch und manuell gleich zugeordneten Tage im Verhältnis zu den total manuell zugeordneten Tagen für die Wetterlagengruppen im Zeitraum 1946 bis 1989 für alle Jahreszeiten	88
Abb. 6.7: Jährliche absolute Häufigkeit der Hochdrucklagen für die vier Jahreszeiten im Zeitraum 1946 bis 1989	90
Abb. 6.8: Absolute Anzahl der Tage, die mit der manuellen respektive der automatischen Klassifikationsmethode im Zeitraum 1946 bis 1989 den einzelnen Wetterlagen zugeordnet wurden.....	91
Abb. 6.9: Absolute Häufigkeiten der manuell und automatisch zugeordneten Parameterwert-Kombinationen der Bodenwindrichtung im Zeitraum 1946 bis 1989.....	93
Abb. 6.10: Relativer Anteil der manuell und automatisch gleich klassierten Bodenwindrichtungen (D), dargestellt für die Wetterlagengruppen in allen Jahreszeiten im Zeitraum 1946 bis 1989	94
Abb. 6.11: Relativer Anteil der manuell und automatisch gleich klassierten Höhenwindrichtungen (d), dargestellt für die Wetterlagengruppen in allen Jahreszeiten im Zeitraum 1946 bis 1989	95
Abb. 6.12: Absolute Häufigkeit der automatisch und manuell zugewiesenen Parameterwerte dd während der Zeitperiode 1946 bis 1989.....	95
Abb. 6.13: Absolute Häufigkeit der automatisch zugeordneten Wetterlagen zu den manuell klassierten Tagen mit Wetterlage -Nx im Zeitraum 1946 bis 1989	100
Abb. 6.14: Schema zur Funktionsweise der Methode der Analogfallsuche.....	103
Abb. 6.15: Die zur Analogfallsuche verwendeten drei verschiedenen Gebietsgrössen.....	105
Abb. 6.16: Für die Analogfallsuche verwendetes Gitternetz (Gebietsgrösse A, Gitterpunktabstand ~5°) mit Angabe von geographischer Länge und Breite.....	107
Abb. 6.17: Für die Berechnung der Windrichtung verwendete Gittermittelpunkte, numeriert von Westen nach Osten und Norden nach Süden mit Angabe von Punktnummer und geographischer Breite und Länge	113

<i>Abb. 6.18: Verteilung der Windrichtungsklassen der Grosswetterlagen WZ und BM an den drei Mittelpunkten a) 52.7° N 17.5° W, b) 67.9° N 27.5° E und c) 67.9° N 37.7° W im Monat Januar für die Jahre 1946 bis 1989.....</i>	<i>114</i>
<i>Abb. 6.19: Verteilung der Windrichtungsklassen der Grosswetterlagen WZ und NEA in den Januarmonaten 1946 bis 1989 im Mittelpunkt 52.7° N 7.3° E.....</i>	<i>115</i>
<i>Abb. 6.20: Relativer Anteil der durch die einzelnen Mittelpunkte ausgeschlossenen Fälle der übrigen Grosswetterlagen für die Grosswetterlagen WZ und BM, für den Monat Januar.....</i>	<i>115</i>
<i>Abb. 6.21: Verwendete Mittelpunkte um die Grosswetterlagen WZ resp. BM im Januar von den restlichen Grosswetterlagen abzugrenzen.....</i>	<i>117</i>
<i>Abb. 6.22: Für jede Wetterlage aufgetretene Windrichtungsklassen im Monat Januar für die Mittelpunkte 58 und 80.....</i>	<i>119</i>
<i>Abb. 7.1: Differenz der jährlichen relativen Häufigkeiten der manuellen und der automatischen Klassifikation der SCHÜEPP-Wetterlagen für die acht Grundtypen im Zeitraum 1958 bis 1988.....</i>	<i>122</i>
<i>Abb. 7.2: Wendepunkttest für die Differenzen der relativen Häufigkeit der SCHÜEPP-Wetterlagen, manuell und automatisch klassiert.....</i>	<i>123</i>

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Beschreibung der 13 Haupttypen der Wetterlagenklassifikation nach DZERDZEEVSKII (Quellen: DZERDZEEVSKII, 1962; KALNICKY, 1987).....	18
Tab. 3-2: Übersicht über die Grosswettertypen und Grosswetterlagen (Quelle: GERSTENGARBE ET AL., 1993, leicht abgeändert).....	20
Tab. 3-3: Zusammenfassung der Grosswetterlagen Europas in 4 Gruppen nach BAUR, 1944 (GERSTENGARBE ET AL., 1993).....	20
Tab. 3-4: Schema der (Gross-) Wetterlagenklassifikation nach LAUSCHER (abgeändert nach: WILLFARTH, 1959; SCHÜEPP, 1968; BARRY and PERRY, 1973).....	23
Tab. 3-5: Die Hauptgruppen der Klassifikation von GRESSEL (Quellen: GRESSEL, 1954b und 1959).....	25
Tab. 3-6: Beschreibung der vereinfachten Klassifikation mit 19 Wettertypen nach GRESSEL (Quellen: GRESSEL 1954a, 1954b, 1959 und 1978).	26
Tab. 3-7: Definition der Basistypen der Wettertypisierung der Britischen Inseln (Quelle: LAMB, 1972).....	27
Tab. 3-8: Die 8 Grundtypen der Wetterlagen nach SCHÜEPP (Quelle: SCHÜEPP, 1979).....	30
Tab. 3-9: Einteilung der 40 Wetterlagen nach SCHÜEPP	31
Tab. 3-10: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften der 6 Wetterlagenklassifikationen.	33
Tab. 5-1: Durchführung des S_1 -Test am Beispiel der absoluten Häufigkeiten der Schüepp-Hochdrucklage mit westlicher Höhenströmung (+Hw)	47
Tab. 5-2: Absolute und relative Häufigkeiten der Wetterlagen nach SCHÜEPP für das ganze Jahr und die vier Jahreszeiten im Zeitraum 1945 bis 1994.	51
Tab. 5-3: Resultate des S_1 -Tests auf monotonen Trend der Häufigkeiten der Wetterlagen nach SCHÜEPP	55
Tab. 5-4: Resultate des Tests auf einen Wendepunkt in den Zeitreihen der Häufigkeiten der Wetterlagen nach SCHÜEPP.....	56
Tab. 5-5: Jahr der Wendepunkte für die absoluten Häufigkeiten der Zeitreihen der 40 Wetterlagen nach SCHÜEPP für das Jahr und alle vier Jahreszeiten im Zeitraum 1945 bis 1994.....	57
Tab. 5-6: Resultate des S_1 -Lokationstrend-Tests und des Wendepunkttests für die relativen Anteile der Tage mit verschiedenen Sequenzlängen am Total aller Tage und für die mittlere Persistenz der konvektiven und advektiven Gruppe	59
Tab. 5-7: Relative Häufigkeiten und monatliche Variationskoeffizienten der alpin-synoptischen Gruppierung der Grosswetterlagen Europas nach HESS/BREZOWSKY bezogen auf den Zeitraum 1881-1990 (Quelle: RICKLI, 1995).....	63
Tab. 5-8: Absolute Häufigkeit der Gruppe 7 (Südwestlagen) pro Dekade für alle Monate (Quelle: RICKLI, 1995).....	65
Tab. 5-9: Testresultate des S_1 - und des Wendepunkt-Tests der Zeitreihen der Häufigkeiten der alpin- synoptischen Gruppen der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen für den Zeitraum 1881 bis 1990.....	68
Tab. 5-10: Resultate des S_1 -Tests und des Tests auf einen Wendepunkt für die Sequenzlängen von 1 Tag bis 22 und mehr Tage (22^+ Tage) für die 8 Gruppen der alpin-synoptischen Gruppierung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen für den Zeitraum 1881 bis 1992.....	70
Tab. 5-11: Resultate des Wendepunkttest nach PETTITT für die unbestimmte Wetterlage und die Sequenzlängen von 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 bis 14, 15 bis 21 und mehr als 22 Tagen über alle Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY.....	72
Tab. 6-1: Verschlüsselung der Bodenwindrichtungen in [°] (DD), mit entsprechendem Code (D) (gemäss SMA, 1985).....	82
Tab. 6-2: Codierung der Windgeschwindigkeit (ff) in Knoten (gemäss SMA, 1985).	84
Tab. 6-3: Übereinstimmung der automatischen Klassifikation mit der manuellen Klassifikation der Wetterlagen nach SCHÜEPP	89

Tab. 6-4: Übereinstimmung des Parameters Bodenwindrichtungsklasse (D) der automatischen Klassifikation mit der manuellen Klassifikation der Wetterlagen nach SCHÜEPP	92
Tab. 6-5: Kreuzfeldtabelle der manuell und automatisch zugeordneten Parameterwerte der Bodenwindrichtung mit absoluter Häufigkeit im Zeitraum 1946 bis 1989.....	93
Tab. 6-6: Kreuzfeldtabelle der manuell und automatisch zugeordneten Parameterwerte der Höhenwindrichtung mit absoluter Häufigkeit im Zeitraum 1946 bis 1989	96
Tab. 6-7: Kreuzfeldtabelle der manuell und automatisch zugeordneten Parameterwerte der Höhenwindgeschwindigkeit mit absoluter Häufigkeit im Zeitraum 1946 bis 1989	97
Tab. 6-8: Beispiele für die Codierung der mittleren Höhe des 500 hPa-Niveaus.....	98
Tab. 6-9: Kreuzfeldtabelle der manuell und automatisch zugeordneten Parameterwerte der mittleren Höhe der 500 hPa-Fläche mit absoluter Häufigkeit im Zeitraum 1946 bis 1989	99
Tab. 6-10: Anzahl Gitterpunkte, die sich für jede Gebietsgrösse und jedes 'spacing' ergeben.....	106
Tab. 6-11: Zusammenfassung der Resultate der 17 Versuche der mittels Analogfall-Methode klassierten HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen.....	111
Tab. 6-12: Resultate aus den Versuchen der Abgrenzung der Grosswetterlagen mit Hilfe von Windrichtungssektoren an 10 Gitterpunkten für die beiden Grosswetterlagen WZ und BM im Monat Januar.....	118
Tab. 7-1: Wendepunkt-Jahre und Wahrscheinlichkeiten der Wendepunkte für die Differenzen der relativen Häufigkeiten der manuell und automatisch zugeordneten SCHÜEPP-Wetterlagen	123

Abkürzungsverzeichnis

abs.Hk.....	absolute Häufigkeit
ALPCLIC	Alpine Climate Change
'automatische Klassifikation'.....	die mit einem Programm durchgeführte Klassifikation
AWS	Alpenwetterstatistik (SMA, 1985)
CO ₂	Kohlendioxid
DJF	Winter (Dezember, Januar, Februar)
Downscaling.....	Herunterskalieren
DWD	Deutscher Wetterdienst , Offenbach am Main
ECHAM	gekoppeltes Atmosphären-Ozean GCM (General Circulation Model), basierend auf Modulen des ECMWF-Vorhersagemodells (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) und des MPI Hamburg (Max Plank Institut)
GCM.....	globales Zirkulationsmodell (General Circulation Model)
gpdam	geopotentielle Dekameter (1 gpdam = 10 gpm)
gpm.....	geopotentielle Meter
GWL.....	Grosswetterlage
GWT.....	Grosswettertyp
hPa.....	Hektopascal (1 hPa = 100 Pascal)
IPCC.....	I ntergovernmental P anel on Climate Change
JJA.....	Sommer (Juni, Juli, August)
kn.....	Knoten (1.852 km/h)
LAM.....	Regionalmodell (L imited A rea M odel)
'manuelle Klassifikation'	Parameter 33 der Alpenwetterstatistik bei der SCHÜEPP-Klassifikation bez. Klassifikation vom DWD bei der HESS/BREZOWSKY-Klassifikation
MAM.....	Frühjahr (März, April, Mai)
NCAR.....	N ational C enter for A tmospheric R esearch
NMC.....	N ational M eteorological C enter
rel. Hk.....	relative Häufigkeit
S ₁ -Test.....	Trendtest nach COX und STUART (LIENERT, 1978)
SMA	Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich
SON.....	Herbst (September, Oktober, November)
UTC.....	Weltzeit (U niversal T ime C oordinated)
Wendepunkt-Test.....	sequentieller Homogenitätstest von PETTITT (1979)
Wl.....	Wetterlage
ZF	Zirkulationsform
12z.....	(=12UTC) z entspricht der Weltzeit
3 ⁺ -täglich	drei- und mehrtäglich

Europäische Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY

Zirkulationsform	Grosswettertyp	Nr.	Grosswetterlage	Beschreibung
zonal	Westlagen	1	WA	Westlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>antizyklonal</i>
		2	WZ	Westlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>zyklonal</i>
		3	WS	Südliche Westlage
		4	WW	Winkelförmige Westlage
gemischt	Südwestlagen	5	SWA	Südwestlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>antizyklonal</i>
		6	SWZ	Südwestlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>zyklonal</i>
	Nordwestlagen	7	NWA	Nordwestlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>antizyklonal</i>
		8	NWZ	Nordwestlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>zyklonal</i>
	Hochdruck über Mitteleuropa	9	HM	Hoch Mitteleuropa
		10	BM	Hochdruckbrücke Mitteleuropa
Tief über Mitteleuropa	11	TM	Tief Mitteleuropa	
meridional	Nordlagen	12	NA	Nordlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>antizyklonal</i>
		13	NZ	Nordlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>zyklonal</i>
		14	HNA	Hoch Nordmeer-Island, über Mitteleuropa überwiegend <i>antizyklonal</i>
		15	HNZ	Hoch Nordmeer-Island, über Mitteleuropa überwiegend <i>zyklonal</i>
		16	HB	Hoch Britische Inseln
		17	TRM	Trog Mitteleuropa
		18	NEA	Nordostlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>antizyklonal</i>
	Nordostlagen	19	NEZ	Nordostlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>zyklonal</i>
		Ostlagen	20	HFA
	21		HFZ	Hoch Fennoskandien, über Mitteleuropa überwiegend <i>zyklonal</i>
	22		HNFA	Hoch Nordmeer-Fennoskandien, über Mitteleuropa überwiegend <i>antizyklonal</i>
	23		HNfZ	Hoch Nordmeer-Fennoskandien, über Mitteleuropa überwiegend <i>zyklonal</i>
	Südostlagen	24	SEA	Südostlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>antizyklonal</i>
		25	SEZ	Südostlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>zyklonal</i>
	Südlagen	26	SA	Südlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>antizyklonal</i>
		27	SZ	Südlage, über Mitteleuropa überwiegend <i>zyklonal</i>
		28	TB	Tief Britische Inseln
29		TRW	Trog Westeuropa	
		30	U	'unbestimmt'

alpin-synoptische Gruppierung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen nach RICKLI

Gruppe 1	NWA, BM, NA, HNA, HB, NEA, HFA
Gruppe 2	WA, WZ, WS
Gruppe 3	WW, NWZ, NZ, TRM
Gruppe 4	HM, HNFA, SEA
Gruppe 5	SA, SZ, TB, TRW
Gruppe 6	NEZ, HFZ, HNFZ, SEZ
Gruppe 7	SWA, SWZ
Gruppe 8	TM, HNz

Synoptische Wetterlagen nach SCHÜEPP

Hauptgruppe	Grundtyp	Nr.	Wetterlage	genaue Bezeichnung
Konvektive Lagen	Hochdrucklagen Höhenluftdruck übernormal für die Jahreszeit	1	+Ho	Hochdrucklage mit schwacher Höhenströmung
		2	+Hw	Hochdrucklage mit westlicher Höhenströmung
		3	+Hn	Hochdrucklage mit nördlicher Höhenströmung
		4	+He	Hochdrucklage mit östlicher Höhenströmung
		5	+Hs	Hochdrucklage mit südlicher Höhenströmung
	Flachdrucklagen Höhenluftdruck ungefähr normal für die Jahreszeit	6	Fo	Flachdrucklage mit schwacher Höhenströmung
		7	Fw	Flachdrucklage mit westlicher Höhenströmung
		8	Fn	Flachdrucklage mit nördlicher Höhenströmung
		9	Fe	Flachdrucklage mit östlicher Höhenströmung
	Tiefdrucklagen Höhenluftdruck unternormal für die Jahreszeit	10	Fs	Flachdrucklage mit südlicher Höhenströmung
		11	-Lo	Tiefdrucklage mit schwacher Höhenströmung
		12	-Lw	Tiefdrucklage mit westlicher Höhenströmung
		13	-Ln	Tiefdrucklage mit nördlicher Höhenströmung
		14	-Le	Tiefdrucklage mit östlicher Höhenströmung
	Advective Lagen	Westlagen	15	-Ls
16			Wj	Westlage mit jetartiger Strömung in der Höhe
17			+Wp	West-Gleichstromlage, Höhenluftdruck übernormal
18			-Wp	West-Gleichstromlage, Höhenluftdruck unternormal
19			+Wx	Westlage mit Winddrehung mit der Höhe, Höhenluftdruck übernormal
Nordlagen		20	-Wx	Westlage mit Winddrehung mit der Höhe, Höhenluftdruck unternormal
		21	Nj	Nordlage mit jetartiger Strömung in der Höhe
		22	+Np	Nord-Gleichstromlage, Höhenluftdruck übernormal
		23	-Np	Nord-Gleichstromlage, Höhenluftdruck unternormal
		24	+Nx	Nordlage mit Winddrehung mit der Höhe, Höhenluftdruck übernormal
Ostlagen		25	-Nx	Nordlage mit Winddrehung mit der Höhe, Höhenluftdruck unternormal
		26	Ej	Ostlage mit jetartiger Strömung in der Höhe
		27	+Ep	Ost-Gleichstromlage, Höhenluftdruck übernormal
		28	-Ep	Ost-Gleichstromlage, Höhenluftdruck unternormal
		29	+Ex	Ostlage mit Winddrehung mit der Höhe, Höhenluftdruck übernormal
Südlagen	30	-Ex	Ostlage mit Winddrehung mit der Höhe, Höhenluftdruck unternormal	
	31	Sj	Südlage mit jetartiger Strömung in der Höhe	
	32	+Sp	Süd-Gleichstromlage, Höhenluftdruck übernormal	
	33	-Sp	Süd-Gleichstromlage, Höhenluftdruck unternormal	
	34	+Sx	Südlage mit Winddrehung mit der Höhe, Höhenluftdruck übernormal	
Mischlagen	Wirbellage	35	-Sx	Südlage mit Winddrehung mit der Höhe, Höhenluftdruck unternormal
		36	Xx	aktiver Tiefdruckwirbel mit Zentrum über dem Gebiet
	Höhenstrom-Jetlagen	37	+Xj	schwache Bodenströmung mit jetartiger Strömung in der Höhe, Höhenluftdruck übernormal
		38	-Xj	schwache Bodenströmung mit jetartiger Strömung in der Höhe, Höhenluftdruck unternormal
	Bodenstromlagen	39	+Xo	wesentliche Bodenströmung mit schwacher Höhenströmung, Höhenluftdruck übernormal
		40	+Xo	wesentliche Bodenströmung mit schwacher Höhenströmung, Höhenluftdruck unternormal

Parameter der SCHÜEPP-Klassifikation

DD	gestrophischer Wind in der Bodenwetterkarte über den Alpen
D	Codierte Werte der Bodenströmung (AWS-Parameter 9)
dd	Höhenwindrichtung in der 500 hPa-Fläche
d	Codierte Werte der Höhenwindrichtung (AWS-Parameter 10)
ff	Höhenwindstärke
f	Codierte Werte der Höhenwindstärke (AWS-Parameter 11)
b	Codierte Werte der Winddrehung mit der Höhe (AWS-Parameter 14)
hh	mittleren Höhe der 500 hPa-Fläche (AWS-Parameter 17)
übernormal	Der Durchschnittswert des 500 hPa-Niveaus liegt im oberen Quartil bei den konvektiven Lagen (Hochdrucklagen) bez. über dem Zentralwert bei den advektiven oder den Mischlagen, bezogen auf die Werte des Punkte 45° N 10° E im Zeitraum 1951 bis 1970.
normal	Der Durchschnittswert des 500 hPa-Niveaus liegt zwischen oberem und unterem Quartil bei den konvektiven Lagen (Flachdrucklagen), bezogen auf die Werte des Punkte 45° N 10° E im Zeitraum 1951 bis 1970.
unternormal	Der Durchschnittswert des 500 hPa-Niveaus liegt im unteren Quartil bei den konvektiven Lagen (Tiefdrucklagen) bez. unter dem Zentralwert bei den advektiven und den Mischlagen, bezogen auf die Werte des Punkte 45° N 10° E im Zeitraum 1951 bis 1970.

Zusammenfassung

Stellte man sich vor wenigen Jahren die Frage, wie weit die Menschheit durch steigende Produktion von Treibhausgasen im Stande ist, in globale atmosphärische Prozesse einzugreifen und damit das Globalklima nachhaltig zu beeinflussen, so ist heute die Frage nach den regionalen und lokalen Auswirkungen globaler Klimaänderungen für Natur, Mensch und Wirtschaft ins Zentrum gerückt. Gebirgsräume stellen auf Grund ihrer reichen Gliederung, ihrer Höhenstufung und ihrer dynamischen Wirkung auf die Atmosphäre besonders sensible Anzeiger von Klimaveränderungen dar.

Die Alpen, welche einen bedeutenden Gebirgsraum in Europa darstellen, erscheinen bei globaler Betrachtung nur als kleiner Punkt, der die allgemeine Zirkulation und die damit verbundenen grossräumigen Wetterverhältnisse nur in geringem Masse beeinflussen kann. Im regionalen Massstab dagegen sind sie von zentraler Bedeutung. Durch ihre thermische und mechanische Wirkung auf atmosphärische Prozesse prägen sie das Wettergeschehen lokal, regional und stromabwärts (Leezyklonen).

Globale Zirkulationsmodelle (GCM) sind heute das geeignetste Instrumentarium, um Trendentwicklungen des globalen Klimas für die nächsten 50 bis 100 Jahre abzuschätzen. Moderne GCMs weisen eine räumliche Auflösung von weniger als 100 Kilometer und eine zeitliche Auflösung von weniger als einer Stunde auf. Einzelne GCMs beziehen neben der Atmosphäre auch die Ozeane in die Berechnungen mit ein. Trotz erstaunlicher Leistungen moderner GCMs und akzeptabler Übereinstimmung verschiedener Modelle in der Verteilung der globalen Temperatur- und Bodendruckverhältnisse, überzeugen regionale Trendentwicklungen noch nicht. Globale Resultate lassen sich nicht ohne weiteres auf den schweizerischen Alpenraum übertragen. Hochoaufgelöste globale Modelle geben den Alpenraum höchstens mit 10 Gitterpunkten und einer maximalen Gipfelhöhe von rund 1500 Metern wieder. Es ist offensichtlich, dass damit regionale Eigenheiten des alpinen Klimas verdeckt bleiben. Die Nachbearbeitung von GCM-Daten ist daher für regionale Aussagen unumgänglich.

Ein zentraler Punkt bildet dabei das sinnvolle Transferieren globaler Daten auf den regionalen bis lokalen Massstab. In der vorliegenden Arbeit wurde dafür das witterungsklimatologische Downscaling angewendet.

Grundlage für das witterungsklimatologische oder synoptische Downscaling bilden Gitternetzdaten eines GCMs, aus welchen Wetterlagen abgeleitet werden. Die entstehenden Zeitreihen von Wetterlagen können über die Häufigkeitsverteilung auf mögliche Änderungen im Klimageschehen untersucht werden.

Für die sinnvolle und effiziente Anwendung des synoptischen Downscalings muss jedoch eine geeignete Methode gefunden werden, die eine möglichst einfache und direkte Zuordnung von Wetterlagen im Alpenraum aus Gitternetzdaten gestattet. Dies erfordert vorgängig die Auswahl einer Wetterlagenklassifikation, die zur Anwendung kommen soll. In der vorliegenden Arbeit wurden als Kriterien für die Eignung einer Klassifikation für ein witterungsklimatologisches Downscaling im Alpenraum ihr Bezug zum schweizerischen Alpenraum, das Zurückreichen der Zeitreihe in die Vergangenheit und ihre Eignung zur automatischen Klassierung herangezogen.

Von 6 betrachteten Klassifikationen erfüllte keine die drei Kriterien vollumfänglich. Ausgewählt wurden daher jene von SCHÜEPP (1968 und 1979) und HESS/BREZOWSKY (1952 und 1969), welche zumindest einen Teil der geforderten Kriterien erfüllen. Beide Klassifikationen wurden in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt. Die Zeitreihen werden heute manuell aufgrund von Wetterkarten aufdatiert.

Die manuelle Zuordnung von Wetterlagen erfordert viel Zeit und Erfahrung. Sollen die manuellen Klassifikationen durch das synoptische Downscaling auf Gitternetzdaten eines GCMs angewendet werden, erhöht sich der Bearbeitungsaufwand erheblich, da beim Vorliegen neuer Modellresultate

jedesmal zuerst Karten erstellt werden müssen. Effizienter ist deshalb eine automatische Klassierung, die direkt auf Gitternetzdaten angewendet werden kann. Eine automatische Zuordnung hat zudem den Vorteil, dass die Resultate kaum durch den Bearbeiter beeinflusst werden. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit stellt daher die Automatisierung der beiden manuellen Klassifikationen von SCHÜEPP und HESS/BREZOWSKY dar.

Die Wetterlagenklassifikation von SCHÜEPP ist aufgrund des strukturierten Entscheidungsbaums gut geeignet für die Automatisierung. Trotzdem gelang nur in 47% aller Fälle eine Übereinstimmung der automatischen mit der manuellen Klassifikation. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einigen Parametern trotz Entscheidungsbaum die Zuordnung sehr subjektiv erfolgen kann. Der Parameter 'Bodenwindrichtung' lässt sich automatisch nicht entsprechend der manuellen Vorgabe implementieren. Ein weiteres Problem stellte die Trennung von Schwachwind- (konvektiven Lagen) und Strömungslagen (advektiven Lagen) dar.

Bei der Grosswetterlagenklassifikation von HESS/BREZOWSKY, die bis 1881 zurück reicht, mussten andere Automatisierungsverfahren angewendet werden, da diese nicht auf einem Entscheidungsbaum beruht. Bei den Grosswetterlagen ist die Mustererkennung von zentraler Bedeutung, wobei vorausgesetzt wird, dass ähnliche Muster zu gleichen Klassierungen führen. Für die Automatisierung wurden daher verschiedene Verfahren der Analogfallsuche sowie ein Verfahren basierend auf der Definition von Windrichtungssektoren in bestimmten Gittermittelpunkten angewendet. Es zeigte sich, dass der grosse geographische Ausschnitt sowie die Forderung der Mindestdauer einer Grosswetterlage von 3 Tagen zu grossen saisonalen und gruppeninternen Variabilitäten führen. Mit den angewendeten Methoden konnte daher in höchstens 40% der Fälle eine Übereinstimmung der manuellen und der automatischen Klassifikation erreicht werden.

Der erreichte Prozentsatz der Übereinstimmung der manuellen mit der automatischen Klassifikation erwies sich bei beiden Klassifikationen als ungenügend. Trotzdem scheint die bei den SCHÜEPP-Wetterlagen angewendete Methode erfolgversprechend, da sie durch Änderungen in einigen Parametern noch verbessert werden könnte. Ein Problem bleibt jedoch der Vergleich der automatischen mit der manuellen Klassifikation, welcher stark von der Homogenität der manuellen Zeitreihe abhängig ist. Eine optimale Anpassung der automatischen Klassifikation auf die manuelle kann nur erfolgen, wenn die Zeitreihe der manuellen Klassifikation homogen ist. Wie sich zeigen liess, liegt bei der manuellen SCHÜEPP-Klassifikation zumindest Mitte der 70^{er} Jahre eine Inhomogenität, vermutlich verursacht durch einen Bearbeiterwechsel, vor. Angesichts der Anfälligkeit manueller Klassifikationen auf Inhomogenitäten durch subjektive Interpretationen der Bearbeiter sind automatische Klassierungen manuellen vorzuziehen.

Nicht nur die Güte der Übereinstimmung der beiden Klassifikationsmethoden ist von der Homogenität der manuellen Zeitreihe abhängig, sondern auch die Qualität der Aussage über die Entwicklung des regionalen Klimas. Regionalklimatische Aussagen sind deshalb nicht zuletzt auch davon abhängig, wie gut die vergangene Zeitreihe der Wetterlagen aufgearbeitet werden kann. Je besser dies gelingt, desto besser wird auch die Aussage über die zukünftige regionale Klimaentwicklung ausfallen.

1 Theoretische Betrachtungen zur atmosphärischen Zirkulation und zum Klimasystem

Unter dem Begriff der allgemeinen Zirkulation sind alle Transportprozesse zusammengefasst, die einen grossräumigen Ausgleich von Masse, Wärme und Bewegungsenergie auf der Erde ermöglichen. Der Ausgleich ist nötig, zumal die kurzweilige solare Einstrahlung auf die Erdoberfläche aufgrund der Neigung der Erdachse und der Form der Erde zu einem starken Temperaturgefälle zwischen Äquator und Pol führt. Da der Druck in einer kalten Luftmasse mit zunehmender Höhe schneller abnimmt als in einer warmen, verschärft sich das Druckgefälle zwischen den Subtropen und den subpolaren Regionen. Die Folge ist eine im klimatologischen Mittel dominierende westliche Höhenströmung. Während eines Grossteils des Jahres liegt der Alpenraum im Einflussbereich dieser Zonalzirkulation.

1.1 Die Zirkulation der Mittelbreiten

1.1.1 Strömungsverhältnisse und Witterung der Mittelbreiten

Bei reiner Zonalzirkulation würde das Temperatur- und Druckgefälle zwischen Äquator und Pol immer grösser. In der Natur ist ein konzentrisches Westwindband nur kurze Zeit stabil. Sobald der meridionale Temperaturgradient 6° pro 1000 km überschreitet (WEISCHET, 1983), wird die barokline breitenkreisparallele Zonalströmung instabil. Es bilden sich meridionale Wellen, meist 3 bis 6 pro Erdumkreisung, die sich mit einer Geschwindigkeit von einigen hundert Kilometern pro Tag langsam von Westen nach Osten bewegen.

Eine zentrale Folge dieser mäandrierenden Höhenströmung sind wechselnde Strömungsverhältnisse und die damit verbundenen Witterungswechsel. Je nach Anströmung der Breitenkreise werden drei Grundformen der Strömung ausgeschieden: zonal, meridional und Blockierung.

Das weitaus häufigste Strömungsbild über dem zentralen und nördlichen Europa ist die *zonale Zirkulation* (vgl. Abb. 1.1, links). Darin eingelagerte mobile Tiefdruckgebiete prägen die regionale Wetterentwicklung.

Je nach Wellenamplitude entwickeln sich ausgeprägte Tröge und Rücken, die im Alpenraum aus der ursprünglich zonalen Anströmung zu Nord- oder Südwinden führen (Abb. 1.1, Mitte).

Regelmässig enden Troglagen mit der Abschnürung von Höhenkaltluft (cut off), die oft über dem Mittelmeer oder Südeuropa wetterwirksam wird (Abb. 1.1, rechts).

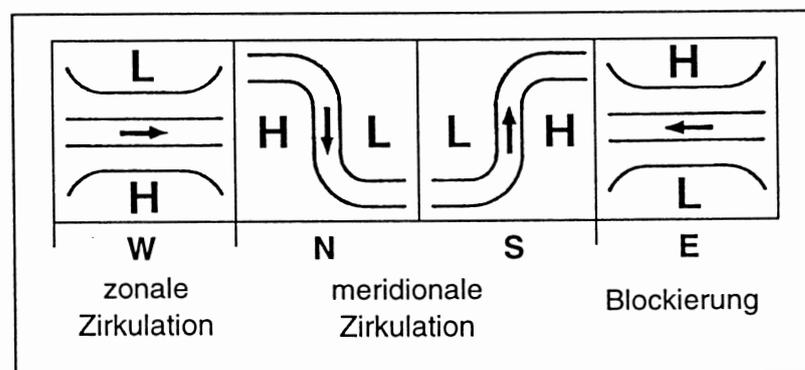


Abb. 1.1: Grundriss der drei Grundformen der Strömung (Quelle: SCHÜEPP, 1979).

Nebst den drei Grundtypen treten auch zahlreiche Zwischenformen auf.

Der Wechsel zwischen Zonal- und Wellenzirkulation bedingt in den verschiedenen Regionen der betroffenen Mittelbreiten in der Regel einen Wechsel der Strömungsrichtung. Mit ihr ändert auch der Einfluss von Luftmassen unterschiedlicher Herkunft und Eigenschaften.

1.2 Die Alpen und ihr Einfluss auf das Wettergeschehen

Die Alpen stellen ein mittleres bis kleines Gebirge der eurasischen Kontinentalmasse dar. Sie befinden sich im Übergangsbereich ozeanischer und kontinentaler Einflüsse und bilden aufgrund ihrer Breitenlage zwischen 44° N und 48° N eine Übergangszone zwischen dem Klima der Mittelbreiten und dem Mittelmeerklima. Amplitude und Wellenlänge der Westwinddrift bestimmen die Wetterentwicklung über dem europäischen Festland und damit auch im Alpenraum (vgl. Kap.1.1).

Der Alpenraum modifiziert das grossräumige Wettergeschehen in zweierlei Hinsicht.

- Bei schwacher synoptischer Strömung und starker Sonneneinstrahlung wird die bodennahe Atmosphäre vor allem *thermisch* beeinflusst.
- Im Falle von starken Winden, welche oft mit Frontdurchgängen verbunden sind, dominieren *mechanische* Effekte.

Abbildung 1.2 zeigt die wichtigsten gebirgsmeteorologischen Phänomene nach Skalenniveau und Einfluss (mechanisch oder thermisch) im Überblick.

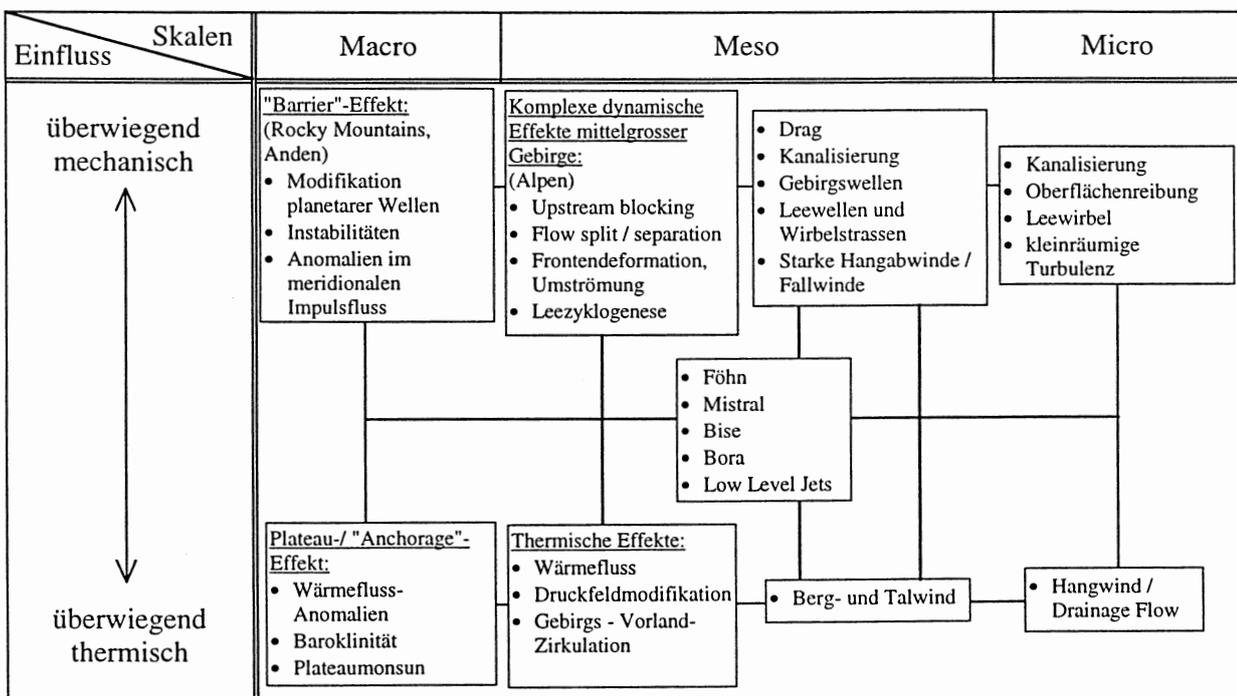


Abb. 1.2: Die wichtigsten gebirgsmeteorologischen Phänomene unter besonderer Berücksichtigung der Alpen (abgeändert nach WANNER, 1988).

Nachfolgend sind nur die für die Alpen relevanten Phänomene beschrieben (Micro- bis Meso-Skala).

Thermische Effekte

Durch die Alpen induzierte, thermotopographische Druckausgleichsströmungen werden auf drei verschiedenen Skalenbereichen beobachtet.

Das kleinräumigste System bilden die Hangwinde. Sie werden durch den Wärmeumsatz an Abhängen begründet und durch die Temperaturgegensätze zwischen der hangnahen und der freien Atmosphäre über einem Tal angetrieben.

Mit den Hangwinden gekoppelt finden wir auf der nächst höheren Ebene das Berg- und Talwindssystem. Dieses System wird durch die Temperaturunterschiede zwischen der Tal- und der Vorlandatmosphäre angetrieben.

Dem grössten Skalenbereich zugeordnet wird das Gebirgs-Vorland-Zirkulationssystem. Oft ist es jedoch als Ganzes nur schwer nachweisbar. Durch die nächtliche Auskühlung entsteht über dem Alpenraum ein Gebiet mit hohen Druckwerten, welches in den unteren Luftschichten einen Massentransport in Richtung der Vorlandsenken bewirkt. Tagsüber erfolgt, unter dem Antrieb des Wärmetiefs über dem Gebirge, der umgekehrte Zustrom von Vorlandluft in Richtung des Gebietes mit maximaler Massenerhebung.

Mechanische Effekte

Je nach Stärke und Form der Anströmung (vertikales Windprofil) und den thermodynamischen Eigenschaften (thermische Schichtung) der anströmenden Luft, ergeben sich unterschiedliche Auswirkungen durch das Gebirge auf die Luftmasse. Prinzipiell kann ein Gebirgszug über- oder umströmt werden. Es können auch beide Effekte gemeinsam auftreten. Ist die Schichtung stabil, so bilden sich bei einer Überströmung im Lee des Gebirges Wellen und Wirbel mit horizontaler Achse; im Luv ist meistens Staubbewölkung vorhanden. Damit verbunden sind Phänomene wie Leewellen, Rotor-Wolken und Föhn effekte.

Ist die Anströmgeschwindigkeit genügend gross ($\geq 0.1 \text{ ms}^{-1}$), bei gleichzeitigem Vorhandensein einer Temperaturinversion unterhalb des Gipfelniveaus (ca. 1-2 km Höhe), wird das Gebirge mehrheitlich umströmt. Dabei können sich im Lee des Gebirges zyklonal drehende Wirbel mit vertikaler Achse ausbilden. Ein Beispiel für eine solche Lee-Wirbelbildung bei den Alpen ist die Genuazyklone (vgl. PICHLER and STEINACKER, 1987).

1.3 Das Klimasystem

Wie aus Abbildung 1.3 ersichtlich ist, bildet die Atmosphäre die zentrale Komponente des Klimasystems. Durch ihre Reaktionszeit auf Veränderungen im Bereich von Tagen hebt sie sich deutlich von den anderen Komponenten (Ozean, Biosphäre, Kryosphäre und Lithosphäre: Reaktionszeiten im Bereich von Jahren bis Jahrtausenden) ab.

Diese Tatsache erleichtert Untersuchungen im Atmosphärensystem, die nur eine kurze Zeitspanne umfassen, wie etwa die Wettervorhersage. Bei dieser genügt es, Informationen aus der Atmosphäre zu verwenden, während die Zustände der anderen Teilsysteme als konstante Randbedingungen zu berücksichtigen sind. Es muss also nur das Subsystem Atmosphäre mit seinen Randbedingungen berücksichtigt werden. In klimatologischen Studien, wie der vorliegenden Arbeit, die einen längeren Zeitraum abdecken, ist es hingegen unerlässlich, alle Subsysteme sowie deren komplexe Wechselwirkungen untereinander zu berücksichtigen.

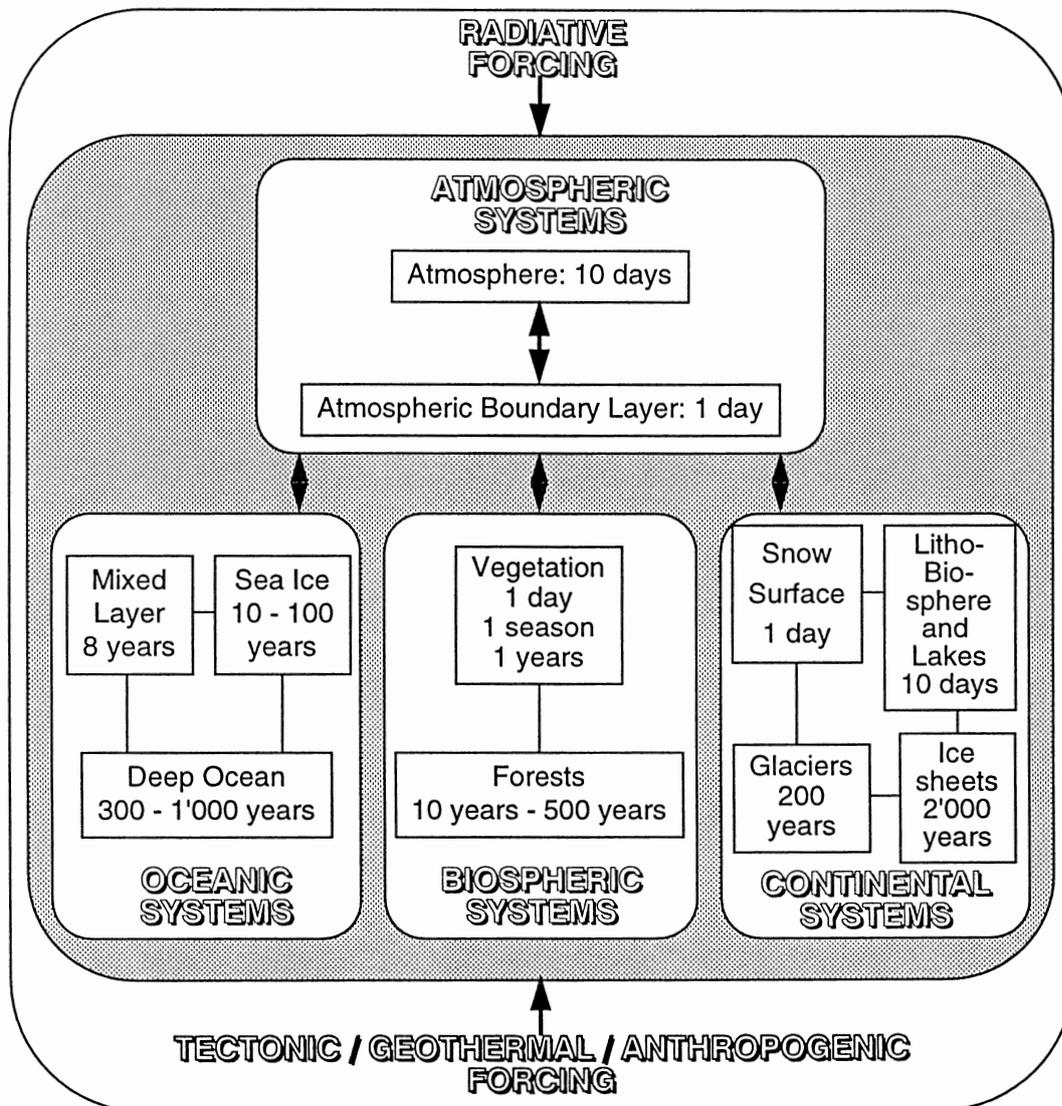


Abb. 1.3: Das Klimasystem mit Angabe von Reaktionszeiten auf bestimmte Störungen (Quelle: BENISTON, 1994).

Das Klimasystem wird sowohl durch systeminterne wie durch verschiedene externe Faktoren beeinflusst. Der wichtigste Antriebsfaktor ist die kurzweilige solare Einstrahlung. Im System stellt sich dadurch ein Gleichgewicht zwischen Solareinstrahlungsenergie und emittierter langwelliger Energie (von der Erdoberfläche, den Ozeanen, den Wolken) ein.

Die im Folgenden aufgeführten systeminternen und externen Faktoren (IPCC, 1990; WARNECKE, 1991; PEIXOTO & OORT, 1992; BARRY & CHORLEY, 1992) können durch ihre Wirkungsweise auf das Strahlungsgleichgewicht das Klimasystem beeinflussen:

- Schwankungen der Sonnenaktivität (z.B. Sonnenfleckenzyklus von 10,7 Jahren)
- Schwankungen der Erdbahnelemente (Präzession, Schiefe und Exzentrizität)
- Schwankungen im Aerosolgehalt der Atmosphäre (in der unteren Atmosphäre aus anthropogenen und natürlichen Quellen, in der oberen Atmosphäre durch Vulkaneruptionen)
- Treibhauseffekt (Änderung des CO₂- und Spurengasgehaltes in der Atmosphäre)
- Treibgase (z. B. FCKW)
- Albedoänderungen durch variable Ausdehnung des Meereises und Oberflächenveränderungen (Abholzung, Desertifikation)

Da die einzelnen Komponenten des Klimasystems durch nichtlineare Wechselwirkungen miteinander verknüpft sind, kann bereits eine geringe Änderung der Einflussfaktoren zu grossen Auswirkungen führen. Die Auswirkungen können entweder die ursprüngliche Änderung verstärken oder aber abschwächen, beziehungsweise dämpfen. Man spricht dabei von positiver respektive negativer Rückkopplung (siehe Beispiele unten). Dabei kann die erfolgte Änderung bei einer negativen Rückkopplung wohl gedämpft, nicht aber rückgängig gemacht werden.

Beispiel: Positive Rückkopplung

Eine globaler Anstieg der Temperatur kann zur Erwärmung der Ozeane führen. Dadurch wird mehr Wasser verdunstet, wodurch der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre ansteigt. Weil der Wasserdampf als Treibhausgas wirkt, erhöht sich wiederum die Temperatur, was zu einer weiteren Erwärmung der Ozeane führen kann.

Beispiel: Negative Rückkopplung

Wie gerade gezeigt wurde, kann eine zunehmende Erwärmung zu einer erhöhten Verdunstung von Wasser führen. Dadurch bilden sich vermehrt hohe Wolken, welche die einfallende Strahlung reflektieren und somit den globalen Temperaturanstieg verlangsamen.

Die beiden Beispiele der positiven und der negativen Rückkopplung zeigen die Komplexität des Klimasystems, indem der gleiche Prozessauslöser (Temperaturzunahme) sowohl zu positiven wie auch zu negativen Rückkopplungen führen kann.

Betrachtet man das Klima an einem bestimmten Ort so spielen nebst den globalen Faktoren auch regionale und lokale Faktoren wie die Topographie, die Distanz zum Meer oder zu einem See, die Art des Untergrundes (Beton, Erde, Vegetation) und die Art der Vegetationsbedeckung (niedrige oder hohe Vegetation) eine bedeutende Rolle.

Unterschiedliche Konstellationen der regionalen und lokalen Klimafaktoren werden daher zu unterschiedlichen Klimaausprägungen führen, dem sogenannten Regional- oder Lokalklima.

Um die Entstehung eines Regionalklimas zu verstehen, müssen sowohl die grossräumigen globalen Prozesse als auch die regionalen und lokalen Einflüsse berücksichtigt werden.

Insbesondere bedeutet dies für das Klima des Alpenraums, dass sowohl die allgemeine Zirkulation, daraus speziell die Zirkulation der Mittelbreiten als auch die regionalen und lokalen Effekte im Alpenraum selbst berücksichtigt werden müssen.

2 Skalenkopplung und Downscaling

2.1 Das Skalenproblem

In Kapitel 1.3 wurden die global, regional und lokal beeinflussenden Klimafaktoren skizziert. Dies mit dem Hintergrund, dass der Alpenraum, als Untersuchungsgebiet dieser Arbeit, einen bestimmten Ausschnitt im ganzen Klimasystem darstellt.

Der Alpenraum stellt bei globaler Betrachtung nur einen sehr kleinen Ausschnitt dar und beeinflusst somit die allgemeine Zirkulation und die damit verbundenen grossräumigen Wetterverhältnisse nur in geringem Masse. Im regionalen Betrachtungsmaßstab sind die Alpen hingegen von zentraler Bedeutung. Aufgrund ihrer thermischen und mechanischen Wirkung (vgl. Kap. 1.2) sind sie in der Lage, die atmosphärischen Prozesse stark zu beeinflussen, die für das Wettergeschehen verantwortlich sind.

Die Wahl der zu untersuchenden Prozesse ist demnach in erster Linie vom betrachteten Raum (räumliche Ausdehnung) und der Beobachtungsdauer (zeitliche 'Ausdehnung') abhängig. Abbildung 2.1 zeigt eine mögliche Einteilung von atmosphärischen Prozessen in der Längen-Zeit- Dimension.

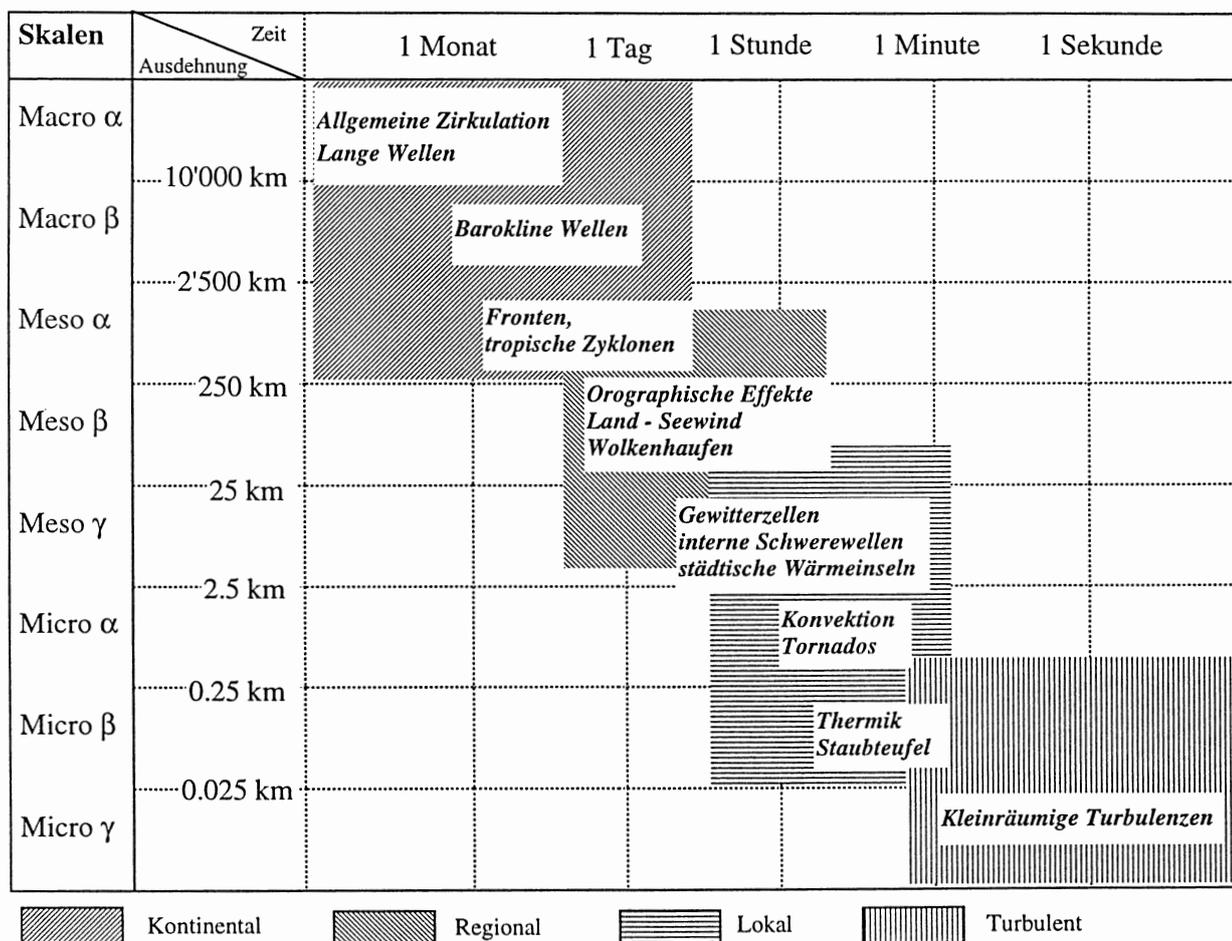


Abb. 2.1: Einteilung der atmosphärischen Phänomene nach charakteristischer Horizontalausdehnung und Zeitdauer (abgeändert nach ORLANSKI, 1975 und BENISTON, 1994).

Für eine Untersuchung der klimatischen Verhältnisse im Alpenraum (räumliche Ausdehnung von ca. 100-1000 km, zeitliche Dimension von Tagen bis Jahrzehnten) sind sowohl macro- wie mesoskalige Prozesse von Bedeutung. Dabei beschreiben die macroskaligen Prozesse die Ausgangsbedingungen oder allgemeiner das globale Klima. Darauf aufbauend wirken im mesoskaligen Bereich Prozesse, die das Regionalklima prägen. Untersuchungen zur Auswirkung einer globalen Klimaänderung auf das Klima einer bestimmten Region (z.B. Alpenraum) erfordern somit eine Methode, die diese beiden Skalenniveaus zu verknüpfen vermag.

2.2 'Downscaling': Vom globalen zum regionalen Massstab

Unter Downscaling versteht man eine 'Verknüpfung' oder 'Verbindung' von höheren (grossräumigen) mit tieferen (kleinräumigen) Skalen. Das Beispiel der Temperaturzunahme verdeutlicht die Skalenproblematik und das Downscaling.

In den letzten rund 100 Jahren wurde global eine Temperaturzunahme von 0.3 bis 0.6 °C (IPCC, 1992) festgestellt. Regional und lokal dürfte die Temperaturzunahme teilweise noch grösser sein. Auf dem Grossen St. Bernhard beispielsweise konnte eine Zunahme um 1.5 °C gemessen werden.

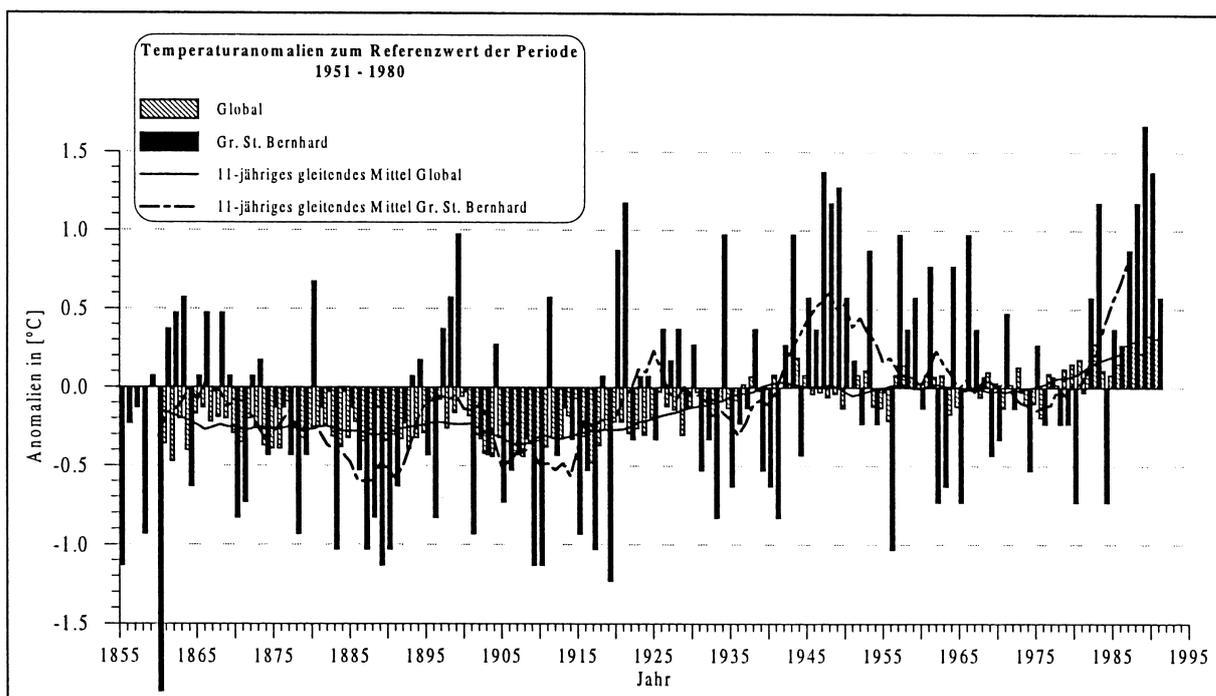


Abb. 2.2: Abweichungen der Jahresmitteltemperatur vom Referenzwert der Periode 1951 - 1980. Dargestellt sind die globale Mitteltemperatur für das Bodenniveau, die Mitteltemperatur der Station Grosser St. Bernhard, sowie je die 11-jährigen gleitenden Mittel (Datenquelle: IPCC, 1992 und SCHÜEPP, 1994).

Abbildung 2.2 mit den Temperaturzeitreihen für den Grossen St. Bernhard und die gesamte Erde dargestellt als Abweichungen zur Mitteltemperatur der drei Dekaden von 1951 bis 1980 (Referenzwert), zeigt anschaulich den allgemeinen Trend. Obwohl der Trend bei beiden Reihen in die gleiche Richtung (Temperaturzunahme) weist, fallen einzelne Jahre oder kürzere Perioden sehr

verschieden aus. Je nach Wahl des betrachteten Ausschnitts ergeben sich unterschiedliche Aussagen. Wird zum Beispiel nur der Ausschnitt 1945 bis 1950 betrachtet, so sind global fast ausschliesslich negative Abweichungen von der Referenzperiode zu verzeichnen. Auf dem Grossen St. Bernhard dagegen traten während dieser Jahre deutliche positive Anomalien (Abweichungen) auf.

Viel markanter noch ist der Unterschied zwischen globalen und regionalen Zeitreihen bei anderen Klimaelementen, wie etwa dem Niederschlag. Selbst der allgemeine Trend der beiden Reihen, der im Falle der Temperatur noch in die gleiche Richtung ging, kann gegenläufig ausfallen. Meistens ist kein Zusammenhang zwischen dem Verlauf der globalen Niederschläge und den Niederschlägen einer bestimmten Region feststellbar. Bei den Niederschlägen kann nicht von einer globalen Zu- oder Abnahme ausgegangen werden. Untersuchungen in den letzten Jahrzehnten haben in den Mittelbreiten eine Zunahme des Niederschlags ergeben, während in den Polargebieten und den Subtropen eine Abnahme festgestellt wurde (IPCC, 1992).

Diese Beispiele zeigen, dass die zeitliche Entwicklung regionaler und lokaler Wetter- und Klimaelemente nicht einfach aus globalen Werten hergeleitet werden können und dürfen. Vielmehr müssen diejenigen Prozesse miteinbezogen werden, die auf den verschiedenen Ebenen für die Ausprägung eines Klimaelements von Bedeutung sind. Sollen die Auswirkungen einer allfälligen globalen Klimaänderung auf den regionalen Massstab untersucht werden, so muss eine Methode bereitgestellt werden, welche die beiden Skalenniveaus auf sinnvolle Weise miteinander verknüpft. Diese 'Verknüpfung' oder 'Verbindung' von höheren (grossräumigen) mit tieferen (kleinräumigen) Skalen wird im englischen Sprachgebrauch 'Downscaling' genannt, was soviel wie 'Herunterskalieren' oder 'Regionalisieren' bedeutet (vgl. Abb. 2.3).

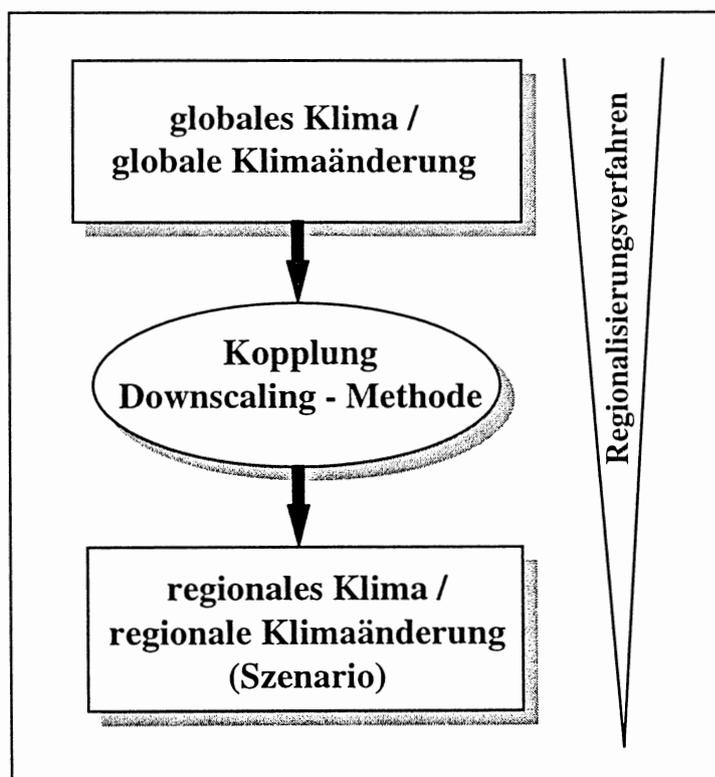


Abb. 2.3: Zur Erläuterung des Begriffs 'Downscaling'.

Grundsätzlich werden drei Downscaling-Methoden unterschieden (GIORGI & MEARNNS, 1991; ROBINSON & FINKELSTEIN, 1991; JAKOB & SCHUBERT, 1992; WANNER & BENISTON, 1995):

- 1) theoretische, dynamische oder prozessbasierte Methoden (reine Modellansätze)
- 2) halb-empirische oder kombinierte Methoden
- 3) empirische Methoden

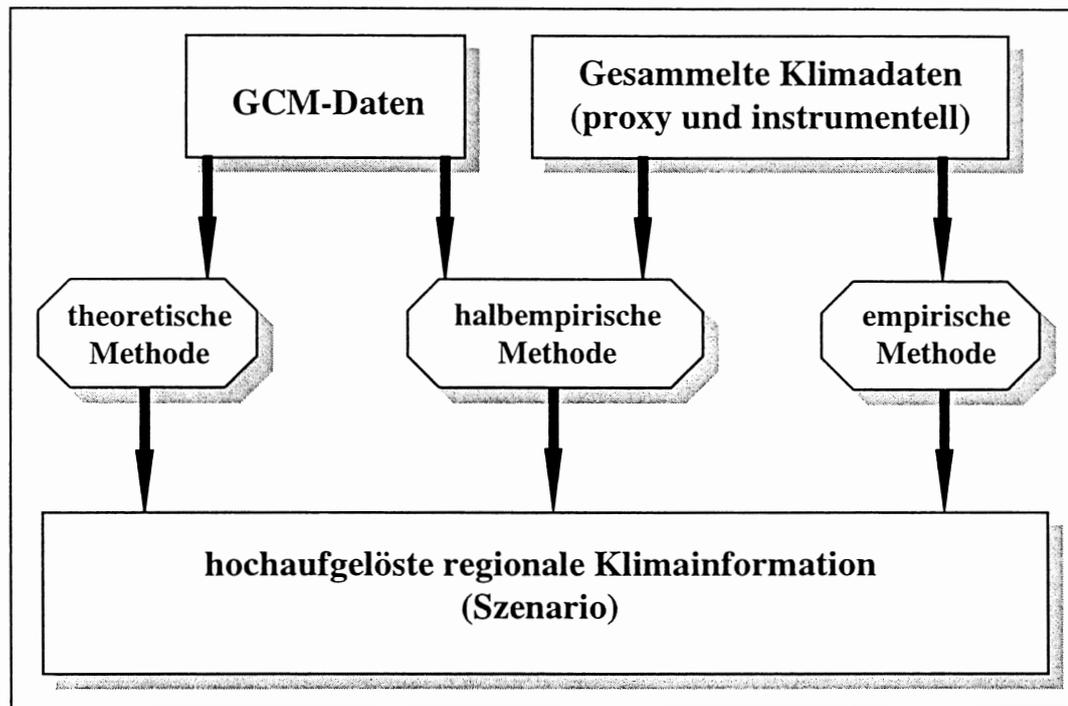


Abb. 2.4: Die drei Ansätze zur Entwicklung regionaler Klimaszenarien aus globalen Daten.

Wie Abbildung 2.4 zeigt, greift die empirische Methode nur auf gesammelte Klimadaten zurück, während die theoretische Methode von globalen Klimaszenarien (von GCMs) ausgeht. Halb-empirische Methoden verwenden sowohl beobachtete Daten als auch Daten von globalen Klimaszenarien.

Globale Zirkulationsmodelle

Die beste heute verfügbare Abbildung des Klimasystems stellen globale Zirkulationsmodelle dar (VON STORCH, ZORITA & CUBASCH, 1991; WANNER & BENISTON, 1995). Ihre räumliche Auflösung ist jedoch zu grob, als dass sie regionale klimatische Details abbilden könnte. Dafür gibt es vor allem zwei Gründe:

1) Rechenkapazität der Grossrechner:

Die Rechenzeiten und die benötigten Speicherkapazitäten sind bereits für grobauflösende Modellsimulationen extrem gross. Eine Verfeinerung der Modellauflösung würde zu einer enormen Erhöhung der Rechenzeit und der Speicherkapazität führen.

Das Klimamodell des Max-Planck-Instituts in Hamburg benötigt auf einem CRAY-Computer bei einer räumlichen Auflösung von rund 120 km (T-106-Mode) für die Simulation eines Jahreszyklus 270 Stunden. Die Daten, die dabei generiert werden, belegen insgesamt 16 GBytes (BENISTON, 1994). Das Klimamodell CCM1 des NCAR (National Center for Atmospheric Research) benötigt in derselben Auflösung, für dieselbe Simulationszeit, auf dem CRAY-Computer 432 Stunden. Eine räumliche Verfeinerung der Modellauflösung auf 30 km führt beim Modell CCM1 für eine Jahres-Zyklus-Simulation, zu einer Rechenzeit von rund 18'000 Stunden (GIORGI & MEARNS, 1991). Die Verwendung globaler Zirkulationsmodelle für Simulationen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung wird deshalb vorläufig an der benötigten Rechenzeit und Speicherkapazität scheitern.

2) Parametrisierung der mesoskaligen physikalischen Prozesse:

Die Parameterbeschreibungen, wie etwa diejenige der turbulenten Durchmischung, der Beschaffenheit der Bodenoberfläche oder der Wolken, wurde für grob auflösende Modelle entwickelt und angepasst. Sie lassen sich daher nicht ohne weiteres in hochauflösenden Modellen verwenden.

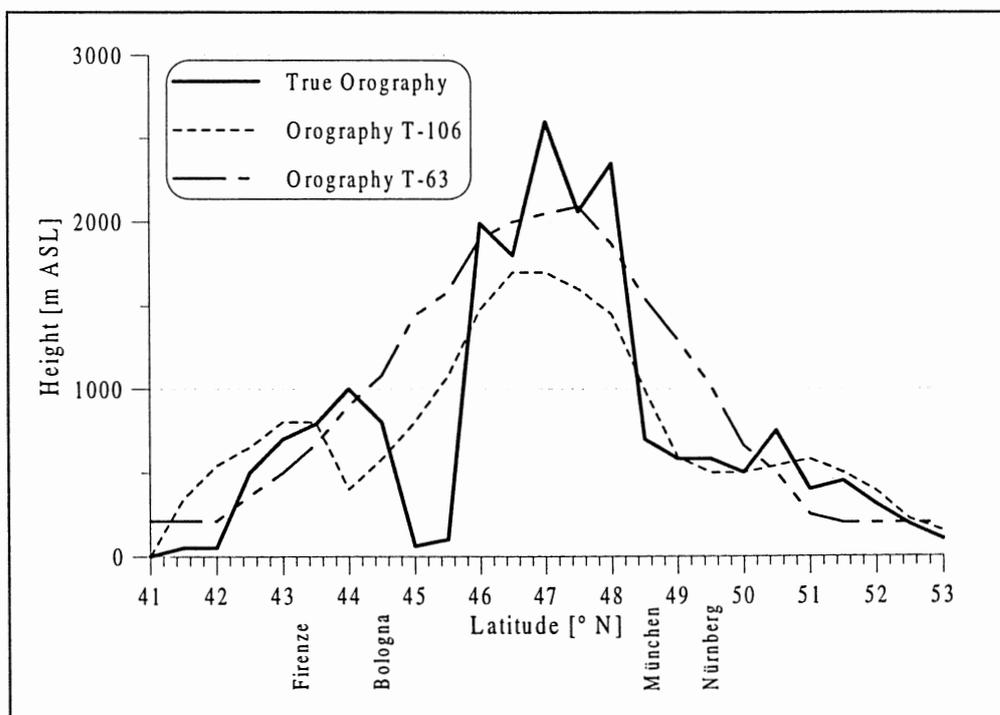


Abb. 2.5: Querschnitt durch die Alpen. Wahre Orographie (ausgezogene Linie) und Orographie der beiden Spektralmodelle T-63 und T-106 (Quelle: BENISTON, 1994).

Abbildung 2.5 zeigt die wahre Orographie sowie die generierte Orographie der beiden Modelle T-63 mit einer räumlichen Auflösung von ca. 200 km und T-106 (räumliche Auflösung 120 km) im Querschnitt durch die Alpen von 41° N bis 53° N. Aus dem Vergleich der wahren Orographie mit der Orographie der beiden Spektralmodelle wird deutlich, dass weder das T-63 Modell noch das feiner auflösende T-106 Modell annähernd die Wirklichkeit abbilden kann. Sowohl die Poebene wie auch die Schwäbisch-Bayerische Hochebene werden mit beiden Modellen nur ungenügend oder gar nicht wiedergegeben.

Aus den genannten Gründen ist es in den nächsten Jahren noch nicht möglich, hochauflösende Atmosphären-Ozean-Eis-Modelle zu rechnen.

2.2.1 Theoretische oder dynamische Downscaling - Methoden

Bei den theoretischen Downscaling-Methoden wird die global grobe Modellauflösung in speziell interessierenden Regionen verfeinert. Dies kann durch den Gebrauch eines Gitters mit variablen Abständen oder über den Einbau eines feiner auflösenden Modells (z.B. LAM = Limited Area Model) in das gröbere GCM erreicht werden. Das Einbetten (engl. nesting oder embedding) eines LAM in ein GCM kann einseitig oder zweiseitig interaktiv erfolgen. Eine einseitige Einbettung liegt dann vor, wenn das GCM die Randbedingungen für das LAM liefert, umgekehrt aber keine Beeinflussung möglich ist. Demgegenüber kann das regionale Modell bei der zweiseitigen interaktiven Einbettung auch Informationen an das GCM übergeben und dieses falls nötig korrigieren.

Das einseitige Einbettungsverfahren wurde von GIORGI (1990) erstmals zur regionalen Klimasimulation angewendet. Der grösste Nachteil dieser Methode ist, dass sie sowohl hinsichtlich Computerressourcen, aber auch hinsichtlich Entwicklung sehr aufwendig ist (FREY-BUNESS, 1993; BENISTON, 1994).

Ein Problem besteht auch in der Rückkopplung des Regionalmodells mit dem globalen Zirkulationsmodell. Fehlt die Rückkopplung, können Fehler im globalen Modell vom regionalen Modell nicht korrigiert werden. Die Qualität der regionalen Klimaszenarien dieser Methode hängt dadurch stark von der Qualität der GCM-Daten ab.

2.2.2 Halb-empirische Downscaling - Methoden

Auch halb-empirische Downscaling-Methoden verwenden Daten von globalen Zirkulationsmodellen. Diese Methoden haben das Ziel, die grob aufgelösten Modellergebnisse mit Hilfe von empirisch abgeleiteten Beziehungen zwischen grobskaligen und lokalen Variablen auf lokale, hoch aufgelöste Statistiken von Klimaelementen zu übertragen (JAKOB & SCHUBERT, 1992).

Wie Abbildung 2.6 zeigt, können die halb-empirischen Methoden weiter unterteilt werden in *justierende Methoden* und *Transferfunktionen*.

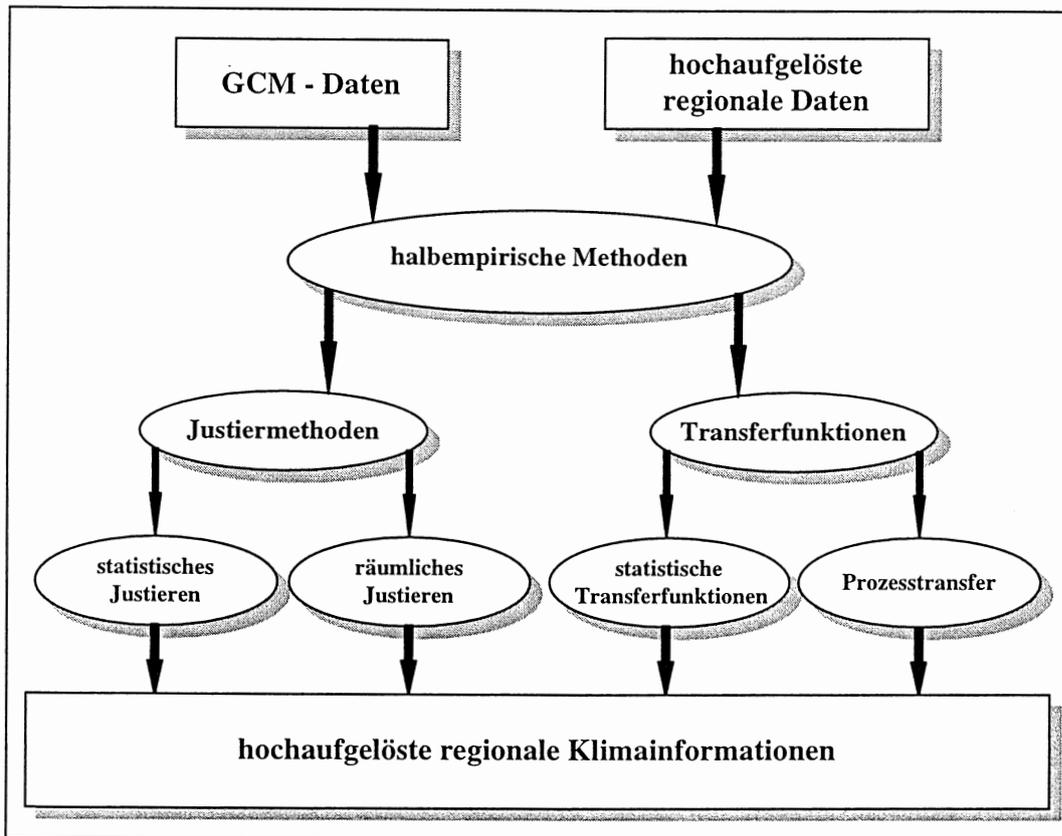


Abb. 2.6: Halb-empirische Downscaling-Methoden.

Bei den *justierenden Methoden* ist eine statistische oder eine räumliche Justierung (Berichtigung) möglich. Dabei werden Anpassungen der Modelldaten (Simulation des heutigen Klimas) an die aktuellen Werte des Lokalklimas vorgenommen. Dies kann durch Umrechnung (statistische Justierung) oder durch eine geographische Verschiebung der Modelldaten (räumliche Justierung) erfolgen. Dieselbe Justierung wird dann auch bei den Modellergebnissen einer Simulation einer Klimaveränderung vorgenommen.

Die zweite Gruppe der halb-empirischen Downscaling-Methoden, die *Transferfunktionen*, setzen sich aus den statistischen Transferfunktionen und dem Prozesstransfer zusammen. Die statistischen Transferfunktionen wurden erstmals von KIM et al. (1984) angewendet. Aufgrund von Beobachtungsdaten verschiedener Stationen wurden statistische Beziehungen, sogenannte Transferfunktionen, zwischen den Stationen und den Mitteln von Klimaelementen hergestellt. In umgekehrter Anordnung ist es dann möglich, mit Hilfe der gefundenen Transferfunktion aus GCM-Ergebnissen, die das räumliche Mittel repräsentieren, auf das Lokalklima zu schliessen. Dieser Ansatz ist auch unter der Bezeichnung 'Klimainversion' (Inversion lat. Umkehrung) bekannt. Mit statistischen Transferfunktionen arbeiten auch die beiden Methoden 'Perfect Prog' (PP) und 'Model Output Statistics' (MOS), die ursprünglich für die Wetterprognose entwickelt wurden, nun aber auch als Downscaling-Techniken im Zusammenhang mit Klimaänderungen auf GCM-Daten angewendet werden. Beide Techniken sind in GIORGI & MEARNES (1991) eingehend erläutert.

Die Bereitstellung von Techniken für den Prozesstransfer ist Aufgabe der synoptischen Methoden (ROBINSON & FINKELSTEIN, 1991). Beim Prozesstransfer ist es wichtig, die komplexe Kopplung und das Ineinandergreifen zwischen den auf verschiedenen Massstabsebenen ablaufenden Prozessen zu verstehen. Anhand von Feinanalysen können zum Beispiel der Zusammenhang zwischen

atlantisch-europäischen Zirkulationsmustern und regionalen Druck-, Temperatur- und Niederschlagsmustern ergründet werden (WANNER, 1994a; LÜTHI et al., 1996).

Einschränkungen der halb-empirischen Methoden

Aus den GCM-Ergebnissen (z. B. in Form von Bodendruckkarten) können die grossräumigen Zirkulationsmuster herausgelesen und so Rückschlüsse auf das lokale Klima gezogen werden. Solche Rückschlüsse sind natürlich nur möglich, wenn die vom GCM simulierten Muster sich einem definierten Zirkulationsmuster zuteilen lassen.

Ein weiteres Problem der halb-empirischen Methoden sind die Datengrundlagen. Soll für eine bestimmte Region eine Beziehung zwischen dem Regionalklima und dem Globalklima hergestellt werden, so müssen lange Datenreihen und möglicherweise auch flächendeckende, hochaufgelöste Daten (Gitternetzdaten) vorhanden sein. Solche langen Beobachtungsreihen gibt es aber nur für Europa, die USA und Australien (FREY-BUNESS, 1993). Streng genommen ist die in den Daten gefundene statistische Beziehung somit nur für den kalibrierten Bereich gültig. Das heisst, dass z.B. Regressionen solange angewendet werden dürfen, wie die verwendeten Werte den beobachteten Wertebereich nicht überschreiten.

Eine weitere Unsicherheit dieser Methoden betrifft die Frage, ob die gefundenen statistischen Strukturen bei Klimaänderungen erhalten bleiben oder nicht (JAKOB & SCHUBERT, 1992).

Letztlich ist bei den halb-empirischen Downscaling-Methoden die *Qualität* der Ausgangsdaten (sowohl GCM-Daten als auch Messdaten) von entscheidender Bedeutung.

2.2.3 Empirische Downscaling - Methoden

Bei den empirischen Downscaling-Methoden werden Klimaschwankungen in der Vergangenheit untersucht. Aus den Erkenntnissen dieser Untersuchungen wird mit Hilfe von Analogieschlüssen auf die regionale Verteilung der zukünftigen Klimaänderungen geschlossen.

Das Klima der Vergangenheit kann entweder mit Hilfe von paläoklimatischen Daten (Radiodendrochronologie, Isotopenverhältnisse in Eisbohrkernen, Höhen- und Breitenlage der Waldgrenze, Gletscherstände und Moränen, Pollenanalyse, fossile Böden, phänologische Beobachtungen, u.s.w.) oder mit langen Zeitreihen (meist Temperatur- oder Druck-Messungen) rekonstruiert werden.

Aus solchen Untersuchungen stammen die Erkenntnisse der früheren Warmperioden des Pleistozäns (~ 3.3 bis 4.3 Mio. Jahre vor heute), des Eem-Interglazial (~ 130'000 Jahre vor heute) und des Holozän-Optimums (5000 bis 6000 Jahre vor heute). Da die Sommertemperaturen im Holozän-Optimum um ca. 2-4 °C höher lagen als heute, wird diese Periode oft als Analogfall für das Klima in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts herangezogen (BENISTON, 1994). Die Erwärmung damals nahm jedoch eine viel längere Zeit in Anspruch als dies bei der aktuellen Erwärmung erwartet wird. Die Konsequenzen des wärmeren Klimas z.B. für Ökosysteme, die eine gewisse Anpassungszeit an neue Verhältnisse benötigen, könnten somit anders ausfallen (BENISTON, 1994). Bei der Verwendung dieser Methode muss auch berücksichtigt werden, dass die Ursache der verschiedenen Erwärmungsphasen und die Ursache der heutigen durch Treibhausgase verursachten Erwärmung unterschiedlich sind. Diesen Methoden wird daher die Annahme zugrunde gelegt, dass die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre auf unterschiedliche Antriebe ähnlich reagiert (JAKOB und SCHUBERT, 1992).

Bei der Verwendung instrumentell erhobener Daten werden beispielsweise global kalte Jahre von global warmen Jahren unterschieden. Aus diesen beiden Gruppen kann eine regionale Verteilung von meteorologischen Parametern in 'kalten' und 'warmen' Jahren gewonnen werden. Mit Hilfe der Berechnung der Differenz der beiden Gruppen zu den heute herrschenden Klimabedingungen, kann eine Beschreibung eines möglichen zukünftigen Klimas abgeleitet werden (JAKOB und SCHUBERT, 1992).

Wie die Ausführungen in den obigen Abschnitten gezeigt haben, beinhalten alle drei beschriebenen Downscaling-Methoden Vorteile und Nachteile. Deshalb werden oft mehrere Verfahren miteinander kombiniert, wie etwa von FREY-BUNESS (1993), die ein statistisch-dynamisches Downscaling-Verfahren entwickelt hat.

2.3 Synoptisches Downscaling - der witterungsklimatologische Ansatz

Viele Schadenereignisse werden erfahrungsgemäss innert Tagesfrist durch mesoskalige Phänomene wie Gewitter, konvektive Niederschläge oder Starkwinde verursacht. Deshalb sind Wetterlagen sowohl in zeitlicher als auch in räumlicher Hinsicht adäquate Variablen für ein Downscaling. Die Zeitreihen der Wetterlagen erlauben zudem einen Vergleich mit früheren Jahrzehnten. Wetterlagen sind anschaulich und leicht einsehbar, während statistische Grössen oft schwierig zu interpretieren sind.

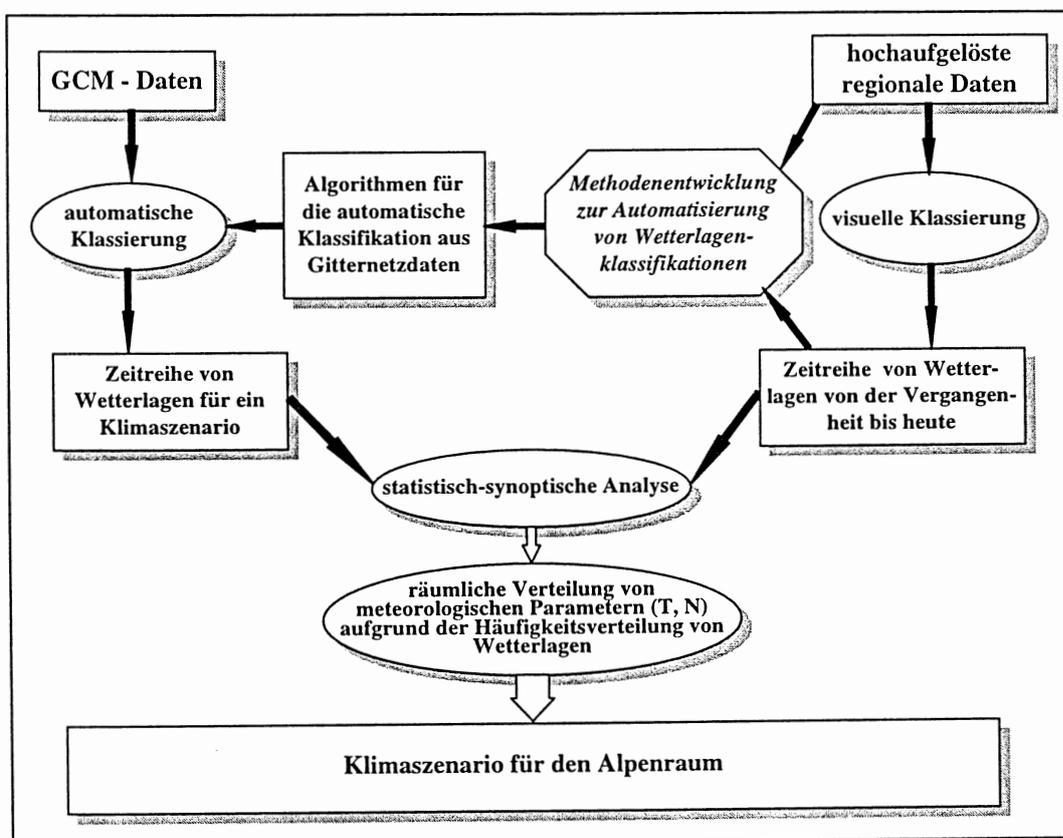


Abb. 2.7: Darstellung der Methode des Synoptischen Downscalings.

Wie Abbildung 2.7 zeigt, werden beim synoptischen Downscaling-Verfahren, das den halbempirischen Ansätzen zuzuordnen ist, die Wetterlagen aus GCM-Gitternetzdaten hergeleitet. Die hergeleiteten Wetterlagen für jeden Tag ergeben eine Zeitreihe, beziehungsweise eine Abfolge von Wetterlagen. Aus dieser Zeitreihe können Häufigkeiten und Intensitäten der in bestimmten Zeitabschnitten auftretenden Wetterlagen bestimmt werden. Aufgrund von Häufigkeitsverteilungen der Wetterlagen von früheren Zeitabschnitten, lassen sich Zu- und Abnahmen in der Auftretenswahrscheinlichkeit und in der Andauer der einzelnen Wetterlagen oder Gruppen von Wetterlagen feststellen. Damit lassen sich regionale Klimaschwankungen erklären. Mit Hilfe der beiden Methoden von BAUDENBACHER (1993) und NEIDHÖFER (1994) lassen sich aus den Häufigkeiten der Wetterlagen Temperatur- beziehungsweise Niederschlagsfelder für den schweizerischen Alpenraum berechnen. BAUDENBACHER (1993) berechnet die räumliche Verteilung standardisierter Temperaturanomalien für jede Wetterlage nach SCHÜEPP für die ganze Schweiz. Mit Kenntnis der Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen nach SCHÜEPP kann daraus eine Karte mit den Temperaturanomalien des betreffenden GCM-Szenarios erstellt werden. NEIDHÖFER (1994) gibt flächendeckend Schätzwerte für die mittlere Niederschlagsmenge ausgewählter Grosswetterlagen (HESS/BREZOWSKY) und deren Fehlervarianzen, jeweils für die Zentralmonate der Jahreszeiten (Januar, April, Juli und Oktober) für den Schweizer Alpenraum an. Auch daraus lassen sich mit Kenntnis der Häufigkeitsverteilung der Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY Niederschlagskarten für ein bestimmtes Klimaszenario berechnen.

Wetterlagenklassifikationen weisen einige charakteristische Nachteile auf. Der gewichtigste ist wohl der Zwang zur manuellen Zuordnung. Rechnet man durchschnittlich 3 Minuten für die Zuordnung eines Tages zu einer bestimmten Wetterlage, so werden für die Zuordnung eines einzigen Jahres bereits über 18 Stunden benötigt. Man stelle sich den Aufwand vor, wenn zum Beispiel eine 30-jährige Periode bearbeitet werden soll! Es ist daher wünschenswert, eine Methode zu entwickeln, mit der die Wetterlage eines Tages automatisch zugeordnet werden kann. Eine automatische Zuordnung der Wetterlage würde gleichzeitig auch einen weiteren Nachteil der Wetterlagenklassifikation entschärfen, die Subjektivität des Bearbeiters bei der Zuordnung. Gleiche oder ähnliche Lagen würden immer demselben Typ zugeordnet. Die Zeitreihe der Wetterlagen würde somit auch reproduzierbar, was sie durch eine manuelle Zuordnung nicht ist.

Daher wird in dieser Arbeit versucht, zwei heute im Deutschen und Schweizer Wetterdienst manuell zugeordnete Wetterlagenklassifikationen zu automatisieren.

Wie bei den anderen Downscaling-Verfahren muss auch beim witterungsklimatologischen Ansatz eine Grundannahme getroffen werden. Das Downscaling mittels Wetterlagen setzt voraus, dass die Beziehung zwischen den einzelnen Wetterlagen und den Wetterelementen (Temperatur, Niederschlag) auch bei einem veränderten Klima stabil bleibt. Nur unter dieser Annahme sind Berechnungen von Temperatur- und Niederschlagsfeldern auf Grund veränderter Wetterlagenhäufigkeiten zulässig.

3 Manuelle Klassifikationstechniken und deren Anwendung im Schweizerischen Alpenraum

Wie aus Kapitel 2.3 hervor geht, werden für das synoptische Downscaling Angaben über Wetterlagen benötigt. Aus Abbildung 2.7 in Kap. 2.3 geht hervor, dass die verwendete Wetterlagenklassifikation auch in die Vergangenheit zurück reichen sollte. Es ist deshalb wünschenswert, eine bereits bestehende Wetterlagenklassifikation zu verwenden. Das vorliegende Kapitel stellt verschiedene Wetterlagenklassifikationen vor. Daraus soll anschliessend die geeignetste für das synoptische Downscaling ausgewählt werden.

Für den in der vorliegenden Arbeit interessierenden Raum der Alpen (insbesondere der Schweizeralpen), boten sich die Wetterlagenklassifikationen von DZERDZEEVSKII, HESS/BREZOWSKY, LAUSCHER, GRESSEL, LAMB und SCHÜEPP zur genaueren Betrachtung an. Es handelt sich dabei um sogenannte "manuelle" Klassifikationstechniken, die in unterschiedlichen Gebietsgrössen und mit unterschiedlichen Klassierungsgrundlagen arbeiten. Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben die oben erwähnten Klassifikationstechniken im Hinblick auf ihre Eignung für eine *Analyse der Entwicklung des Alpenklimas*.

Eines der wichtigsten Kriterien bei der Auswahl der Klassifikationen stellte der Bezug zum Alpenraum dar. Entsprechend werden die verschiedenen Klassifikationen in der Reihenfolge vorgestellt mit der ihr räumlicher Bezug zum Alpenraum zunimmt. Eine Übersicht über die im Folgenden besprochenen Klassifikationen gibt Tabelle 3-10.

3.1 Beschreibung der manuellen Wetterlagenklassifikationen

3.1.1 Die Wetterlagenklassifikation nach DZERDZEEVSKII

Im Jahre 1946 entwickelten DZERDZEEVSKII und seine Mitarbeiter eine Klassierung der Zirkulation für die Gebiete nördlich des 25^{ten} Breitenkreises der Nordhemisphäre (DZERDZEEVSKII, 1962).

Dabei verwendete er erstmals Wetterkarten der gesamten Nordhemisphäre. Die Betrachtung der gesamten Nordhemisphäre erlaubte es, Prozesse von der Entstehung bis zum Ausklingen zu verfolgen. Dadurch wurden Fehler vermieden, die durch die Einschränkung des Gebietes verursacht werden (DZERDZEEVSKII, 1962).

Klassifikationskriterien

Die Klassifikationsgrundlage bildet der von DZERDZEEVSKII bezeichnete einfache oder elementare Zirkulationsmechanismus (elementary circulation mechanism; DZERDZEEVSKII, 1962). Es handelt sich dabei um ein dynamisches Zirkulationsmuster, das jeden Teil der hemisphärischen Strömung mit allen anderen Teilen in Verbindung bringt (KALNICKY, 1987). Da durch die Klassifikation die gesamte Nordhemisphäre abgedeckt werden soll, verwendet DZERDZEEVSKII nur grossräumige Merkmale wie:

- Die Position der halbstationären (semipermanenten) Bodendruckzentren (z.B. Aläuten-Tiefdruckgebiet, Island-Tiefdruckgebiet, sibirisches Hochdruckgebiet und nordpazifisches bzw. nordatlantisches subtropisches Hochdruckgebiet),

- die Position und Zugbahn von wandernden Bodendruckzellen, und
- das Wellenmuster in der Höhe, mit Position und Intensität der Tiefdruckrinnen und Hochdruckrücken (KALNICKY, 1987).

Speziell berücksichtigt werden polare Kaltluftausbrüche (polar intrusions) und damit verbundene Blockierungen der Westströmung (blocking in the westerlies) in 6 Sektoren von ungefähr 50° bis 60° Längengraden (Atlantik, Westeuropa, Osteuropa, Asien, Pazifik und Amerika).

Die Zugbahnen der Zyklonen und Antizyklonen werden aus Karten des 700 hPa oder 500 hPa-Niveaus entnommen, welche die Strömung der mittleren Troposphäre repräsentieren (BARRY and PERRY, 1973).

Typisierung

DZERDZEEVSKII unterteilt die Zirkulationsprozesse der Nordhemisphäre in vier Gruppen, die in Abbildung 3.1 dargestellt und in Tabelle 3-1 beschrieben sind.

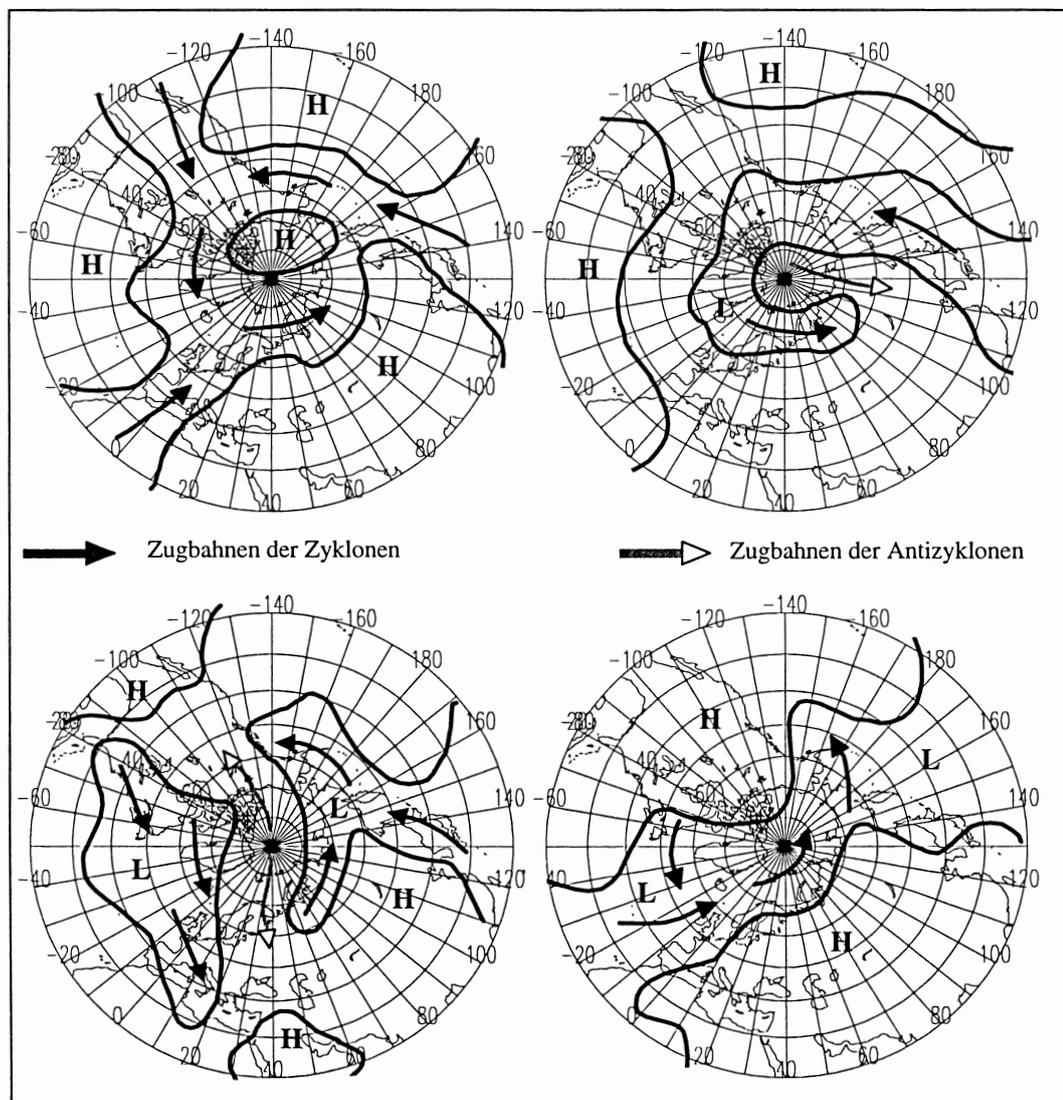


Abb. 3.1: Die vier Zirkulationsgruppen der Wetterlagenklassifikation der Nordhemisphäre nach DZERDZEEVSKII (Quelle: DZERDZEEVSKII, 1962): zonal (oben links), zonal mit Blockierung (o. re.), nord meridional (u. li.), süd meridional (u. re.)

Die 4 Zirkulationsgruppen lassen sich weiter in 13 Haupttypen unterteilen (vgl. Tab 3-1).

Tab. 3-1: Beschreibung der 13 Haupttypen der Wetterlagenklassifikation nach DZERDZEEVSKII (Quellen: DZERDZEEVSKII, 1962; KALNICKY, 1987).

Gruppe	Typen	Charakterisierung
1. zonal	1: drei Hochdruckgürtel über dem Atlantik, dem Pazifik und Eurasien, wobei der atlantische und der pazifische über Amerika oder der pazifische und der eurasische über der asiatische Küste des Pazifiks zusammengeschlossen sind, so dass nur zwei Unterbrechungen entstehen 2: Hochdruckgürtel über dem Atlantik und dem Pazifik, zusätzlich 1 bis 2 abgeschlossene Hochdruckgebiete über Eurasien, mit 2,3 oder 4 resultierenden Unterbrechungen	<ul style="list-style-type: none"> • zonale Zirkulation <u>ohne</u> nördliche Blockierung mit 2 bis 4 Unterbrechungen des südlichen Hochdruckgürtels; • um ein isoliertes polares Hochdruckgebiet schliesst sich ein Ring von Zyklonenzugbahnen; • umfangreiche Hochdruckgebiete im Bodenniveau bedecken die Subtropischen Gebiete und die niederen Mittelbreiten
2. zonal mit Blockierung (disruption of zonality)	Kaltluftvorstoss über 3: dem Nordatlantik 4: Europa 5: Asien 6: Nordpazifik 7: Nordamerika	<ul style="list-style-type: none"> • nur in <u>einem</u> Sektor Vorstösse arktischer Luftmassen, aus einem polaren Hochdruckgebiet in tiefere Mittelbreiten; • übrige Gebiete der Nordhemisphäre zonale Strömung;
3. nord meridional	Kaltluftvorstoss über 8: irgendwelche Sektoren, ausser östlicher Nordpazifik und Nordamerika; 9: Nordatlantik und Nordpazifik 10: Europa und Nordamerika 11: Asien und Nordamerika 12: drei oder vier Vorstösse mit Wanderung nach Nordamerika und Ostasien in allen Varianten	<ul style="list-style-type: none"> • arktische Kaltluft-Vorstösse aus einem polaren Hochdruckgebiet in 2, 3 oder 4 verschiedenen Sektoren; • über dem grösseren Teil der Gebiete der Nordhemisphäre meridionale Zirkulation.
4. süd meridional	13	<ul style="list-style-type: none"> • Zyklonenaktivität entlang der arktischen Frontalzone; • Zyklonen wandern nordwärts von mittleren Breiten in arktische Regionen; • in den übrigen Gebieten der Nordhemisphäre zonale Zirkulation

Eine weitere Unterteilung der 13 Haupttypen in 41 Typen wird durch Zufügen von Buchstaben erreicht.

- Die Buchstaben **a** bis **d** werden verwendet, um Verschiebungen in der Hauptströmung zu identifizieren (z.B. der Vorstoss der polaren Kaltluft aus dem Polarhochdruckgebiet ist in Typ 7a über dem östlichen Nordamerika, während er in Typ 7b über dem westlichen Nordamerika liegt).
- Unterschiede der Zirkulation, die mit den Jahreszeiten zusammenhängen, werden mit den Buchstaben **z** für den Wintertyp und **l** für den Sommertyp gekennzeichnet (KALNICKY, 1987).

Ein Zirkulationstyp dauert normalerweise 4 Tage, seltener nur 3 Tage und wird dann schnell durch einen anderen abgelöst, so dass zwei aufeinanderfolgende Tage zwei verschiedenen Typen zugeordnet werden können (DZERDZEEVSKII, 1962).

3.1.2 Katalog der Grosswetterlagen Europas nach HESS/BREZOWSKY

In den Jahren 1941 - 1943 entstand unter der Leitung von F. BAUR erstmals ein 'Kalender der Grosswetterlagen Europas'. Darin wurden Grosswetterlagen anhand der beiden Kriterien der geographischen Lage der Steuerungszentren und der Erstreckung der Frontalzonen klassiert. 1950 bis 1951 überarbeiteten HESS und BREZOWSKY den Grosswetterkalender von BAUR vollständig und veröffentlichten ihn 1952 als 'Katalog der Grosswetterlagen Europas'. Diesem Katalog wurde im Jahre 1969 noch eine Lage zugefügt (HESS und BREZOWSKY, 1969). Die heute angewendete Version der Grosswetterlagenklassifikation nach HESS/BREZOWSKY geht auf dieses Jahr zurück.

Die folgende Beschreibung dieser Klassifikation ist im Wesentlichen eine Zusammenfassung der Ausführungen von GERSTENGARBE et al. (1993) zur neu überarbeiteten Ausgabe des 'Katalogs der Grosswetterlagen nach Paul Hess und Helmuth BREZOWSKY, 1881 - 1992'.

Klassifikationskriterien

Der Gebietsausschnitt, welcher der Wetterlagenklassifikation zugrunde liegt, umfasst den Raum vom Nordatlantik bis zum Ural und von Grönland-Spitzbergen bis Nordafrika ($\sim 30^{\circ}$ - 80° N / $\sim 20^{\circ}$ W- 60° E; HESS, 1952; siehe Abb. 3.3, Kap. 3.2).

Da für die Jahre 1881 bis 1938 nur Bodenkarten zur Verfügung standen, wurde die Luftdruckverteilung auf dem Meeresniveau stark berücksichtigt. Dies änderte sich mit der Verfügbarkeit von Höhenkarten (500 hPa-Niveau) für den Ausschnitt Europa-östlicher Nordatlantik. In der heutigen Ausgabe wird als Grundlage der Klassifikation diejenige Zirkulationsform verwendet, "die durch die Lage der steuernden Druckzentren (Höhentiefdruckgebiete) und durch die Erstreckung der Frontalzonen bestimmt wird" (GERSTENGARBE et al., 1993).

Nebst der Lage der Druckzentren werden auch die Zugrichtung der wandernden Druckgebilde sowie die Drucksteig- und Druckfallgebiete (Steuerung) zur Bestimmung der Grosswetterlagen herangezogen.

Typisierung

Der Kalender der Grosswetterlagen unterscheidet die drei Zirkulationsformen zonal, meridional und gemischt.

Die zonale Zirkulationsform besteht aus dem Grosswettertyp West, welcher vier Grosswetterlagen umfasst (vgl. Tab. 3-2).

Die gemischte Zirkulationsform beinhaltet die Grosswettertypen Südwest und Nordwest, die sich je in eine Grosswetterlage mit zyklonaler und antizyklonaler Isobarenkrümmung über Mitteleuropa aufspalten lassen, den Grosswettertyp 'Hoch Mitteleuropa', bestehend aus den beiden Lagen 'Hochdruck Mitteleuropa' und 'Brücke Mitteleuropa' und den Grosswettertyp 'Tief Mitteleuropa', der zugleich auch eine Grosswetterlage darstellt.

Die meridionale Zirkulationsform schliesslich setzt sich aus den Grosswettertypen Nord, Nordost, Ost, Südost und Süd zusammen, wobei bei den meisten Lagen zwischen überwiegend zyklonaler oder antizyklonaler Isobarenkrümmung über Mitteleuropa unterschieden wird. Zusätzlich erfolgt meist auch eine Präzisierung der Lage des Hochdruckkerngebietes, wie aus Tabelle 3-2 ersichtlich ist.

Tab. 3-2: Übersicht über die Grosswettertypen und Grosswetterlagen (Quelle: GERSTENGARBE ET AL., 1993, leicht abgeändert). (Die vollständige Bezeichnung der einzelnen Grosswetterlagen befindet sich im Abkürzungsverzeichnis.)

Zirkulationsform	Grosswettertyp	Grosswetterlage
zonal	West	WA, WZ, WS, WW
gemischt	Südwest Nordwest Hoch Mitteleuropa	SWA, SWZ NWA, NWZ HM, BM
	Tief Mitteleuropa	TM
meridional	Nord	NA, NZ HNA, HNZ HB, TRM
	Nordost Ost	NEA, NEZ HFA, HFZ HNFA, HNFZ
	Südost Süd	SEA, SEZ SA, SZ TB, TRW
unbestimmt		unbestimmte Tage

Die Grosswetterlagen Europas von HESS/BREZOWSKY umfassen total 29 verschiedene Lagen und eine Gruppe für 'unbestimmte' Tage. Für detaillierte Beschreibungen der Wetterlagen sowie Musterbeispiele für jede der 29 Lagen (Boden- und Höhenwetterkarte (500 hPa-Niveau)) wird auf die Arbeit GERSTENGARBE et al. (1993) verwiesen¹.

Um eine bessere Übersicht über die Grosswetterlagen zu erhalten, wurden von verschiedenen Autoren Gruppierungen vorgenommen. Eine mögliche Gruppierung zeigt Tabelle 3-2, in der die Grosswetterlagen zu Grosswettertypen und diese wiederum zu Zirkulationsformen zusammengefasst sind.

Eine andere Möglichkeit der Zusammenfassung der Grosswetterlagen bietet der Vorschlag von BAUR (GERSTENGARBE et al., 1993). Er fasst die mitteleuropäischen Hochdrucklagen, die allgemein antizyklonalen Lagen, die mitteleuropäischen Tiefdrucklagen und die allgemein zyklonalen Lagen je zu einer Gruppe zusammen (vgl. Tab. 3-3).

Tab. 3-3: Zusammenfassung der Grosswetterlagen Europas in 4 Gruppen nach BAUR, 1944 (GERSTENGARBE ET AL., 1993).

Bezeichnung	Abkürzung	Grosswetterlagen
Mitteleuropäische Hochdrucklagen	H	SWA, HM, BM, NEA, HFA, HNFA, SEA, SA
allg. antizyklonale Lagen	A	WA, NWA, NA, HNA, HB
Mitteleuropäische Tiefdrucklagen	T	TM, HNZ, TRM, NEZ, HFZ, HNFZ, SEZ
allg. zyklonale Lagen	Z	WZ, WS, WW, SWZ, NWZ, NZ, SZ, TB, TRW

¹ Eigene Berechnungen von Mittelkarten des Drucks und Geopotentials (500 hPa) für jede Grosswetterlage und jeden Monat haben gezeigt, dass die Anordnung der Druckgebilde der einzelnen Wetterlagen jahreszeitlichen Änderungen (Verschiebungen) unterliegt (vgl. Anhang).

3.1.2.1 Gruppierung Europäischer Grosswetterlagen nach alpin-synoptischen Kriterien

Für die von HESS/BREZOWSKY vorgenommene Klassierung der 29 europäischen Grosswetterlagen ist in erster Linie die geographische Lage der steuernden Druckzentren zwischen Neufundland und Ural und zwischen Maghreb und Spitzbergen von Bedeutung. Für den Schweizer Alpenraum ist jedoch nur ein kleiner Ausschnitt von rund 220 x 360 Kilometern relevant. Dies führt dazu, dass sich unterschiedliche Grosswetterlagen im Schweizer Alpenraum durch ähnliche Muster im Bodendruck- und 500 hPa-Geopotentialfeld äussern können. Aus diesem Grund erstellte RICKLI (1995) im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes Nr. 31 (NFP31, Projekt ALPCLIC) eine Gruppierung der Europäischen Grosswetterlagen nach alpin-synoptischen Kriterien.

RICKLI (1995) wählte für die Zusammenfassung als Hauptkriterium das synoptische Erscheinungsbild der Grosswetterlagen auf der Alpennordseite. Daraus ergaben sich die 8 alpin-synoptischen Gruppen, die entsprechend ihrer Häufigkeit (Gruppe 1 am häufigsten, Gruppe 8 am seltensten) geordnet wurden. Als Grundlage für die Gruppierung dienten die Abbildungen der Musterbeispiele im Anhang von GERSTENGARBE et al. (1993).

Die aus den 29 Wetterlagen gebildeten 8 Gruppen von RICKLI (1995) werden im Folgenden kurz beschrieben. Die Beschreibungen stammen im wesentlichen aus dem Arbeitsbericht von RICKLI (1995).

Gruppe 1: NWA, BM, NA, HNA, HB, NEA, HFA

Gruppe 1 stellt die grösste Gruppe dar. Sie besteht aus Wetterlagen, bei denen der Alpenraum im Bereich eines Hochdruckausläufers, verbunden mit Kaltluftvorstössen über Osteuropa, liegt. Nördliche Höhenströmung und Bise in der Ostschweiz sind Kennzeichen für HFA. Bei NWA und NA führt der Druckanstieg über Frankreich zu aufkommender Bise im westlichen Mittelland, während die Nord- und Ostschweiz noch von Störungsausläufern gestreift werden. Bise und nördliche Höhenwinde sind auch den Wetterlagen BM, NEA und HB eigen.

Gruppe 2: WA, WZ, WS

Gruppe 2 ist identisch mit dem Grosswettertyp 'West' in HESS/BREZOWSKY (1952). Typische Merkmale der in Gruppe 2 zusammengefassten Grosswetterlagen sind eine grosse Wellenlänge der Westwinddrift sowie der Zustrom maritimer Polarluft in den Alpenraum. Da sich die 'winkelförmige Westlage' (WW) im Vergleich mit den übrigen Westlagen durch kürzere Wellenlängen auszeichnet, wurde sie der Gruppe 3 zugeordnet.

Gruppe 3: WW, NWZ, NZ, TRM

Die Gruppe 3 zeichnet sich durch nordwestliche bis nördliche Anströmung der Alpen aus, verbunden mit Frontdurchgängen und einem Druckanstieg über Westeuropa. Die steuernden Tiefdruckgebiete ziehen von der Nordsee über Südkandinavien zum Baltikum.

Ebenfalls dieser Gruppe zugeordnet wurde die zyklonale Nordlage (NZ). Sie tritt am häufigsten im Frühjahr auf und führt zu sehr krassen Luftmassenwechseln. Da sie nur eine geringe Häufigkeit aufweist, wurde sie dieser Gruppe zugeordnet und nicht als separate Gruppe aufgeführt.

Gruppe 4: HM, HNFA, SEA

Ausschlaggebendes Kriterium für die Zusammenfassung der Grosswetterlagen HM, HNFA und SEA in Gruppe 4 sind eine meridional verlaufende Keilachse im Bereich oder direkt über den Alpen sowie östliche bis südöstliche Winde in Bodennähe. Der Alpenraum liegt dabei am Südwestrand eines Bodenhochs mit Kern zwischen Polen und Skandinavien.

Gruppe 5: SA, SZ, TB, TRW

Gruppe 5 entspricht dem Grosswettertyp 'Süd' von HESS/BREZOWSKY. Kennzeichen sind ein kurzweiliger Trog vor Westeuropa und damit verbunden eine südwestliche bis südliche Anströmung des Alpenraumes. Der Einbezug subtropischer Luftmassen führt bis zum Durchgang einer atlantischen Störung zu positiven Temperaturanomalien. Eng verbunden mit dieser Gruppe sind Föhnsituationen.

Gruppe 6: NEZ, HFZ, HNFZ, SEZ

Mit Ausnahme von SEZ zeichnen sich die in Gruppe 6 zusammengefassten Grosswetterlagen durch Höhenkaltluft über Mittel- und Osteuropa aus.

Entlang der Alpennordseite herrscht Bise. Mit HFZ und HNFZ umfasst die Gruppe jene Grosswetterlagen, welche für die ausgeprägtesten Vorstösse kontinentaler Kaltluft nach Westen verantwortlich sind. Bei SEZ liegt die Höhenkaltluft in Form eines Kaltlufttropfens über dem Mittelmeer vor. SEZ ist nur bedingt vergleichbar mit den anderen Lagen. Sie lässt sich jedoch kaum einer anderen Gruppe zuordnen.

Ein weiteres Kennzeichen von Gruppe 6 ist die Entkopplung von der nordatlantischen Zirkulation. Das bedeutet, dass vornehmlich kontinentale Luftmassen den Wettercharakter prägen. Auch hier bilden Tage, an denen SEZ auftritt, die Ausnahme dieser Regel.

Gruppe 7: SWA, SWZ

Gruppe 7 ist identisch mit dem Grosswettertyp 'Südwest' der gemischten Zirkulationsform von HESS/BREZOWSKY (1952). Für die beiden langwelligen Grosswetterlagen ist eine grossräumige südwestliche Anströmung der Alpen charakteristisch. Dabei werden grossräumige subtropische Luftmassen in den Alpenraum geführt, was zu positiven Temperaturanomalien führt.

Gruppe 8: TM, HNZ

Wie schon Gruppe 6 zeichnet sich auch Gruppe 8 durch eine Entkopplung von der Westwinddrift und ein Eigenleben der Zirkulation aus, das durch die Abschnürung von Höhentroggen zustande kommt (Cut off Lows). Im Raum Nordsee-Südsandinavien-Baltikum herrscht tiefer Druck. Der Alpenraum liegt daher im Bereich einer Westströmung und damit auch im Einflussbereich maritimer Luftmassen. Vereinfachend und generalisierend lässt sich Gruppe 8 als Omega-Gruppe bezeichnen, wobei das Omega bei TM besonders ausgeprägt ist, während es bei HNZ zwar auch vorhanden, jedoch weniger augenfällig ist.

3.1.3 Klassifikation der Wetterlagen in den Ostalpenländern nach LAUSCHER

In der Klassifikation der Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY stellt der Alpenraum nur ein Randgebiet dar. Entsprechend wird dem Mittelmeereinfluss auf den Alpenraum zu wenig Beachtung geschenkt (WILLFARTH, 1959). Aus diesem Grund modifizierte LAUSCHER im Jahre 1947 das Schema der europäischen Grosswetterlagen von HESS/BREZOWSKY "zwecks bessere(r) Anwendbarkeit in den Ostalpenländer(n)" (LAUSCHER, 1972).

Wie bereits der Name ausdrückt, bezieht sich das Kerngebiet der Klassifikation auf die Ostalpenländer, insbesondere Österreich. Der genaue Perimeter des Gebietes, in dem die Klassifikation gültig ist, wird jedoch weder von LAUSCHER (1951, 1972, 1976, 1982, 1986) noch von WILLFARTH (1959) genauer definiert. Aus den Beschreibungen der einzelnen Typen in LAUSCHER (1954) und WILLFARTH (1959) geht jedoch hervor, dass für die Klassierung eines Tages eine Gebietsgrösse ähnlich derjenigen der Grosswetterlagen Europas mit einer südwärts Erweiterung von rund 10 Breitengraden berücksichtigt wird. Es muss aber angenommen werden, dass die Ostalpenklassifikation von LAUSCHER nicht für das gesamte oben beschriebene Gebiet Gültigkeit hat.

Klassifikationskriterien

Die Grundlage für die Klassifikation der Wetterlagen nach LAUSCHER bilden in erster Linie die Druckgebilde auf Meeresniveau, speziell diejenigen, welche für die tatsächliche Witterung in den *Ostalpen* (speziell in Österreich) bestimmend sind. Aus diesem Grund werden in der LAUSCHER-Klassifikation öfter Tiefdruckrandlagen und Tiefdruckgebilde klassiert, wenn auch die Grosswetterlage Europas durch die Antizyklonen als Aktionszentren zu charakterisieren wären. Ergänzend wird auch die Höhenströmung miteinbezogen, "besonders bei beharrenden Höhentiefs über den Ostalpen" (LAUSCHER, 1954). Die Wetterlage soll "einen unmittelbaren Schluss auf den Wettercharakter im Ostalpengebiet" gewähren.

Typisierung

Die Wetterlagenklassifikation für die Ostalpenländer unterscheidet 5 Gruppen (Hochdruck, Hochdruck-Randlagen, Tiefdruck, Tiefdruck-Randlagen und geradlinige Strömung). Die Benennung der einzelnen Wetterlagen wurde auf eine 16-teilige Gliederung festgelegt (LAUSCHER, 1972). Tabelle 3-4 zeigt die 16 Wetterlagen, wie sie SCHÜEPP in WILLFAHRT (1959) in ein Schema nach Strömung und Witterungscharakter eingeordnet hat.

Tab. 3-4: Schema der (Gross-) Wetterlagenklassifikation nach LAUSCHER (abgeändert nach: WILLFARTH, 1959; SCHÜEPP, 1968; BARRY and PERRY, 1973).

Wit- terungs- charakter	Strömung			Advektiv								
	Hoch	Sattel	Tief	N	NW	W	SW	S	SE	E	NE	
antizyklonal (Absinken)	Hochdruck			Hochdruck-Randlage								
	H	H_z	h	HF							HE	
indifferent (~horizontal)	flache Druckverteilung			geradlinige Strömung								
	antiz.	indiff.	zykl.	N	NW	W	SW	S				
zyklonal (Aufsteigen)	Tiefdruck			Tiefdruck-Randlage								
	Vb	TR	TM		TB		TwM	TS				

LAUSCHER (1954) beschreibt die fünf Gruppen mit ihren 16 Wetterlagen wie folgt:

- 1) "*Hochdruck* H mit den Nebenformen 'Zonale Hochdruckbrücke' Hz (vom Azorenhoch zu einem Hoch über Osteuropa) und dem 'Zwischenhoch' h, dem 'kalten' Hoch zwischen zwei Gebilden tieferen Druckes. (...)
- 2) *Hochdruck-Randlagen*, bei denen Österreich am Rande eines hier überwiegend noch antizyklonal wirksamen Hochdruckgebietes liegt. (...) die Kerne des Hochdruckgebietes (lagen) überwiegend in drei bestimmten Gebieten, entweder über Osteuropa (HE = Hoch im Osten) oder (nach F. BAUR Nomenklatur) über Fennoskandien (HF). (...)
- 3) *Weiträumig geradlinige Höhenströmung* (N, NW, W, SW und S), nach der Häufigkeit gipfelnd in den in jeder Jahreszeit vorkommenden und überaus kennzeichnenden 'Westwetterlagen'.
- 4) *Tiefdruck-Randlagen*. Die Tiefkerne liegen zumeist über den Britischen Inseln (TB). (...) Auch über dem westlichen Mittelmeer können ziemlich beständige und bei uns noch sehr wirksame Tiefdruckzentren vorkommen (TwM). (...) Eine sehr häufige und für das ostalpine Wetter sehr wichtige Wetterlage sind die Tiefdruckgebiete, welche im Süden (daher TS, d.h. Tief im Süden) von West nach Ost über das Mittelmeer, eventuell auch über den Balkan vorbeiziehen. (...)
- 5) *Tiefdruck*, und zwar die eben erwähnten Vb-Lagen, Tiefdruckrinnen oder Tröge (TR), sowie Tiefdruckgebilde mit Kernen über Mitteleuropa (TM)." (LAUSCHER, 1954).

Neben der Fokussierung auf den Ostalpenraum unterscheidet sich die LAUSCHER-Klassifikation in weiteren Punkten von der Grosswetterlagenklassifikation nach HESS/BREZOWSKY. Die ostalpine Wetterlagenklassifikation enthält zusätzlich die Lagen h, TwM, Ts, Vb und Tr. Einige Wetterlagen der HESS/BREZOWSKY-Klassifikation wurden weggelassen, weil sie für die Witterung in Österreich nicht von Bedeutung waren, oder sie wurden zusammengefasst, weil bei der Ostalpinen Wetterlagenklassifikation nach LAUSCHER (1976) "auf keinen Fall zu viele Lagen unterschieden werden (sollten), da dies die Anwendung nur erschwert." Zum Beispiel wurden die beiden Lagen 'Hoch Fennoskandien' und 'Hoch Nordmeer' zu 'Hoch Fennoskandien' zusammengefasst. Unterschiede sind auch bei der Klassierung einzelner Tage festzustellen, die bei LAUSCHER oft anders klassiert sind, als bei den europäischen Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY. So tritt z.B. "Westwetter" bei den HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen viel häufiger auf als bei LAUSCHER. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich der Wetterablauf bei "Westlagen" in Westeuropa und im Ostalpengebiet wesentlich unterscheiden, was dazu führt, dass diese Lagen in den Ostalpen oft den Tiefdruckrinnen zugeordnet werden (LAUSCHER, 1954).

Die ostalpine Wetterlagenklassifikation wurde schon verschiedentlich in synoptisch-klimatologischen Arbeiten verwendet. Ein nahezu vollständiges Verzeichnis der Arbeiten, die im Zusammenhang mit der Wetterlagenklassifikation der Ostalpen stehen, findet sich in LAUSCHER (1972, 1976, 1982 und 1985).

3.1.4 Ein synoptisches Kalendarium für den Alpenraum von GRESSEL

Anfangs der 50^{er} Jahre begann GRESSEL, ein "synoptisches Kalendarium" für den Alpenraum zu entwickeln. Im Gegensatz zu den bis dahin entwickelten Klassifikationsschemen, die nur einen Momentanzustand des Wetters als "Wetterlage" bezeichneten, wollte er besonders die dynamischen Prozesse betonen. Das Gebiet, welches durch diese Klassifikation abgedeckt wird, ist der Alpenraum. Eine präzisere Abgrenzung wird von GRESSEL (1954a, 1954b, 1959 und 1978) nicht beschrieben.

Klassifikationskriterien

GRESSELS Klassifikation basiert auf den grossräumigen Strömungsverhältnissen am Boden und in der Höhe, von einer zentralen Stelle über dem Alpengebiet aus betrachtet (GRESSEL, 1954b). Die Kriterien zur Einteilung eines bestimmten Tages sind nicht die Position der Druckgebilde selbst, sondern deren Bewegungen (Kinematik) und Positionsänderungen. Täglich werden mehrere Wetterkarten zur Klassierung herangezogen, und es werden auch die Vor- und Folgetage beachtet, um die Kontinuität bei der Darstellung des Wettergeschehens beizubehalten (GRESSEL, 1954b).

Typisierung

Eine Klassifikation, die die Dynamik und die Entwicklungsvorgänge im Wettergeschehen zum Ausdruck bringen soll, muss in der Symbolgebung sehr flexibel sein. Es ist daher nicht erstaunlich, dass zur genauen Darstellung der Entwicklung der Isobarenkonfiguration eine relativ grosse Anzahl von Symbolen und damit viele verschiedene Typen notwendig sind.

So entstand ein Klassifikationsverfahren mit insgesamt 75 Einzeltypen, welche in GRESSEL (1954b) aufgeführt und beschrieben sind. Die 75 Einzeltypen lassen sich in 6 Hauptgruppen einteilen, welche in Tabelle 3-5 bezeichnet und erläutert sind.

Tab. 3-5: Die Hauptgruppen der Klassifikation von GRESSEL (Quellen: GRESSEL, 1954b und 1959).

Nr.	Gruppenbezeichnung	Kurzbeschreibung
I	Hochdruckgebiete	Keine einheitlich gerichtete, grossräumige Strömung über dem Alpenraum.
II	Tiefdruckgebiete	Keine einheitlich gerichtete, grossräumige Strömung über dem Alpenraum.
III	Antizyklonaler Strömungsverlauf	Wetterentwicklungen, bei welchen Hochdruckgebiete aus gegebener Richtung gegen das Alpengebiet keilen.
IV	Zyklonaler Strömungsverlauf	Allgemein vorherrschende grossräumige zyklonale Strömung im Alpenraum bei Fehlen von charakteristischen Druckzentren über dem Alpengebiet.
V	Kombinierte Vorgänge	Wetterentwicklungen, bei welchen der Charakter der grossräumigen Witterung durch einen antizyklonalen oder zyklonalen Strömungsverlauf gegeben ist, neben welchem sich noch eine Mittelmeerdepression oder ein Vb-Tief gebildet hat, oder Vorgänge, bei welchen zwei verschiedene, antizyklonale und zyklonale, Strömungen auftreten.
VI	Gradientschwache Vorgänge	Gradientschwache Wetterentwicklung mit flacher Luftdruckverteilung über dem Alpenraum

Um dieses Kalendarium der 75 Einzeltypen auch statistisch und dynamisch-klimatologisch bearbeiten zu können, wurde die Klassifikation auf 19 Typen reduziert (GRESSEL, 1978). Dabei musste auf die Darstellung der genauen synoptischen Verhältnisse verzichtet werden, jedoch nicht auf den kausalen Zusammenhang zur grossräumigen Wetterentwicklung. Die 19 Wettertypen der vereinfachten Klassifikation von GRESSEL sind in der Tabelle 3-6 beschrieben.

Tab. 3-6: Beschreibung der vereinfachten Klassifikation mit 19 Wettertypen nach GRESSEL (Quellen: GRESSEL 1954a, 1954b, 1959 und 1978).

Gr.	Nummer(n)	Symbol	Beschreibung
I	1	H	Hochdruckeinfluss (stationär, zentral, kurzzeitig, lokalalpin oder Hochdruckbrücke) bei Fehlen einer einheitlich grossräumigen Strömung
II	2	T	Tiefdruckeinfluss (stationär, zentral, kurzzeitig, lokalalpin oder Tiefdruckrinne) bei Fehlen einer einheitlich grossräumigen Strömung
II	3	Tsa	Tiefdruckgebiet südlich der Alpen zwischen Golf von Genua und dem Balkan, welches vorwiegend allein das Wettergeschehen im Alpenraum bestimmt.
III und IV	4 - 11	N, NE, E, SE, S, SW, W, NW	Allgemeine Strömungsrichtung im Alpenraum bei Fehlen von charakteristischen Druckzentren über dem Alpengebiet.
V	12 - 17		Symbole für kombinierte Vorgänge, also Angabe eines Strömungsverlaufes der grossräumigen Zirkulation oder eines Druckzentrums mit einem Tiefdruckgebiet südlich der Alpen, welches auf seiner Zugstrasse vom Golf von Genua bis zum Balkan die Wetterentwicklung im Alpengebiet beeinflusst.
V	12	W + Tsa	grossräumige antizyklonale oder zyklonale W-NWStrömung mit Tiefdruckgebiet südlich der Alpen
V	13	N + Tsa	grossräumige antizyklonale oder zyklonale N-NEStrömung mit Tiefdruckgebiet südlich der Alpen
V	14	E + Tsa	grossräumige antizyklonale oder zyklonale EStrömung mit Tiefdruckgebiet südlich der Alpen
V	15	S + Tsa	grossräumige antizyklonale oder zyklonale S-SEStrömung mit Tiefdruckgebiet südlich der Alpen
V	16	W + Vb	grossräumige antizyklonale oder zyklonale W-NWStrömung mit einem Vb-Tief
V	17	N + Vb	grossräumige antizyklonale oder zyklonale N-NEStrömung mit einem Vb-Tief
V	18	K	Kombinierte Vorgänge bei welchen über dem Alpengebiet entweder zwei grossräumige Strömungen aus verschiedener Richtung auftreten (z.B. S, SW oder W im westliche, E oder SE im östlichen Teil) oder ein Teil des Alpenraumes durch Hochdruckeinfluss, der andere durch eine grossräumige Strömung charakterisiert wird. (z.B. W im Westen, Einfluss eines Resthochs im Osten oder ein Resthoch im Westen bei grossräumiger Ostströmung im Osten)
VI	19	G	Gradientschwache Wetterentwicklung mit flacher Luftdruckverteilung über dem Alpenraum

3.1.5 Wassertypen für die Britischen Inseln nach LAMB

Zu Beginn der 50^{er} Jahre entwickelte LAMB eine Wassertypenklassifikation für die Britischen Inseln, die auf dem einfachen Schema von LEVICK aufbaut (BARRY and PERRY, 1973).

Die Grösse des Gebietes, welches durch diese Klassifikation erfasst wird, erstreckt sich von 50° N bis 60° N und von 10° W bis 2° E (siehe Abb. 3.3, Kap. 3.2).

Klassifikationskriterien

Die Klassifikation befasst sich mit der Position und den Zugbahnen der Bodendruckzentren, bezieht heute aber auch die Höhenströmung mit ein. Diese steuert die Bodendruckzentren und beeinflusst massgeblich den Charakter des Wetterablaufes während mehrerer Tage über den Britischen Inseln. Die Zugehörigkeit eines bestimmten Tages zu einem LAMB-Typus kann allein aus den Druckmustern der Bodenkarten abgeleitet werden. Heute werden dazu 4 Karten pro Tag verwendet (00, 06, 12 und 18 UTC). Früher waren es je nach Verfügbarkeit 1 bis 3 Karten (LAMB, 1972).

Durch die alleinige Verwendung des Bodendruckes war es möglich, die Klassifikation bis ins Jahr 1861 zurückzuführen.

Typisierung

In der Klassifikation der Wassertypen für die Britischen Inseln werden 7 Haupt- oder Basistypen unterschieden, welche in Tabelle 3-7 beschrieben sind. Verschiedene Musterbeispiele für jeden Haupttyp sind in LAMB (1972) zu finden.

Tab. 3-7: Definition der Basistypen der Wassertypisierung der Britischen Inseln (Quelle: LAMB, 1972).

Basiswassertyp	Beschreibung / Kriterien
antizyklonal	Hochdruckgebiete erstrecken sich über das Gebiet der Britischen Inseln oder liegen sehr nahe. Auch Sattel-Situationen.
zyklonal	Tiefdruckgebiete stagnieren über den Britischen Inseln oder ziehen häufig darüber hinweg. Für diesen Typ sollte das Tiefdruckgebiet über Grossbritannien liegen oder die zentrale Isobare eines 4-5 hPa Abstandes sollte zumindest einmal während des Tages über dem Festland von England oder Irland liegen. Auch Tage zwischen dem Durchzug von Zyklonen werden zu diesem Typ gezählt, falls die Isobaren die zyklonale Krümmung beibehalten oder die Haupttiefdruckachse über dem Gebiet bleibt.
west	Südlich (gelegentlich auch südwestlich oder südöstlich) der Britischen Inseln herrscht hoher und nördlich davon tiefer Druck.
nordwest	Das Azorenhoch ist nordostwärts gegen die Britischen Inseln oder nördlich über den Atlantik westlich der Küste von Grossbritannien verschoben. Tiefdruckgebiete ziehen südost- oder ostsüdostwärts von Island gegen die Nordsee und erreichen ihre grösste Intensität über Skandinavien oder dem Baltikum.
nord	Hoher Druck herrscht westlich und nordwestlich der Britischen Inseln, besonders über Grönland. Manchmal entsteht ein Hochdruckgürtel über dem Atlantik bis zum Azorenhoch. Tiefdruckgebiete ziehen süd- oder südostwärts der norwegischen See vorbei.
ost	Hochdruckgebiete über Skandinavien, die sich bis Island ausbreiten können. Tiefdruckgebiete zirkulieren über dem westlichen Nordatlantik und in der Region Azoren-Spanien-Biskaya.
süd	Hoher Druck über Zentral- und Nordeuropa. Atlantische Tiefdruckgebiete werden westlich der Britischen Inseln blockiert oder ziehen nord- oder nordostwärts der Küste entlang.
unklassierbar	<ul style="list-style-type: none"> • Tage mit chaotischem Druckmuster (Druckverteilung sehr flach und/oder Druckgebilde nur klein) • Auftreten von Typen, die in der Klassifikation nicht vorgesehen sind (z.B. nord-süd, west-ost, antizyklonal-zyklonal) • schnelle Änderung des Druckmusters innerhalb eines Tages

Zu den 7 Basistypen kommen 19 Mischtypen, welche die Eigenschaften von 2 oder 3 Haupttypen vereinen (vgl. Definitionen der Mischtypen in LAMB, 1972). Insgesamt ergeben sich somit 27 Typen (7 Basistypen, 19 Mischtypen und 1 Typ für unklassierbare Tage).

Sollen für statistische Zwecke nur die Basistypen ausgewertet werden, so wird jeweils $\frac{1}{2}$ oder $\frac{1}{3}$ Tag des Mischtyps den jeweiligen Haupttypen zugeordnet.

Die Subjektivität in der Klassifikation soll durch folgende 3 Punkte möglichst gering gehalten werden (LAMB, 1972).

- 1) Neben den 7 Haupttypen können auch sogenannte Mischtypen zugeordnet werden. Ein Mischtyp ist dann zuzuordnen, wenn der entsprechende Tag die besonderen Merkmale mehrerer (meist 2-3) Haupttypen erfüllt.
- 2) Es müssen nicht alle Tage einem Haupt- oder Mischtyp zugeordnet werden. Es gibt auch eine Gruppe für unklassierbare Tage.
- 3) Die Klassifikation eines einzelnen Tages ist meist schwierig und könnte daher durch verschiedene Meteorologen zu unterschiedlichen Typen zugeordnet werden. Diese Fehlerquelle wird vermindert, wenn Sequenzen von 3 bis 5 Tagen betrachtet werden, wodurch das grossräumige Muster besser erkennbar wird und dadurch die Zuordnung eher gleich ausfällt. Dadurch verbessert sich auch die Nachvollziehbarkeit der Klassifikation.

Bei den Wettertypen für die Britischen Inseln handelt es sich wohl um die längste Zeitreihe einer manuellen Klassifikation, die auch eine grösstmöglichen Homogenität aufweist. Die gesamte Zeitreihe (1861 - 1968) wurde von LAMB selbst in nur einem Jahr erneut klassiert. Dabei verwendete er bewährte Praktiken und Urteilkriterien, die als konstant angesehen werden können. Er ergriff mehrere Vorsichtsmassnahmen, um Inhomogenitäten, die durch Änderungen der Praktiken entstehen können, zu vermeiden. Unter anderen klassierte er die einzelnen Jahre in beliebig zufälliger Reihenfolge und extreme Jahre wurden danach noch einmal klassiert (LAMB, 1972).

3.1.6 Wetterlagen der synoptischen Klassifikation nach SCHÜEPP

"Die vorliegende witterungsklimatologische Einteilung ist das Resultat einer langen Entwicklungsgeschichte, die sich über ein Vierteljahrhundert erstreckt...." schreibt SCHÜEPP (1979). Erste Ideen zu dieser Einteilung wurden von SCHÜEPP in den Jahren 1954 und 1957 veröffentlicht. Eine vollständige Beschreibung des "Kalenders der Wetter- und Witterungslagen" erfolgte 1968 (SCHÜEPP, 1968).

Die synoptische Wetterlagenklassifikation nach SCHÜEPP basiert auf den meteorologischen Verhältnissen innerhalb eines verhältnismässig kleinen Gebietes von 2 Breitengraden Radius (rund 222 Kilometer) um den Zentralpunkt 46.5° N und 9° E, der sich ungefähr in der Mitte des Alpenbogens bei der Kammlinie im Gebiet des Rheinwaldhorns befindet (SCHÜEPP, 1979; vgl. Abb. 3.2).

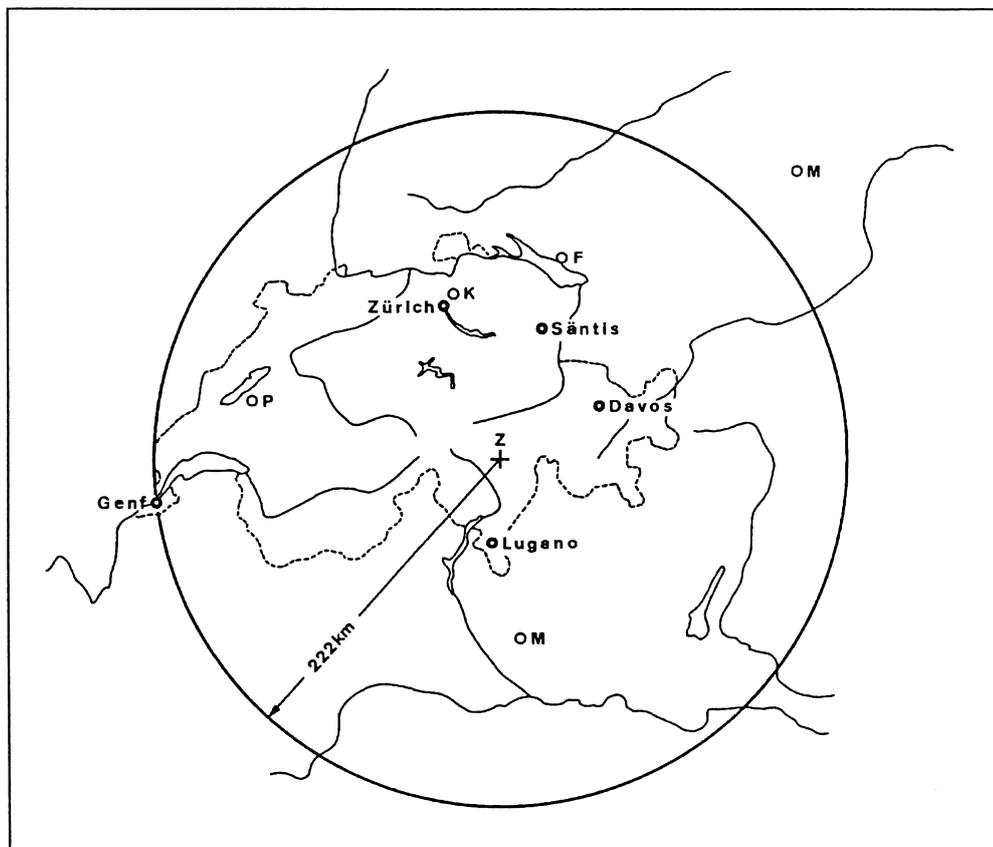


Abb. 3.2: Lage und Gebietsgrösse für die Wetterlagen nach SCHÜEPP (Quelle: KIRCHHOFER, 1971).
(Zentralpunkt (Z) = 46.5° N / 9° E, F = Fridrichshafen, K = Kloten-Flughafen, P = Payerne,
M (Alpennordseite) = München, M (Alpensüdseite) = Mailand).

Die relativ kleine Gebietsausdehnung wird durch SCHÜEPP (1979) mit der Lage der Schweiz in einer Drei-Regionen-Ecke Europas, in welcher West-, Mittel- und Südeuropa zusammenstossen, begründet. Die Grenze zwischen West- und Mitteleuropa wird im Raum Vogesen-Jura angesetzt, diejenige zwischen Südeuropa und den anderen beiden Regionen (West- und Mitteleuropa) über dem Alpenkamm. Die vorliegenden Ausführungen stellen eine Zusammenfassung aus SCHÜEPP (1979) dar.

Klassifikationskriterien

Als Grundlage für die Einteilung dienen die charakteristischen Wetterelemente Bodendruckverteilung, Windverteilung und -stärke sowie Höhenlage der Druckflächen im 500 hPa-Niveau.

Um eine gute Charakterisierung zu erhalten, werden die *beiden* Höhenstufen Bodenniveau und 500 hPa-Fläche einbezogen.

In erster Linie entscheidet die für den Wettercharakter massgebende Luftbewegung über die Gruppenzuteilung.

Typisierung

SCHÜEPP (1979) unterscheidet 3 Haupttypen:

- 1) **Konvektive Lagen** mit geringen Druckgradienten in den Bodenwetterkarten:
In der Höhe können ebenfalls geringe Winde auftreten oder mässige Strömungen bis 49 Knoten (ca. 90 km/h). Die Konvektiven Lagen sind charakterisiert durch wesentliche vertikale Windkomponenten (grossräumiges Aufsteigen, Absinken oder kleinräumiges Auf und Ab bei flachen Druckverteilungen). Die konvektiven Lagen treten hauptsächlich im Sommerhalbjahr auf, wenn die thermischen Gegensätze zwischen Pol und Äquator gering sind, weil am Pol die Sonne 24 Stunden über dem Horizont steht.
- 2) **Advektive Lagen** mit grösseren Druckgradienten sowohl in den Boden- als auch in den Höhenwetterkarten:
Die Strömung über einem Gebiet von etwa vier Breitengraden (ca. 450 km) weist in den beiden Höhenlagen eine einheitliche Richtung auf. Die beiden Richtungen Boden und Höhe können dabei gleich sein, sogenannte Gleichstromlagen, wie sie bei einer einheitlichen Luftmasse ohne Fronten auftritt. Boden- und Höhenströmung können aber auch verschieden sein (Links- oder Rechtsdrehung mit der Höhe bei der Zufuhr von kalter bzw. warmer Luft). Die advektiven Lagen treten vorwiegend in den kälteren Jahreszeiten auf, wenn am Pol Nacht und Kälte herrscht, in den Subtropen die Sonne aber immer noch verhältnismässig hoch steht und stark aufheizt.
- 3) **Mischlagen** mit wesentlichen vertikalen und horizontalen Luftbewegungen:
Dazu gehören aktive Wirbel über dem Gebiet (Advektion und Konvektion) und Lagen mit windschwachem (konvektivem) Wetter im einen Niveau (Boden oder Höhe) aber wesentlichen Strömungen im anderen Niveau.

Die drei Hauptgruppen lassen sich in 8 Grundtypen (vgl. Tab. 3-8) unterteilen.

Tab. 3-8: Die 8 Grundtypen der Wetterlagen nach SCHÜEPP (Quelle: SCHÜEPP, 1979).

Hauptgruppen	Grundtypen	Bemerkung
<i>Konvektiven Lagen</i>	1. Hochdrucklagen 2. Flachdrucklagen 3. Tiefdrucklagen	(die Angaben Hoch, Flach und Tief beziehen sich auf die Höhenlage der 500 hPa-Fläche)
<i>Advektive Lagen</i>	4. Westströmung 5. Nordströmung 6. Ostströmung 7. Südströmung	(die Angaben West, Nord, Ost und Süd beziehen sich auf die Windrichtung im 500 hPa-Niveau)
<i>Mischlagen</i>	8A. Wirbellagen 8B. Höhenstrom-Jetlagen 8C. Bodenstromlagen	

Jeder der 8 Grundtypen kann in 5 Unterklassen weiter unterteilt werden, wobei 8A nicht unterteilt, 8B und 8C in je zwei Untertypen zerfallen. Insgesamt ergeben sich daraus 40 Klassen (vgl. Tab. 3-9).

Tab. 3-9: Einteilung der 40 Wetterlagen nach SCHÜEPP (Abkürzungen vgl. Abkürzungsverzeichnis).

	Höhenluft- druck	Höhenwind				
		schwach	West	Nord	Ost	Süd
Konvektive Lagen	Hoch	+Ho	+Hw	+Hn	+He	+Hs
	Flach	Fo	Fw	Fn	Fe	Fs
	Tief	-Lo	-Lw	-Ln	-Le	-Ls
Advektive Lagen	Höhenströ- mung	Jet	Gleichstrom		Gegenstrom	
			Höhenluftdruck übernormal		Höhenluftdruck unternormal	
	West	Wj	+Wp	-Wp	+Wx	-Wx
	Nord	Nj	+Np	-Np	+Nx	-Nx
	Ost	Ej	+Ep	-Ep	+Ex	-Ex
	Süd	Sj	+Sp	-Sp	+Sx	-Sx
Mischlagen	Wirbel	Xx		Höhenluftdruck übernormal		unternormal
	Höhen- stromjet			+Xj	-Xj	
	Boden- strom			+Xo	-Xo	

3.2 Eignung der Wetterlagenklassifikationen für das witterungsklimatologische Downscaling

Die Alpen nehmen in Mitteleuropa eine besondere Stellung im Wettergeschehen ein (GRESSEL, 1954b). Mit ihrer Ausdehnung über rund 11 Längen- und 4 Breitengrade und ihrer Hörnchenform stellen sie ein beachtliches Hindernis im Strömungsfeld der Atmosphäre dar. Sie modifizieren die mesoskalige Strömung thermisch und dynamisch (vgl. Kap. 1.2).

Um eine Aussage über die Wetterlagenklimatologie (Veränderung der Wetterlagen) im Alpenraum machen zu können, braucht es eine Datengrundlage, die

- a) entweder das Alpenklima direkt repräsentiert oder die Rückschlüsse auf das Alpenklima zulässt,
- b) möglichst weit in die Vergangenheit zurückreicht oder zurückverfolgt werden kann, und
- c) möglichst einfach aus Gitternetzdaten abgeleitet werden kann, d.h. möglichst klar definiert ist.

Die im vorangehenden Kapitel (3.1) vorgestellten manuellen Klassifikationstechniken von DZERDZEEVSKII, HESS/BREZOWSKY, LAUSCHER, GRESSEL, LAMB und SCHÜEPP berücksichtigen meist nur einen Teil der oben genannten Datengrundlagen. An dieser Stelle sollen deshalb die 6 vorgestellten Klassifikationsmethoden einander gegenübergestellt werden, mit dem Ziel, die geeignetsten Klassifikationsmethoden für das in Kapitel 2.3 beschriebene Verfahren des synoptischen Downscalings für den Alpenraum zu bestimmen.

Im Folgenden werden die einzelnen Teilaspekte (a bis c) näher beleuchtet und die Vor- und Nachteile der einzelnen Klassifikationen gegeneinander abgewogen. Eine Gesamtübersicht über die einzelnen Kriterien der 6 betrachteten Wetterlagenklassifikationen enthält Tabelle 3-10.

Tab. 3-10: Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften der 6 Wetterlagenklassifikationen. (> = Klassifikationen werden bis heute Fortgeführt).

	DZERDZEEVSKII	HESS-BREZOWSKY	GRESSEL	LAUSCHER	LAMB	SCHÜEPP
Entstehungsjahr	1946	1943	1954	1947	1950	seit 1954
Skala	Macro α	Macro β	Macro β - Meso α	Meso α	Meso α	Meso α - Meso β
Perimeter (räumliche Ausdehnung)	Nordhemisphäre (25° N - 90° N)	Nordatlantik bis Ural und Grönland bis Nordafrika (~30° N - 80° N / ~20° W - 60° E)	Alpenraum (keine Präzisierung)	Ostalpen (kein präzisieren Angaben)	Britische Inseln (50° - 60° N / 10° W - 2° E)	Schweiz mit angrenzenden Gebieten (222 km-Radius um den Zentralpunkt 46.5° N / 9° E)
Grundlage der Definition (z.B. Luftmasse, Druckfeld, Strömung, etc.)	Position der Bodendruckzentren; Position der Tröge und Rücken in der Höhe (elementare Zirkulationsmechanismen)	Lage der steuernden Zentren (Höhenthoch- und Höhentiefdruckgebiet), Erstreckung der Frontalzone	grossräumige Strömungsverhältnisse am Boden und in der Höhe in Bezug auf den Alpenraum	für die Ostalpen wetterbestimmende Druckgebilde im Meeresniveau (ergänzend auch Höhenströmung)	Position und Zugbahn der Bodendruckzentren mit Einbezug der Höhenströmung	Wetterelemente: Bodendruck, Wind, Höhenlage der Druckfläche im 500 hPa-Niveau
definierte Dauer	4 Tage, seltener 3 Tage	mindestens 3 Tage	1 Tag mit Einbezug des vorangehenden und nachfolgenden Tages	1 Tag	Sequenz von ca. 3 - 5 Tagen	1 Tag
mögliche Zusammenfassungen der einzelnen Lagen	4 Zirkulationsformen 13 Haupttypen	3 Zirkulationsformen 10 Grosswettertypen 1 Lage für unklassierbare Tage	6 Haupttypen (19 Typen in der vereinfachten Klassifikation)	5 Gruppen	7 Haupttypen + 19 Mischtypen + 1 für unklassierbar	3 Hauptklassen 8 Grundtypen
Anzahl Lagen	41	30	75	16	27	40
Klassifikationszeitraum	1899 - >	1881 - >	1920 - 1975 ²	1946 - >	1861 - >	1945 - >

² Aufdatierungen sind von GRESSEL (1978) bis 1975 bekannt.

a) *Perimeter und Skalenniveau*

Mit der Klassifikation von DZERDZEEVSKII wird praktisch die ganze Nordhemisphäre erfasst. Einzelne Sektoren von rund 60 Längengraden Erstreckung spielen bei polaren Kaltluftausbrüchen eine besondere Rolle. Die Alpen mit einer zonalen Ausdehnung von rund 11° , stellen darin nur einen kleinen Ausschnitt dar. Es ist offensichtlich, dass diese Klassifikation nicht in der Lage ist, mesoskalige Prozesse zu erfassen, die für den Alpenraum wichtig sind. Die Grosswetterlagen-Klassifikation von HESS/BREZOWSKY, die das nächst kleinere Gebiet abdeckt, bezieht ganz Europa in die Klassifikation mit ein. Sie operiert auf dem Macro β Skalenniveau und berücksichtigt den Alpenraum nur randlich. Durch die Betrachtung von Westeuropa ist sie jedoch in der Lage, die grossräumigen Einflüsse auf den Alpenraum zu erfassen. Die LAMB-Wettertypen stellen einen Spezialfall dar und beziehen sich ausschliesslich auf die Britischen Inseln. Der Alpenraum liegt bei diesem Klassifikationsschema deutlich ausserhalb des für die Klassifikation berücksichtigten Gebietes. Diese Klassifikation könnte jedoch auf den Alpenraum übertragen werden.

Die Klassifikationen von LAUSCHER, GRESSEL und SCHÜEPP decken den Alpenraum am besten ab. Bei GRESSEL wird die Lage und Grösse des Gebietes nicht weiter spezifiziert, während LAUSCHER das Schwergewicht seiner Klassifikation auf die Ostalpen legt. Das kleinste Gebiet wird mit der SCHÜEPP-Klassifikation abgedeckt. Sie umfasst nur die Schweizeralpen und das angrenzende Tirol. Der schweizerische Alpenraum ist jedoch genau der Raum, der in dieser Arbeit interessiert.

Abbildung 3.3 zeigt in einer Übersicht die Perimeter der betrachteten Klassifikationen.

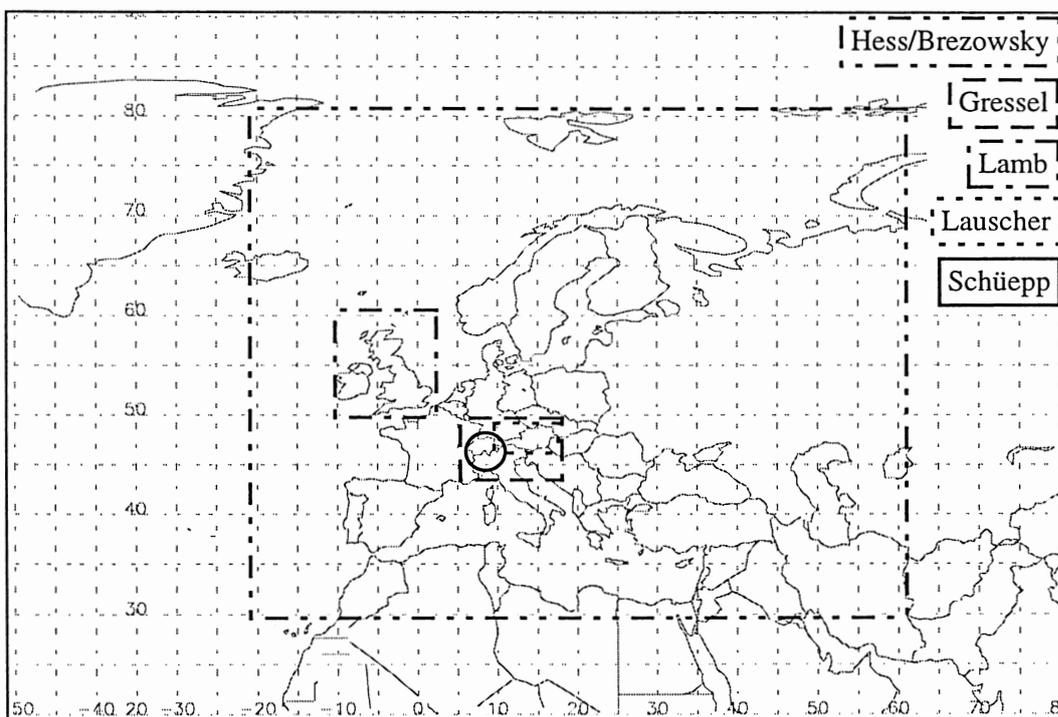


Abb. 3.3: *Gebietsgrösse der verschiedenen Wetterlagenklassifikationen.*

b) Zeitreihendauer

Das zweite wichtige Kriterium fordert eine möglichst lange Zeitreihe.

Die längste Reihe mit einer täglichen Typisierung ab 1861 stellt die LAMB-Klassifikation dar. Durch eine Überarbeitung der gesamten Zeitreihe durch LAMB (1972) stellt sie wohl auch die homogenste Zeitreihe aller Wetterlagenklassifikationen dar.

Die Zeitreihen der Klassifikationen von DZERDZEEVSKII und HESS/BREZOWSKY reichen bis 1899 respektive 1881 zurück. Die HESS/BREZOWSKY-Klassifikation wurde verschiedentlich neu bearbeitet (HESS und BREZOWSKY, 1952 und 1969). Eine Überprüfung der Homogenität dieser Reihe nahmen BÁRDOSSY und CASPARY (1990) vor. Eine vollständige Neuklassierung der gesamten Reihe fand jedoch seit 1952 nicht mehr statt, obwohl 1969 noch eine Änderung bei den Einteilungen vorgenommen wurde (HESS und BREZOWSKY, 1969). KLAUS (1993) schliesst deswegen methodisch begründete Inhomogenitäten (Verwendung der Höhensondierung ab 1952) nicht aus.

Die kürzesten Reihen bilden die Klassifikationen von LAUSCHER und SCHÜEPP, die nur bis in die Mitte dieses Jahrhunderts zurück reichen. Wegen dem expliziten Einbezug des 500 hPa-Höhenneaus in diesen beiden Klassifikationen wäre es im besten Fall möglich, sie noch bis 1935 zurück zu klassieren, weil vor 1935 noch keine regelmässigen Sondierungen durchgeführt wurden.

Die Klassifikation von GRESSEL liegt mit einer 80-jährigen Zeitreihe dazwischen.

c) Definition, Anzahl und Andauer der Wetterlagen

Die Klassifikationen von DZERDZEEVSKII, HESS/BREZOWSKY, LAUSCHER und LAMB basieren auf der Druckverteilung, das heisst, auf der Position der Druckgebilde im Meeresniveau mit allfälliger Berücksichtigung der Zugbahnen (Höhenströmung). GRESSEL berücksichtigt nicht die Druckgebilde selbst, sondern deren Bewegung und Positionsänderung bezüglich eines zentralen Punktes in den Alpen.

Die SCHÜEPP'sche Klassifikation baut auf einzelnen Wetterelementen auf, die aus Wetterkarten herausgelesen oder berechnet werden.

Grundsätzlich wird heute bei der Klassierung aller Wetterlagen ein Höheniveau miteinbezogen. Bei den Klassifikationen von DZERDZEEVSKII, HESS/BREZOWSKY und LAMB kann bei Bedarf die Einteilung allein auf Grund des Bodenniveaus erfolgen. Bei den Klassifikationen von LAUSCHER, GRESSEL und SCHÜEPP ist die Berücksichtigung des 500 hPa-Geopotentials unerlässlich.

Die Anzahl der ausgeschiedenen Wetterlagen oder -typen der 6 Klassifikationen ist unterschiedlich. Tendenziell kann davon ausgegangen werden, dass für ein grösseres Gebiet auch mehr Wetterlagen definiert werden müssen. So verwendet DZERDZEEVSKII für die Nordhemisphäre 41 Lagen, während LAMB für Grossbritannien nur 27 Typen benötigt. LAUSCHER schlägt für die Ostalpen 16 Lagen vor. GRESSEL benötigt in seiner Klassifikation für den gesamten Alpenraum 75 Klassen. Jedoch existiert eine vereinfachte Version von GRESSEL mit nur 19 Typen. Die SCHÜEPP-Klassifikation hebt sich, mit 40 Lagen für das relativ kleine Gebiet der Schweizeralpen, deutlich von den anderen Klassifikationen ab. Da die SCHÜEPP'sche Klassifikation auf einzelnen Wetterelementen aufbaut, ergeben sich viele Kombinationen, die sich nur zum Teil zu Gruppen zusammenfassen lassen.

Auch bei der definierten Andauer der einzelnen Wetterlagen fällt die SCHÜEPP-Klassifikation auf. Bei ihr handelt es sich nämlich um echte *Wetterlagen*. Unter Wetterlage versteht SCHÜEPP (1968) "(...) den Wetterzustand in bezug auf die wichtigen meteorologischen Elemente (Boden-, Höhenwind, Bewölkung bzw. Sonnenscheindauer, Niederschlag, Lufttemperatur und Feuchtigkeit) über einem begrenzten Gebiet während eines kurzen, höchstens *eintägigen* Zeitintervalls. Ist dieses Gebiet von kontinentalen Ausmassen, dann sprechen wir nach BAUR von Grosswetterlagen (...)". Bei allen anderen Klassifikationen, deren zeitliche Ausdehnung mehr als 1 Tag umfasst, müsste korrekterweise

von *Witterungslagen* gesprochen werden. "Bei Witterungslagen tritt an Stelle des kurzen Zeitintervalles eine *mehrtägige* Spanne, in der sich ein annähernd gleichbleibender Typus des Wetters bzw. ein einfach zu typisierender Ablauf einstellt. In unseren Breiten beträgt die Länge eines solchen Zeitintervalls im Durchschnitt etwa drei Tage." (SCHÜEPP, 1968). Dies zeigt sich in der Tatsache, dass bei den meisten Klassifikationen entweder eine Sequenz von mehreren Tagen (meist 3-5 Tage) betrachtet wird, oder dass bei der Zuordnung der Lagen auch der vorangehende und der nachfolgende Tag mitberücksichtigt werden, wie beispielsweise bei der Klassifikation von LAUSCHER, GRESSEL und LAMB.

Schlussfolgerungen

Aus den Ausführungen über die Kriterien a bis c lassen sich folgende Konsequenzen ableiten:

- Direkte Rückschlüsse auf das Alpenklima lassen nur die drei Klassifikationen von GRESSEL, LAUSCHER und SCHÜEPP zu. Das Klima der Schweizeralpen wird am besten durch die SCHÜEPP-Wetterlagenklassifikation repräsentiert. Praktisch keine Rückschlüsse auf das Alpenklima lassen die Wetterlagenklassifikationen von DZERDZEEVSKII und LAMB zu. DZERDZEEVSKII arbeitet auf einem Skalenniveau (Macro α), auf dem der Alpenraum nicht mehr aufgelöst werden kann. LAMB dagegen benutzt zwar ein Skalenniveau, das für den Alpenraum durchaus angebracht wäre, ist aber auf die Britischen Inseln fokussiert, die zu weit von den Alpen entfernt liegen.
- Die längsten Zeitreihen weisen die Klassifikationen von LAMB, HESS/BREZOWSKY und DZERDZEEVSKII auf. Zusätzlich kann bei den beiden Zeitreihen von LAMB und HESS/BREZOWSKY auch davon ausgegangen werden, dass sie einigermaßen homogen sind. Im Gegensatz zu den langen Reihen weisen die Klassifikationen von LAUSCHER und SCHÜEPP nur kurze Zeitreihen auf.
- Eine Herleitung der Klassifikation auf Grund von Gitternetzdaten erscheint am einfachsten für die SCHÜEPP-Klassifikation, da diese klare Klassifikationskriterien aufweist. Am schwierigsten dürfte eine Automatisierung der GRESSEL-Klassifikation sein. GRESSEL betont bei seiner Klassifikation besonders die Dynamik. Gemäss GRESSEL (1954b) müssen, um "die Kontinuität in der Symbolik bei der Darstellung des Wettergeschehens beizubehalten, die vorangehenden und die darauf folgenden Tage in die Beurteilung des Einzeltages miteinbezogen und darnach das betreffende Tagessymbol bestimmt" werden. Es ist offensichtlich, dass eine dynamische Klassierung programmässig viel schwieriger zu erfassen ist, als eine auf einer einzelnen Karte (Momentanzustand) beruhende Klassierung. Für die Wetterlagenklassifikation von LAMB besteht von JONES, HULME und BRIFFA (1993) bereits ein Ansatz zur automatischen Klassierung der Wettertypen.

Keine der sechs Klassifikationen erfüllt die oben geforderten Kriterien vollumfänglich. Das bedeutet, dass keine der Klassifikationen alleine in der Lage ist, das Problem des synoptischen Downscalings für den Alpenraum optimal zu lösen. Die SCHÜEPP-Klassifikation erfüllt zwar zwei wichtige Punkte (a und c), verfügt jedoch nur über eine relativ kurze Zeitreihe. Eine besonders lange Zeitreihe weist die HESS/BREZOWSKY-Klassifikation auf. Sie erfüllt zwar die beiden anderen Kriterien nicht optimal, weist jedoch auch keine gravierenden Mängel auf.

Eine auf den zur Verfügung stehenden Grundlagen aufbauende optimale Lösung wäre die Kombination der beiden Klassifikationen. Durch die Verwendung der HESS/BREZOWSKY-Klassifikation wäre eine lange Zeitreihe gewährleistet. Die SCHÜEPP-Klassifikation liefert eine optimale Lösung für die Abbildung des Klimas des Schweizerischen Alpenraums und verspricht eine einfache Lösung der automatischen Zuordnung auf Grund von Gitternetzpunkten.

4 Kopplung europäischer und alpiner Wetterlagen

Die Ausführungen in Kapitel 3.2 haben gezeigt, dass für das synoptische Downscaling eine Kombination der beiden Wetterlagenklassifikationen von HESS/BREZOWSKY und SCHÜEPP anzustreben ist. Unter Kombination ist in diesem Zusammenhang eine Überführung der einen Klassifikation in die andere und umgekehrt zu verstehen. Ein zentraler Punkt stellt daher die Untersuchung möglicher Zusammenhänge zwischen der HESS/BREZOWSKY- und der SCHÜEPP-Klassifikation dar.

Sollte ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Klassifikationen bestehen, könnte die SCHÜEPP-Klassifikation ebenfalls bis 1881 zurück klassiert werden. Die Zeitreihe der SCHÜEPP-Klassifikation würde dadurch verdoppelt. Für die HESS/BREZOWSKY-Klassifikation würde ein Zusammenhang mit der SCHÜEPP - Klassifikation bedeuten, dass der Alpenraum besser repräsentiert würde. Darauf aufbauend könnte dann die Klimaentwicklung im Alpenraum entsprechend länger und besser verfolgt werden.

4.1 Zusammenhang der Wetterlagenklassifikationen nach SCHÜEPP und HESS/BREZOWSKY

Bei der Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der HESS/BREZOWSKY- und der SCHÜEPP-Klassifikation stellte sich bereits eine erste Schwierigkeit mit der Anzahl ausgeschiedener Lagen beider Klassifikationsschemen. Wie Tabelle 3-10 in Kapitel 3.2 zeigt, umfasst die HESS/BREZOWSKY-Klassifikation 30 Lagen, während die SCHÜEPP-Klassifikation 40 Lagen aufweist. Eine direkte Zuordnung der Lagen beider Klassifikationsschemen ist nicht ohne weiteres möglich. Theoretisch bestünde jedoch die Möglichkeit, einer HESS/BREZOWSKY-Lage mehrere SCHÜEPP-Lagen zuzuordnen. Bei direkter Zuordnung müssten bei zehn HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen jeweils zwei SCHÜEPP-Wetterlagen zugeordnet werden.

In diesem Zusammenhang ist jedoch nicht wichtig, wie manche SCHÜEPP-Lage genau einer bestimmten HESS/BREZOWSKY-Lage zugeordnet wird, sondern dass die Zuordnung *eindeutig* ist. Das bedeutet, dass bei der Klassierung eine bestimmte SCHÜEPP-Lage immer derselben HESS/BREZOWSKY-Lage zugeordnet werden müsste. Dass dies jedoch im beobachteten Zeitraum von 1945 bis 1992 nicht der Fall war, ist bereits aus Abbildung 4.1 ersichtlich, die die Zuordnung der Konvektiven SCHÜEPP-Wetterlagen zu den drei Zirkulationsformen der HESS/BREZOWSKY-Klassifikation zeigt. Um die Lesbarkeit der Graphik zu verbessern, wurden an Stelle der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen nur die drei Zirkulationsformen dargestellt. Jede Zirkulationsform beinhaltet jedoch mehrere Grosswetterlagen.

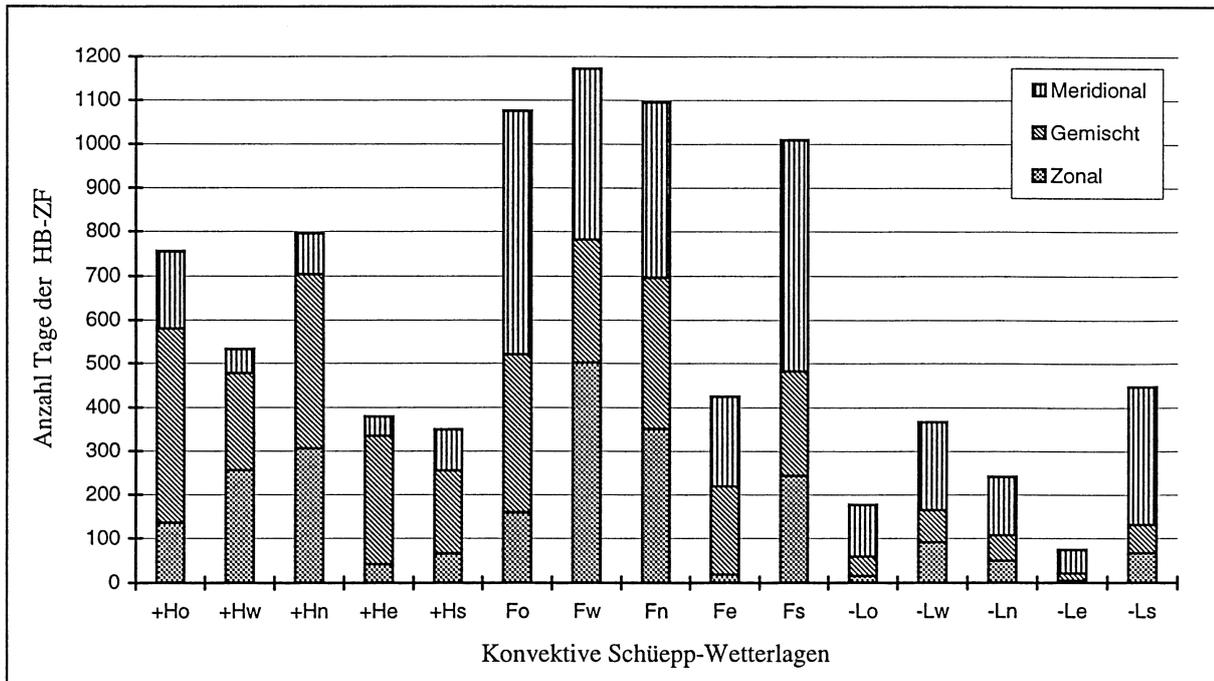


Abb. 4.1: Anzahl Tage der HESS/BREZOWSKY-Zirkulationsformen (HB-ZF), die während den Jahren 1945 bis 1992 den verschiedenen konvektiven SCHÜEPP-Wetterlagen zugeordnet wurden.

Aus Abbildung 4.1 geht hervor, dass praktisch allen konvektiven SCHÜEPP-Lagen alle HESS/BREZOWSKY-Zirkulationsformen zugeordnet wurden (Ausnahme: -Le). Dabei repräsentiert jede Zirkulationsform mindestens eine Grosswetterlage.

Unterschiede lassen sich in der Häufigkeit der Zuordnung feststellen. Im Zeitraum 1945 bis 1992 fielen beispielsweise die SCHÜEPP-Hochdrucklagen mit östlicher Höhenströmung (+He) in den meisten Fällen auf Tage mit HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen der gemischten Zirkulationsform. SCHÜEPP-Flachdrucklagen mit nördlicher Höhenströmung (Fn) wurden zu gleichen Teilen bei Tagen mit zonaler, meridionaler und gemischter Zirkulationsform (HESS/BREZOWSKY) registriert.

Abbildung 4.2 entspricht im wesentlichen der Abbildung 4.1, zeigt jedoch die relativen Anteile der zugeordneten HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen zu den konvektiven SCHÜEPP-Wetterlagen.

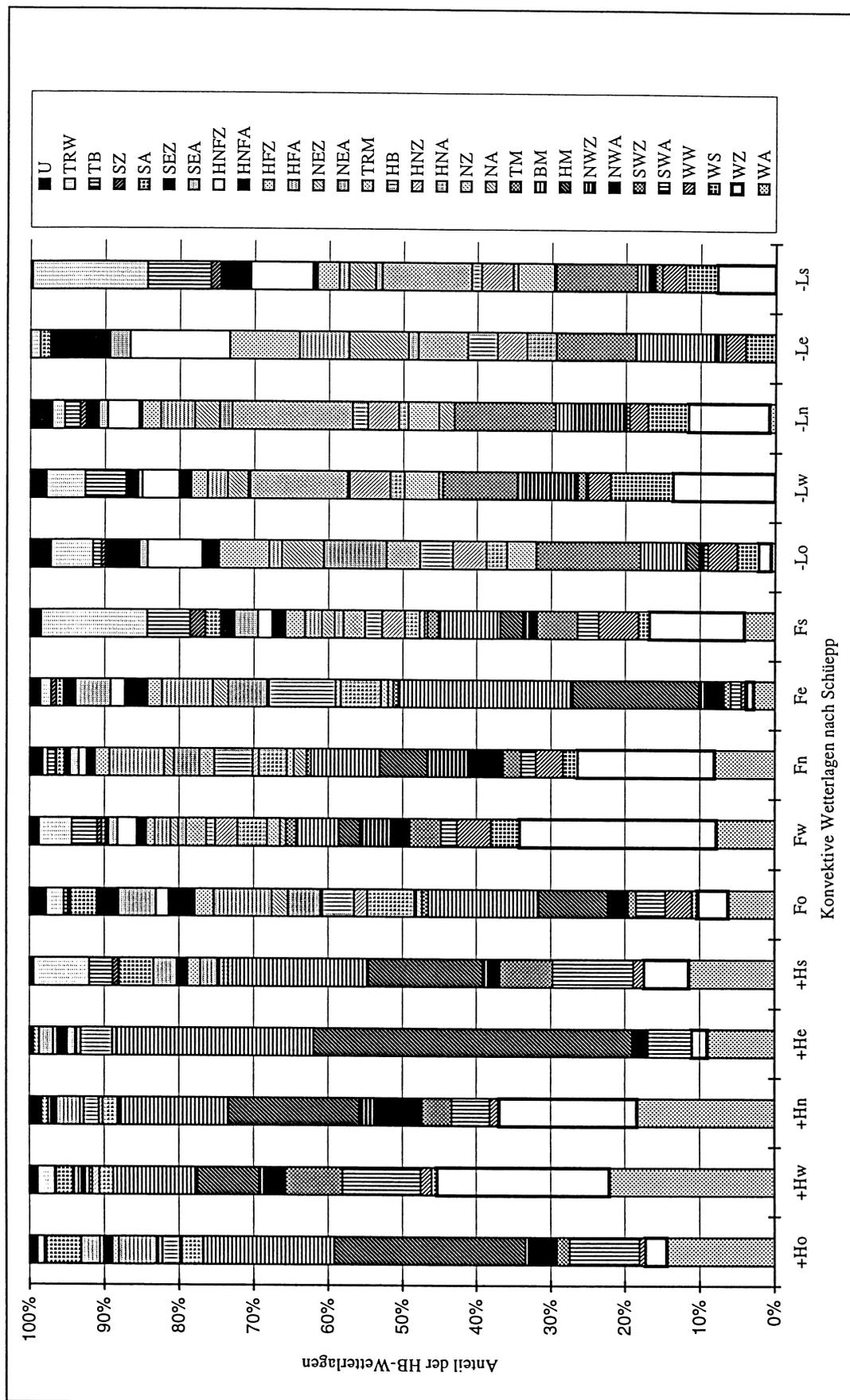


Abb. 4.2: Relativer Anteil aller HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen an den einzelnen SCHÜEPP-Wetterlagen während den Jahren 1945 bis 1992.

Betrachtet man eine bestimmte SCHÜEPP-Wetterlage aus Abbildung 4.2, so lässt sich feststellen, dass immer mehrere HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen zugeordnet werden. Der SCHÜEPP-Hochdrucklage (+He) beispielsweise, wurden nur in 70% aller Tage die beiden HESS/BREZOWSKY-Wetterlagen HM und BM zugeordnet, welches eines der besten Resultate darstellte.

Diese qualitativ ungenügenden Ergebnisse beschränken sich nicht nur auf die konvektiven Lagen sondern zeigen sich auch bei den advektiven Wetterlagen.

Die Abbildungen 4.1 und 4.2 beziehen sich jeweils auf den gesamten Zeitraum von 1945 bis 1992 und umfassen alle Jahreszeiten. Eine weitere Möglichkeit, Zusammenhänge zwischen den beiden Wetterlagenklassifikationen besser aufdecken zu können, bietet eine getrennte Betrachtung nach Jahreszeiten. Diese Betrachtungsweise rechtfertigt sich auch, wenn die Monatsmittel-Karten der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen (siehe Anhang) herangezogen werden. Darauf zeigt sich deutlich eine leichte Verschiebung der Druckzentren von Monat zu Monat. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn eine bestimmte HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlage während den verschiedenen Jahreszeiten zu unterschiedlichen Klassierungen der SCHÜEPP-Wetterlagen führt.

Abbildung 4.3 zeigt die Zuordnung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen zu vier ausgewählten SCHÜEPP-Wetterlagen, während der vier Jahreszeiten. Um die Lesbarkeit zu gewährleisten, wurden an Stelle der Grosswetterlagen die Grosswettertypen verwendet.

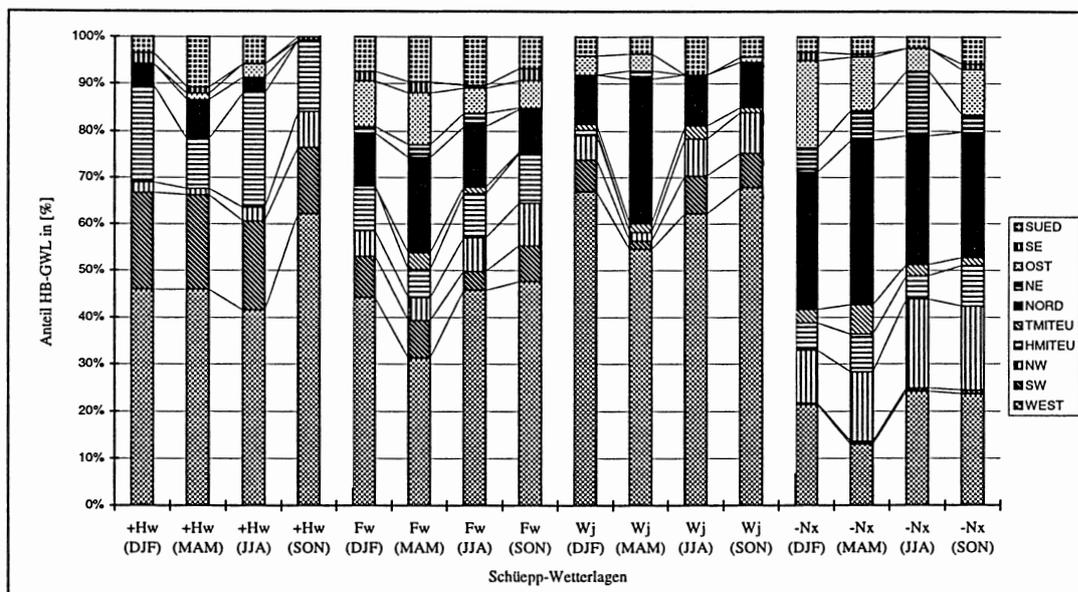


Abb. 4.3: Relativer Anteil der HESS/BREZOWSKY-Grosswettertypen an ausgewählten SCHÜEPP-Wetterlagen im Zeitraum 1945 bis 1992 für alle Jahreszeiten (DJF = Winter, MAM = Frühling, JJA = Sommer, SON = Herbst).

Bei den Hochdrucklagen mit westlicher Höhenströmung (+Hw) werden im Herbst rund 20% mehr West-Grosswettertypen zugeordnet als im Sommer. In den Herbstmonaten von 1945 bis 1992 wurden den +Hw-Lagen keine Nord-, Nordost-, Ost- und Südostlagen zugeordnet, während diese Lagen im Sommer rund 7% und im Frühjahr gar 12% ausmachen. Auch bei der SCHÜEPP-Wetterlage 'Westströmung mit Jet in der Höhe' (Wj) zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den Jahreszeiten. Der Anteil der HESS/BREZOWSKY-Westwettertypen an den SCHÜEPP-Wj-Lagen ist in allen Jahreszeiten über 50%, er kann jedoch im Herbst fast auf 70% ansteigen. Im Frühjahr werden an Wj-Tagen in 30% aller Fälle grossräumig Nordlagen klassiert. In den anderen Jahreszeiten liegt dieser Anteil bei 10%.

Über alle Wetterlagen gesehen ergibt sich, dass die Zuordnung von HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen zu SCHÜEPP-Wetterlagen oder umgekehrt sowohl für den gesamten Zeitraum, als auch für die einzelnen Jahreszeiten sehr unterschiedlich ausfällt und stark variieren kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Zuordnung bietet die Gruppierung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen nach den von RICKLI (1995) aufgestellten Kriterien. Die Gruppierung umfasst die 8 alpin-synoptische Gruppen. Gemäss RICKLI (1995) sollten die in einer Gruppe zusammengefassten HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen auf der Alpennordseite ein ähnliches synoptisches Erscheinungsbild aufweisen. In der Folge sollten daraus zumindest ähnliche Klassierungen bei den SCHÜEPP-Wetterlagen resultieren. Daher wurde für die Abbildung 4.4 eine Zusammenfassung der SCHÜEPP-Wetterlagen nach deren Höhenströmungen vorgenommen. Die daraus entstehenden 6 Gruppen der Höhenströmungen, setzen sich wie folgt zusammen:

- schwache Höhenströmung: +Ho, Fo, -Lo, +Xo, -Xo, Xx
- westliche Höhenströmung: +Hw, Fw, +Wp, -Wp, +Wx, -Wx
- nördliche Höhenströmung: +Hn, Fn, -Ln, +Np, -Np, +Nx, -Nx
- östliche Höhenströmung: +He, Fe, -Le, +Ep, +Ex, -Ex
- südliche Höhenströmung: +Hs, Fs, -Ls, +Sp, -Sp, +Sx, -Sx
- starke Höhenströmung: Wj, Nj, Ej, Sj, +Xj, -Xj

Abbildung 4.4 zeigt, wie sich die 6 Höhenströmungsgruppen der SCHÜEPP-Wetterlagen auf die 8 alpin-synoptischen Gruppen der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen verteilen.

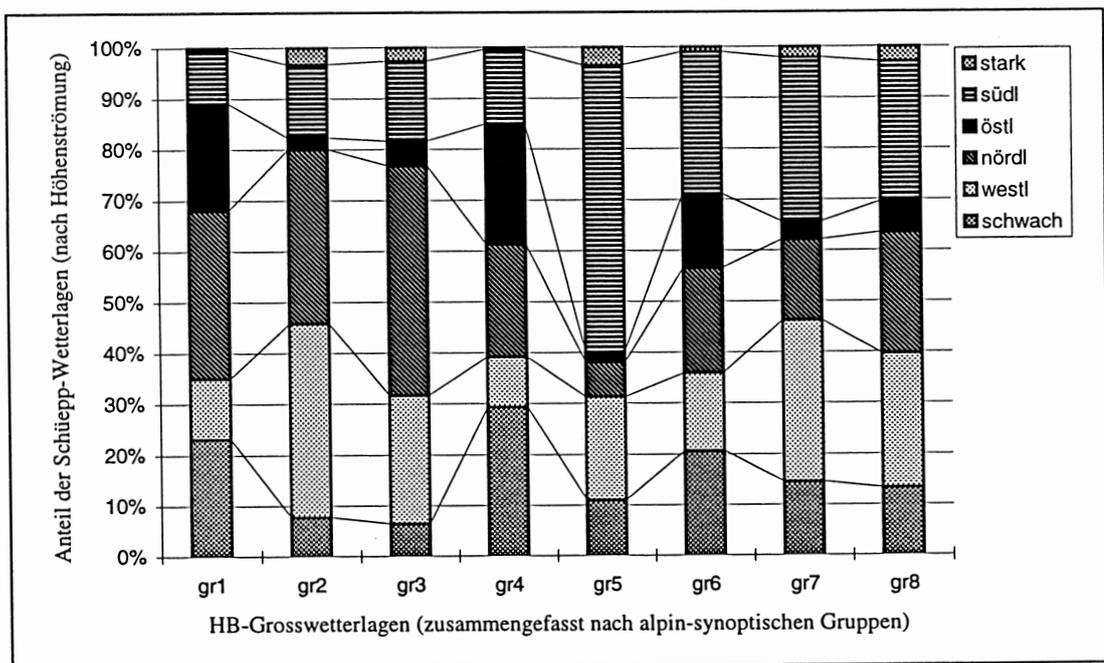


Abb. 4.4: Relativer Anteil der SCHÜEPP-Wetterlagen, zusammengesfasst nach Höhenströmung, an den einzelnen HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen (zusammengesfasst zu den 8 alpin-synoptischen Gruppen).

- Gruppe 1 NWA, BM, NA, HNA, HB, NEA, HFA
 Gruppe 2 WA, WZ, WS
 Gruppe 3 WW, NWZ, NZ, TRM
 Gruppe 4 HM, HNFA, SEA
 Gruppe 5 SA, SZ, TB, TRW
 Gruppe 6 NEZ, HFZ, HNFZ, SEZ
 Gruppe 7 SWA, SWZ
 Gruppe 8 TM, HNZ

Gruppe 2 beispielsweise fasst die HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen WA, WZ und WS zusammen. In dieser Gruppe wird in rund 70% aller Tage eine SCHÜEPP-Wetterlage mit westlicher oder nördlicher Höhenströmung zugeordnet. In den restlichen 30% der Fälle treten aber auch alle übrigen Höhenströmungen über dem Alpenraum auf. SCHÜEPP-Wetterlagen mit westlicher und nördlicher Höhenströmung werden jedoch nicht nur an Tagen mit HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen aus der Gruppe 2 klassiert. Auch für die HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen der Gruppe 3 weisen 70% der Tage SCHÜEPP-Wetterlagen mit westlicher und nördlicher Höhenströmung auf. Die Grosswetterlagen der Gruppen 2 und 3 lassen sich somit kaum voneinander unterscheiden.

In diesem Zusammenhang gilt es auch zu erwähnen, dass die Zuteilung von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich sein kann. Abbildung 4.5 verdeutlicht dies am Beispiel der zweithäufigsten Grosswetterlage 'HM'.

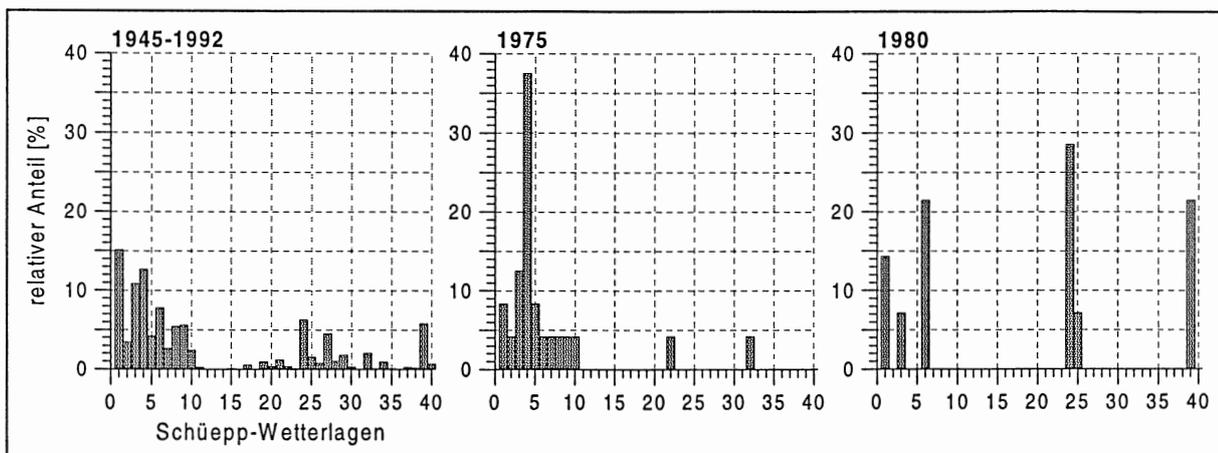


Abb. 4.5: Relativer Anteil der einzelnen SCHÜEPP-Wetterlagen an den Tagen mit der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlage 'HM' für verschiedene Zeiträume; links: 1945 bis 1992, mitte 1975, rechts 1980.

Über die Jahre 1945 bis 1992 gesehen, wurden 46% aller HESS/BREZOWSKY-'Hoch Mitteleuropa'-Grosswetterlagen als SCHÜEPP-Hochdrucklagen (Nr. 1-5 in Abb. 4.5) klassiert. Betrachtet man dagegen das Jahr 1975, so lag der Anteil bei 71%, 1980 nur bei 21.5%. Überdurchschnittlich viele 'HM'-Lagen wurden 1980 als SCHÜEPP-Nordlagen (Nr. 21-25 in Abb. 4.5) klassiert (36%), der entsprechende Anteil 1975 lag bei 4% und im langjährigen Durchschnitt bei knapp 10%. SCHÜEPP-Ostlagen (Nr. 26-30 in Abb. 4.5) wurden bei 'HM'-Lagen in den Jahren 1975 und 1980 keine registriert, während der Durchschnitt in der Beobachtungsperiode 1945 bis 1992 bei knapp 9% liegt. Auch innerhalb der einzelnen SCHÜEPP-Grundtypen variiert die Zuteilung von Jahr zu Jahr recht stark. Rund 21% aller 'HM'-Lagen entfallen sowohl über den Gesamtzeitraum als auch in den beiden Jahren 1975 und 1980 auf SCHÜEPP-Flachdrucklagen (Nr. 6-10 in Abb. 4.5). Die Aufteilung auf die 5 Flachdrucklagen (schwache, westliche, nördliche, östliche und südliche Höhenströmung) kann jedoch sehr verschieden ausfallen. Im Jahr 1975 sind alle 5 Flachdrucklagen an Tagen mit HESS/BREZOWSKY-'HM'-Lagen ungefähr gleich häufig. 1980 wurden bei mitteleuropäischen Hochdrucklagen nur Flachdrucklagen mit schwachen Winden in der Höhe registriert, andere Flachdrucklagen wurden an 'HM'-Tagen keine registriert. Im langjährigen Durchschnitt wurden den HESS/BREZOWSKY-'HM'-Lagen je 2.5% Flachdrucklagen mit westlichen und südlichen Höhenwinden, je 5.5% Flachdrucklagen mit nördlichen und östlichen Höhenwinden und knapp 8% Flachdrucklagen mit schwachen Höhenwinden zugeordnet. Alle diese Beispiele zeigen, dass im langjährigen Durchschnitt einer bestimmten Wetterlage eine grosse Anzahl von Wetterlagen der anderen Klassifikation zugeordnet werden können.

Fazit

Daraus folgt, dass weder von der grossräumigen HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagenklassifikation auf die kleinräumige Klassierung von SCHÜEPP, noch umgekehrt von der SCHÜEPP'schen Klassierung auf die europäischen Grosswetterlagen geschlossen werden kann. Es darf jedoch nicht abgeleitet werden, dass von der grossräumigen synoptischen Situation a priori nicht auf die synoptische Situation über dem Alpenraum geschlossen werden kann oder dass letztere von ersterer völlig entkoppelt wäre. Vielmehr liegt der Grund des Misslingens der Kopplung in der Eigenart der beiden Wetterlagensysteme. Am gewichtigsten schlägt wohl die Tatsache zu Buche, dass es sich bei den HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen streng genommen um Witterungslagen handelt, die definitionsgemäss mindestens 3 Tage andauern müssen und dadurch eine grosse Dynamik beinhalten. Die SCHÜEPP-Wetterlagen dagegen sind echte Wetterlagen, die kaum länger als einen Tag andauern. Sie werden aufgrund einer einzigen Karte (12z-Karte) als Momentansituation klassiert. Diese Diskrepanz führt dazu, dass eine bestimmte HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlage während ihres Lebenszyklus von mehreren Tagen, mit hoher Wahrscheinlichkeit zu unterschiedlichen Klassierungen bei den SCHÜEPP-Wetterlagen führen wird.

Ein weiterer Grund für die Inkompatibilität der beiden Systeme ist die nur randliche Berücksichtigung des Alpenraumes bei den HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen. WILLFARTH (1959) wies bereits 1959 darauf hin, dass in der HESS/BREZOWSKY-Klassifikation vor allem dem Mittelmeereinfluss im Alpenraum zuwenig Beachtung geschenkt würde.

Letztlich spielt sicher auch die Gebietsgrösse und die Betrachtungsweise eine nicht zu unterschätzende Rolle. Bei den HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen wird ausschliesslich die grossräumige Dynamik und Wanderung der Druckgebilde betrachtet. Anders ist der Fokus bei den SCHÜEPP-Wetterlagen: Hier werden einzelne Elemente wie Strömung oder Luftdruck an einem bestimmten Punkt als Klassifikationskriterien herangezogen.

All diese Umstände begründen die Tatsache, dass die beiden Klassifikationen nicht ohne weiteres ineinander überführt werden können. Dabei wird aber nichts über die Güte der beiden Klassifikationen ausgesagt. Beide haben ihre Berechtigung, wenn sie entsprechend der jeweiligen Fragestellung eingesetzt werden: Die HESS/BREZOWSKY-Klassifikation für grossräumige Betrachtungen der Dynamik und die SCHÜEPP-Klassifikation für die kleinräumige Betrachtung von mesoskaligen Phänomenen wie Frontdurchgängen, Gewittern, Starkwindereignissen usw..

Aus diesem Grund werden im Kapitel 5 die Zeitreihen beider Klassifikationsschemen bearbeitet. Der Versuch der automatischen Klassierung wird ebenfalls für beide Klassifikationen durchgeführt, wenn auch mit einem unterschiedlichen Ansatz.

5 Retrospektive Auswertung der Zeitreihen der Wetterlagenklassifikationen nach SCHÜEPP und HESS/BREZOWSKY

Veränderungen im zukünftigen Klimageschehen können nur festgestellt werden, wenn auch das heutige und vergangene Klima weitgehend bekannt sind. Denn wie soll eine Änderung festgestellt werden, wenn keine Vergleichsperiode vorliegt. Es ist daher auch im Rahmen des witterungsklimatologischen Downscalings wichtig, das Klimageschehen in der Vergangenheit zu untersuchen.

Da das synoptische Downscaling-Verfahren mit Wetterlagen arbeitet, ist es naheliegend, sich ein Bild über das 'vergangene' Klima und dessen Entwicklung anhand von Zeitreihen von Wetterlagenklassifikationen zu verschaffen.

Aus Kapitel 3.2 gingen die Wetterlagen von HESS/BREZOWSKY und SCHÜEPP als geeignetste Klassifikationsschemen für das Downscaling im Alpenraum hervor. Da die beiden Klassifikationsschemen nicht gekoppelt werden konnten, wird im Folgenden die Zeitreihenanalyse für beide Klassifikationen getrennt durchgeführt.

Ein Kennzeichen klimatologischer Zeitreihen ist ihre grosse Variabilität. Es ist daher von Vorteil, wenn für Analysen mehrere Zeitreihen zusammengefasst werden können. Bei Wetterlagenklassifikationen ist es oft möglich, verschiedene Einzellagen zu Gruppen zusammenzufassen. Entsprechend werden bei der Zeitreihenanalyse der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen in einem ersten Schritt nur die 8 alpin-synoptischen Gruppen, bei den SCHÜEPP-Wetterlagen nur die drei Hauptgruppen (Konvektive, Advektive und Mischlagen) unterschieden. Der zeitliche Verlauf dieser beiden Reihen wird in den Abbildungen 5.1 und 5.2 dargestellt.

Abbildung 5.1 zeigt die 11-jährigen gleitenden Mittel der absoluten Häufigkeiten der 8 alpin-synoptischen Gruppen über den Zeitraum 1881 bis 1991.

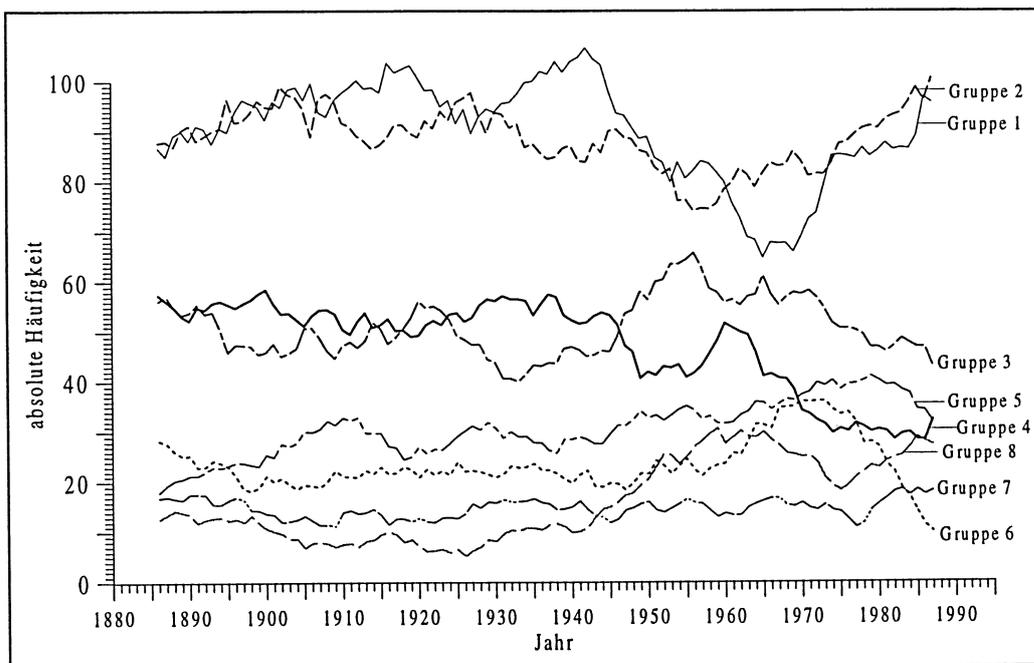


Abb. 5.1: 11-jährige gleitende Mittel der jährlichen Häufigkeiten der 8 alpin-synoptischen Gruppen (vgl. Abkürzungsverzeichnis) der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen (Periode 1881-1994).

Die auffälligsten Merkmale der Häufigkeitsentwicklungen der alpin-synoptischen Gruppen sind

- ein starker Zusammenbruch der Häufigkeiten der Gruppe 1 am Anfang der 40^{er} Jahre mit anschließender Erholung in den 60^{er} bis in die 90^{er} Jahren
- eine Mitte der 30^{er} Jahre beginnende Abnahme der Häufigkeiten der Gruppe 4
- eine stetige Zunahme der Häufigkeiten der Gruppe 5 über den gesamten Zeitraum
- eine starke Zunahme der Häufigkeiten der Gruppe 6 in den 60^{er} bis in die 70^{er} Jahre und eine anschließende starke Abnahme bis in die 90^{er} Jahre
- eine Zunahme der Häufigkeiten der Gruppe 7 in den 30^{er} bis in die 60^{er} Jahre

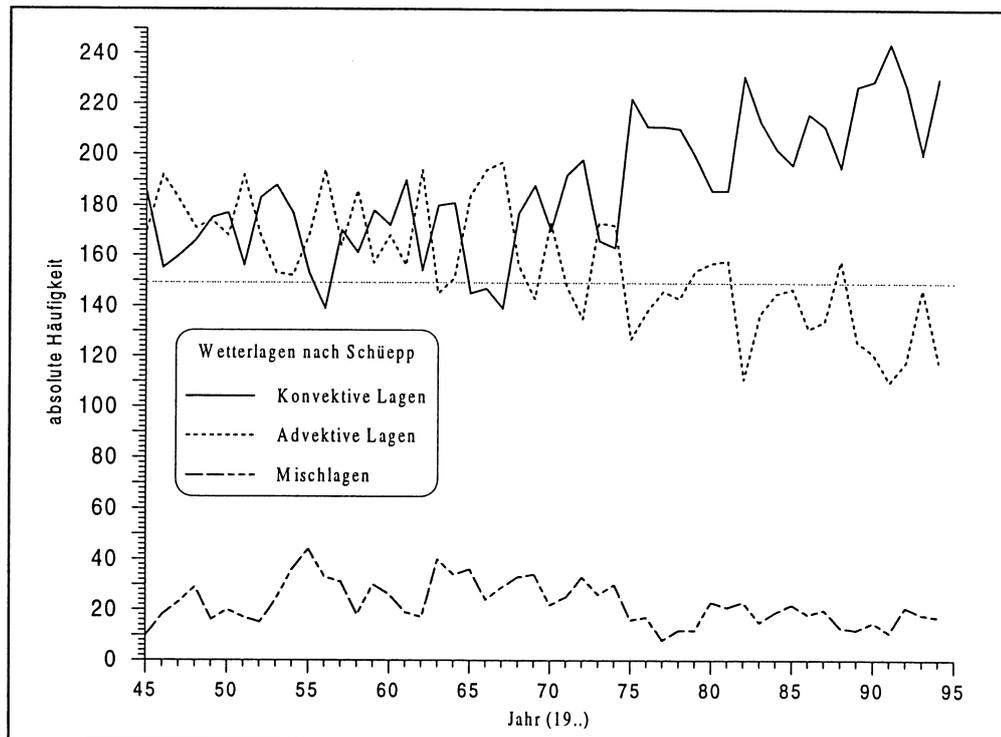


Abb. 5.2: Absolute Häufigkeit der drei Hauptgruppen der SCHÜEPP-Wetterlagen von 1945 bis 1994.

Aus Abbildung 5.2 ist ersichtlich, dass die Häufigkeiten der konvektiven und advektiven Wetterlagen etwa seit Anfang der 70^{er} Jahre zu divergieren beginnen. Auch bei den Mischlagen ist ab diesem Zeitpunkt eine Änderung feststellbar. Da alle Änderungen mit dem Zeitpunkt eines Bearbeiterwechsels zusammenfallen, ist fraglich, ob es sich nicht um eine künstlich verursachte Inhomogenität handelt.

Die Entwicklungen der Zeitreihen der jährlichen Häufigkeiten der alpin-synoptischen Gruppen in Abbildung 5.1 und der Hauptgruppen der SCHÜEPP-Wetterlagen in Abbildung 5.2 werfen verschiedene Fragen auf:

- 1) Verhalten sich alle Lagen einer bestimmten Gruppe (z.B. alpin-synoptische Gruppe 2 oder konvektive Lagen) gleich?
- 2) Erfolgen die Variationen in allen Jahreszeiten gleich?
- 3) Gibt es bestimmte Lagen, die dieses Bild prägen, während andere Lagen stationäre Reihen bilden?
- 4) Lassen sich zu- bzw. abnehmende Trends der einzelnen Lagen auch statistisch nachweisen?
- 5) Gibt es einen bestimmten Zeitpunkt (Jahr), bei dem eine Änderung eingesetzt hat ?

Die beiden ersten Fragen lassen sich allein mit graphischen Auswertungen beantworten. Sie werden in den entsprechenden Kapiteln der Zeitreihenanalyse der Wetterlagen nach SCHÜEPP und HESS/BREZOWSKY beantwortet. Die verbleibenden Fragen können nur mit Hilfe von statistischen Tests beantwortet werden.

Im Folgenden werden zwei statistische Testverfahren vorgestellt, welche für die Auswertung des Datenmaterials (Zeitreihen) verwendet wurden.

5.1 Statistische Testverfahren zur Erkennung von Trends und Wendepunkten

5.1.1 Der S_1 -Lokationstrendtest nach COX und STUART

Die einfachste Lösung, statistisch einen monotonen Trend in einer Zeitreihe nachzuweisen, bietet die Korrelation der Zeitreihenwerte mit dem Zeitpunkt der Beobachtung (wobei der ersten Beobachtung der Zeitpunkt 1 zugeordnet wird und der letzten der Zeitpunkt n). Dazu bieten sich verschiedene Verfahren an. Die üblicherweise verwendete Produktmomentkorrelation eignet sich bei den vorliegenden Daten nicht, da nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann. Auch die SPEARMANN- und die Tau-Korrelation (von KENDALL) sind ungeeignet, da in den Zeitreihen relativ viele Bindungen auftreten, wodurch die Korrelationen geschwächt werden. Nach LIENERT (1973) dürften nur gerade 20% der Beobachtungen Bindungen aufweisen, was vor allem bei den selteneren Lagen nicht erfüllt ist.

Der Test, der den vielen Voraussetzungen der Häufigkeits-Zeitreihen der Wetterlagen wohl am ehesten gerecht wird, ist der in LIENERT (1978) vorgeschlagene S_1 -Test von COX und STUART. Er kann einen monotonen Trend auch in Fällen von stärkerer Fehlerüberlagerung (etwa eine 'sägezahnartig' steigende oder fallende Zeitreihe) erkennen.

Der S_1 -Test ist verteilungsfrei und geht von folgender Überlegung aus. Falls der zu untersuchenden Zeitreihe ein positiv monotoner Trend anhaftet, dann wird die Differenz zwischen den endständigen Werten der Zeitreihe (z.B. dem ersten und dem letzten Wert) eher positiv sein, als die Differenz zwischen mittelständigen Zeitreihenwerten (die beiden in der Mitte liegenden Werte der Zeitreihe).

Vorgehen:

Die Prüfgröße wird so konstruiert, dass die Vorzeichen der Differenzen entsprechend ihrem Zeitabstand gewichtet werden.

$$S_1 = \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} (n - 2i + 1) \cdot (h_i)$$

i = Beobachtungszeitpunkt
 n = Anz. Beobachtungen (Zeitreihenwerte)
 y_i = Absolute Häufigkeit zum Zeitpunkt i
 $h_i = 0 \quad \forall \quad y_{n-i+1} < y_i$
 $h_i = 1 \quad \forall \quad y_{n-i+1} > y_i$

Am einfachsten ermittelt man die Prüfgröße S_1 indem man die Zeitreihe um ihren Median faltet (vgl. Beispiel Tab. 5-1). Besteht die Zeitreihe aus einer ungeraden Anzahl von Werten, dann fällt der Medianwert weg.

Anschliessend werden die Differenzen zwischen den Werten (erster und letzter, zweiter und zweitletzter Wert usw.) festgestellt. Da nur das Vorzeichen und nicht der Betrag der Differenzen von Bedeutung ist, wird für positive Differenzen (die endständigen Werte sind grösser als die am Anfang stehenden) eine 1 notiert, für negative eine 0. Um bei vielen Bindungen eine konservative Testentscheidung herbeizuführen, wird der Test doppelt durchgeführt. Dabei werden die Null-Differenzen (die beiden miteinander verglichenen Werte sind gleich) einmal als 0 und einmal als 1 codiert. Führt der Test mit beiden Varianten zu Signifikanz in derselben Richtung, kann diese akzeptiert werden, andernfalls wird für nicht signifikant entschieden. Das heisst, dass im Zweifelsfall eher gegen als für einen Trend entschieden wird.

Nachdem die Gewichte berechnet wurden, wird die Prüfsumme mit den Gewichten gebildet, die eine positive Differenz ergaben.

Nach LIENERT (1978) ist die Prüfgrösse S_1 über einem Erwartungswert ($E(S_1)$) mit einer Varianz ($Var(S_1)$) asymptotisch normal verteilt.

$$E(S_1) = \frac{n^2}{8} \quad n = \text{Anzahl Beobachtungen}$$

$$Var(S_1) = \frac{n(n^2 - 1)}{24}$$

Eine beobachtete Prüfgrösse S_1 wird somit über die Normalverteilung nach

$$z = \frac{|S_1 - E(S_1)| - \frac{1}{2}}{\sqrt{Var(S_1)}}$$

beurteilt.

Tabelle 5-1 veranschaulicht das Vorgehen beim S_1 -Test am Beispiel der Zeitreihe der Schüepp-Hochdrucklage mit westlicher Höhenströmung (+Hw).

Tab. 5-1: Durchführung des S_1 -Test am Beispiel der absoluten Häufigkeiten (abs. Hk.) der Schüepp-Hochdrucklage mit westlicher Höhenströmung (+Hw).

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	←
	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	
y_i	18	5	6	6	2	17	6	11	10	4	1	8	4	19	7	8	6	15	8	9	3	4	13	11	5	← abs. Hk.
y_{n-i+1}	21	18	29	17	19	9	18	20	16	19	7	19	20	17	20	13	11	9	4	8	15	6	9	9	14	
h_i	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	← Bewertung der Differenzen
n-2i+1	49	47	45	43	41	39	37	35	33	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	11	9	7	5	3	1	
S₁	49	47	45	43	41	0	37	35	33	31	29	27	25	0	21	19	17	0	0	0	9	7	0	0	1	← Summe von S ₁ = 516
z(S₁) = 2.81														P(z ≤ z(S₁)) = 0.0025												

i=Beobachtungszeitpunkt,
y_i=absolute Häufigkeiten,
n-2i+1=Gewichtungsfaktor,

n=Anzahl Beobachtungen,
h_i=Vorzeichen der Differenzen,
S₁=Summand der Testgrösse.

Die Überschreitungswahrscheinlichkeit $P(z \leq z(S_1))$ ist mit 0.2% sehr klein, d.h. des Testergebnis ist hoch signifikant.

Der S_1 -Trendtest der auf monotone Trends testet, reagiert vor allem auf Unterschiede am Anfang und am Ende einer Reihe. Tritt nun aber innerhalb einer Zeitreihe eine plötzliche Änderung auf, eine sogenannte Niveauveränderung, so kann diese, falls sie nicht gross ist, durch den S_1 -Test nicht erkannt werden. Auch zur Beantwortung der Frage nach dem Zeitpunkt, zu dem die Änderung eingesetzt haben mag, muss ein weiterer Test eingesetzt werden. In diesem Fall ist wiederum ein nicht parametrischer, robuster Test von Vorteil. SNEYERS (1992) schlägt dafür den Test von PETTITT (1979) vor.

5.1.2 Der Wendepunkt-Test nach PETTITT

Der Test auf einen Wendepunkt (change point) in einer Serie von Beobachtungen (sequentieller Homogenitätstest nach PETTITT, 1979), beruht auf dem U-Test von MANN-WITHNEY zur Homogenitätsprüfung zweier Stichproben. Er prüft, ob zwei Stichproben aus derselben Grundgesamtheit stammen. Da dieser Test auf Rangwerten bzw. Rangsummen basiert, ist er stabiler gegenüber Ausreissern als etwa der für denselben Zweck konzipierte parametrische t-Test von STUDENT.

Vorgehen:

Die Daten müssen in einem ersten Schritt in aufsteigender Reihenfolge rangiert werden. Aus der Reihe der Rangwerte wird die Prüfgrösse

$$X_k = 2 \cdot R_k - k \cdot (n + 1)$$

$$R_k = \sum_{i=1}^k r_i$$

k = Beobachtungszeitpunkt
 n = Anzahl Beobachtungen
 r_i = Rang des Elementes i

sequentiell für jeden Zeitpunkt gerechnet.

Als Wendepunkt wird derjenige Zeitpunkt k definiert, bei dem der Betrag von X_k maximal ist.

$$X_E = \max(|X_k|)$$

Die Abbildung 5.3 veranschaulicht die sequentielle Berechnung von X_k (untere Kurve) am Beispiel der Reihe der absoluten Häufigkeiten der SCHÜEPP-Wetterlage $-W_x$. Das Maximum der X_k -Werte wird bei einem Wert von 532 erreicht. Auf der x-Achse kann zu diesem Wert das Jahr 1972 abgelesen werden. Betrachtet man nun die absoluten Häufigkeiten (fette Linie) vor dem Wendepunkt (Zeitraum 1945-1972) und diejenigen danach (1973-1994), so ist der Niveauunterschied zwischen den beiden Kollektiven deutlich sichtbar.

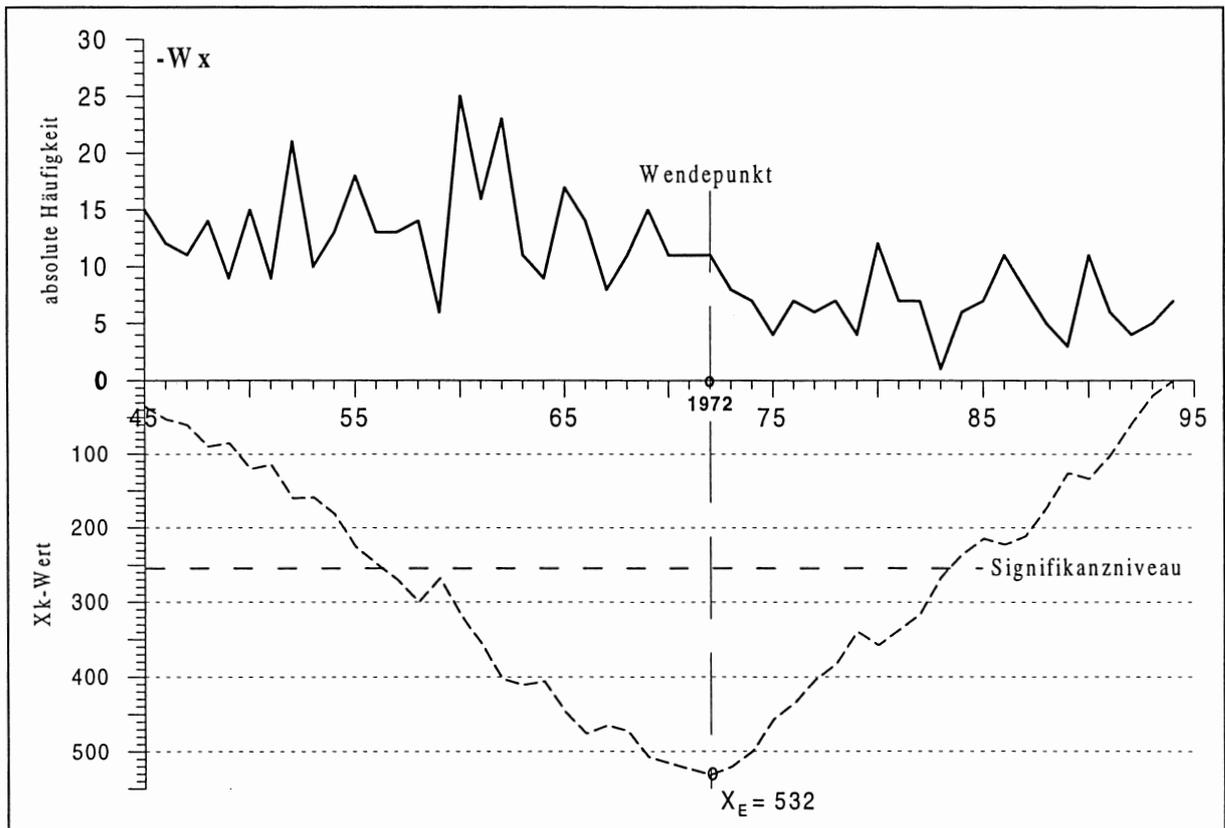


Abb. 5.3.: Graphische Darstellung des sequentiellen Homogenitätstests (Wendepunkttest) nach PETTITT (1979). Oben: Ausgangsdaten (absolute Häufigkeit pro Jahr); unten: sequentielle Berechnung der Prüfgröße X_k .

Die statistische Signifikanz wird über folgende Relation geprüft:

$$\alpha = e^{\left(\frac{-6 \cdot (X_E)^2}{n^2 + n^3}\right)}$$

$$X_E = \max(|X_k|)$$

n = Anzahl Beobachtungen

Dabei wird α als Signifikanzniveau bezeichnet. Um einen auf dem 5%-Niveau signifikanten Wendepunkt zu erhalten, muss $\alpha \leq 0.05$ sein. Umgekehrt kann natürlich auch $\alpha = 0.05$ gesetzt und der X_E -Wert berechnet werden, der mindestens erreicht werden muss. Da z.B. bei den SCHÜEPP-Wetterlagen jedesmal 40 Reihen (Wetterlagen) mit derselben Anzahl von Elementen (50 Beobachtungen für die Häufigkeiten pro Jahr und 51 für die einzelnen Jahreszeiten) durchgetestet werden müssen, ist die zweite Variante effizienter. Für $n = 50$ ergibt sich ein minimales X_E von 253 (in Abbildung 5.3 mit Signifikanzniveau bezeichnet), bei $n = 51$ ein solches von 260. Das bedeutet, dass alle berechneten X_E -Werte die grösser oder gleich 253 respektive 260 sind, als mindestens auf dem 5%-Niveau signifikante Wendepunkte angesehen werden können.

5.2 Zeitreihenanalyse der Wetterlagen nach SCHÜEPP

Um sich eine Übersicht über das Datenmaterial zu verschaffen, ist es oft sinnvoll, im ersten Schritt eine statische Auswertung durchzuführen. Unter einer statischen Betrachtung des Zahlenmaterials soll hier eine Auswertung der Häufigkeiten über den gesamten Zeitraum, ohne Unterscheidung der einzelnen Jahre, verstanden werden. Die statische Auswertung des Zahlenmaterials erlaubt eine Charakterisierung über einen längeren Zeitraum und somit eine Darstellung des 'mittleren' Verhaltens des untersuchten Zahlenmaterials.

Im Gegensatz zur statischen Betrachtung soll die dynamische Betrachtung die Variationen und Trends im untersuchten Zeitraum aufzeigen. Die dynamische Betrachtung des Zahlenmaterials beschäftigt sich somit vor allem mit der Auswertung der Zeitreihen der jährlichen Häufigkeiten. Durch die dynamische Betrachtungsweise ist es auch möglich, die eingangs gestellten Fragen (1-5) zu beantworten.

Zuerst wird jedoch die statische Betrachtung der Häufigkeiten der Wetterlagen nach SCHÜEPP über den gesamten Zeitraum vorgestellt.

5.2.1 Statische Wetterlagenbetrachtung im Zeitraum 1945 bis 1994

Wie bereits in Kapitel 3.1.6 dargestellt wurde, umfassen die Wetterlagen nach SCHÜEPP 40 Klassen oder Muster. Tabelle 5-2 zeigt die Häufigkeiten der einzelnen Lagen, Grundtypen und Hauptgruppen insgesamt (Jahr) und nach Jahreszeiten.

Daraus geht hervor, dass die konvektiven Lagen rund die Hälfte (51%) des Kollektivs stellen, die Advektiven Lagen 43% ausmachen und dadurch nur noch 6% den Mischlagen zugeordnet werden. Gut die Hälfte der Konvektiven Lagen gehört zu den Flachdrucklagen. Ein Drittel machen die Hochdrucklagen aus und nur gerade $\frac{1}{3}$ sind Tiefdrucklagen.

Die Ostlagen machen bei den Advektiven Lagen mit nur $\frac{1}{3}$ den kleinsten Teil aus. Die Nordlagen mit etwas mehr als $\frac{1}{3}$ haben den grössten Anteil bei den Advektiven Lagen. Der Rest gehört den West- und den Südlagen mit je rund $\frac{1}{4}$ Anteilen an.

Wie bereits in Kapitel 3.1.6 beschrieben, bevorzugen die Konvektiven Lagen eher die wärmere Jahreszeit, die Advektiven dagegen die kältere. Durch Tabelle 5-2 lässt sich diese Aussage noch weiter differenzieren. Während Flach- und Tiefdrucklagen vermehrt im Frühjahr und Sommer auftreten, werden Hochdrucklagen im Sommer und Herbst bevorzugt. Flachdrucklagen treten im Winter (16%) nur gerade halb so oft auf, wie im Sommer (36%). Der Winter ist die Jahreszeit der Advektiven Lagen, die in diesen Monaten ihr Häufigkeitsmaximum haben, ausgenommen die Südlagen, die bevorzugt in den Übergangsjahreszeiten Frühjahr und Herbst auftreten. Mischlagen treten in allen Jahreszeiten ungefähr gleich selten auf.

Tab. 5-2: Absolute und relative Häufigkeiten der Wetterlagen nach SCHÜEPP für das ganze Jahr und die vier Jahreszeiten im Zeitraum 1945 bis 1994 (Abkürzungen siehe Abkürzungsverzeichnis).

Lagen	Jahr		Winter		Frühjahr		Sommer		Herbst	
	abs.Hk.	rel. Hk.	abs.Hk.	rel. Hk.	abs.Hk.	rel. Hk.	abs.Hk.	rel. Hk.	abs.Hk.	rel. Hk.
+Ho	801	4.4%	124	2.7%	136	2.9%	290	6.2%	271	5.8%
+Hw	573	3.1%	102	2.2%	85	1.8%	260	5.5%	137	3.0%
+Hn	836	4.6%	263	5.7%	174	3.7%	235	5.0%	185	4.0%
+He	396	2.2%	169	3.7%	81	1.7%	56	1.2%	107	2.3%
+Hs	379	2.1%	68	1.5%	63	1.3%	162	3.5%	105	2.3%
Hoch	2985	16.3%	726	15.8%	539	11.5%	1003	21.4%	805	17.3%
Fo	1123	6.1%	117	2.5%	361	7.7%	352	7.5%	319	6.9%
Fw	1217	6.7%	156	3.4%	260	5.5%	525	11.2%	296	6.4%
Fn	1144	6.3%	223	4.8%	259	5.5%	372	7.9%	306	6.6%
Fe	443	2.4%	104	2.3%	159	3.4%	83	1.8%	115	2.5%
Fs	1068	5.8%	144	3.1%	322	6.9%	342	7.3%	281	6.1%
Flach	4995	27.4%	744	16.2%	1361	29.0%	1674	35.7%	1317	28.4%
-Lo	189	1.0%	38	0.8%	72	1.5%	40	0.9%	42	0.9%
-Lw	374	2.0%	70	1.5%	82	1.7%	146	3.1%	82	1.8%
-Ln	252	1.4%	55	1.2%	77	1.6%	62	1.3%	68	1.5%
-Le	75	0.4%	17	0.4%	40	0.9%	8	0.2%	12	0.3%
-Ls	461	2.5%	82	1.8%	139	3.0%	132	2.8%	115	2.5%
Tief	1351	7.4%	262	5.7%	410	8.7%	388	8.3%	319	6.9%
Konvektiv	9331	51.1%	1732	37.6%	2310	49.2%	3065	65.3%	2441	52.6%
Wj	375	2.1%	189	4.1%	60	1.3%	37	0.8%	98	2.1%
+Wp	444	2.4%	175	3.8%	110	2.3%	43	0.9%	119	2.6%
-Wp	399	2.2%	124	2.7%	86	1.8%	79	1.7%	114	2.5%
+Wx	249	1.4%	57	1.2%	56	1.2%	76	1.6%	63	1.4%
-Wx	518	2.8%	115	2.5%	109	2.3%	214	4.6%	89	1.9%
West	1985	10.9%	660	14.3%	421	9.0%	449	9.6%	483	10.4%
Nj	588	3.2%	329	7.1%	130	2.8%	34	0.7%	122	2.6%
+Np	221	1.2%	97	2.1%	63	1.3%	20	0.4%	48	1.0%
-Np	334	1.8%	94	2.0%	100	2.1%	84	1.8%	70	1.5%
+Nx	754	4.1%	261	5.7%	179	3.8%	135	2.9%	189	4.1%
-Nx	1142	6.3%	286	6.2%	311	6.6%	298	6.4%	257	5.5%
Nord	3039	16.6%	1067	23.2%	783	16.7%	571	12.2%	686	14.8%
Ej	58	0.3%	43	0.9%	7	0.1%	1	0.0%	10	0.2%
+Ep	281	1.5%	123	2.7%	73	1.6%	28	0.6%	62	1.3%
-Ep	400	2.2%	143	3.1%	133	2.8%	49	1.0%	79	1.7%
+Ex	99	0.5%	26	0.6%	44	0.9%	5	0.1%	24	0.5%
-Ex	119	0.7%	38	0.8%	40	0.9%	11	0.2%	32	0.7%
Ost	957	5.2%	373	8.1%	297	6.3%	94	2.0%	207	4.5%
Sj	181	1.0%	53	1.2%	55	1.2%	19	0.4%	57	1.2%
+Sp	510	2.8%	131	2.8%	147	3.1%	78	1.7%	165	3.6%
-Sp	513	2.8%	135	2.9%	174	3.7%	46	1.0%	164	3.5%
+Sx	175	1.0%	45	1.0%	64	1.4%	36	0.8%	31	0.7%
-Sx	446	2.4%	100	2.2%	131	2.8%	99	2.1%	118	2.5%
Süd	1825	10.0%	464	10.1%	571	12.2%	278	5.9%	535	11.5%
Advektiv	7806	42.7%	2564	55.7%	2072	44.2%	1392	29.7%	1911	41.2%
Xx	78	0.4%	14	0.3%	24	0.5%	20	0.4%	20	0.4%
+Xj	116	0.6%	54	1.2%	16	0.3%	22	0.5%	26	0.6%
-Xj	251	1.4%	63	1.4%	60	1.3%	57	1.2%	79	1.7%
+Xo	313	1.7%	87	1.9%	91	1.9%	53	1.1%	84	1.8%
-Xo	367	2.0%	88	1.9%	119	2.5%	83	1.8%	80	1.7%
Gemischt	1125	6.2%	306	6.6%	310	6.6%	235	5.0%	289	6.2%
Total	18262	100.0%	4602	100.0%	4692	100.0%	4692	100.0%	4641	100.0%

Die zuvor beschriebenen statischen Betrachtungen gelten nur über grössere Zeiträume gesehen. Von Jahr zu Jahr zeigen sich stark unterschiedliche Verteilungen. Die statische Betrachtungsweise soll daher durch eine dynamische ergänzt werden, wozu die folgende Analyse der Zeitreihen dient.

5.2.2 Dynamische Betrachtung der Häufigkeiten der Wetterlagen

Die dynamische Betrachtungsweise erlaubt die Beantwortung der eingangs gestellten 5 Fragen.

1) Verhalten der Lagen einer bestimmten Gruppe

Abbildung 5.2 zeigt deutlich, dass die konvektiven und advektiven Lagen eine Zu- respektive Abnahme aufweisen. Die Mischlagen, die im Vergleich zu den anderen beiden Hauptgruppen selten auftreten, zeigen nur eine sehr schwache Abnahme. Im Folgenden werden daher nur die beiden erstgenannten Gruppen betrachtet (Abb. 5.4)

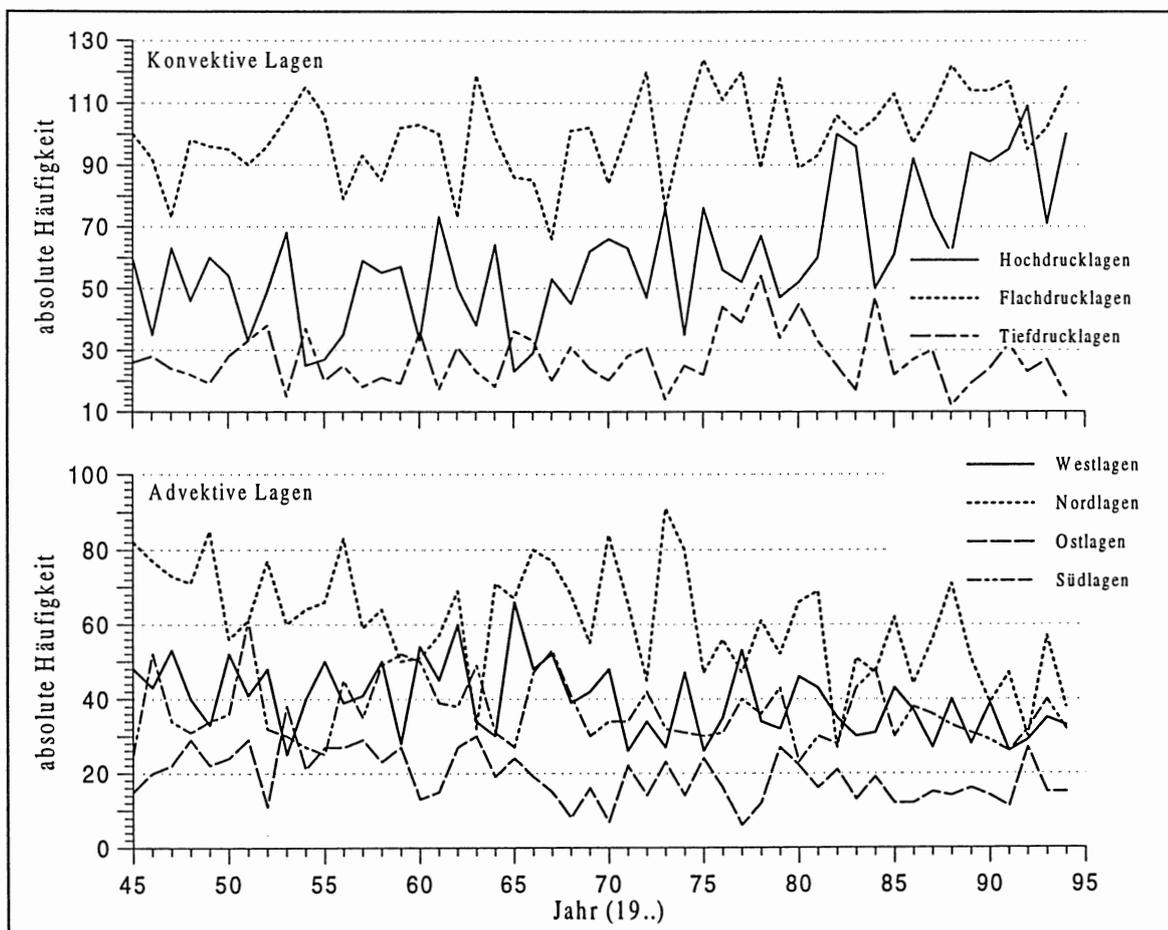


Abb. 5.4: Zeitlicher Verlauf der absoluten Häufigkeit pro Jahr der Gruppen der SCHÜEPP-Wetterlagen; oben: Hochdruck-, Flachdruck- und Tiefdrucklagen; unten: West-, Nord-, Ost- und Südlagen, im Beobachtungszeitraum 1945 - 1994.

Im oberen Teil von Abbildung 5.4 wird der Verlauf der Konvektiven Lagen aufgeteilt nach Hoch-, Flach- und Tiefdrucklagen gezeigt. Diese Lagen weisen bei der Betrachtung des gesamten Kollektivs der konvektiven Lagen eine Zunahme auf (siehe Abb. 5.2). Am Verlauf der Kurven aus

Abbildung 5.4 ist abzulesen, dass die Hochdrucklagen (ausgezogene Linie) die stärkste Zunahme zeigen, die Flachdrucklagen dagegen nur eine sehr schwache. Bei den Tiefdrucklagen ist über 50 Jahre hinweg kein Trend feststellbar.

Auch die vier Grundtypen der advektiven Lagen im unteren Teil der Abbildung 5.4 scheinen nicht generell eine Abnahme zu zeigen, wie dies auf Grund des abnehmenden Trends aus der Betrachtung des Gesamtkollektivs aus Abbildung 5.2 anzunehmen wäre. Die stärkste Abnahme betrifft die häufigste Gruppe der Advektiven Lagen, die Nordlagen. Der Verlauf der West- und Südlagen ist sehr ähnlich. Bei beiden ist zwar eine leichte Abnahme gegen die 90^{er} Jahre hin feststellbar, jedoch hat auch die Variabilität stark abgenommen. Die Ostlagen zeigen kaum eine Veränderung.

2) Variationen in den Jahreszeiten

Die zweite Frage nach den Variationen der einzelnen Lagen in den Jahreszeiten lässt sich nur zum Teil mit Hilfe von Abbildung 5.5 beantworten.

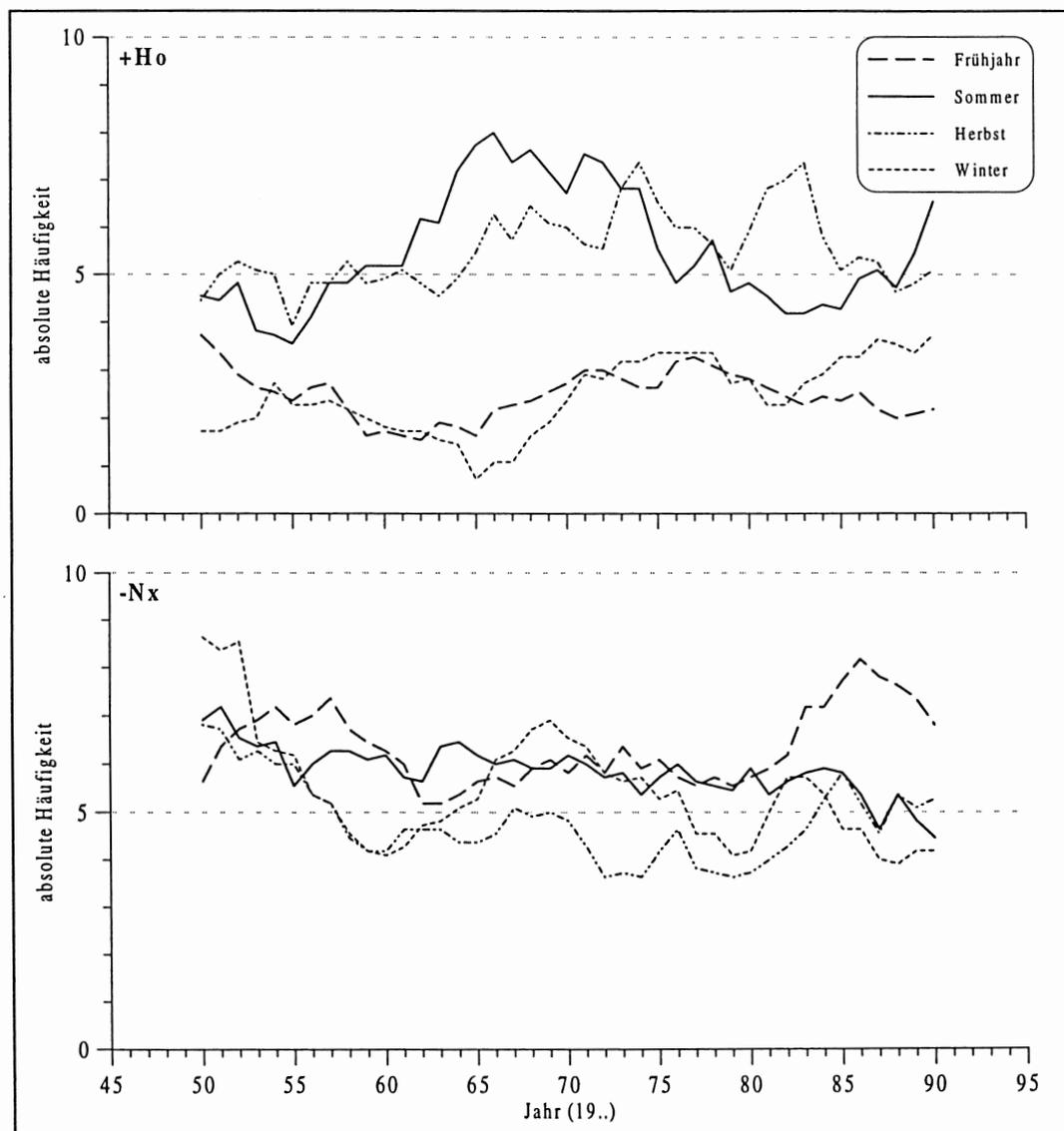


Abb. 5.5.: Verlauf der 11-jährigen gleitenden Mittel der absoluten Häufigkeiten der beiden SCHÜEPP-Wetterlagen +Ho und -Nx in den vier Jahreszeiten, im Zeitraum 1945 bis 1995.
oben: Hochdrucklage mit schwacher Höhenströmung, unten: Gegenstrom Nordlage mit Höhentief.

Abbildung 5.5 zeigt den jahreszeitlichen Verlauf der Häufigkeiten der Hochdrucklagen mit schwacher Höhenströmung (+Ho) und der Nordlagen mit Kaltluftadvektion in der Höhe (-Nx). Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass es Wetterlagen gibt, die sich tendenziell in allen Jahreszeiten ähnlich verhalten (-Nx). Es gibt aber auch Wetterlagen, die nicht in allen Jahreszeiten gleich reagieren (+Ho). Das bedeutet, dass eine Aussage nicht nur für die Häufigkeiten pro Jahr, sondern auch für die einzelnen Jahreszeiten gemacht, beziehungsweise verifiziert werden muss.

3) und 4) Schlüssellagen und statistischer Nachweis trendbehafteter Lagen

Die dritte Frage nach Wetterlagen, welche das Gesamtbild besonders prägen, sogenannte Schlüssellagen, sowie die Frage nach der statistischen Nachweisbarkeit von zunehmenden bzw. abnehmenden Trends, lassen sich gemeinsam beantworten, wenn 'stationär' im Sinne einer schwachen Stationarität aufgefasst wird, d.h. wenn Autokorrelation in den Zeitreihen zugelassen wird. Die neu formulierte Frage würde somit lauten:

- Weist eine gewisse Lage einen statistisch signifikanten monotonen Trend auf oder ist sie schwach stationär?

Diese Frage lässt sich anhand der Resultate aus dem S_1 -Test beantworten.

Resultate des S_1 - Trendtests

Der in den Abbildungen 5.2 und 5.4 graphisch festgestellte progressive (steigende) Trend der konvektiven Lagen und der degressive (fallende) Trend der advektiven Lagen, soll für die einzelnen Wetterlagen statistisch nachgewiesen werden.

Der Trendtest wurde gemäss Tabelle 5-1 für die Häufigkeitszeitreihen aller Wetterlagen durchgeführt. Getestet wurde einseitig, da die Richtung des Trends aus den Graphiken der absoluten Häufigkeiten der Wetterlagen pro Jahr, respektive Jahreszeit, bereits bekannt war. Die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde auf 5% angesetzt.

Die auf Grund von Abbildung 5.4 geäusserte Vermutung, dass die Zunahme der konvektiven Lagen hauptsächlich durch Hochdrucklagen verursacht wird, wurde durch den S_1 -Test bestätigt (vgl. Tab. 5-3, Zeile 'Jahr'). Bei den Flachdrucklagen zeigt nur die seltenste Lage (Fe) einen signifikant steigenden Trend. Bei den restlichen Flachdrucklagen (Fo, Fw, Fn, Fs) kann weder ein steigender noch ein fallender Trend nachgewiesen werden. Die Flachdrucklagen sind von Jahr zu Jahr grossen Schwankungen unterworfen, weshalb sich ein Trend weniger gut nachweisen lässt als bei anderen Lagen.

Bei der jahreszeitlichen Betrachtung (Tab. 5-3 Zeilen 2-5) kann der steigende Trend mehrerer Hochdrucklagen nur gerade in den Wintermonaten statistisch nachgewiesen werden (für +Hw auch noch im Herbst).

Auch bei den Advektiven Lagen kann nur bei wenigen ein fallender Trend statistisch nachgewiesen werden. Über das ganze Jahr gesehen sind dies eine Westlage (-Wx) und je eine Nord- (+Nx), Süd- (-Sx) und Ostlage (+Ex) (vgl. Tab. 5-3 Zeile 'Jahr'). Bei den beiden Gegenstromlagen -Wx und -Sx konnte der Trend auch im Winter, für +Nx im Frühjahr nachgewiesen werden. Die anderen trendbehafteten advektiven Lagen waren oft in mehreren Jahreszeiten so selten oder überhaupt nicht aufgetreten, so dass der Test als Folge der entstehenden häufigen Bindungen zu "nicht signifikant" führte.

Tab. 5-3: Resultate des S_1 -Tests auf monotonen Trend der Häufigkeiten der Wetterlagen nach SCHÜEPP.

	signifikanter Trend		nicht signifikant
	steigend	fallend	
Jahr	+Hw, +Hn, +He, +Hs, Fe, +Sp	-Wx, +Nx, +Ex, -Sx, Xx, +Xo, -Xo	+Ho, Fo, Fw, Fn, Fs, -Lo, -Lw, -Ln, -Le, -Ls, Wj, +Wp, -Wp, +Wx, Nj, +Np, -Np, -Nx, Ej, +Ep, -Ep, -Ex, Sj, -Sp, +Sx, +Xj, -Xj
Winter (Dez., Jan., Feb.)	+Ho, +Hw, +Hn, +He	-Wx, -Nx, - Ep, -Sp, -Sx, -Xo	+Hs, Fo, Fw, Fn, Fe, Fs, -Lo, -Lw, -Ln, -Le, -Ls, Wj, +Wp, -Wp, +Wx, Nj, +Np, -Np, +Nx, Ej, +Ep, +Ex, -Ex, Sj, +Sp, +Sx, Xx, +Xj, -Xj, +Xo
Frühjahr (März, April, Mai)		+Nx	+Ho, +Hw, +Hn, +He, +Hs, Fo, Fw, Fn, Fe, Fs, -Lo, -Lw, -Ln, -Le, -Ls, Wj, +Wp, -Wp, +Wx, -Wx, Nj, +Np, -Np, -Nx, Ej, +Ep, -Ep, +Ex, -Ex, Sj, +Sp, -Sp, +Sx, -Sx, Xx, +Xj, -Xj, +Xo, -Xo
Sommer (Juni, Juli, Aug.)			+Ho, +Hw, +Hn, +He, +Hs, Fo, Fw, Fn, Fe, Fs, -Lo, -Lw, -Ln, -Le, -Ls, Wj, +Wp, -Wp, +Wx, -Wx, Nj, +Np, -Np, +Nx, -Nx, Ej, +Ep, -Ep, +Ex, -Ex, Sj, +Sp, -Sp, +Sx, -Sx, Xx, +Xj, -Xj, +Xo, -Xo
Herbst (Sept., Okt., Nov.)	+Hw, Fn		+Ho, +Hn, +He, +Hs, Fo, Fw, Fe, Fs, -Lo, -Lw, -Ln, -Le, -Ls, Wj, +Wp, -Wp, +Wx, -Wx, Nj, +Np, -Np, +Nx, -Nx, Ej, +Ep, -Ep, +Ex, -Ex, Sj, +Sp, -Sp, +Sx, -Sx, Xx, +Xj, -Xj, +Xo, -Xo

5) Zeitpunkt der Änderung

Mit Hilfe des Wendepunkt-Tests kann die Frage nach dem Zeitpunkt an dem eine Änderung einsetzt, auf statistischer Basis beantwortet werden.

Resultate des Tests auf einen Wendepunkt

Der Wendepunkt-Test wurde auf sämtliche Zeitreihen angewendet. Da er auf mehrfache Rangbindungen, wie sie in den Zeitreihen häufig vorkommen, konservativ reagiert (d.h. bei mehreren gleichen Rängen wird die Nullhypothese eher beibehalten), war dieses Vorgehen adäquat.

Tabelle 5-4 gibt eine Übersicht über die Resultate des durchgeführten Tests.

Alle konvektiven Wetterlagen, die einen signifikanten monoton steigenden Trend aufweisen (Tab. 5-3), zeigen auch einen signifikanten Wendepunkt an (mit X_E als minimalem X_k -Wert, was bedeutet, dass der Wendepunkt eine Zunahme oder eine positive Niveauänderung ab diesem Zeitpunkt anzeigt). Zeitreihen mit Wendepunkten aber ohne Trend, können bei mehreren Flachdrucklagen (Fn, Fw), vor allem im Herbst, festgestellt werden.

Auch bei den Advektiven Lagen gilt die Aussage, dass jede Reihe, die mit einem Trend behaftet ist, auch einen Wendepunkt aufweist. Auch hier gibt es eine Lage, die einen signifikanten Wendepunkt zeigt, ohne dass sie einen Trend aufweist. Es handelt sich um die Wetterlage -Ep.

Tab. 5-4: Resultate des Tests auf einen Wendepunkt in den Zeitreihen der Häufigkeiten der Wetterlagen nach SCHÜEPP (Bezeichnung der Wetterlagen siehe Abkürzungsverzeichnis).

	signifikanter Wendepunkt		keine Signifikanz
	$X_E = \text{Min.}(X_k)$	$X_E = \text{Max.}(X_k)$	
Jahr	+Hw, +Hn, +He, +Hs, Fn, Fe, Fs, -Lo, +Sp, +Xj	-Wx, +Nx, -Ep, +Ex, -Sx, Xx, +Xo, -Xo	+Ho, Fo, Fw, -Lw, -Ln, -Le, -Ls, Wj, +Wp, -Wp, +Wx, Nj, +Np, -Np, -Nx, Ej, +Ep, -Ex, Sj, -Sp, +Sx, -Sx, -Xj
Winter (Dez., Jan., Feb.)	+Ho, +Hw, +Hn, +He, +Hs, Fn, Fe, Fs, +Wp, +Xj	-Wx, +Nx, -Nx, -Ep -Sp, +Sx, -Sx, +Xo, -Xo	Fo, Fw, -Lo, -Lw, -Ln, -Le, -Ls, Wj, -Wp, +Wx, Nj, +Np, -Np, Ej, +Ep, +Ex, -Ex, Sj, +Sp, Xx, -Xj
Frühjahr (März, April, Mai)	+Hn, -Ln, -Le, -Xj	+Wx, -Wx, +Nx, -Sx, Xx	+Ho, +Hw, +He, +Hs, Fo, Fw, Fn, Fe, Fs, -Lo, -Lw, -Ls, Wj, +Wp, -Wp, Nj, +Np, -Np, -Nx, Ej, +Ep, -Ep, +Ex, -Ex, Sj, +Sp, -Sp, +Sx, +Xj, +Xo, -Xo
Sommer (Juni, Juli, Aug.)	+Hw, +Hs, Fn	-Lw, -Wx, -Sx, -Xo	+Ho, +Hn, +He, Fo, Fw, Fe, Fs, -Lo, -Ln, -Le, -Ls, Wj, +Wp, -Wp, +Wx, Nj, +Np, -Np, +Nx, -Nx, Ej, +Ep, -Ep, +Ex, -Ex, Sj, +Sp, -Sp, +Sx, Xx, +Xj, -Xj, +Xo
Herbst (Sept., Okt., Nov.)	+Hw, +Hn, +Hs, Fw, Fn, +Xj	-Wx, -Sx, Xx, +Xo	+Ho, +He, Fo, Fe, Fs, -Lo, -Lw, -Ln, -Le, -Ls, Wj, +Wp, -Wp, +Wx, Nj, +Np, -Np, +Nx, -Nx, Ej, +Ep, -Ep, +Ex, -Ex, Sj, +Sp, -Sp, +Sx, -Xj, -Xo

Über die einzelnen Jahreszeiten betrachtet, weisen alle trendbehafteten Lagen auch einen Wendepunkt auf. Jedoch zeigen sich auch bei den Lagen, bei denen statistisch kein Trend nachgewiesen werden konnte, relativ viele Wendepunkte. Die beiden Gegenstromlagen -Wx und -Sx weisen als einzige Lagen in allen Jahreszeiten sowie übers Jahr betrachtet einen signifikanten Wendepunkt auf.

Tabelle 5-5 enthält die Angaben über den Zeitpunkt der Wendepunkte. Bei den absoluten Häufigkeiten der Wetterlagen pro Jahr tritt der früheste Wendepunkt im Jahr 1965 (-Lo), der späteste im Jahr 1980 (+Hs) auf. Die meisten Wendepunkte wurden zwischen 1970 bis 1974 registriert. Die Streuung bei den Zeitreihen der einzelnen Jahreszeiten ist etwas grösser als diejenige über das ganze Jahr. Hier wurden Wendepunkte in den Jahren ab 1958 (Winter, Wetterlage Fe) bis 1984 (Herbst, Wetterlage Fw) festgestellt. Der grösste Teil konzentriert sich jedoch in den Jahren 1965 bis 1976. Tendenziell haben die meisten Advektiven Lagen etwas früher reagiert (Wendepunkt zwischen 1965-75) als die Konvektiven Lagen (Wendepunkt zwischen 1968-80). In der Gruppe der Konvektiven Lagen haben die Hochdrucklagen etwas später reagiert als die Flachdruck- und Tiefdrucklagen. Letztere haben ihren Wendepunkt Mitte bis Ende 60er Jahre.

Leider weisen die Wendepunktjahre auch innerhalb der einzelnen Wetterlagen für verschiedene Jahreszeiten eine grosse Streuung auf, wie etwa die Südlage -Sx mit einem Wendepunkt im Jahr 1959 für die Frühjahresmonate und 1981 für die Herbstmonate. Da die Werte in den einzelnen Jahreszeiten sehr stark streuen, werden in der folgenden Analyse nur noch die Zeitreihen der absoluten Häufigkeiten pro Jahr untersucht.

Tab. 5-5: Jahr der Wendepunkte für die absoluten Häufigkeiten der Zeitreihen der 40 Wetterlagen (WI) nach SCHÜEPP für das Jahr und alle vier Jahreszeiten im Zeitraum 1945 bis 1994.

WI	Jahr	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	WI	Jahr	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
+Ho	—	1970	—	—	—	Wj	—	—	—	—	—
+Hw	1977	1971	—	1978	1976	+Wp	—	1973	—	—	—
+Hn	1972	1974	1980	—	1976	-Wp	—	—	—	—	—
+He	1970	1970	—	—	—	+Wx	—	—	1974	—	—
+Hs	1980	1970	—	1980	1968	-Wx	1972	1971	1970	1972/74	1965
Fo	—	—	—	—	—	Nj	—	—	—	—	—
Fw	—	—	—	—	1984	+Np	—	—	—	—	—
Fn	1973	1979	—	1973	1969	-Np	—	—	—	—	—
Fe	1974	1973	—	—	—	+Nx	1974	1974	1970	—	—
Fs	1974	1958	—	—	—	-Nx	—	1971	—	—	—
-Lo	1965	—	—	—	—	Ej	—	—	—	—	—
-Lw	—	—	—	1968	—	+Ep	—	—	—	—	—
-Ln	—	—	1969	—	—	-Ep	1967	1970	—	—	—
-Le	—	—	1973	—	—	+Ex	1972	—	—	—	—
-Ls	—	—	—	—	—	-Ex	—	—	—	—	—
Xx	1970	—	1972	—	1970	Sj	—	—	—	—	—
+Xj	1979	1976	—	—	1962	+Sp	1965	—	—	—	—
-Xj	—	—	1965	—	—	-Sp	—	1978	—	—	—
+Xo	1974	1976	—	—	1974	+Sx	—	1964	—	—	—
-Xo	1974	1970	—	1974	—	-Sx	1970	1965	1959	1970	1981

Aus den Trend- und den Wendepunktanalysen geht hervor, dass vor allem die 'Hochdrucklagen mit definierter Höhenströmung' (+Hw, +Hn, +He, +Hs) an der Zunahme der Konvektiven Lagen beteiligt sind und die drei Lagen -Wx, +Nx und -Sx an der Abnahme der advektiven Lagen. Eine Zu- bzw. Abnahme der Häufigkeit einer Lage kann durch die Veränderung von deren Persistenz verursacht sein. Dies wird im folgenden Kapitel näher untersucht.

5.2.3 Persistenzanalyse trendbehafteter SCHÜEPP-Wetterlagen

Unter Persistenz versteht man das Bestehenbleiben eines bestimmten Zustandes über längere Zeiträume. Im Zusammenhang mit Wetterlagen wird darunter das Bestehenbleiben einer bestimmten Wetterlage oder Gruppe über mehrere Tage verstanden.

Die Persistenzanalyse wurde nur bei trendbehafteten Wetterlagen durchgeführt. Zu den trendbehafteten Lagen gehören die Konvektiven Wetterlagen +Hw, +Hn, +He und +Hs, die in der 'konvektiven Gruppe' zusammengefasst werden und die Advektiven Lagen -Wx, +Nx und -Sx, die der 'advektiven Gruppe' zugeteilt werden.

Mit Hilfe der Persistenzanalyse soll festgestellt werden, ob sich in der Beständigkeit beziehungsweise der Andauer der untersuchten Wetterlagen eine Veränderung vollzogen hat oder nicht. Insbesondere soll für die konvektive Gruppe (+Hw, +Hn, +He, +Hs) festgestellt werden, ob deren Häufigkeits-

zunahme rein auf ein zahlenmässig häufigeres Auftreten zurückzuführen ist, oder ob die jeweilige Andauer (Sequenzlänge) dieser Gruppe, zugenommen hat. Analog soll für die advective Gruppe (-Wx, +Nx, -Sx) festgestellt werden, ob der degressive Trend auf eine Abnahme der Andauer dieser Gruppe zurückzuführen ist.

Die Abbildungen 5.6 und 5.7 zeigen die Entwicklung der Anzahl Tage der konvektiven und der advectiven Gruppe während derer ein, zwei und mehr Tage andauernde Sequenzen (1-, 2- und 3+-tägige Sequenzen) aufgetreten sind. Im Folgenden werden die drei- und mehrtägigen Sequenzen mit dem Begriff '3+' bezeichnet.

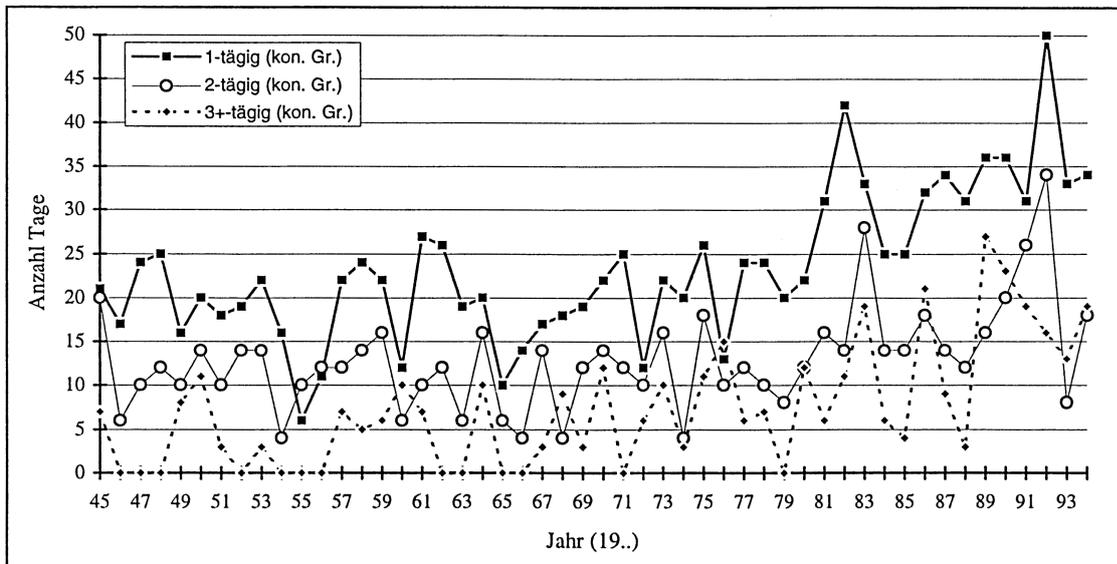


Abb. 5.6: Anzahl Tage pro Jahr mit 1-, 2- und 3⁺-tägigen Sequenzen der konvektiven Gruppe (+Hw, +Hn, +He, +Hs), im Beobachtungszeitraum 1945 bis 1994.

Der in Kapitel 5.2.2 statistisch nachgewiesene zunehmende Trend der konvektiven Gruppe ist auch in Abbildung 5.6 sichtbar. Insbesondere ist ersichtlich, dass die Anzahl Tage der 3⁺-tägigen Sequenzen stärker zugenommen hat als die Anzahl der Tage mit 1- und 2-tägigen Sequenzen.

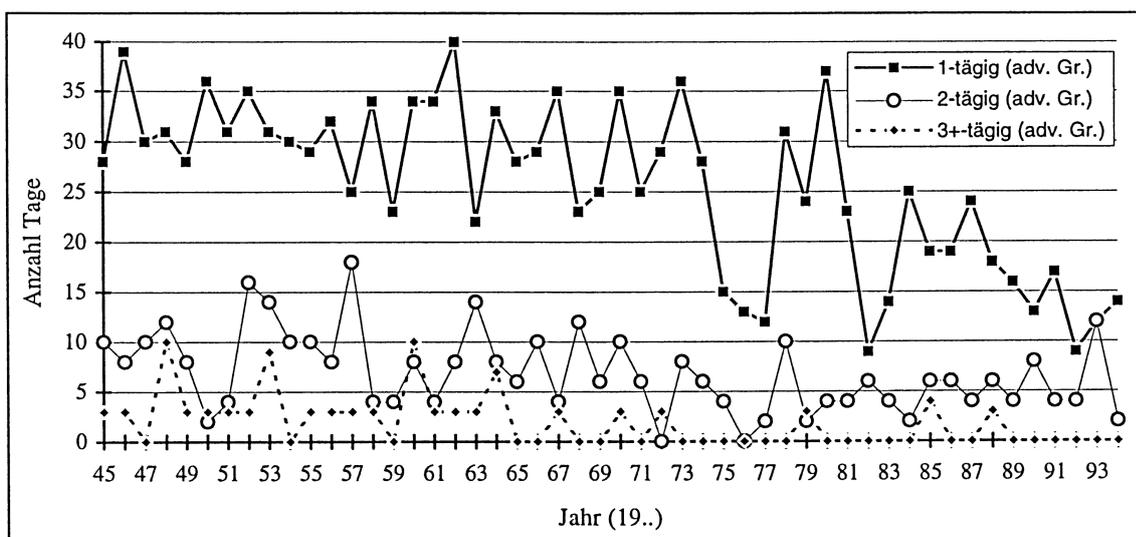


Abb. 5.7: Anzahl Tage pro Jahr mit 1-, 2- und 3⁺-tägigen Sequenzen der advectiven Gruppe (-Wx, +Nx, -Sx), im Beobachtungszeitraum 1945 bis 1994.

Bei der advektiven Gruppe (vgl. Abb. 5.7) sind 3⁺-tägige Sequenzen in den Jahren 1989-1994 überhaupt nicht mehr vorgekommen. Die Veränderung scheint somit auch in diesem Fall eher die längeren Sequenzen zu betreffen.

Um festzustellen, ob sich die Anteile an den verschiedenen Sequenzlängen innerhalb der beiden Gruppen tatsächlich verändert haben, wurden die relativen Anteile der 1-, 2-, 3⁺-tägigen Sequenzen an der gesamten Anzahl Tage, an denen die betreffende Gruppe aufgetreten war, berechnet. Diese relativen Anteile wurden dem monotonen Trendtest und dem Wendepunkttest unterzogen, welche bereits in den Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2 erläutert wurden. Damit soll die aus Abbildung 5.6 ersichtliche Zunahme der 3⁺-tägigen Sequenzen bei der konvektiven Gruppe auch statistisch geprüft und belegt werden. Entsprechend soll bei der advektiven Gruppe die Abnahme der langen Sequenzen statistisch geprüft und belegt werden (vgl. Abb. 5.7).

Die Resultate der Tests sind in Tabelle 5-6 dargestellt.

Tab. 5-6: Resultate des S_1 -Lokationstrend-Tests und des Wendepunkttests für die relativen Anteile der Tage mit verschiedenen Sequenzlängen am Total aller Tage und für die mittlere Persistenz der konvektiven und advektiven Gruppe).

S1-Test auf monotonen Trend				
	mittlere Persistenz	1-tägige Sequenzen	2-tägige Sequenzen	3 ⁺ -tägige Sequenzen
konvektive Gruppe	Nein	Nein	Ja	Ja
advektive Gruppe	Nein	Nein	Nein	Ja
Wendepunkttest nach PETTITT				
konvektive Gruppe	Nein	Nein	Nein	Ja
Wendepunkt-Jahr	1971	—	1973	1967
Wahrscheinlichkeit des Wendepunktes	79.7%	49.2%	94.3%	99.4%
advektive Gruppe	Ja	Nein	Nein	Ja
Wendepunkt-Jahr	1964	1964		1964
Wahrscheinlichkeit des Wendepunktes	96.3%	88.2%	59.2%	99.9%

schrattierte Felder: signifikant negative Trends, bzw. Wendepunkte
 punktierte Felder: signifikant positive Trends, bzw. Wendepunkte

Bei der konvektiven Gruppe hat der Anteil der 3⁺-tägigen Sequenzen signifikant zugenommen, während der Anteil der 2-tägigen Sequenzen signifikant abgenommen hat. Beim Anteil der 1-tägigen Sequenzen lässt sich statistisch kein Trend nachweisen. Da der Anteil längerer Sequenzen zugenommen hat, sollte auch die mittlere Persistenz, das heisst die mittlere Dauer, während der eine bestimmte Lage bestehen bleibt, zugenommen haben. Abbildung 5.8 zeigt, dass dies, wenn auch in sehr geringem Ausmass, tatsächlich der Fall ist. Jedoch ist die Zunahme der mittleren Persistenz der konvektiven Gruppe viel geringer als deren Schwankungen, weshalb sie sich statistisch nicht nachweisen lässt (vgl. dazu Tab. 5-6).

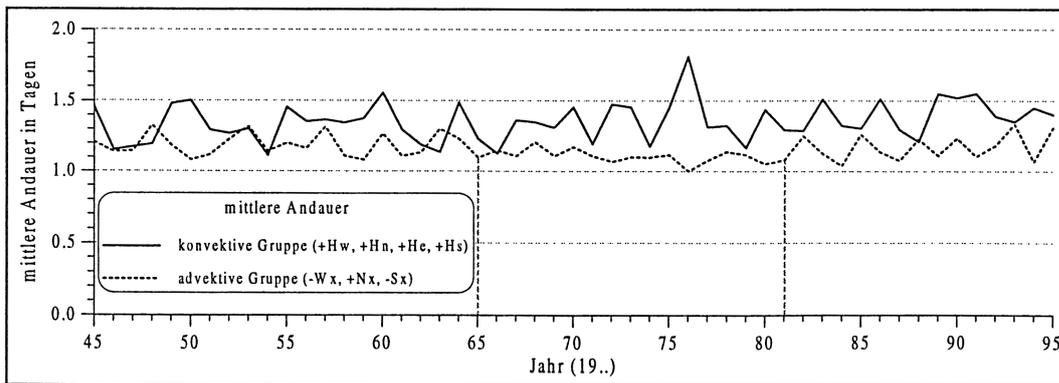


Abb. 5.8: Mittlere Andauer der konvektiven Gruppe (+Hw, +Hn, +He, +Hs) und der advektiven Gruppe (-Wx, +Nx, -Sx) in der Zeitperiode 1945 bis 1994. Die zwei vertikalen Linien bezeichnen den Zeitraum von 1965 bis 1981 mit etwas geringerer mittlerer Andauer der advektiven Gruppe.

Der Wendepunkt für die Zunahme des relativen Anteils der 3⁺-tägigen Sequenzen wird mit 99% Wahrscheinlichkeit im Jahr 1967 (Tab. 5-6) angesetzt. Die Häufigkeitszunahme der konvektiven Gruppe ist also insgesamt auf eine zunehmende Persistenz zurückzuführen. Dies wird durch Abbildung 5.9 noch verdeutlicht. Sie zeigt die Anzahl Fälle pro Jahr mit einer Sequenzlänge von 5 und mehr Tagen. Es ist ersichtlich, dass solche Sequenzen in den letzten Jahren deutlich häufiger aufgetreten sind als früher.

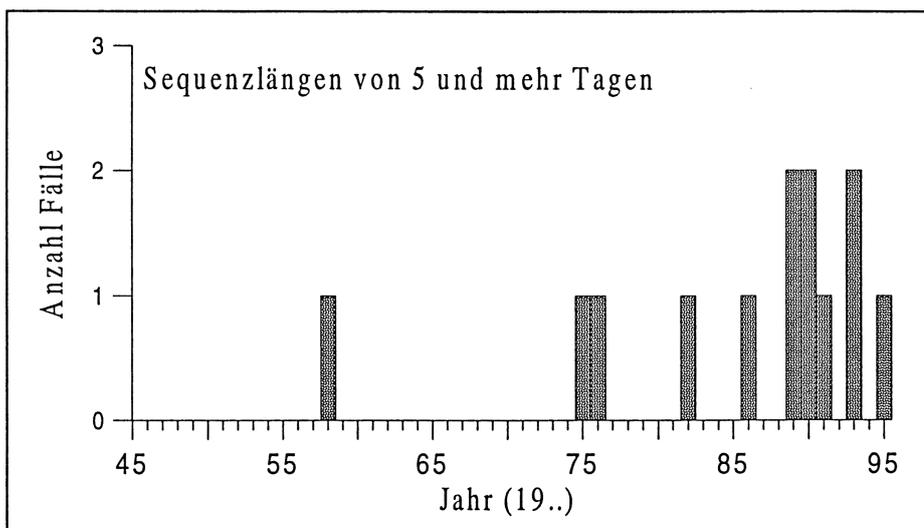


Abb. 5.9: Anzahl Fälle pro Jahr der konvektiven Gruppe (+Hw, +Hn, +He, +Hs) mit einer Sequenzlänge von 5 und mehr Tagen, im Beobachtungszeitraum 1945 bis 1994.

Im Beobachtungszeitraum wurde eine Sequenz von 5 oder mehr Tagen erstmals im Jahr 1958 registriert. In den letzten sechs Jahren (1989-1994) waren es insgesamt 6 Fälle.

Eine gegenläufige Tendenz zeichnet sich bei der advektiven Gruppe ab. Wie Abbildung 5.7 zeigt, sind von 1989-1994 keine 3⁺-tägigen Sequenzen mehr aufgetreten. Seit Anfang der 70^{er} Jahre treten bei der advektiven Gruppe immer wieder mehrere aufeinanderfolgende Jahre ohne 3⁺-tägige Sequenz auf. Obschon bereits früher Jahre ohne 3⁺-tägige Sequenzen aufgetreten sind, wird aus Abbildung 5.7 deutlich, dass dies vor 1970 weniger häufig der Fall war. Zum selben Ergebnis gelangt der Trendtest, welcher statistisch belegt, dass der Anteil der 3⁺-tägigen Sequenzen bei der advektiven Gruppe abnimmt (vgl. Tab. 5-6). Es lässt sich jedoch auch bei der advektiven Gruppe keine Abnahme der

mittleren Persistenz nachweisen, was aus der Abbildung 5.8 deutlich hervorgeht. Einzig in der Zeitspanne von 1965 bis 1981 (in Abb. 5.8 mit zwei senkrechten Linien markiert) war die mittlere Andauer etwas geringer. Dies lag vor allem daran, dass die Anzahl Tage mit Sequenzlänge 2 Tage sehr stark abnahmen, während die eintägigen Sequenzen noch bis etwa 1975 auf demselben Niveau blieben, bevor sie nach einer kurzen Erholung ab 1984 stark zu sinken begannen (vgl. dazu Abb. 5.7). Entsprechend lässt sich für die mittlere Persistenz der advektiven Gruppe im Jahr 1964 ein signifikanter Wendepunkt finden. Die durch diesen Wendepunkt eingeleitete Abnahme endet 1984 mit einem weiteren Wendepunkt, der allerdings nicht signifikant ist. Auch der Wendepunkt für die Abnahme des relativen Anteils der 3⁺-tägigen Sequenzen wird auf das Jahr 1964 festgelegt. Die 1- und 2-tägigen Sequenzen der advektiven Gruppe weisen keinen signifikanten Wendepunkt auf.

Fazit

Die Persistenzanalyse zeigt, dass sich die Häufigkeitszunahme der konvektiven Gruppe auf eine Zunahme in den Sequenzen von 3⁺ Tagen zurückführen lässt, insbesondere konnte in den letzten Jahren ein deutlich häufigeres Auftreten von 5-tägigen Sequenzen festgestellt werden. Die Abnahme der Häufigkeit der advektiven Gruppe kann auf eine Abnahme oder sogar ein Ausbleiben der 3⁺-tägigen Sequenzen zurückgeführt werden.

Obschon der Anteil der 3⁺-tägigen Sequenzen bei der konvektiven Gruppe signifikant zugenommen, bei der advektiven Gruppe signifikant abgenommen hat, konnte weder bei der mittleren Persistenz der konvektiven Gruppe eine Zunahme, noch eine Abnahme derselben bei der advektiven Gruppe statistisch nachgewiesen werden. Dies ist hauptsächlich auf zwei Gründe zurückzuführen.

1. Der Anteil der Einzeltage, sowohl bei der konvektiven als auch bei der advektiven Gruppe, ist sehr hoch. Er liegt bei der konvektiven Gruppe je nach Jahr zwischen 40% und 80%, bei der advektiven Gruppe zwischen 60% und 100%. Dies hat zur Folge, dass die mittlere Persistenz stark durch die Einzeltage geprägt wird.
2. Die Anzahl der Tage, die auf eine bestimmte Gruppe entfallen, schwankt von Jahr zu Jahr sehr stark. Dadurch wird auch die mittlere Persistenz gegenüber ihrem langjährigen Durchschnitt starke Schwankungen aufweisen. Da die Schwankungen den Trend bei weitem übertreffen, kann dieser statistisch nicht festgestellt werden.

Eine Zunahme der mittleren Persistenz bei der konvektiven Gruppe wird sich erst nachweisen lassen, wenn die 3⁺-tägigen Sequenzen einen ähnlich hohen Anteil erreicht haben wie die 1-tägigen Sequenzen.

5.3 Zeitreihenanalyse der alpin-synoptischen Gruppierung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen

Das Schema zur Klassifikation europäischer Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY ist weltweit eine der bekanntesten Wetterlagenklassifikationen. Es erstaunt daher nicht, dass die Zeitreihen dieser Klassifikation periodisch immer wieder aufgearbeitet wurden (BREZOWSKY, 1952; HESS, 1952; HESS und BREZOWSKY, 1952; MERTZ, 1959; HESS und BREZOWSKY, 1969; SPEKAT, 1983; GRABAU, 1985; BARDOSSY und CASPARY, 1990; FRANKENBERG und KAPPAS, 1991; KLAUS, 1993; GERSTENGARBE et al., 1993). Im Folgenden soll daher nur auf die einzelnen Grosswetterlagen eingegangen werden, wenn dies für das Verständnis nötig wird. Ansonsten sollen vor allem die 8 Gruppen der alpin-synoptischen Gruppierung der HESS/BREZOWSKY-Klassifikation (vgl. Kap. 3.1.2.1) analysiert werden, denn sie stellen eine optimale Zusammenfassung der einzelnen Grosswetterlagen für das Alpengebiet dar. Analog zu Kapitel 5.2 soll auch dieses Kapitel in eine statische und eine dynamische Betrachtung aufgeteilt werden.

5.3.1 Statische Betrachtung über den Zeitraum 1881 bis 1990

In der statischen Betrachtung werden nicht nur die Häufigkeiten über den gesamten Zeitraum, sondern auch der Variationskoeffizient dieser Häufigkeiten betrachtet. Der Variationskoeffizient beinhaltet die Schwankungen der Häufigkeiten über einen bestimmten Zeitraum (hier 110 Jahre). Somit ist er zwar selbst ein statisches Element (es wird nur ein Wert für den gesamten Zeitraum berechnet), Erklärungen für dessen Grösse sind jedoch in der Dynamik der Zeitreihe zu suchen. Der Variationskoeffizient verbindet somit die beiden Betrachtungsweisen. Es ist daher nicht vermeidbar, auch in diesem Kapitel zur Erklärung verschiedener Variationskoeffizienten dynamische Betrachtungen einfließen zu lassen.

Eine Übersicht über die relativen Häufigkeiten und die Variationskoeffizienten der alpin-synoptischen Gruppen der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen über den Zeitraum 1881 bis 1990 gibt Tabelle 5-7.

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die Auftretenshäufigkeiten unter den Gruppen stark schwanken. Gruppe 2, die nur drei Wetterlagen umfasst (WA, WZ, WS), ist in den untersuchten 110 Jahren insgesamt gleich häufig aufgetreten wie Gruppe 1 mit 7 Wetterlagen (NWA, BM, NA, HNA, HB, NEA, HFA). Beide Gruppen machen je knapp $\frac{1}{4}$, zusammen die Hälfte des Gesamtkollektivs aus. Gruppe 3 und 4 machen gemeinsam wiederum rund $\frac{1}{4}$ aus, womit nur noch $\frac{1}{4}$ für die restlichen 4 Gruppen übrigbleibt.

Aus den relativen Häufigkeiten in Tabelle 5-7 kann auch der durchschnittliche Jahresgang der einzelnen Gruppen über 110 Jahre (1881-1990) abgelesen werden.

Der Variationskoeffizient, der in dieser Tabelle ebenfalls angegeben ist, gibt die Standardabweichung in Prozent des Mittelwertes an. Ein grosser Variationskoeffizient bedeutet demnach eine starke Streuung der Häufigkeiten von Jahr zu Jahr, bezogen auf den Mittelwert; ein kleiner Variationskoeffizient ist kennzeichnend für Daten mit einer geringen Streuung, wiederum bezogen auf den Mittelwert.

Tab. 5-7: Relative Häufigkeiten und monatliche Variationskoeffizienten (Standardabweichung/Mittelwert*100) der alpin-synoptischen Gruppierung der Grosswetterlagen Europas nach HESS/BREZOWSKY (vgl. Abkürzungsverzeichnis) bezogen auf den Zeitraum 1881-1990 (Quelle: RICKLI, 1995).

HB Lage		JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	Jahr
Gruppe 1	rel. Hk.	19.1	22.9	22.5	25.8	27.4	32.2	28.5	26.4	27.6	22.1	21.4	21.5	24.8
	Varkoef	21%	18%	24%	22%	17%	17%	26%	26%	24%	26%	25%	26%	
Gruppe 2	rel. Hk.	25.6	23.3	22.9	17.2	16.1	23.2	28.1	31.9	25.0	25.2	24.0	29.4	24.3
	Varkoef	25%	24%	23%	34%	34%	20%	17%	26%	26%	27%	27%	26%	
Gruppe 3	rel. Hk.	15.3	12.2	14.2	16.5	11.9	14.0	15.8	12.7	12.7	11.0	15.9	15.0	14.0
	Varkoef	24%	40%	28%	31%	41%	29%	27%	36%	47%	48%	26%	19%	
Gruppe 4	rel. Hk.	15.0	16.4	13.3	10.3	14.4	11.5	10.7	9.9	16.2	16.3	11.2	12.2	13.1
	Varkoef	41%	31%	49%	33%	38%	41%	23%	30%	40%	20%	28%	43%	
Gruppe 5	rel. Hk.	6.5	7.1	7.3	9.2	10.0	5.7	6.9	8.4	7.5	9.8	11.6	8.4	8.2
	Varkoef	52%	44%	49%	39%	62%	63%	55%	36%	60%	45%	46%	39%	
Gruppe 6	rel. Hk.	7.6	8.3	9.8	10.1	8.6	6.2	3.8	4.3	4.3	4.1	5.3	5.1	6.4
	Varkoef	56%	51%	43%	46%	43%	81%	65%	84%	58%	73%	57%	58%	
Gruppe 7	rel. Hk.	6.9	5.3	4	3.3	3.4	2.1	2.2	3.2	3.7	6.2	6.4	5.5	4.4
	Varkoef	32%	71%	71%	85%	95%	127%	110%	113%	114%	63%	46%	54%	
Gruppe 8	rel. Hk.	3.8	4.2	5.1	6.7	7.1	4.5	3.4	2.8	2.1	4.1	3.6	2.3	4.1
	Varkoef	74%	63%	53%	58%	64%	44%	57%	46%	60%	64%	54%	66%	

horizontal schraffierte Felder: Zeilenminima der relativen Häufigkeiten;
 abwärts schraffierte Felder: Zeilenmaxima der relativen Häufigkeiten;
 aufwärts schraffierte Felder: Zeilenminima der Variationskoeffizienten;
 vertikal schraffierte Felder: Zeilenmaxima der Variationskoeffizienten

Bei Gruppe 1 zeichnet sich ein Maximum der relativen Häufigkeit im Sommerhalbjahr ab (vgl. Tab. 5-7), wobei die Variationskoeffizienten Ende Frühjahr / Anfangs Sommer etwas geringer sind als diejenigen der Herbst- und Frühwintermonate. Der Monat mit der grössten Häufigkeit (fast $\frac{1}{3}$ der totalen Häufigkeit der Gruppe 1) fällt mit dem kleinsten Wert des Variationskoeffizienten zusammen. Das bedeutet, dass das Juni-Maximum mit grosser Wahrscheinlichkeit auftritt und die Schwankungen der Häufigkeiten von Jahr zu Jahr in diesem Monat, verglichen mit den anderen Monaten, geringer sind. Die Lagen der ersten Gruppe wie auch die Lagen der zweiten Gruppe treten insgesamt mit relativ grosser Regelmässigkeit auf.

Die Gruppe 2 weist einen zweigipfligen Jahresgang mit einem Häufigkeitsmaximum im Spätsommer (August) und einem zweiten Maximum Anfang Winter (Dezember) auf (vgl. Tab. 5-7). Am regelmässigsten tritt die Gruppe 2 im Juli in Erscheinung, also in einem Monat, in welchem sie auch häufig auftritt. Der Variationskoeffizient beträgt dabei 17%. Wie bei der Gruppe 1 gilt auch für die Gruppe 2 mit guter Näherung die Aussage, dass grössere Häufigkeiten tendenziell mit geringeren Variationskoeffizienten einher gehen.

Gruppe 3 hat kein deutliches Häufigkeitsmaximum im Jahresgang. Am regelmässigsten tritt diese Gruppe mit einem Variationskoeffizienten von 19% im Dezember in Erscheinung (vgl. Tab. 5-7), am unregelmässigsten in den Monaten September und Oktober, wo der Variationskoeffizient bis auf 48% ansteigt.

Wie Gruppe 2 zeigt auch die vierte Gruppe zwei deutliche Häufigkeitsmaxima. Zu den zwei primären Maxima im Frühherbst (Sept./Okt.) und Spätwinter (Jan./Feb.) kommt ein sekundäres Maximum im Mai dazu. Der Jahresgang dieser Gruppe kann jedoch von Jahr zu Jahr stark variieren, was sich in den

hohen Variationskoeffizienten bis 50% zeigt. Jedoch gehen auch in dieser Gruppe tendenziell kleinere Variationskoeffizienten mit grösseren Häufigkeiten einher.

Auch in Gruppe 5 sind zwei deutliche Häufigkeitsmaxima erkennbar, im Spätfrühjahr (April/Mai) und im Spätherbst (Okt./Nov.). Zwischen den beiden Maxima zeigt sich im August ein sekundäres Maximum. Die Variationskoeffizienten sind in allen Monaten sehr hoch. Das Mai-Maximum weist einen Variationskoeffizienten von 62% auf. Für diese Gruppe trifft die Aussage nicht zu, dass grössere Häufigkeiten mit geringeren Variationskoeffizienten einher gehen. Die grosse Variabilität der Gruppe 5 wird in Abbildung 5.10 veranschaulicht.

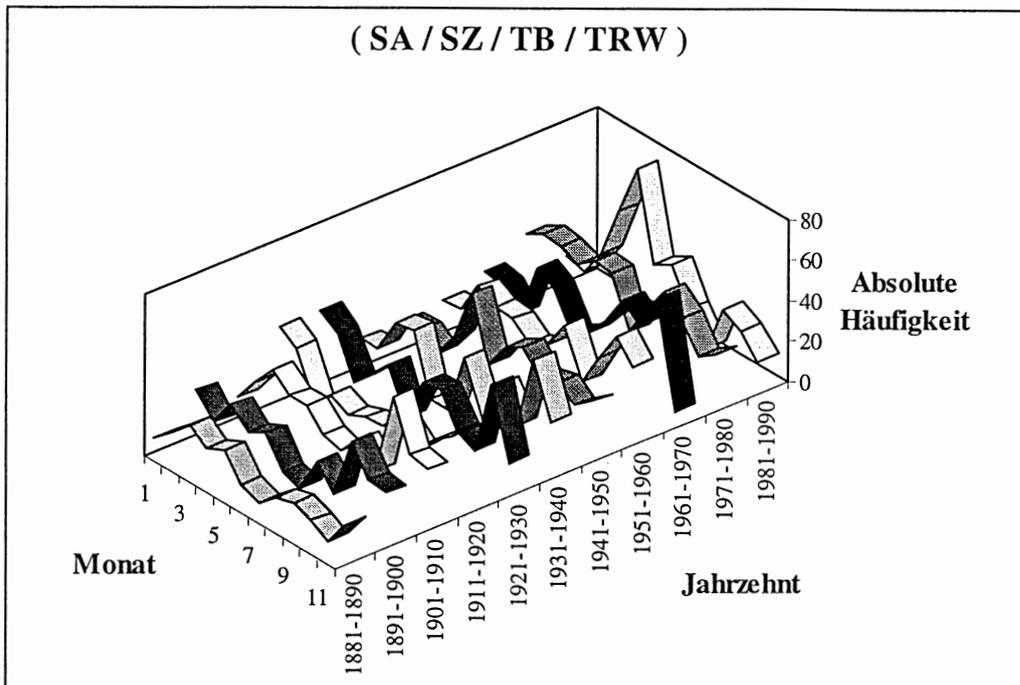


Abb. 5.10: Jahresgang der Gruppe 5 (Südlagen), aufgeteilt nach Dekaden (Quelle: RICKLI, 1995).

Aus Abbildung 5.10 wird deutlich, dass das Mai-Maximum vor allem durch die sehr hohe absolute Häufigkeit des Mai-Maximums der *letzten* Dekade (1981-1990) hervorgerufen wurde. In dieser Dekade ist die Gruppe 5 (Südlagen), im Vergleich zum Mai früherer Dekaden, doppelt so häufig aufgetreten. Für den April sieht die Situation ähnlich aus.

Die Gruppen 6 und 8 zeichnen sich durch ein deutliches Frühlingsmaximum aus. Bei beiden sind die Variationskoeffizienten im Frühjahr etwas geringer als in den restlichen Jahreszeiten. Bei Gruppe 8 sind sie nur im Sommer noch kleiner. Insgesamt sind die Variationskoeffizienten jedoch in allen Monaten sehr hoch, meist bei 50% oder mehr.

Durch eine sehr hohe durchschnittliche Variabilität und ein deutliches Wintermaximum zeichnen sich in der Beobachtungsperiode (1881 bis 1990) die Südwestlagen (Gruppe 7) aus. Die hohe Variabilität ist jedoch nicht auf eine Verschiebung des Jahresganges, wie bei Gruppe 5 oder eine stark fluktuierende Häufigkeit von Jahr zu Jahr wie bei Gruppe 4 zurückzuführen, sondern auf eine insgesamt starke Zunahme der Häufigkeit dieser beiden Lagen (SWA und SWZ) im Sommerhalbjahr.

Dies geht besonders deutlich aus den absoluten Dekadenwerten aus Tabelle 5-8 hervor. Es ist jedoch nicht von der Hand zu weisen, dass die Südwestlagen auch eine sehr grosse Variabilität von Jahrzehnt zu Jahrzehnt aufweisen, was beispielsweise durch die absoluten Häufigkeiten im Monat Juni während der letzten drei Dekaden (vgl. Tab. 5-8) bestätigt wird. Während in den 70^{er} Jahren im Monat Juni nur gerade zweimal eine Südwestlage registriert wurde, waren es im Jahrzehnt davor neunmal so viele und in der Dekade 1981-1990 sogar 12 mal so viele.

Tab. 5-8: Absolute Häufigkeit der Gruppe 7 (Südwestlagen) pro Dekade für alle Monate (Quelle: RICKLI, 1995).

Dekade	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Summe
1881-1890	16	36	7	4	6	8	8	0	0	14	18	9	126
1891-1900	21	11	13	2	12	0	8	3	0	25	24	5	124
1901-1910	22	0	7	5	2	3	0	0	2	14	17	3	75
1911-1920	16	20	7	9	3	0	0	0	7	6	9	25	102
1921-1930	16	3	7	3	0	0	0	0	0	7	6	10	52
1931-1940	19	13	5	9	4	0	4	0	0	9	18	24	105
1941-1950	19	9	10	10	0	5	6	16	17	18	24	22	156
1951-1960	35	23	34	11	22	12	4	26	23	26	25	19	260
1961-1970	32	19	22	30	24	18	26	18	24	46	16	15	290
1971-1980	25	7	15	6	19	2	11	21	12	15	14	30	177
1981-1990	14	25	29	22	25	25	7	25	37	34	38	27	308

5.3.2 Dynamische Betrachtung der Häufigkeiten der Zeitreihen

Analog zu Kapitel 5.2.2 wird hier die Zeitreihenanalyse für die alpin-synoptischen Gruppierungen unter dem Gesichtspunkt der eingangs gestellten fünf Fragen behandelt.

Im Anschluss daran folgt eine Persistenzanalyse mit dem Ziel, die Ursache möglicher positiver oder negativer Trends zu klären. Da ein Teil der Fragen bereits von anderen Autoren (GRABAU, 1985; BARDOSSY & CASPARY, 1990; GERSTENGARBE et al., 1993) aufgegriffen und behandelt wurde, werden an diesen Stellen nur ausgewählte Beispiele diskutiert und das Schwergewicht auf ergänzende Informationen gelegt.

1) Verhalten der Lagen einer bestimmten Gruppe

Hier wird abgeklärt, ob sich alle Grosswetterlagen einer bestimmten alpin-synoptischen Gruppe ähnlich verhalten. Wie Abbildung 5.11 am Beispiel der Gruppe 2 zeigt, kann auch für die alpin-synoptischen Gruppen nicht davon ausgegangen werden, dass sich alle Grosswetterlagen einer Gruppe gleich oder ähnlich verhalten. In der Abbildung 5.11 sind die absoluten Häufigkeiten der gesamten Gruppe 2 sowie der einzelnen Grosswetterlagen, die dieser Gruppe angehören, dargestellt. Die absoluten Häufigkeiten der beiden Grosswetterlagen WA und WS verlaufen praktisch gegenläufig, wodurch sich ihre Schwankungen grösstenteils aufheben. Dies hat zur Folge, dass sich Gruppe 2 praktisch nur aus dem Verhalten der Grosswetterlage WZ ableiten lässt.

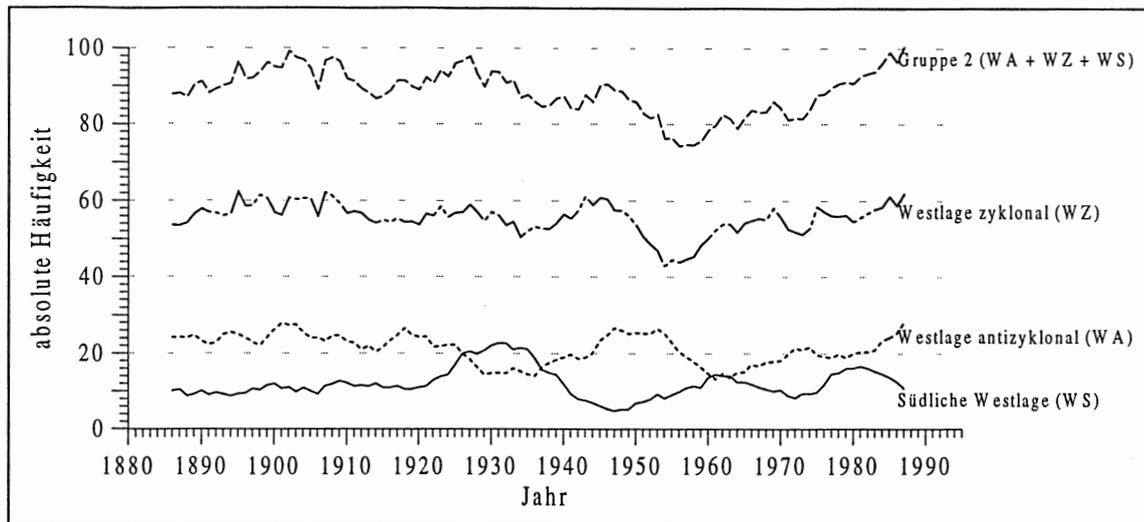


Abb. 5.11: 11-jährige gleitende Mittel der absoluten Häufigkeit der alpin-synoptischen Gruppe 2, der Grosswetterlagen WA, Wz und Ws über den Zeitraum 1881 bis 1992.

2) Verhalten in den Jahreszeiten

Aus den Ausführungen in Kapitel 5.3.1, insbesondere aus den Betrachtungen über den Variationskoeffizienten, ist bereits zu vermuten, dass sich die einzelnen alpin-synoptischen Gruppen in den verschiedenen Jahreszeiten unterschiedlich verhalten. Abbildung 5.12 bestätigt diese Vermutung anhand des Beispiels der Gruppen 1 und 8 weitgehend.

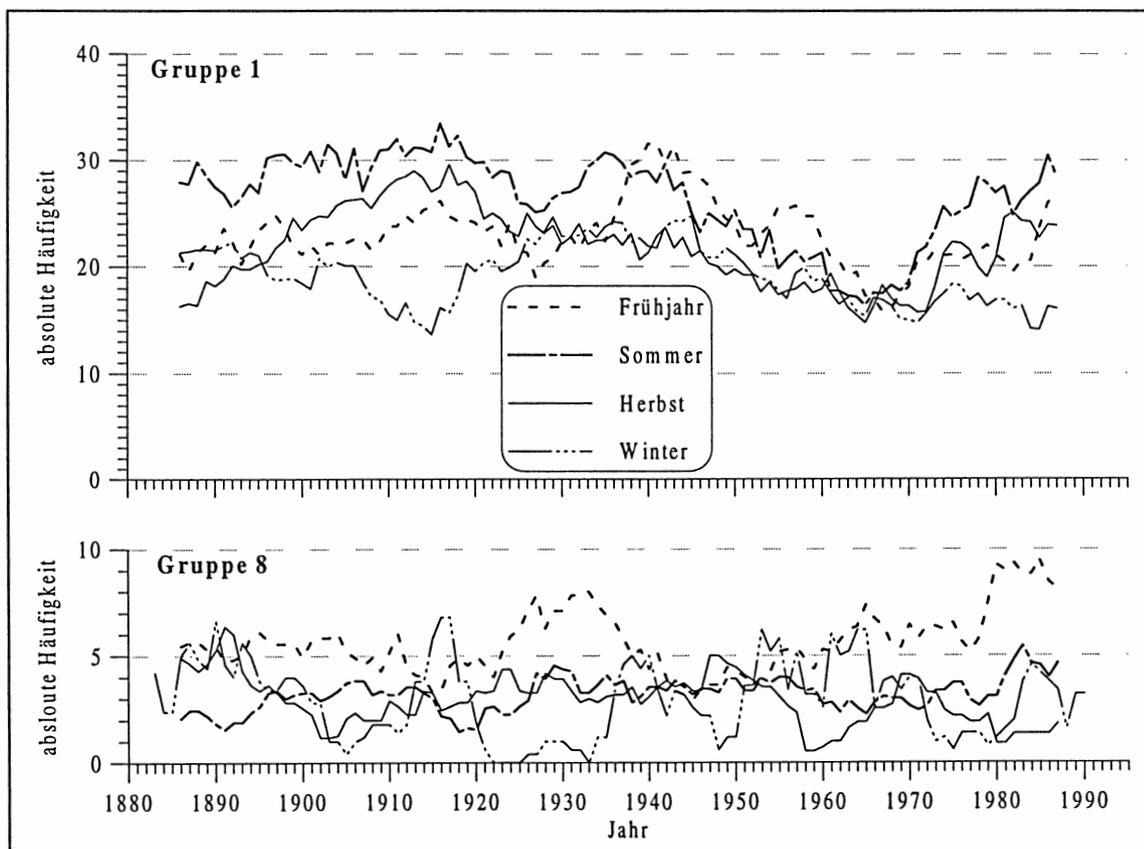


Abb. 5.12: 11-jährige gleitende Mittel der absoluten Häufigkeit der alpin-synoptischen Gruppe 1 (oben) und 8 (unten) in den vier Jahreszeiten für den Zeitraum 1881 bis 1992.

Bei Gruppe 1 in Abbildung 5.12 verlaufen die Kurven der drei Jahreszeiten Frühling, Sommer und Herbst ähnlich. Die absoluten Häufigkeiten im Winter dagegen verlaufen nur in gewissen Perioden gleichsinnig zu den übrigen Jahreszeiten, z.B. zwischen den 30^{er} und den 60^{er} Jahren. Sie können sogar gegenläufig verlaufen, wie etwa anfangs 20. Jahrhundert bis in die 20^{er} Jahre.

Auch aus der Darstellung der absoluten Häufigkeiten der vier Jahreszeiten der Gruppe 8 (vgl. Abb. 5.12) wird deutlich, dass kein Zusammenhang zwischen dem Verlauf der vier Jahreszeitenkurven besteht. In gewissen Zeitabschnitten können zwei oder mehrere Kurven gleichsinnig verlaufen, in anderen Zeitabschnitten auch gegensinnig. Es wird daher auch bei den Auswertungen der alpin-synoptischen Gruppierungen der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen unumgänglich sein, die Auswertungen ebenfalls für die vier Jahreszeiten durchzuführen.

3) Statistischer Nachweis von Trends und Wendepunkten

In Kapitel 5.2.2 wurden die Fragen 3) und 4) zur Frage nach einem statistisch signifikanten monotonen Trend oder Stationarität zusammengefasst. Im weiteren Verlauf wurde festgestellt, dass jede trendbehaftete Lage auch einen Wendepunkt aufweist. Die statistischen Analysen von Trends und Wendepunkten werden daher bei den alpin-synoptischen Gruppen nicht getrennt, sondern gemeinsam behandelt.

Mit Hilfe des S1-Tests von COX and STUART auf monotonen Trend (vgl. Kap. 5.1.1) lässt sich in den absoluten Häufigkeiten pro Jahr der Gruppen 5 und 7 statistisch ein signifikanter positiver Trend nachweisen (vgl. Tab. 5-9). Dies dürfte bereits auf Grund der Abbildung 5.1 vermutet werden

Die Häufigkeiten der Gruppe 4 dagegen unterliegen einem hoch signifikanten degressiven Trend. Abbildung 5.13 zeigt den Anteil der einzelnen Gruppen am Gesamtkollektiv (ohne unbestimmte Lagen) für den Zeitraum 1881-1992. Es ist deutlich sichtbar, wie das Band der Gruppe 4 gegen rechts (1992) hin abnimmt, während die beiden Bänder der Gruppen 5 und 7 sich weiten.

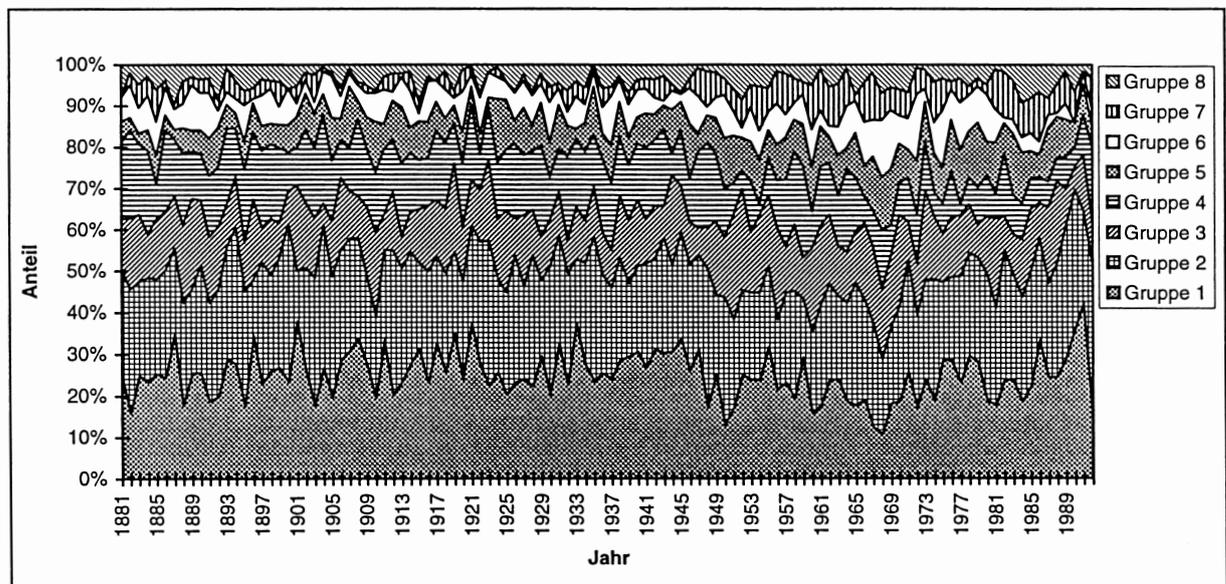


Abb. 5.13: Relative Häufigkeit der alpin-synoptischen Gruppen der Hess-Brezowsky-Wetterlagen (vgl. Abkürzungsverzeichnis) pro Jahr für den Zeitraum 1881 bis 1992.

Wie bereits auf Grund von Tabelle 5-8 zu vermuten war, konnte für die Gruppe 7 mit dem Wendepunkttest (vgl. Kapitel 5.1.2) ein signifikanter Wendepunkt im Jahre 1946 berechnet werden. Für die Gruppen 4 und 5 ergaben sich Wendepunkte in den Jahren 1949 und 1923 (vgl. Tab. 5-9).

Tab. 5-9: Testresultate des S_1 - und des Wendepunkt-Tests der Zeitreihen der Häufigkeiten der alpin-synoptischen Gruppen der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen für den Zeitraum 1881 bis 1990.

	Jahr			Winter			Frühjahr			Sommer			Herbst		
	S_1	Wp	Jahr	S_1	Wp	Jahr	S_1	Wp	Jahr	S_1	Wp	Jahr	S_1	Wp	Jahr
Gruppe 1	Nein	Ja	1947	Nein	Nein		Nein	Nein		Nein	Ja	1940	Nein	Nein	
Gruppe 2	Nein	Nein		Nein	Ja	1973	Nein	Ja	1949	Nein	Nein		Nein	Nein	
Gruppe 3	Nein	Nein		Nein	Nein		Nein	Nein		Nein	Nein		Nein	Nein	
Gruppe 4	Ja	Ja	1949	Ja	Ja	1943	Ja	Ja	1960	Nein	Nein		Ja	Ja	1965
Gruppe 5	Ja	Ja	1923	Nein	Nein		Ja	Ja	1946	Ja	Ja	1923	Nein	Nein	
Gruppe 6	Nein	Nein		Nein	Nein		Nein	Nein		Nein	Nein		Nein	Nein	
Gruppe 7	Ja	Ja	1946	Nein	Nein		Ja	Ja	1948	Nein	Ja	1941	Ja	Ja	1945
Gruppe 8	Nein	Nein		Nein	Nein		Nein	Nein		Nein	Nein		Nein	Ja	1952

S_1 : S_1 -Test;

Wp: Wendepunkt-Test;

Jahr: Jahr des Wendepunktes;

abwärts schraffierte Felder: abnehmender Trend;

vertikal schraffierte Felder: zunehmender Trend

Für die absoluten Häufigkeiten der Gruppe 7 lassen sich im Frühjahr (1948), Sommer (1941) und Herbst (1945) signifikante Wendepunkte nachweisen. Im Winter ist weder ein Trend noch ein Wendepunkt statistisch nachweisbar.

Für alle anderen Gruppen (1-3, 6, 8) lassen sich statistisch keine weiteren monotonen Trends nachweisen.

Ein Wendepunkt im Jahr 1947 mit mindestens 95% Wahrscheinlichkeit verzeichnet zusätzlich zu den anderen drei Gruppen die Gruppe 1.

5.3.3 Persistenz der alpin-synoptischen Gruppen

Aus den Auswertungen von KLAUS (1993) geht hervor, dass die zonale, aber auch die gemischte Zirkulationsform in den letzten 20 Jahren zugenommen haben, während die meridionale Zirkulationsform abgenommen hat. Wie er zeigen konnte, weisen alle Zirkulationsformen, also auch die meridionale, welche insgesamt eine Abnahme verzeichnet, seit rund 20 Jahren einen Anstieg der mittleren Persistenz auf. Jahreszeitlich erfolgten die stärksten Persistenzänderungen im Winter. Seit den sechziger Jahren nahm die mittlere Andauer der zonalen Zirkulationsform um 10 Tage zu.

Im Rahmen dieser Arbeit interessiert daher speziell die Frage, ob dieser Persistenzanstieg auch in den 8 alpin-synoptischen Gruppen beobachtet werden kann.

Die mittlere Persistenz einer Gruppe und die Häufigkeit von verschiedenen langen Sequenzen (Andauer) wurden für alle Gruppen berechnet, wobei für die Andauer in erster Linie die Gruppenzugehörigkeit und nicht die Bezeichnung der einzelnen Grosswetterlage von Bedeutung war. Eine 3-tägige Sequenz der Wetterlage WA mit anschliessender 3-tägiger Sequenz der Wetterlage WZ wurde folglich als 6-tägige Andauer der Gruppe 2 gewertet, da beide Wetterlagen derselben alpin-synoptischen Gruppe (Gruppe 2) angehören.

Abbildung 5.14 zeigt die Resultate aus diesen Berechnungen für die Gruppen 1, 2, 7 und 8 für die Zeitperiode 1881 bis 1992.

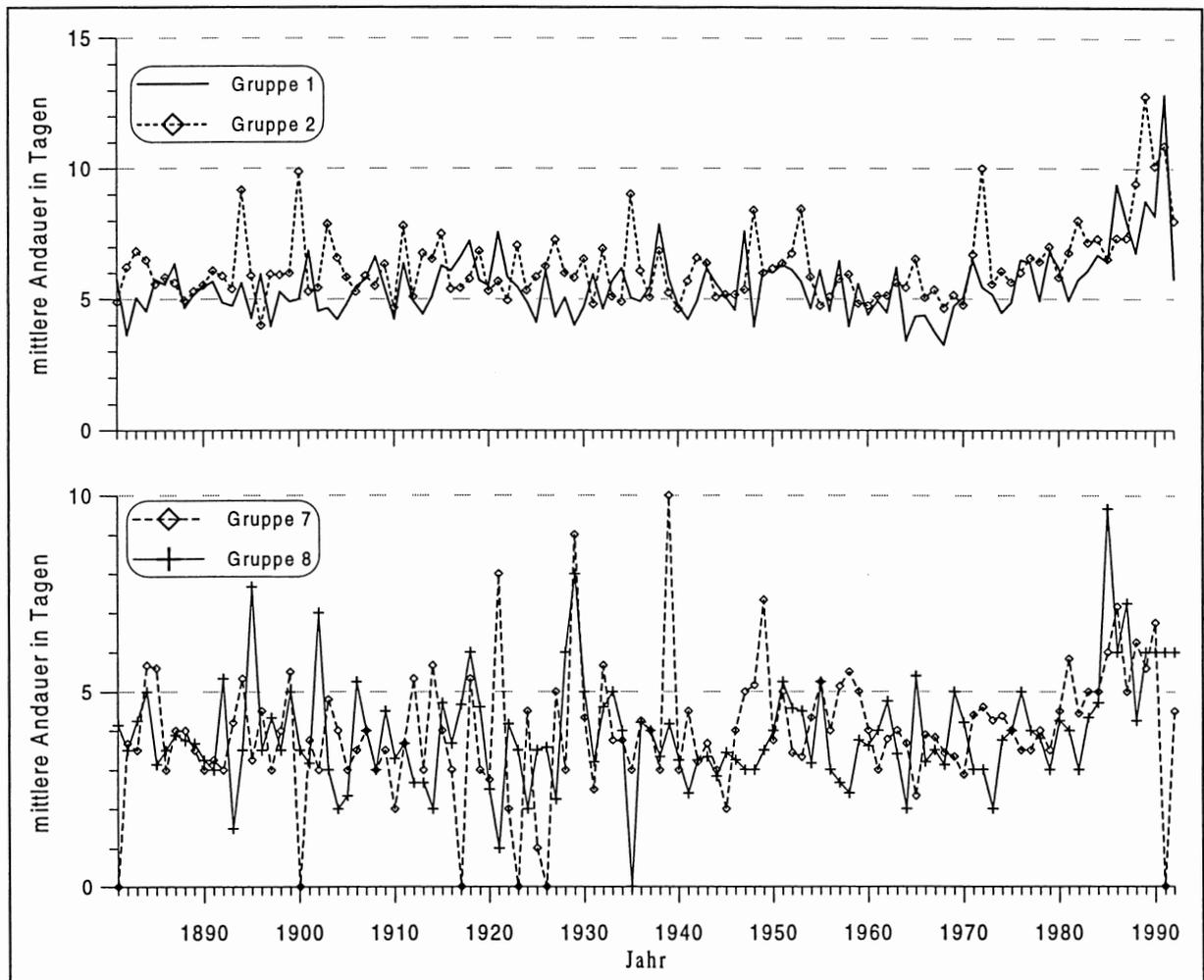


Abb. 5.14: Mittlere Andauer in Tagen der Gruppen 1, 2, 7 und 8 der alpin-synoptischen Einteilung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen nach RICKLI (1995) für die Zeitperiode 1881-1992.

Ein statistisch signifikant monotoner Trend der mittleren Persistenz lässt sich nur für die Gruppen 1, 2, 7 und 8 nachweisen. Dabei handelt es sich bei allen vier Gruppen um einen monoton *steigenden* Trend. Es kann also auch hier zumindest bei der Hälfte der Gruppen von einer Zunahme der mittleren Persistenz ausgegangen werden.

Betrachtet man die Zeitreihe der Anzahl Tage pro Jahr, die einer bestimmten Sequenzlänge angehört, so lässt sich mit Hilfe des Trendtests (S1-Test) nur gerade in den Gruppen 1, 2 und 3 für 3-tägige Sequenzen ein monoton degressiver Trend nachweisen (vgl. Tab. 5-10 Spalte 'S₁-Test'). Das bedeutet, dass sich die Häufigkeitszunahme in den einzelnen Gruppen auf mehrere Sequenzlängen verteilt und daher statistisch nicht oder noch nicht nachgewiesen werden kann.

Etwas deutlicher fallen die Ergebnisse des Wendepunkt-Tests in Tabelle 5-10 aus.

Tab. 5-10: Resultate des S₁-Tests und des Tests auf einen Wendepunkt für die Sequenzlängen von 1 Tag bis 22 und mehr Tage (22⁺ Tage) für die 8 Gruppen der alpin-synoptischen Gruppierung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen für den Zeitraum 1881 bis 1992..

Gruppe und Andauer	S ₁ -Test	sign. Wp	Wahrsch.	Wp-Jahr	Gruppe und Andauer	S ₁ -Test	sign. Wp	Wahrsch.	Wp-Jahr
Gruppe 1					Gruppe 5				
1 Tag	Nein	Ja	99.93%	1969	1 Tag	Nein	Ja	95.30%	1967
2 Tage	Nein	Ja	99.45%	1975	2 Tage	Nein	Nein	76.39%	
3 Tage	Ja	Ja	98.17%	1934	3 Tage	Nein	Nein	81.46%	1961
4 Tage	Nein	Nein	55.93%		4 Tage	Nein	Nein	87.06%	1948
5 Tage	Nein	Nein	55.11%		5 Tage	Nein	Nein	64.11%	
6 Tage	Nein	Nein	38.87%		6 Tage	Nein	Nein	41.87%	
7 Tage	Nein	Nein	38.17%		7 Tage	Nein	Nein	71.69%	
8 bis 14 Tage	Nein	Nein	47.65%		8 bis 14 Tage	Nein	Nein	78.43%	1933
15 bis 21 Tage	Nein	Nein	86.98%	1970	15 bis 21 Tage	Nein	Nein	7.01%	
22 ⁺ Tage	Nein	Nein	46.60%		22 ⁺ Tage	—	—	—	
Gruppe 2					Gruppe 6				
1 Tag	Nein	Ja	98.71%	1966	1 Tag	Nein	Ja	99.67%	1965
2 Tage	Nein	Ja	97.28%	1974	2 Tage	Nein	Ja	98.30%	1974
3 Tage	Ja	Ja	97.88%	1970	3 Tage	Nein	Nein	93.56%	1911
4 Tage	Nein	Nein	70.90%		4 Tage	Nein	Nein	49.20%	
5 Tage	Nein	Nein	67.74%		5 Tage	Nein	Nein	70.63%	
6 Tage	Nein	Nein	79.94%	1931	6 Tage	Nein	Nein	77.20%	
7 Tage	Nein	Nein	68.86%		7 Tage	Nein	Nein	26.55%	
8 bis 14 Tage	Nein	Nein	46.25%		8 bis 14 Tage	Nein	Nein	51.25%	
15 bis 21 Tage	Nein	Nein	89.84%	1975	15 bis 21 Tage	Nein	Nein	5.08%	
22 ⁺ Tage	Nein	Nein	25.05%		22 ⁺ Tage	—	—	—	
Gruppe 3					Gruppe 7				
1 Tag	Nein	Ja	99.75%	1968	1 Tag	Nein	Nein	59.64%	
2 Tage	Nein	Nein	89.90%	1975	2 Tage	Nein	Ja	97.02%	1939
3 Tage	Ja	Ja	97.94%	1947	3 Tage	Nein	Nein	89.78%	1922
4 Tage	Nein	Nein	80.45%	1898	4 Tage	Nein	Nein	76.16%	
5 Tage	Nein	Ja	97.24%	1948	5 Tage	Nein	Ja	99.38%	1950
6 Tage	Nein	Nein	75.57%		6 Tage	Nein	Nein	72.21%	
7 Tage	Nein	Nein	41.87%		7 Tage	Nein	Nein	89.52%	1946
8 bis 14 Tage	Nein	Ja	96.12%	1901	8 bis 14 Tage	Nein	Nein	89.19%	1965
15 bis 21 Tage	Nein	Nein	13.35%		15 bis 21 Tage	—	—	—	
22 ⁺ Tage	—	—	—		22 ⁺ Tage	—	—	—	
Gruppe 4					Gruppe 8				
1 Tag	Nein	Ja	99.71%	1968	1 Tag	Nein	Nein	83.28%	1967
2 Tage	Nein	Ja	98.20%	1975	2 Tage	Nein	Nein	81.76%	1975
3 Tage	Nein	Nein	82.81%	1957	3 Tage	Nein	Nein	88.23%	1947
4 Tage	Nein	Nein	69.27%		4 Tage	Nein	Nein	64.26%	
5 Tage	Nein	Nein	80.35%	1937	5 Tage	Nein	Nein	56.43%	
6 Tage	Nein	Nein	57.40%		6 Tage	Nein	Nein	74.60%	
7 Tage	Nein	Nein	65.00%		7 Tage	Nein	Nein	35.70%	
8 bis 14 Tage	Nein	Nein	70.76%		8 bis 14 Tage	Nein	Nein	51.59%	
15 bis 21 Tage	Nein	Nein	24.06%		15 bis 21 Tage	—	—	—	
22 ⁺ Tage	Nein	Nein	17.47%		22 ⁺ Tage	—	—	—	

abwärts schraffiert: signifikante Abnahme (95%-Niveau);

senkrecht schraffiert: signifikante Zunahme (95%-Niveau)

Sechs der acht Gruppen weisen in der Andauer von 1 Tag mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95% einen Wendepunkt zwischen 1965 und 1969 auf. Bei den Gruppen 7 und 8 kann dieser Wendepunkt infolge zu geringen Auftretens nicht festgestellt werden.

Die Hälfte der Gruppen weist auch bei den 2-tägigen Sequenzen einen signifikanten Wendepunkt auf, welcher auf die Jahre 1974 respektive 1975 entfällt. Der Wendepunkt leitet eine abnehmende Tendenz ein.

Ein signifikanter Wendepunkt bei 3-tägigen Sequenzen lässt sich für die drei Gruppen 1 bis 3 feststellen. Er erfolgt jedoch nicht bei allen Gruppen zeitgleich (vgl. Tab. 5-10).

Über alle Grosswetterlagen gesehen lässt sich zeigen, dass die kurzen Sequenzen (Andauer von 1-3 Tagen) in den letzten 10-20 Jahren seltener vorkamen als früher. Seit 1972 wurden keine Einzeltage mehr als Grosswetterlagen klassiert (es treten keine 1-tägigen Sequenzen mehr auf; vgl. Abb. 5.15). Etwa um dieselbe Zeit beginnt die Anzahl der Tage der unklassierbaren Lagen (pro Jahr) zu steigen. Die Vermutung liegt nahe, dass die Klassierungsbedingungen der Grosswetterlagen (Minstdauer von 3 Tagen) konsequenter gehandhabt wurden. Einzeltage wurden somit nicht als Grosswetterlagen sondern als 'unbestimmt' (U) klassiert, wie dies die Klassifikationskriterien fordern. Sollte diese Vermutung zutreffen, müsste davon ausgegangen werden, dass die Zeitreihe der Grosswetterlagen nicht homogen ist.

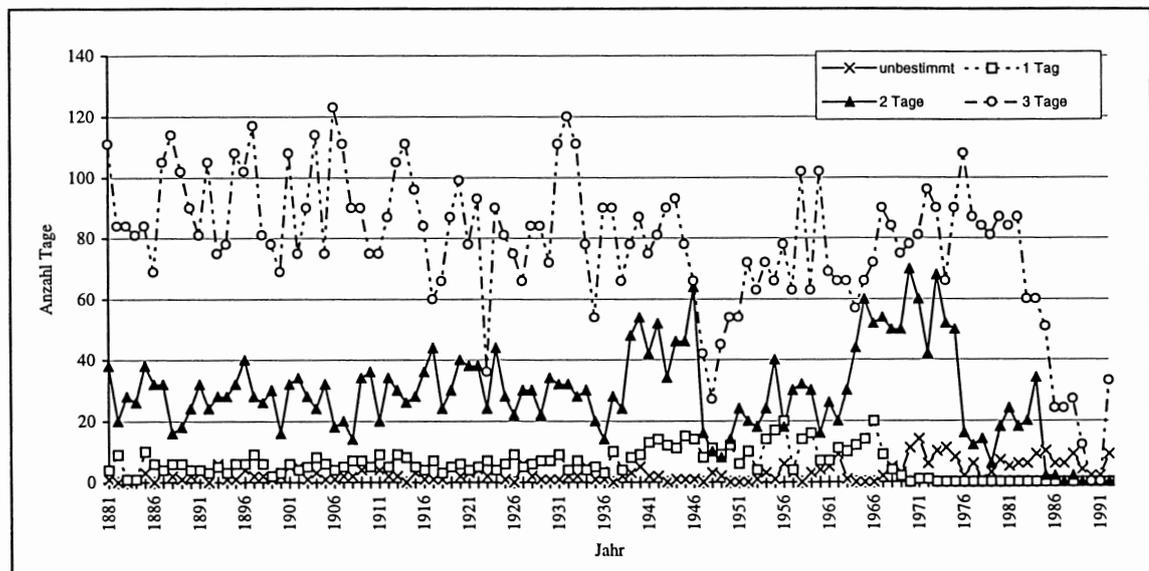


Abb. 5.15: Absolute Häufigkeit der Tage pro Jahr die als 'unbestimmt' klassiert wurden, sowie Anzahl Tage pro Jahr mit den Sequenzlängen 1 Tag, 2 Tage und 3 Tage berechnet über alle Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY.

Wie aus Abbildung 5.15 hervorgeht, hat auch die Anzahl der Tage, die auf 2- und 3-tägigen Sequenzen entfällt, in den letzten 15 respektive 10 Jahren stark abgenommen. So kamen beispielsweise in den Jahren 1990 und 1991 weder 1-, 2- noch 3-tägige Sequenzen vor. Die Abnahme betrifft alle Grosswetterlagen.

Die bereits geäußerte Vermutung über die restriktivere Handhabung des Klassifikationsschemas ab ca. 1970 lässt sich auch mit Hilfe des Wendepunkttests von PETTITT verdeutlichen. Für die unbestimmten Lagen und die 1-tägigen Andauern ergibt sich ein sehr signifikanter Wendepunkt im Jahr 1967. Weitere signifikante Wendepunkte, die eine abnehmende Tendenz einleiten, lassen sich bei den 2- und 3-tägigen Sequenzen nachweisen. Während der Wendepunkt der 2-tägigen Andauern im Jahr 1975 festgelegt wird, befindet sich derjenige der 3-tägigen Sequenzen bereits im Jahr 1944.

Für die 4-tägigen Andauern lässt sich ein Wendepunkt im Jahr 1932 nachweisen, der eine zunehmende Tendenz einleitet.

Einen auf dem 95%-Niveau knapp nicht signifikanten Wendepunkt mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.949, der eine Zunahme ab 1981 einleitet (vgl. Tab. 5-11), erreichen die Andauern von 8 bis 14 Tagen.

Tabelle 5-11 zeigt eine Zusammenstellung der Wendepunkte, der Zeitpunkte des Wendepunkts und der Richtung des Wendepunktes für die ausgewerteten Sequenzlängen aller Grosswetterlagen.

Tab. 5-11: Resultate des Wendepunkttest nach PETTITT für die unbestimmte Wetterlage und die Sequenzlängen von 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 bis 14, 15 bis 21 und mehr als 22 Tagen über alle Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY.

	Wendepunkt	Wahrscheinlichkeit	Wendepunkt-Jahr	Richtung des Wendepunktes
unbest.	Ja	1.000	1967	-
1 Tag	Ja	1.000	1967	+
2 Tage	Ja	0.999	1975	+
3 Tage	Ja	1.000	1944	+
4 Tage	Ja	0.992	1932	-
5 Tage	Nein	0.773	1924	-
6 Tage	Nein	0.854	1915	-
7 Tage	Nein	0.855	1983	-
8-14 Tage	Nein	0.948	1981	-
15-21 Tage	Nein	0.464	1977	-
22+ Tage	Nein	0.170	1921	+

vertikal schraffierte Felder: signifikante Zunahme;

abwärts schraffierte Felder: signifikante Abnahme mindestens auf dem 95%-Signifikanzniveau

Abbildung 5.16 zeigt, dass die maximale Andauer pro Jahr, das heisst, die längste Sequenz einer Grosswetterlage, die während eines Jahres registriert wurde, in den letzten 20 Jahren tendenziell zugenommen hat.

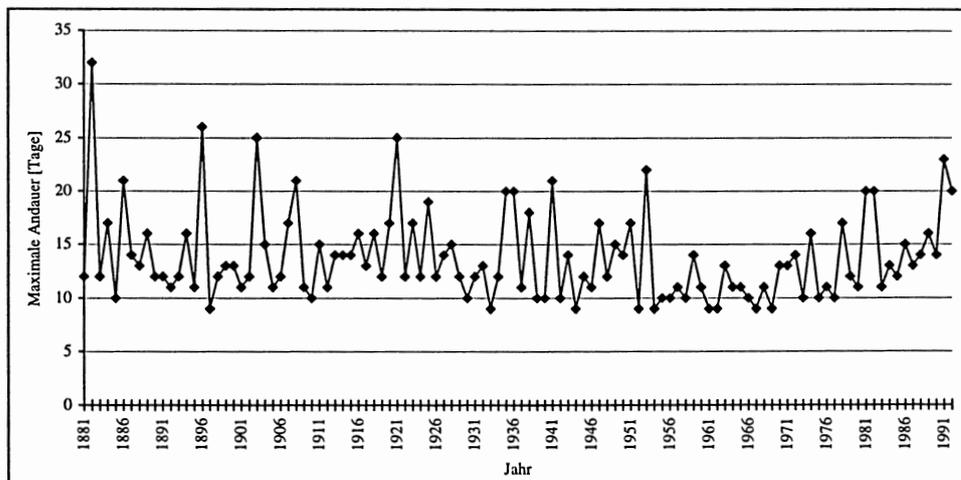


Abb. 5.16: Absolutes Maximum der Andauer der Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY pro Jahr für den Zeitraum 1881 bis 1992.

Gleichzeitig gilt es aber zu berücksichtigen, dass die maximale Andauer in den 50^{er} und 60^{er} Jahren einen Tiefstand erreicht hatten. Von 1881 bis in die 1920^{er} Jahre sind jedoch noch längere Sequenzen vorgekommen, als heute zu verzeichnen sind. Daraus lässt sich schliessen, dass nicht die *Länge* aller Sequenzen zugenommen hat, sondern die *Häufigkeit* der Sequenzen von 1-2 wöchiger Dauer.

Ein ähnlicher Schluss lässt sich aus den Auswertungen der Sequenzlängen der alpin-synoptischen Gruppen in Tabelle 5-10 ziehen. Die Sequenzlängen von 4 und 5 Tagen zeigen bei der Mehrheit der Gruppen eine zunehmende Tendenz. Jedoch sind die Wendepunkte nur bei den Gruppen 5 und 7 für die 5-tägigen Sequenzen signifikant (95%-Signifikanzniveau). Bei 6- und mehrtägigen Sequenzen ist keine allgemeine Aussage mehr möglich. Ausser bei Gruppe 3 (Wendepunkt mit Abnahme der 8 bis 14 tägigen Sequenzen) treten auch keine signifikanten Wendepunkte mehr auf.

Bei den meisten Gruppen sind lange Sequenzen auch sehr selten oder sind in den 110 Jahren gar nicht vorgekommen.

Positive und negative Trends - Ursachen

Zu Beginn dieses Kapitels konnte für die absolute Häufigkeit der alpin-synoptischen Gruppen 5 (Südlagen) und 7 (Südwestlagen) ein positiver Trend mit entsprechendem Wendepunkt sowie für die Gruppe 4 ein negativer Trend mit Wendepunkt statistisch nachgewiesen werden. Im Folgenden werden diese drei Gruppen eingehender betrachtet.

Die Abnahme der Häufigkeit der Gruppe 4 betrifft vor allem die 1- und 2-tägigen Sequenzen (signifikante Wendepunkte 1968 und 1975), aber auch die 5-, 6-, 8- und mehrtägigen Sequenzen, die jedoch auf dem 95%-Signifikanzniveau keine Wendepunkte mehr verzeichnen. Da sich die Abnahme auf mehrere Sequenzlängen verteilt, verzeichnet die mittlere Persistenz dieser Gruppe keinen Trend. Bei Gruppe 5, die eine Zunahme in der absoluten Häufigkeit pro Jahr aufweist, scheinen vor allem die 4-tägigen Sequenzen vermehrt vorzukommen. Sie weisen einen Wendepunkt mit 87% Wahrscheinlichkeit im Jahr 1948 auf. Sequenzen von 1 bis 3 Tagen zeigen Abnahmen, lange Sequenzen von 7 bis 14 Tagen dagegen Zunahmen, wobei keine signifikanten Wendepunkte vorliegen, ausser bei den 1-tägigen Sequenzen. Da die mittlere Persistenz der Gruppe 5 bei ca. 4 Tagen liegt, zeigt die mittlere Andauer keinen signifikanten Trend.

Im Gegensatz zu allen anderen Gruppen weist die Gruppe 7 bei den 1- und 2-tägigen Sequenzen keine Abnahme, sondern einen Wendepunkt mit Zunahme auf. Überhaupt zeichnen sich die Sequenzen der Gruppe 7 (mit Ausnahme der 3-tägigen Sequenzen) durch Wendepunkte, die eine Zunahme einleiten, aus. Es sind jedoch nur die beiden Wendepunkte der 2- und 5-tägigen Sequenzen auf dem 95%-Niveau signifikant.

Die Zunahme praktisch aller Sequenzlängen dieser Gruppe erstaunt nicht, wenn man bedenkt, dass in Gruppe 7 seit den 40^{er} Jahren insgesamt eine Häufigkeitszunahme festgestellt wurde. Trotzdem scheint ein signifikanter Wendepunkt bei den 2-tägigen Sequenzen den Ausführungen über die Abnahme der kurzen Sequenzen zu widersprechen.

Abbildung 5.17 klärt diesen scheinbaren Widerspruch. Als Wendepunkt (vgl. Tab. 5-10) wird das Jahr 1939 angegeben. Betrachtet man die beiden Kollektive vor und nach 1939 in Abbildung 5.17, so wird deutlich, dass nach 1939 vor allem im Zeitraum 1960 bis 1985 deutlich mehr Tage mit 2-tägigen Sequenzen aufgetreten sind als vor dem Wendepunkt. Sie zeigt jedoch auch, dass nach 1984 keine 2-tägigen Sequenzen mehr aufgetreten sind.

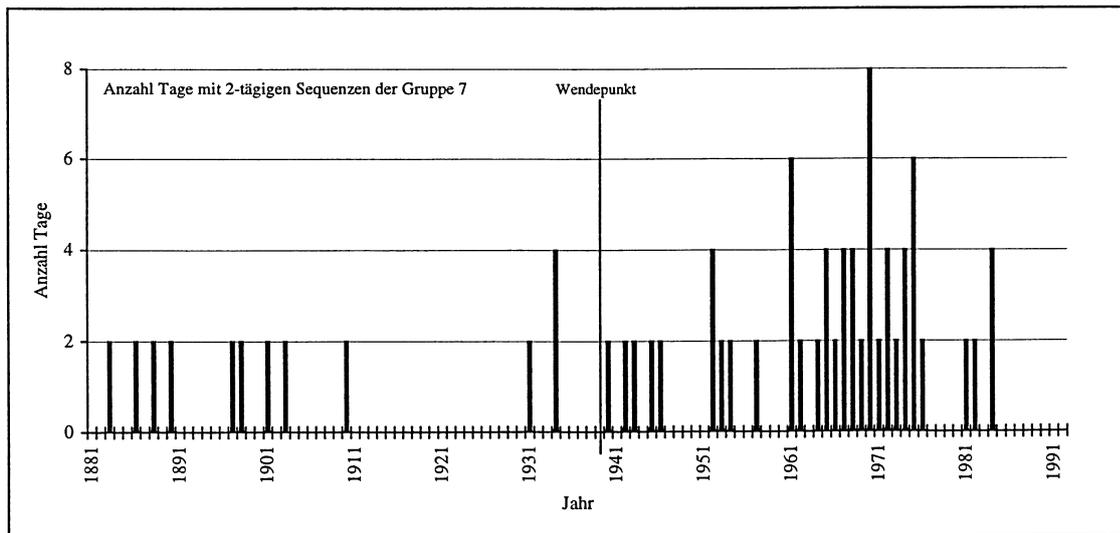


Abb. 5.17: Anzahl Tage pro Jahr mit 2 Tage dauernden Sequenzen der Gruppe 7 der alpin-synoptischen Gruppierung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen im Zeitraum 1881 bis 1992.

Alle Sequenzlängen der Gruppe 7, die grösser als 3 Tage sind, weisen einen Wendepunkt mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 70% auf. Da aber die maximale Sequenzlänge in Abbildung 5.18 keine Zunahme zeigt, muss angenommen werden, dass zwar die Häufigkeiten der Sequenzen, nicht aber deren Länge zugenommen hat.

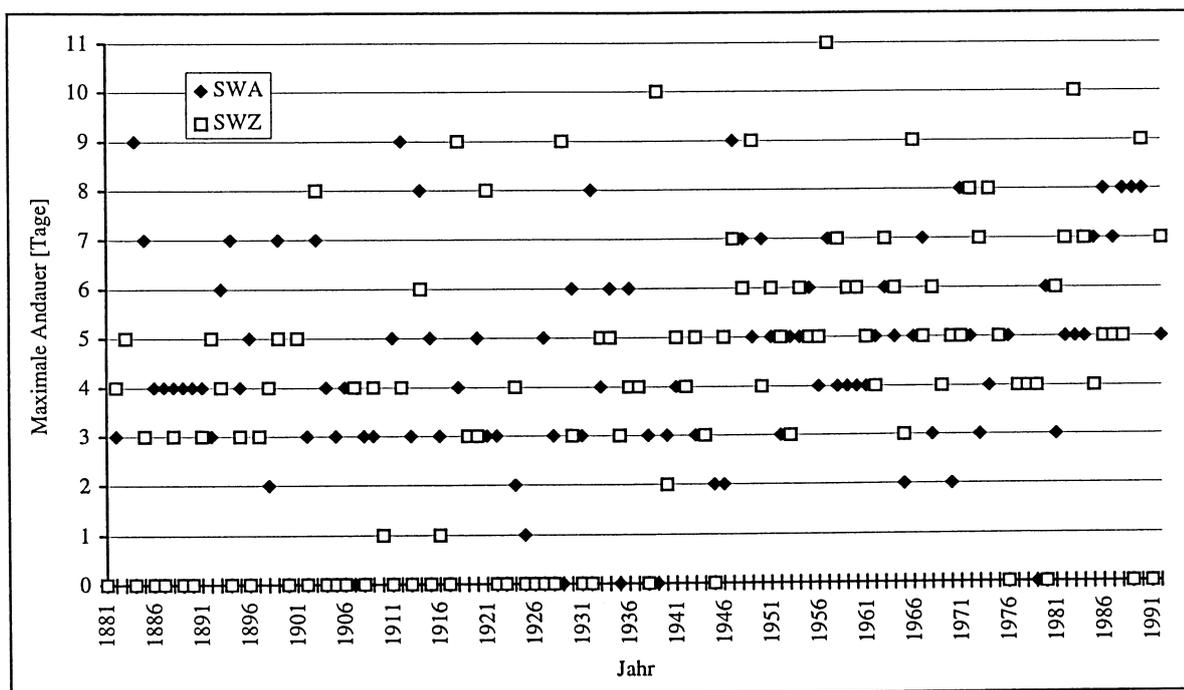


Abb. 5.18: Maximale Andauer pro Jahr der Grosswetterlagen SWA und SWZ.

Dass die mittlere Andauer der Gruppe 7 trotzdem zugenommen hat, hat zwei Gründe: Zum einen hat die Häufigkeit der 3-tägigen Sequenzen abgenommen, zum anderen waren in den letzten 40 Jahren sehr viel weniger Jahre zu verzeichnen, in denen eine oder beide Südwestlagen überhaupt nicht vorgekommen sind (vgl. Abb. 5.18).

Fazit

Bei der Hälfte der 8 Gruppen liess sich eine Zunahme der mittleren Andauer statistisch belegen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass diese Zunahme nicht durch eine längere maximale Andauer der Gruppen, sondern durch ein vermindertes Auftreten oder sogar Wegfallen von sehr kurzen (1-2 Tage) Sequenzen und durch ein häufigeres Auftreten von 4- und 5-tägigen sowie von 1-2 Wochen dauernden Sequenzen verursacht wurde.

Es ist möglich, dass diese Verschiebung zu längeren Sequenzen zum Teil durch eine restriktivere Anwendung des Klassifikationsschemas begründet werden kann. Seit Anfang der 70^{er} Jahre sind keine 1-tägigen Sequenzen mehr aufgetreten. Sie wurden vermutlich entweder den 'unbestimmten' Grosswetterlagen oder der vorangehenden respektive nachfolgenden Grosswetterlage zugeordnet. Dasselbe kann für die 2-tägigen Sequenzen vermutet werden, die ebenfalls in den letzten Jahren deutlich seltener vorgekommen sind.

Sollte die Hypothese der restriktiveren Handhabung des Klassifikationsschemas zutreffen, hätte dies zur Folge, dass sich die Sequenzlängen durch 'Anhängen' oder 'Vorstellen' der 1- und 2-tägigen Sequenzen allgemein verlängert hätten. Der statistisch belegbare Trend zur Sequenzverlängerung wäre somit nicht natürlich bedingt, sondern methodisch (durch die Bearbeiter) verursacht.

Für diese These spricht auch der Umstand, dass der Wendepunkt bei den unbestimmten Wetterlagen und derjenige der 1-tägigen Sequenzen genau ins gleich Jahr (1967) fallen.

Andererseits ist es auch möglich, dass heute häufiger längere Sequenzen vorkommen als früher. Dadurch müssten auch die kürzeren Andauern abnehmen, denn die gesamte Anzahl Tage bleibt immer gleich. Bei einer solchen Entwicklung wäre jedoch auch eine Zunahme der maximalen Länge der Sequenzen zu erwarten, was mit der aktuellen Datenlage nicht nachgewiesen werden kann.

6 Automatische Klassierung von Wetterlagen

Bei den beiden für das witterungsklimatologische Downscaling im Schweizer Alpenraum ausgewählten Wetterlagenklassifikationen (vgl. Kap. 3.2) handelt es sich um manuelle Klassifikationsschemen, bei denen die Wetterlagen durch eine Person bearbeitet, klassiert und zugeordnet werden. Wie bereits in Kapitel 2.3 angedeutet wurde, bedeutet dies nicht nur einen grossen Zeitaufwand, sondern auch eine starke Subjektivität in der Zuordnung.

Im Rahmen des Projektes ALPCLIC wurde deshalb der Versuch unternommen, die beiden Wetterlagenklassifikationen von SCHÜEPP und HESS/BREZOWSKY automatisch herzuleiten. Dies nicht zuletzt aus dem Grund, weil eine Extrapolation der Zeitreihen der Wetterlagenklassifikationen in die Zukunft mit Hilfe von GCM-Daten angestrebt wurde.

Die GCM-(General Circulation Model) Outputs liegen meist in Form von Gitternetzdaten digital vor (in unserem Fall als Bodendruck- und 500 hPa-Geopotentialdaten).

Am einfachsten wäre es, wenn die Wetterlagenzuordnung direkt aus den vorliegenden Gitternetzdaten abgeleitet werden könnte.

Die automatische Herleitung der Wetterlagenzuordnung aus Gitternetzdaten hätte mehrere Vorteile:

- Die Zuteilung der einzelnen Tage zu den Wetterlagen wäre weniger subjektiv (weder vom Bearbeiter noch von dessen Stimmung abhängig).
- Die Zuteilung wäre reproduzierbar, da immer dieselben Kriterien angewendet würden.
- Der Aufwand, um zusätzliche Daten zu verarbeiten, wäre relativ gering, da die Daten in ein bestehendes Programm eingespielen werden könnten.
- Die Zeitreihe wäre von der Klassierung her homogen. Es müssten daher vor der Bearbeitung der Zeitreihen keine Homogenitätstests angesetzt werden.

Da die beiden Wetterlagenklassifikationen von SCHÜEPP und HESS/BREZOWSKY unterschiedliche Definitionsgrundlagen aufweisen (SCHÜEPP: Wetterelemente; HESS/BREZOWSKY: Lage und Ausdehnung der steuernden Zentren; vgl. Tab. 3-10, Kap. 3.2), wurden für die Versuche der Automatisierung zwei verschiedene Ansätze gewählt. Bei der SCHÜEPP-Klassifikation, für die ein übersichtliches Bestimmungsschema vorliegt, können die Parameter direkt aus bestimmten Gitterpunkten berechnet werden. Für die HESS/BREZOWSKY-Klassifikation wird die Methode der Analogfallsuche angewendet.

6.1 Datengrundlage

In den vorangehenden Kapiteln (4 und 5) wurden für die Auswertungen bereits die täglichen Werte der SCHÜEPP- und HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagenklassifikationen verwendet. Bei der automatischen Klassierung werden sowohl diese beiden Datensätze als auch die NMC-Gitternetzdaten verwendet. Die drei Datensätze sollen daher im Folgenden kurz beschrieben werden.

Datensatz der Alpenwetterstatistik

Die Daten der Alpenwetterstatistik (AWS) können in digitaler Form bei der SMA bezogen werden. Dieser Datensatz beinhaltet Daten ab dem 1. Januar 1945. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Daten der Alpenwetterstatistik bis 30. November 1995 verwendet.

Die Alpenwetterstatistik beinhaltet insgesamt 34 Parameter, welche in SMA (1985) beschrieben sind. In der vorliegenden Arbeit wurden jedoch nur die Parameter 9 (D = gestrophischer Wind in der Bodenwetterkarte über den Alpen), 10 (d = Höhenwindrichtung in der 500 hPa-Fläche), 11 (f = Höhenwindstärke), 14 (b = Beziehung zwischen Boden- und Höhenströmung), 17 (hh = absolute Topographie 500 hPa) und 33 (synoptische Wetterlageneinteilung nach SCHÜEPP) verwendet.

Datensatz der Wetterlagenklassifikation nach HESS und BREZOWSKY

Ebenfalls in digitaler Form standen die Grosswetterlagen Europas zur Verfügung. Sie liegen für den Zeitraum vom 1. Januar 1881 bis zum 31. Dezember 1984 als tägliche Daten (klassiert vom Deutschen Wetterdienst) vor. Die 8 Jahre von 1985 bis 1992 wurden der Publikation von GERSTENGARBE et al. (1993) entnommen und in digitale Form gebracht.

National Meteorological Center Grid Point Data Set

Die NMC-Gitternetzdaten (National Meteorological Center Northern Hemisphere octagonal grid data) stammen aus dem Datenarchiv des 'National Center for Atmospheric Research' (NCAR) in Boulder Colorado. Sie wurden von der Sektion Daten dieser Institution und dem 'Department of Atmospheric Sciences' der Universität Washington zusammengestellt und aufbereitet.

Der Gitternetzdatensatz umfasst Daten vom 2. Januar 1946 bis 30. Juni 1989. In dieser Arbeit wurden nur die täglichen 12 UTC-Gitternetzdaten des Bodendrucks und des 500 hPa-Geopotentials verwendet.

Das achteckige NMC-Gitter besteht aus 1977 Punkten, welche auf einem polar stereoskopischen Gitter mit gleichmässigen Abständen angeordnet sind. Das Gitter wurde so gedreht, dass der Meridian 10° E auf der rechten Seite des Pols eine horizontale Linie bildet. So erscheint das Gitter wie ein Gitter mit 47 x 51 Punkten, bei dem die Ecken abgeschnitten sind (vgl. Abb. 6.1).

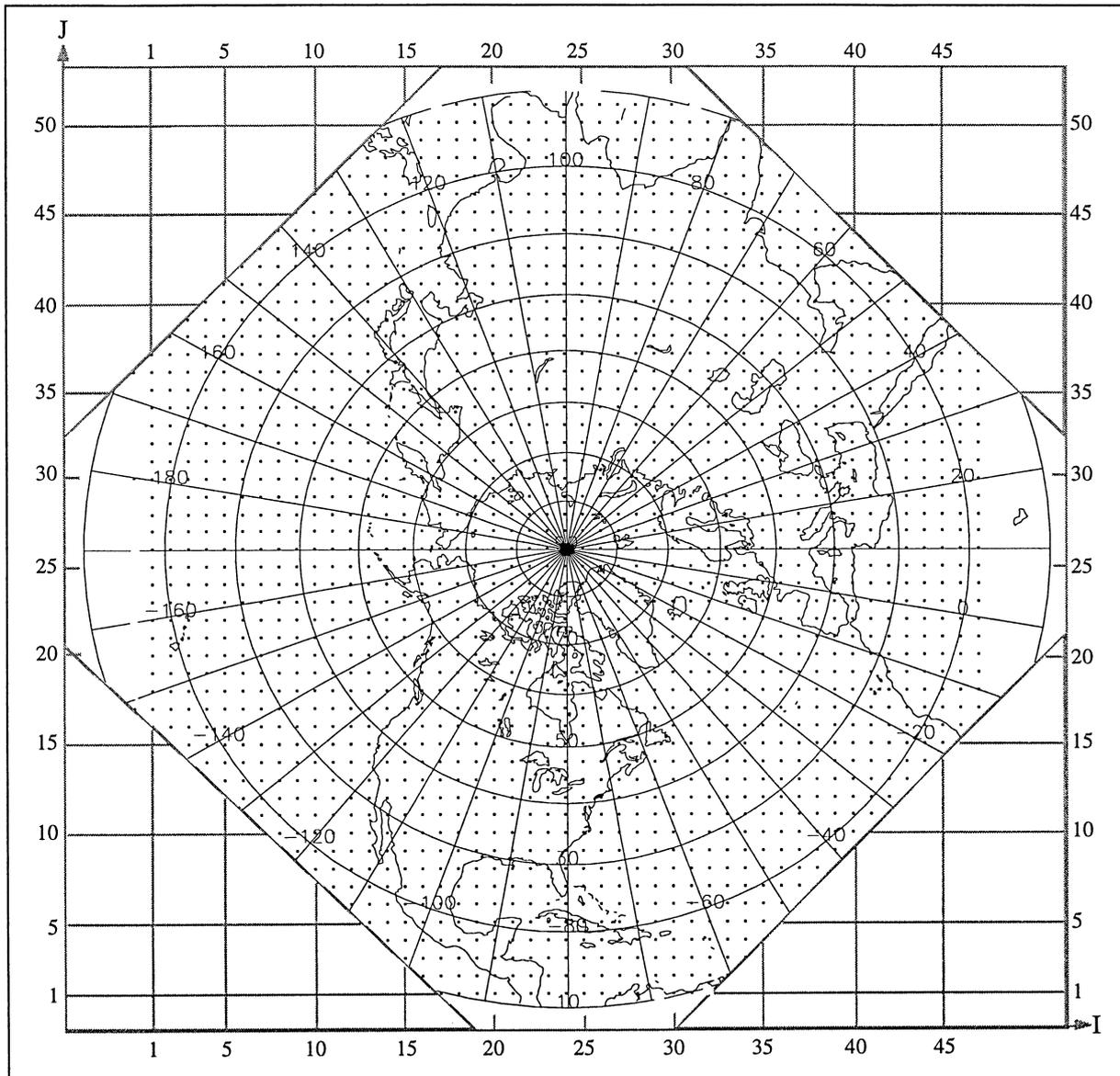


Abb. 6.1: Pol-stereoskopisches 47x51 NMC-Gitternetz. Im Achteck befinden sich insgesamt 1977 Gitterpunkte. Der NORDPOL befindet sich im Punkt $(I,J) = (24,26)$.

Weitere Angaben über den NMC-Gitternetzdatensatz und das Datenformat können dem 'User's-Guide' (NCAR and UW, 1990) entnommen werden.

Da neben einem Ausschnitt des NMC-Gitternetzes auch die geographische Länge und Breite der Punkte benötigt wurden, musste das Gitternetz in ein Längengrad/Breitengrad - Gitternetz umgerechnet werden. Das Programm zur Konvertierung, das bereits in Fortran-Code vorlag, musste in Pascal umgeschrieben werden. Auch für den Datenzugriff musste ein neues Programm geschrieben werden, da die bestehende Software zur Datenextraktion (Fortran Programme) auf der Workstation des Geographischen Instituts der Universität Bern nicht lauffähig war.

Die extrahierten Daten wurden zum Teil graphisch dargestellt und mit Hilfe der Boden- und der 500 hPa-Höhenwetterkarten des Europäischen Wetterberichts vom DWD auf ihre Plausibilität überprüft.

6.2 Automatische Klassierung der Alpenwetterlagen nach SCHÜEPP aus Gitternetzdaten

Das Schema der 40 synoptischen Wetterlagen nach SCHÜEPP kann als die Klassifikation mit dem fortgeschrittensten Objektivierungsgrad angesehen werden. Mit dem bestehenden Schema werden einzelne Tage auf Grund der Ausprägung verschiedener Parameter einer Wetterlage zugeordnet. Gleiche Kombinationen von Parameterwerten ergeben somit immer gleiche Wetterlagen. Zudem hat die Wetterlagenklassifikation nach SCHÜEPP den grossen Vorteil, dass sie sich auf einen bestimmten Zeitpunkt (12 UTC) und nicht auf eine Zeitspanne bezieht und dadurch auch von Tag zu Tag zu einer unterschiedlichen Klassierung kommen darf. Sie bringt somit optimale Voraussetzungen für eine Automatisierung mit sich, denn je enger manuelle Kriterien an einen Entscheidungsbaum gebunden sind, desto erfolgreicher sollte die automatische Klassierung ausfallen.

Eine automatische Klassierung der Wetterlagen wäre für die vorliegende Arbeit von grosser Bedeutung für:

- Die Rekonstruktion der SCHÜEPP-Klassifikation in die Vergangenheit (vor 1945), soweit die Bodendruck- und Geopotentialwerte vorhanden sind.
- Die rationelle Zuordnung von GCM-Daten (Modelldaten) zu bestimmten SCHÜEPP-Wetterlagen und dadurch die Fortführung der Reihe in die Zukunft.
- Die Erstellung einer Zeitreihe mit grösstmöglicher Homogenität, um die subjektive Beurteilung des Klassierers zu vermeiden. Die einzelnen Tage würden dadurch nicht unbedingt 'besser', aber auf jeden Fall konsequenter klassiert.

6.2.1 Methode zur Automatisierung der Klassifikation der SCHÜEPP-Wetterlagen

In der Alpenwetterstatistik der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA, 1985) befindet sich im Anhang ein übersichtliches Bestimmungsschema für die synoptische Klassifikation der Wetterlagen nach SCHÜEPP. Auf diesem Schema, welches in leicht abgeänderter Form in Abbildung 6.2 dargestellt ist, basiert das im Folgenden vorgestellte Programm *SCHÜEPPGEN.P*. Das Programm berechnet die benötigten Parameter aus vier Gitternetzpunkten.

An allen vier Gitterpunkten standen der Bodendruck und das 500 hPa-Geopotential (p und Z) zur Verfügung. Abbildung 6.3 zeigt die Bezeichnung der im Folgenden verwendeten verschiedenen Variablen.

Um die bestmögliche Abdeckung des Klassifikationsgebietes mit Zentralpunkt Rheinwaldhorn ($46.5^\circ \text{ N} / 9^\circ \text{ E}$) zu erhalten (vgl. Abb. 3.2), wurde in meridionaler Richtung ein Abstand von 1.5 Breitengraden und in zonaler Richtung ein solcher von 2 Längengraden vom Zentralpunkt gewählt. In Abbildung 6.3 entspricht die geographische Breite $\varphi_1 = 45^\circ \text{ N}$ und $\varphi_2 = 48^\circ \text{ N}$. Die geographischen Längen λ_1 und λ_2 bezeichnen den 7. und 11. östlichen Längengrad. Der Abstand Δy der beiden Breiten φ_1 und φ_2 beträgt somit knapp 333 Kilometer. In zonaler Richtung (Δx_1 und Δx_2) liegen die Punkte rund 300 Kilometer auseinander.

Im Programm *SCHÜEPPGEN.P* geschieht die Berechnung der einzelnen Parameter und die Klassierung der Wetterlagen in sechs Schritten (Abb. 6.2), die im Folgenden kurz erläutert werden.

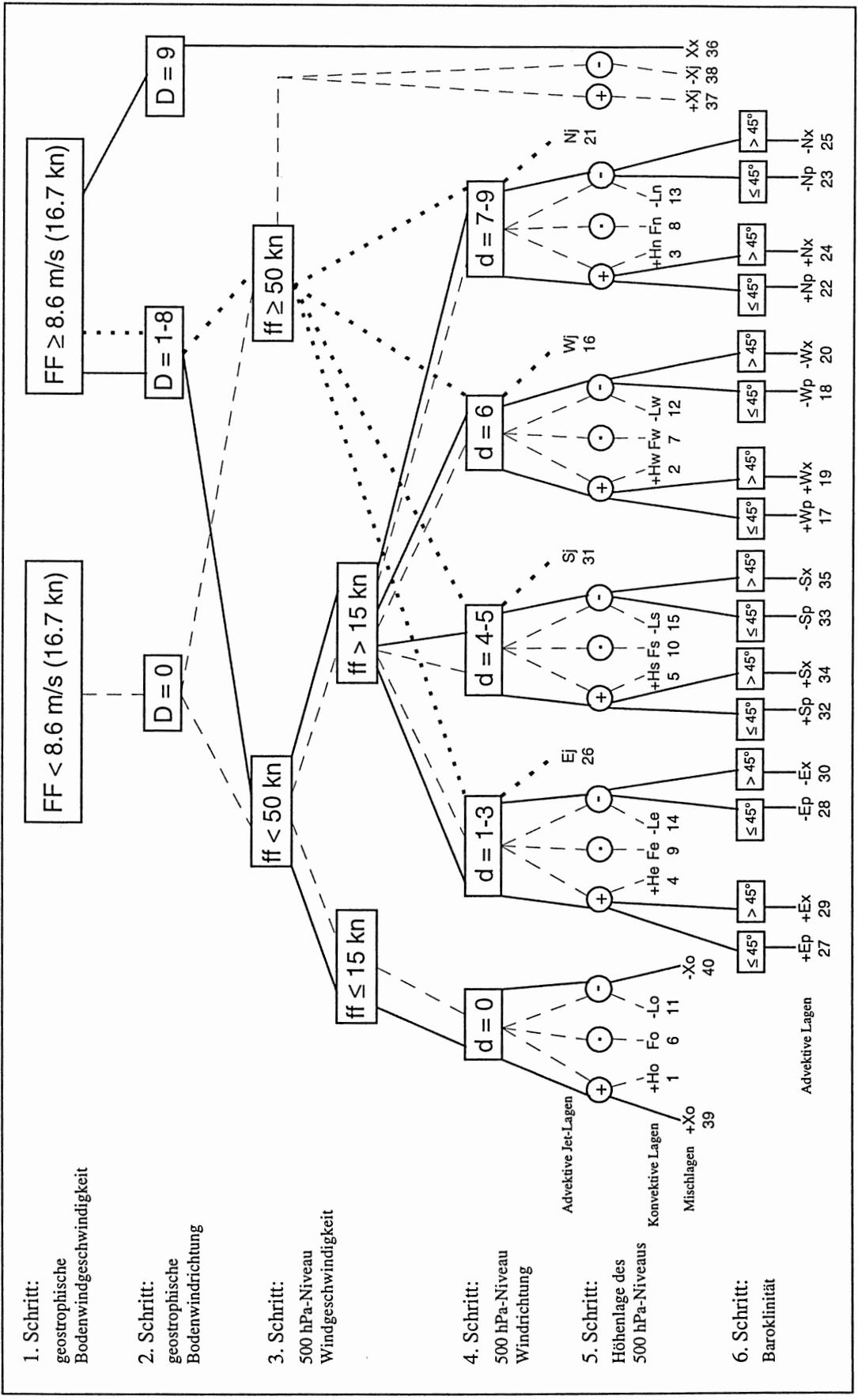


Abb. 6.2: Schema zur Einteilung der 40 Wetterlagen nach SCHÜEPP in sechs Schritten (Quelle: SMA, 1985; leicht abgeändert). Die Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis zu finden.

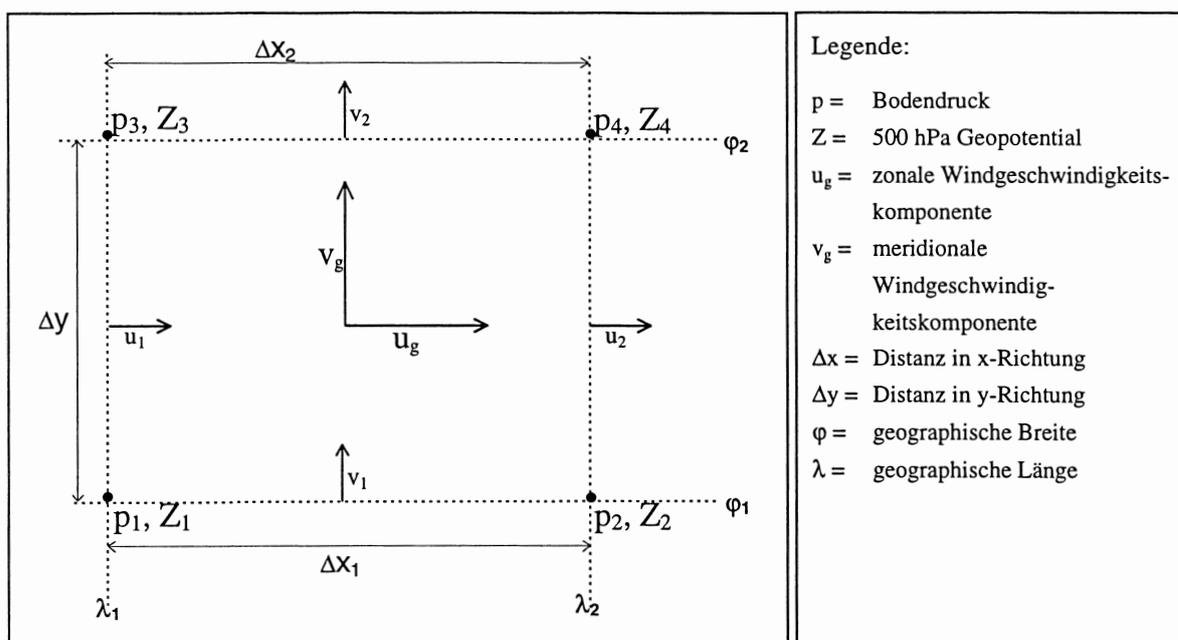


Abb. 6.3: Bezeichnung der Variablen an und zwischen den einzelnen Gitterpunkten. (Abkürzungen siehe Legende neben der Abbildung).

1. Schritt: Unterscheidung zwischen konvektiven und advektiven oder Mischlagen (Berechnung der geostrophischen Bodenwindgeschwindigkeit)

Konvektive und Advektive Lagen unterscheiden sich in erster Linie durch die Stärke des Bodendruckgradienten. Bei konvektiven Lagen treten nur geringe Bodendruckgradienten auf, während bei advektiven und Mischlagen zum Teil erhebliche Bodendruckdifferenzen auftreten können. Beträgt die Druckdifferenz innerhalb des Klassifikationsgebietes mehr als 5 hPa, dann liegt (gemäss Definition in SMA, 1985) eine advektive Lage, andernfalls eine konvektive Lage vor. Da die vier Gitterpunkte des Bodendruckes das kreisförmige Klassifikationsgebiet (vgl. Abb. 3.2) nur näherungsweise repräsentieren, wurde nicht die maximale Druckdifferenz zwischen zwei Punkten als Kriterium verwendet. Da Wind durch Druckunterschiede erzeugt wird, wurde die Windgeschwindigkeit als Kriterium herangezogen. Je grösser die Druckunterschiede sind, desto stärker sind auch die Winde. Als Trennkriterium zwischen konvektiven und advektiven Lagen wurde ein Druckunterschied von 5 hPa auf 444 Kilometer (Durchmesser des Klassifikationsgebietes) festgesetzt (SMA, 1985). Dies entspricht gemäss Formel (1) einer Windgeschwindigkeit von 8.6 ms^{-1} oder 16.7 Knoten.

Mit Hilfe der Formeln (1) bis (3) lässt sich die geostrophische Windgeschwindigkeit im Bodenniveau für den Zentralpunkt aus den Bodendruckdaten (p_1 bis p_4), dem zonalen und meridionalen Abstand der Punkte (Δx und Δy ; vgl. Abb. 6.3), der Luftdichte (ρ) und dem Coriolisparameter (f) berechnen.

Ist die aus den vier Gitterpunkten berechnete Bodenwindgeschwindigkeit (FF) kleiner als die vorgegebene Grenze von 8.6 ms^{-1} , so ist der betreffende Tag den konvektiven Lagen zuzuordnen. Liegt dagegen eine Bodenwindgeschwindigkeit von mehr als 8.6 ms^{-1} vor, so handelt es sich um eine advektive oder eine Mischlage. Die Codierung der Bodenwindrichtung erfolgt dann im Schritt 2.

$$u_g = -\frac{\Delta p}{\Delta y} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{f}$$

zonale Windgeschwindigkeitskomponente (1)

$\Delta p = p(\varphi_2) - p(\varphi_1)$ Druckunterschied zwischen nördlichem und südlichem Punkt

$\Delta y = \frac{U_p}{360^\circ} \cdot |\varphi_2 - \varphi_1|$ nord-südliche Distanz zwischen den Punkten

$U_p = 39'940'952\text{m}$ Erdumfang meridional

$\rho = 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Dichte der Luft

$f = 2 \cdot \omega \cdot \sin(\varphi)$ Coriolisparameter für die Breite (φ)

$\omega = 7.292 \cdot 10^{-5}$ Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation

$$v_g = \frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{f}$$

meridionale Windgeschwindigkeitskomponente (2)

$\Delta p = p(\lambda_2) - p(\lambda_1)$ Druckunterschied zwischen östlichem und westlichem Punkt

$\Delta x = \frac{U_{ae} \cdot \cos(\varphi)}{360^\circ} \cdot |\lambda_2 - \lambda_1|$ West-Ost Distanz zwischen den Punkten

$U_{ae} = 40'075'412\text{m}$ Erdumfang am Äquator

$$ff = \sqrt{u_g^2 + v_g^2}$$

Windgeschwindigkeit (3)

2. Schritt: Ermittlung der Bodenwindrichtung

Die Bodenwindrichtung (DD) wird bei Konvektiven Lagen (vgl. Schritt 1) definitionsgemäss als $D = 0$ verschlüsselt. Bei Advektiven Lagen werden die Werte von 1 bis 8 vergeben, je nach Windrichtungssektor. Die Verschlüsselung erfolgt gemäss Alpenwetterstatistik (SMA, 1985; Parameter 9; vgl. Tab. 6-1).

Tab. 6-1: Verschlüsselung der Bodenwindrichtungen in $[\circ]$ (DD), mit entsprechendem Code (D) (gemäss SMA, 1985)

FF	Windrichtung	Bodenwindrichtung (DD) in $[\circ]$	Code (D)
$< 8.6 \text{ ms}^{-1}$	windschwach	—	0
$\geq 8.6 \text{ ms}^{-1}$	NE	$22.5 \leq DD < 67.5$	1
$\geq 8.6 \text{ ms}^{-1}$	E	$67.5 \leq DD < 112.5$	2
$\geq 8.6 \text{ ms}^{-1}$	SE	$112.5 \leq DD < 157.5.5$	3
$\geq 8.6 \text{ ms}^{-1}$	S	$157.5 \leq DD < 202.5$	4
$\geq 8.6 \text{ ms}^{-1}$	SW	$202.5 \leq DD < 247.5$	5
$\geq 8.6 \text{ ms}^{-1}$	W	$247.5 \leq DD < 292.5$	6
$\geq 8.6 \text{ ms}^{-1}$	NW	$292.5 \leq DD < 337.5$	7
$\geq 8.6 \text{ ms}^{-1}$	N	$337.5 \leq DD \leq 360$ $0 \leq DD < 22.5$	8
$\geq 8.6 \text{ ms}^{-1}$	uneinheitlich	—	9

Die Windrichtungsklasse 9 (uneinheitliche Richtung) kann im Programm nicht erfasst werden, da die Windrichtung nur im Zentralpunkt berechnet wird. Dies hat zur Folge, dass Wirbellagen (Xx) nicht klassiert werden können. Für die automatische Klassierung stellt dies nur einen geringen Mangel dar, da laut SMA (1985) im Alpenraum $D = 9$ äusserst selten vorkommt.

Mit dem Programm *SCHÜEPPGEN.P* kann die Windrichtung mit Hilfe von trigonometrischen Funktionen aus den zonalen und den meridionalen Windgeschwindigkeitsvektoren berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass durch den Arcustangens immer der Winkel zwischen zwei Vektoren und nicht etwa die Abweichung zur Nordrichtung berechnet wird. Dieser Winkel entspricht *nicht* der meteorologischen Windrichtung sondern bezeichnet die Richtung, aus welcher der Wind bläst. Eine Umrechnung der sogenannten mathematischen Windrichtung in die meteorologische ist deshalb unumgänglich. Dazu ist eine Aufteilung der Berechnung nach positiver und negativer u -Komponente (oder v -Komponente) nötig. Wird eine Aufteilung nach der v -Komponente vorgenommen, so werden für die Summenvektoren (S) im 1. und 4. Quadrant die Abweichungen von der Nordrichtung, im 2. und 3. Quadrant diejenigen von der Südrichtung berechnet (vgl. Abb. 6.4, linke Seite). Da die Nordrichtung sowohl durch 0° wie durch 360° repräsentiert wird, ist es einfacher, die Aufteilung nach der u -Komponente vorzunehmen. Wie die rechte Seite der Abbildung 6.4 zeigt, werden dabei die Winkel zwischen der West-Ost - Geraden und dem Summenvektor (S) berechnet. Die Arcustangens-Funktion ergibt für diese Winkel im 2. und 4. Quadrant negative Werte, da eine der Windgeschwindigkeitskomponenten negativ ist.

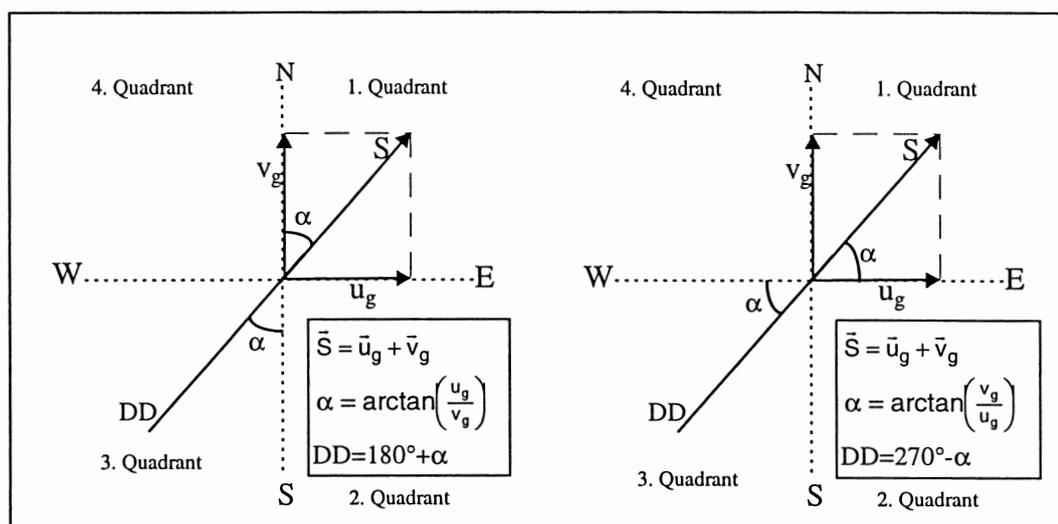


Abb. 6.4: Schema zur Berechnung der mathematischen und der meteorologischen Windrichtung in den 4 Quadranten. Links für die Aufteilung nach positiver und negativer v -Komponente, rechts entsprechend für die u -Komponente.

Somit lassen sich die meteorologischen Windrichtungen (DD) für den 1. und 2. (positive u -Komponente) beziehungsweise für den 3. und 4. Quadranten (negative u -Komponente) mit nur zwei Formeln (4.1 und 4.2) berechnen. Da der Winkel im 2. und 4. Quadrant negativ ist, wird er automatisch addiert, und es resultiert die meteorologische Windrichtung. Falls die zonale Windgeschwindigkeitskomponente 0 ist, herrscht genau Süd- oder Nordwind. Im Programm erfordert dies eine spezielle Abfrage, da eine Division durch 0 zu einem Fehler führen würde.

$$\text{Für } u_g > 0: \quad DD = 270^\circ - \arctan \left(\frac{v_g}{u_g} \right) \quad (4.1)$$

$$\text{Für } u_g < 0: \quad DD = 90^\circ - \arctan \left(\frac{v_g}{u_g} \right) \quad (4.2)$$

$$\text{Für } u_g = 0: \quad DD = 180^\circ \text{ für } v_g > 0; \quad DD = 0^\circ \text{ sonst} \quad (4.3)$$

Die Codierung der berechneten Bodenwindrichtung in die Windrichtungsklassen 1-8 erfolgt gemäss Tabelle 6-1.

3. Schritt: Berechnung der Windgeschwindigkeit im 500 hPa-Niveau

In Schritt 3 wird die Windgeschwindigkeit für das 500 hPa-Niveau (ff) bestimmt. Da auf dem 500 hPa-Niveau die geopotentielle Höhe der Druckfläche und nicht der Luftdruck gegeben ist, berechnen sich die Windgeschwindigkeitskomponenten u_g und v_g nach Formel (5) und (6).

$$\boxed{u_g = -\frac{g}{f} \cdot \frac{\Delta z}{\Delta y}} \quad \Delta z = z(\varphi_2) - z(\varphi_1) \quad \text{Höhenunterschied zwischen nördlichem und südlichem Punkt} \quad (5)$$

$$\boxed{v_g = \frac{g}{f} \cdot \frac{\Delta z}{\Delta x}} \quad g = 9.81 \frac{m}{s^2} \quad \text{Schwerebeschleunigung} \quad (6)$$

Aus den beiden Komponenten u_g und v_g lässt sich, wie in Formel (3), die Windgeschwindigkeit berechnen.

Die Codierung der Windgeschwindigkeit erfolgt nach Tabelle 6-2 in Knoten. Es muss daher zuerst eine Umrechnung der Windgeschwindigkeit von Metern pro Sekunde in Knoten erfolgen, gemäss SCHÖNWIESE (1988) durch den Multiplikationsfaktor 1.9438.

Tab. 6-2: Codierung der Windgeschwindigkeit (ff) in Knoten (gemäss SMA, 1985).

Windgeschwindigkeit in [kn] (ff)	Code (f)
$0 \leq ff < 10$	0
$10 \leq ff < 20$	1
$20 \leq ff < 30$	2
$30 \leq ff < 40$	3
$40 \leq ff < 50$	4
$50 \leq ff < 60$	5
$60 \leq ff < 70$	6
$70 \leq ff < 80$	7
$80 \leq ff < 90$	8
$\geq ff 90$	9

Für die Einteilung der SCHÜEPP-Wetterlagen sind nur die zwei Grenzen von 15 und 50 Knoten wichtig. Beträgt die Höhenwindgeschwindigkeit weniger als 15 Knoten, so liegt eine windschwache Lage vor. Windgeschwindigkeiten von 15 bis 50 Knoten kennzeichnen Höhenstromlagen. Überschreitet die Höhenwindgeschwindigkeit 50 Knoten, so liegt eine Jetlage vor.

4. Schritt: Ermittlung der Windrichtung im 500 hPa-Niveau

Analog zu Schritt zwei muss auch im Höhengniveau die Windrichtung (dd) festgestellt werden. Sie wird, wie im Bodenniveau, durch die drei Formeln (4.1), (4.2) und (4.3) bestimmt. Die Verschlüsselung dieses Parameters (d) erfolgt analog zu Tabelle 6-1.

5. Schritt: Bestimmung der mittleren Höhe des 500 hPa-Niveaus

Eine Unterteilung nach der mittleren Höhe der 500 hPa-Fläche (hh) erfolgt bei Lagen mit schwacher Bodenströmung (konvektive Lagen; $FF < 8.6 \text{ ms}^{-1}$, $D = 0$) und bei Advektiven Lagen mit Höhenwinden von weniger als 50 Knoten ($D = 1$ bis 8, $f = 1$ bis 4). advektive Jetlagen ($D = 1$ bis 8, $f \geq 5$) werden in diesem Schritt nicht weiter unterteilt.

Bei den konvektiven Lagen werden drei Klassen unterschieden. Ist der Höhenluftdruck übernormal für die Jahreszeit, erfolgt eine Klassierung zu den Hochdrucklagen, ist er normal, so handelt es sich um eine Flachdrucklage. Bei unternormalem Höhenluftdruck ist es eine Tiefdrucklage.

Bei den Höhenstrom-Jetlagen (Gruppe der Mischlagen) und den Advektiven Lagen (ohne advektive Jetlagen) dagegen wird nur zwischen über- und unterdurchschnittlich unterschieden, wobei 'überdurchschnittlich' eine Warmluftadvektion und 'unterdurchschnittlich' eine Kaltluftadvektion bedeutet.

Ob der ermittelte Wert der mittleren Höhe im 500 hPa-Niveau als normal, über- oder unternormal, als über- oder unterdurchschnittlich einzuordnen ist, wird mit Hilfe eines von der SMA zur Verfügung gestellten Programms entschieden. Wie die Abbildung 6.5 zeigt, beziehen sich die Angaben normal, übernormal, unternormal, überdurchschnittlich und unterdurchschnittlich auf die Quartilwerte respektive den Zentralwert, wobei der Bereich zwischen oberem und unterem Quartil als 'normal' anzusehen ist.

Die Werte (oberes Quartil, Zentralwert, unteres Quartil) in Abbildung 6.5 basieren auf dem Mittelwert der Jahre 1951-1970 der 500 hPa-Höhe über dem Gitterpunktes $45^\circ \text{ N} / 10^\circ \text{ E}$ in der Nähe von Cremona (Italien). Mit Hilfe des SMA-Programms können die Quartilwerte für jeden Tag im Jahr berechnet werden. Nach Abschluss dieses Schrittes ist es möglich, alle konvektiven Lagen zu klassieren.

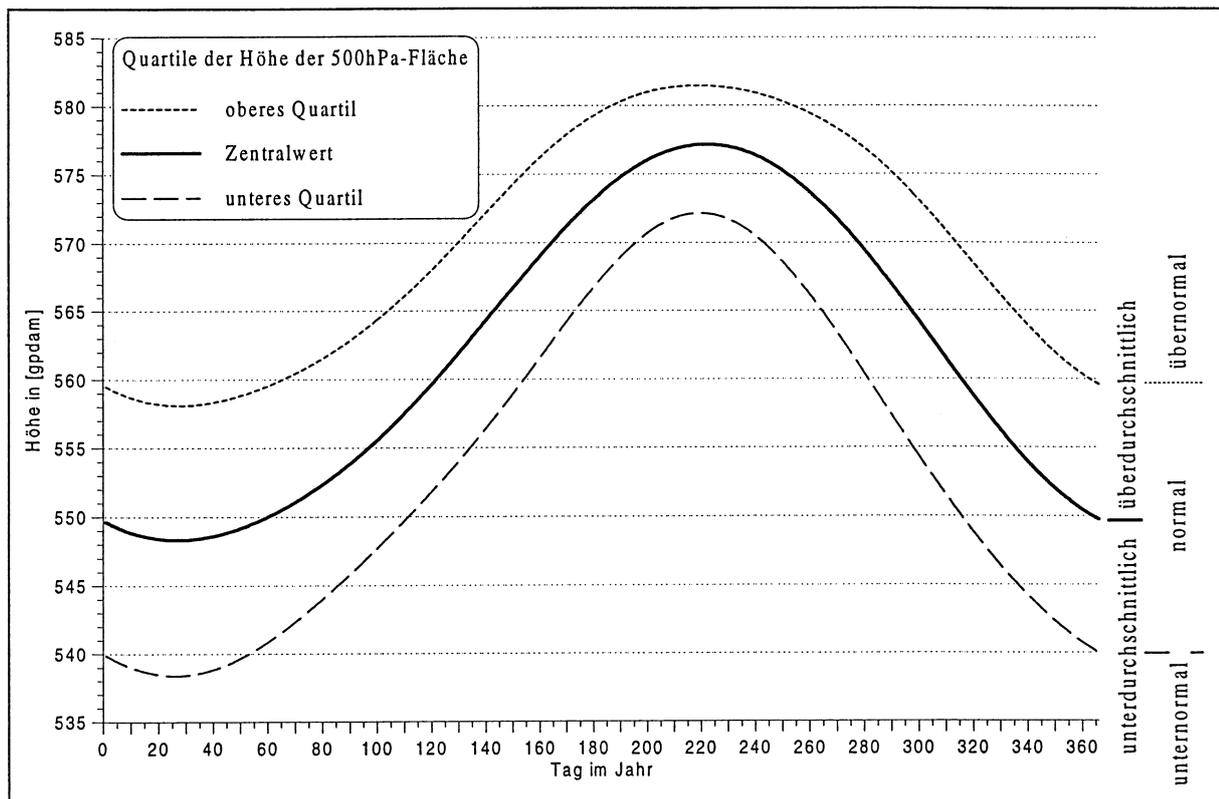


Abb. 6.5: Quartile der Höhe der 500 hPa-Fläche für jeden Tag im Jahr. Die Werte basieren auf dem Mittelwert der Werte von 1951 bis 1970 über dem Punkt 45° N 10° E. (Quelle: SMA, 1995)

6. Schritt: Feststellung der Baroklinität

Um die Advektiven Lagen endgültig zuordnen zu können, muss die Winddrehung mit der Höhe berücksichtigt werden. Die Bestimmung der Baroklinität (Winddrehung mit der Höhe) erfordert keine spezielle Berechnung, sondern greift auf die beiden Parameter Bodenwindrichtung und Höhenwindrichtung zurück. Weicht die Höhenwindrichtung um mehr als 45° von der Bodenwindrichtung ab, wird nicht von einer Gleichstrom- sondern von einer Gegenstromlage gesprochen. Durch die Bestimmung der Baroklinität sind auch die Advektiven Lagen eindeutig klassierbar.

Auf Grund der sechs berechneten Größen (Bodenwindgeschwindigkeit, Bodenwindrichtung, Höhenwindgeschwindigkeit, Höhenwindrichtung, 500 hPa-Geopotential und Baroklinität) ist es möglich, eine Klassierung zu den SCHÜEPP-Wetterlagen vorzunehmen. Welche Parametercodierungen zu welchen Wetterlagen führen, kann aus Abbildung 6.2 abgelesen werden.

6.2.2 Vergleich der automatischen und der manuellen Wetterlagenklassifikation

Für den Vergleich der automatischen Klassifikation der SCHÜEPP-Wetterlagen mit der synoptischen Wetterlageneinteilung nach SCHÜEPP (AWS Parameter 33) standen insgesamt 14'279 Einzeltage vom Januar 1946 bis Juni 1989 zur Verfügung.

Im Folgenden soll unter 'automatischer Klassifikation' immer die mit dem Programm *SCHÜEPPGEN.P* durchgeführte Klassifikation verstanden werden. Als 'manuelle Klassifikation' gilt die, im Parameter 33 der Alpenwetterstatistik abgelegte Einteilung durch die SMA.

Der Vergleich der manuellen mit der automatischen Klassierung ergab im Durchschnitt über alle Lagen und Tage rund 47% gleich klassierte Wetterlagen. Die Übereinstimmung variiert jedoch je nach Wetterlage und Jahreszeit sehr stark.

Die Tabelle 6-3 zeigt die Resultate für die Wetterlagengruppen und für die einzelnen Wetterlagen nach Jahreszeit und für das ganze Jahr.

In der ersten Spalte steht jeweils die absolute Häufigkeit (HK) des Vorkommens der betreffenden Gruppe oder Wetterlage in der Jahreszeit oder insgesamt (Jahr) in der manuellen Klassifikation während den 44 Jahren (1946 bis 1989). Die zweite Spalte enthält die Anzahl der Fälle, bei denen die automatische Klassifikation dasselbe Resultat erbrachte, wie die manuelle Klassifikation.

Die dritte Spalte drückt die Anzahl gleich klassierter Fälle in Prozent der Gesamtanzahl aus. Die unterste Zeile (Total) enthält die Werte über alle Wetterlagen gerechnet.

Es zeigt sich, dass über alle Wetterlagen gerechnet, unterschiedliche Klassierungen der beiden Methoden am häufigsten im Winter vorkommen (nur 44% Übereinstimmung). Im Herbst dagegen wird mit 49% fast die Hälfte aller Tage gleich zugeordnet.

Einen Vergleich der Klassierungen in den vier Jahreszeiten für die 7 Gruppen (Hochdruck-, Flachdruck-, Tiefdruck-, West-, Nord-, Ost- und Südlagen) vermittelt Abbildung 6.6.

Mit über 50% gleich klassierten in allen Jahreszeiten (im Frühjahr, Sommer und Herbst sogar über 60%) können die Hochdrucklagen am häufigsten gleich zugeordnet werden. Auch bei den Flachdrucklagen ist die Klassierung mit über 55% in drei Jahreszeiten (im Winter nur 48%) noch recht gut. Bei den Tiefdrucklagen reicht der Anteil der gleich klassierten nur noch im Herbst über die 50% Marke (durchgezogene Linie in der Abb. 6.6).

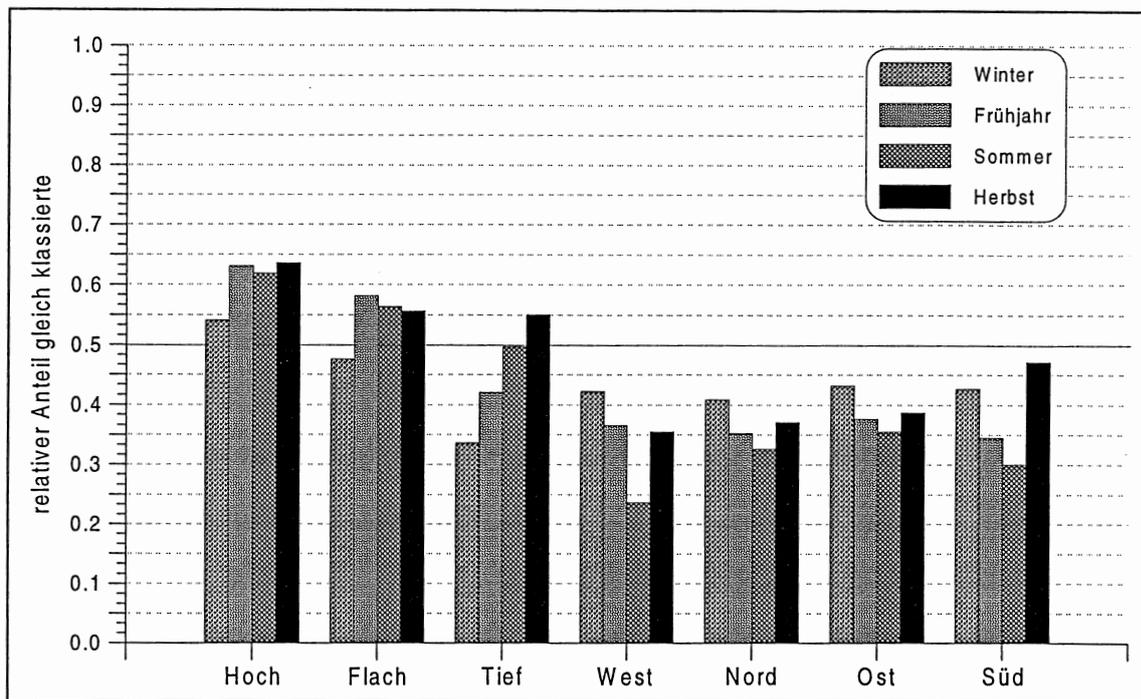


Abb. 6.6: Anteil der automatisch und manuell gleich zugeordneten Tage im Verhältnis zu den total manuell zugeordneten Tagen für die Wetterlagegruppen im Zeitraum 1946 bis 1989 für alle Jahreszeiten.

Es zeigt sich deutlich, dass die konvektiven Lagen (Hoch-, Flach-, und Tiefdrucklagen) vor allem im Winter durch die beiden Klassierungsarten unterschiedlich klassiert werden. Der Winter liegt meist bis zu 10% unter der Quote der Übereinstimmung der anderen Jahreszeiten.

Die advektiven Lagen (West-, Nord-, Ost- und Südlagen) werden im Gegensatz dazu im Winter öfter gleich erfasst als in den anderen Jahreszeiten (ausser Südlagen im Herbst). Insgesamt zeigen die advektiven Lagen jedoch eine deutlich schlechtere Übereinstimmung der beiden Klassierungsarten als die Konvektiven Lagen. Grosse Probleme treten vor allem im Sommer auf. In dieser Jahreszeit gelang bei den Westlagen nur gerade bei $\frac{1}{4}$ eine übereinstimmende Klassierung. Auch die übrigen advektiven Lagen weisen, mit nur $\frac{1}{3}$ gleich klassierten Tagen, kein markant besseres Ergebnis auf.

Aus Tabelle 6-3 ist ersichtlich, dass häufig vorkommende Lagen meist besser automatisch klassiert werden können als seltene Lagen. Die Hochdrucklage mit schwacher Höhenströmung (+Ho) beispielsweise, die im Beobachtungszeitraum insgesamt an 646 Tagen aufgetreten ist, liess sich an 491 Tagen durch die automatische Klassierung gleich zuordnen wie durch die manuelle. Die Ostlage mit jetartiger Strömung in der Höhe (Ej) dagegen liess sich automatisch nur an 14 von insgesamt 42 Tagen gleich zuordnen. Über die einzelnen Jahreszeiten betrachtet, wurden im Frühjahr, Sommer und Herbst bei manuell zugeordneten Ej-Lagen mit der automatischen Methode nie Ej-Lagen zugeordnet (vgl. Tab. 6-3 Zeile 'Ej').

Tab. 6-3: Übereinstimmung der automatischen Klassifikation mit der manuellen Klassifikation der Wetterlagen nach SCHÜEPP.

	Winter			Frühjahr			Sommer			Herbst			Jahr		
WI	HK	TR	PR	HK	TR	PR									
+Ho	100	68	68%	103	77	75%	216	164	76%	<u>227</u>	182	80%	646	491	76%
+Hw	69	25	36%	48	26	54%	<u>182</u>	107	59%	109	66	61%	408	224	55%
+Hn	<u>184</u>	114	62%	118	78	66%	175	92	53%	141	84	60%	618	368	60%
+He	<u>103</u>	44	43%	55	30	55%	45	25	56%	88	41	47%	291	140	48%
+Hs	43	19	44%	47	23	49%	<u>106</u>	60	57%	73	33	45%	269	135	50%
Hoch	499	270	54%	371	234	63%	724	448	62%	638	406	64%	2232	1358	61%
Fo	94	50	53%	278	179	64%	<u>283</u>	177	63%	227	147	65%	882	553	63%
Fw	126	64	51%	203	121	60%	<u>409</u>	229	56%	217	112	52%	955	526	55%
Fn	148	72	49%	201	107	53%	<u>279</u>	144	52%	228	123	54%	856	446	52%
Fe	71	23	32%	<u>121</u>	55	45%	61	31	51%	82	37	45%	335	146	44%
Fs	120	57	47%	242	145	60%	<u>270</u>	153	57%	198	111	56%	830	466	56%
Flach	559	266	48%	1045	607	58%	1302	734	56%	952	530	56%	3858	2137	55%
-Lo	31	9	29%	<u>58</u>	22	38%	34	20	59%	35	18	51%	158	69	44%
-Lw	62	25	40%	61	27	44%	<u>121</u>	58	48%	63	39	62%	307	149	49%
-Ln	37	6	16%	<u>58</u>	12	21%	48	15	31%	52	18	35%	195	51	26%
-Le	16	3	19%	<u>30</u>	8	27%	6	2	33%	9	5	56%	61	18	30%
-Ls	68	29	43%	<u>112</u>	65	58%	111	64	58%	88	56	64%	379	214	56%
Tief	214	72	34%	319	134	42%	320	159	50%	247	136	55%	1100	501	46%
Konv.	1272	608	48%	1735	975	56%	2346	1341	57%	1837	1072	58%	7190	3996	56%
Wj	<u>128</u>	74	58%	47	23	49%	27	7	26%	79	38	48%	281	142	51%
+Wp	<u>135</u>	55	41%	86	37	43%	37	9	24%	102	51	50%	360	152	42%
-Wp	<u>103</u>	33	32%	70	22	31%	58	7	12%	96	18	19%	327	80	24%
+Wx	44	13	30%	44	9	20%	<u>57</u>	17	30%	54	17	31%	199	56	28%
-Wx	94	38	40%	84	30	36%	<u>172</u>	43	25%	69	18	26%	419	129	31%
West	504	213	42%	331	121	37%	351	83	24%	400	142	36%	1586	559	35%
Nj	<u>254</u>	146	57%	88	38	43%	27	12	44%	94	49	52%	463	245	53%
+Np	<u>80</u>	14	17%	41	4	10%	12	0	0%	42	2	5%	175	20	11%
-Np	<u>70</u>	10	14%	<u>79</u>	6	8%	65	12	18%	57	6	11%	271	34	13%
+Nx	<u>200</u>	88	44%	135	58	43%	115	50	43%	155	78	50%	605	274	45%
-Nx	233	84	36%	236	98	42%	<u>238</u>	75	32%	194	66	34%	901	323	36%
Nord	837	342	41%	579	204	35%	457	149	33%	542	201	37%	2415	896	37%
Ej	<u>31</u>	14	45%	5	0	0%	1	0	0%	5	0	0%	42	14	33%
+Ep	<u>92</u>	49	53%	58	25	43%	22	9	41%	49	16	33%	221	99	45%
-Ep	<u>111</u>	53	48%	108	49	45%	39	16	41%	57	30	53%	315	148	47%
+Ex	22	4	18%	<u>38</u>	11	29%	5	1	20%	20	4	20%	85	20	24%
-Ex	<u>31</u>	4	13%	30	5	17%	9	1	11%	24	10	42%	94	20	21%
Ost	287	124	43%	239	90	38%	76	27	36%	155	60	39%	757	301	40%
Sj	36	9	25%	<u>41</u>	14	34%	13	3	23%	<u>41</u>	17	41%	131	43	33%
+Sp	100	61	61%	104	41	39%	58	19	33%	<u>123</u>	77	63%	385	198	51%
-Sp	110	47	43%	<u>132</u>	48	36%	37	9	24%	117	56	48%	396	160	40%
+Sx	40	6	15%	<u>52</u>	11	21%	27	11	41%	20	3	15%	139	31	22%
-Sx	82	34	41%	<u>106</u>	36	34%	85	24	28%	104	38	37%	377	132	35%
Süd	368	157	43%	435	150	34%	220	66	30%	405	191	47%	1428	564	39%
Adv.	1996	836	42%	1584	565	36%	1104	325	29%	1502	594	40%	6186	2320	38%
Xx	10	0	0%	18	0	0%	15	0	0%	18	0	0%	61	0	0%
+Xj	<u>37</u>	5	14%	10	2	20%	20	8	40%	19	6	32%	86	21	24%
-Xj	51	22	43%	46	22	48%	49	25	51%	<u>53</u>	27	51%	199	96	48%
+Xo	<u>78</u>	40	51%	72	30	42%	44	12	27%	65	26	40%	259	108	42%
-Xo	80	46	57%	93	50	54%	68	24	35%	57	28	49%	298	148	50%
Misch	256	113	44%	239	104	44%	196	69	35%	212	87	41%	903	373	41%
Total	3524	1557	44%	3558	1644	46%	3646	1735	48%	3551	1753	49%	14279	6689	47%

WI: Wetterlage, HK: absolute Häufigkeit der Wetterlage in der manuellen Klassifikation, kursiv und unterstrichen: Häufigkeitsmaxima der Jahreszeit, TR: Treffer, gleiche Klassierungen in der manuellen und der automatischen Klassierung, PR: Prozentualer Anteil der Treffer an der Häufigkeit, fett: Treffermaxima der Jahreszeiten

Betrachtet man die Verteilung der gleich klassierten Lagen über die einzelnen Jahre hinweg, kann man eine starke Variation feststellen (Abb. 6.7).

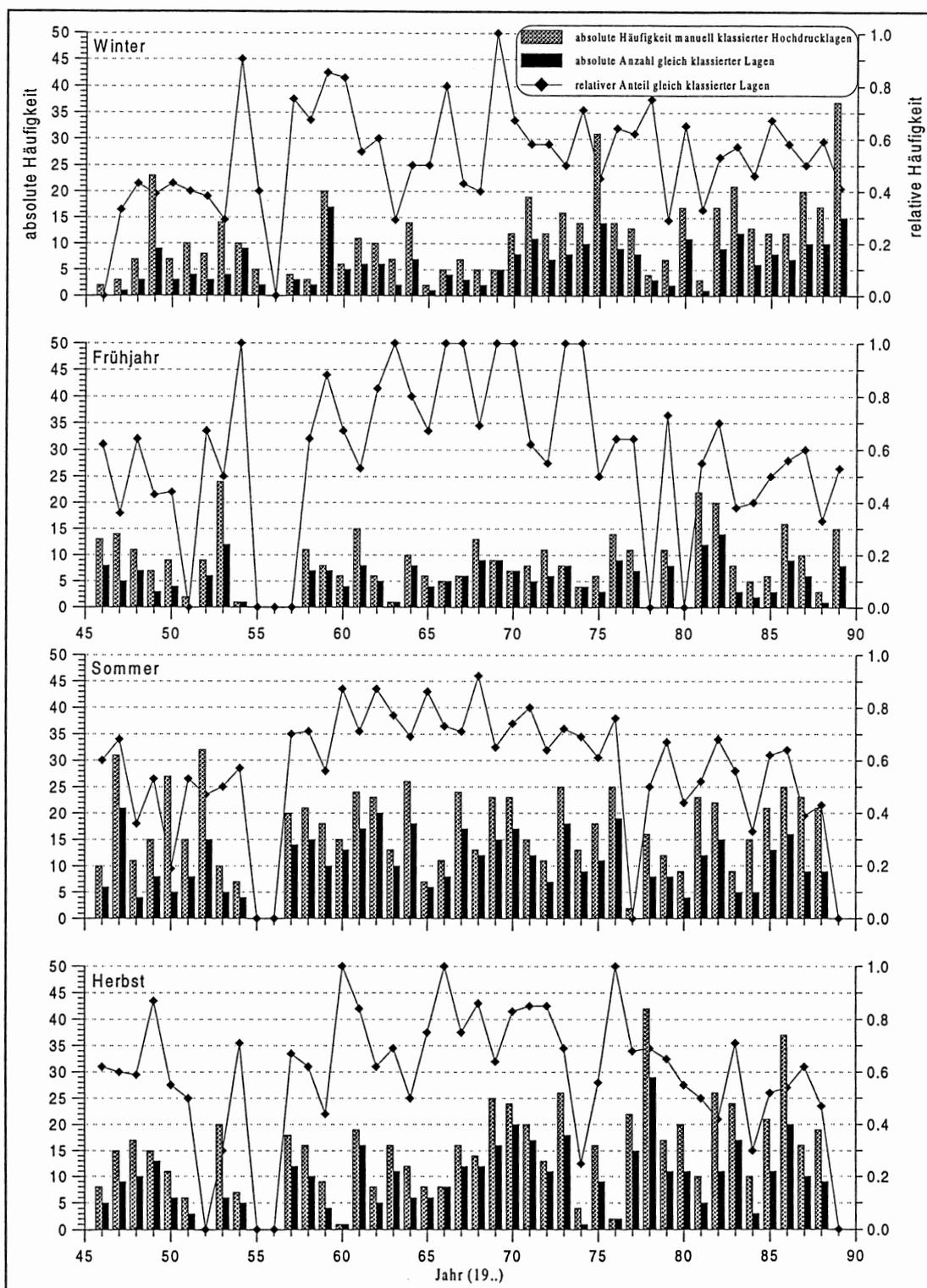


Abb. 6.7: Jährliche absolute Häufigkeit der Hochdrucklagen für die vier Jahreszeiten im Zeitraum 1946 bis 1989.

(Histogramme: gemusterte Balken=absolute Häufigkeit der manuell klassierten Hochdrucklagen, schwarze Balken=absolute Häufigkeit der manuell und automatisch gleich klassierten Hochdrucklagen; Linie=Anteil der automatisch als Hochdrucklagen klassierten Wetterlagen am Total der manuell klassierten Hochdrucklagen).

Im Winter und auch im Frühjahr 1969 konnten mit der automatischen Klassierung alle aufgetretenen Hochdrucklagen gleich klassiert werden wie manuell. Im Jahr davor (1968) konnten im Winter nur gerade 40% und im Frühjahr nur knapp 70% gleich zugeordnet werden. Auch hier entsteht erneut der Eindruck, dass die einzelnen Lagen, wenn sie häufiger vorkommen, auch besser automatisch klassiert werden können.

Die häufigste Hauptgruppe der Wetterlagen nach SCHÜEPP sind die konvektiven Lagen. Die beiden häufigsten Grundtypen (Hochdruck- und Flachdrucklagen) stammen aus dieser Hauptgruppe. Der Grund, warum gerade die Lagen dieser beiden Grundtypen, insbesondere die beiden Lagen +Ho und Fo besonders viele gleiche Klassierungen bei der manuellen und automatischen Technik liefern, ist in Abbildung 6.8 ersichtlich.

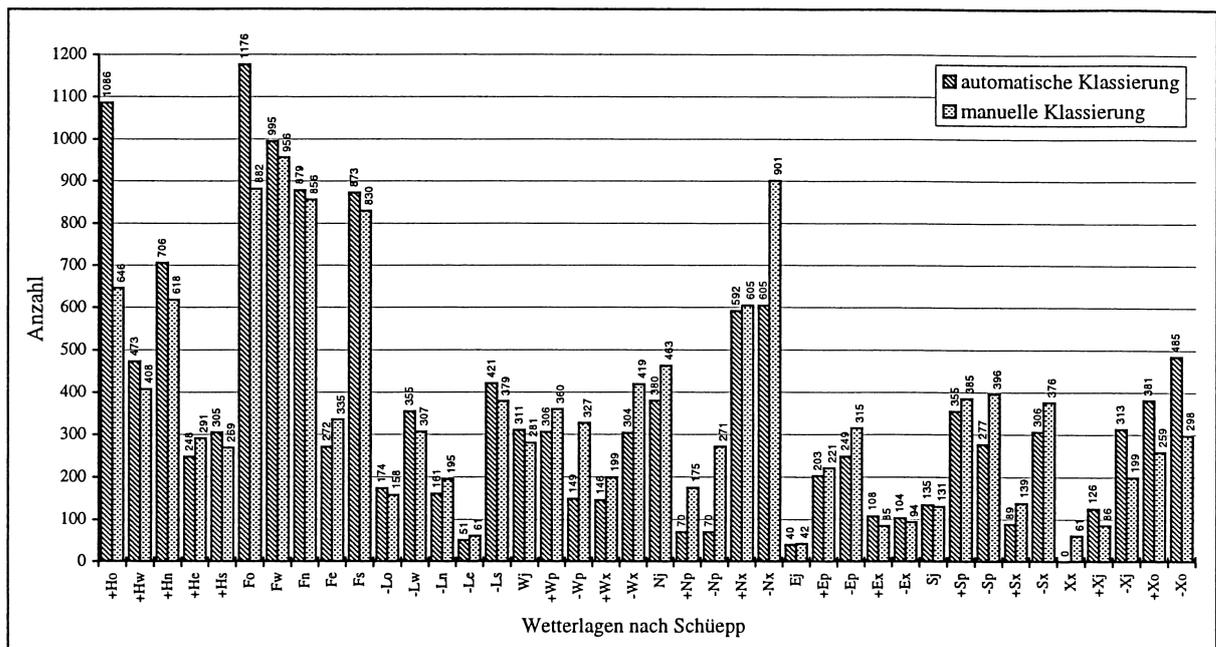


Abb. 6.8: Absolute Anzahl der Tage, die mit der manuellen respektive der automatischen Klassifikationsmethode im Zeitraum 1946 bis 1989 den einzelnen Wetterlagen zugeordnet wurden.

Aus Abbildung 6.8 geht hervor, dass im Zeitraum 1946 bis 1989 mit der automatischen Methode 1086 Tage der Hochdrucklage mit schwacher Höhenströmung (+Ho) zugeordnet wurden, während manuell dieser Lage nur 646 Tage zugeordnet wurden. Ähnlich sieht das Zuordnungsverhältnis automatisch zu manuell zugeordneter Tage bei der Flachdrucklage mit schwacher Höhenströmung (Fo) aus. Je mehr Tage einer bestimmten Lage zugeordnet werden, um so höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass auch die andere Methode einen Teil der Tage zur gleichen Lage zugeordnet hat.

Invers dazu präsentiert sich das Bild bei vielen advektiven Lagen, vorab bei der Nord-Gegenstromlage mit Höhentief (-Nx), wo 605 Tage der automatischen Klassierung 901 Tagen der manuellen Klassierung gegenüber stehen.

Es erstaunt daher nicht, dass die Übereinstimmung bei den konvektiven Lagen deutlich besser ausfällt als bei den advektiven Lagen.

Gründe für die unterschiedlichen Zuordnungen der beiden Klassifikationsmethoden sind in der Berechnung der einzelnen Parameter zu suchen. Sie führen dazu, dass ein bestimmter Tag der einen oder anderen Wetterlage zugeordnet wird. Es ist daher wichtig, die einzelnen Parameter und ihre Übereinstimmung zu untersuchen.

6.2.2.1 Resultate der einzelnen Parameter

Um herauszufinden, bei welchen Parametern die automatische Klassierung andere Resultate liefert als die manuelle, werden die Parameter einzelnen ausgewertet. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass bei der automatischen Klassifikation nicht bei allen Parametern alle Werte zugeordnet werden konnten. Bei der Windrichtung z.B. ist die Zuordnung des Parameters D,d = 9 nicht möglich.

1. Vergleich der Parameterwerte der Bodenströmung (D, AWS-Parameter 9)

Die Alpenwetterstatistik (SMA, 1985) schreibt zur Bestimmung dieses Parameters: „Da das Druckfeld in der Bodenwetterkarte infolge der Geländeeinflüsse viele lokale Effekte, Umbiegungen der Isobaren an den Alpen und den Mittelgebirgen sowie Knickstellen an den Fronten aufweist, ist der Parameter D einer der am schwierigsten (vollständig, objektiv) zu bestimmenden Grössen. Grundsätzlich wird er aus der Bodenkarte von 12z (vgl. Abkürzungsverzeichnis) bestimmt, in Zweifelsfällen wird die zugehörige 850 hPa-Karte, eventuell auch die Bodenkarte von 15z oder diejenige von 09z hinzugezogen.“ Das Programm *SCHÜEPPGEN.P* dagegen ist nicht flexibel. Es entscheidet immer allein auf Grund der 12z Werte ohne Einbezug von irgendwelchen anderen Werten. Auch die Unterscheidung zwischen konvektiven und advektiven Lagen, die mit Hilfe dieses Parameters vorgenommen wird (konvektive Lagen D=0; advektive Lagen D>0), wird im Programm stur bei einer geostrophischen Bodenwindgeschwindigkeit von 8.6 ms^{-1} (~16.7 kn) gezogen.

Tabelle 6-4 zeigt, dass die Bodenwindrichtungsklasse bei den Hoch- und Flachdrucklagen im Frühjahr, Sommer und Herbst bei 90% und mehr Fällen mit der automatischen Methode gleich zugeordnet wird wie mit der manuellen (fett gedruckte Zahlen in Tab. 6-4). Bei den Tiefdrucklagen ist dies nur noch im Sommer der Fall. Bereits grössere Probleme bietet die gewählte Berechnungsart bei den konvektiven Wetterlagen im Winter. Der Anteil der gleich klassierten liegt hier nur noch zwischen knapp 70% bis etwas über 80%.

Deutlich schlechter fällt die Bilanz bei den advektiven Lagen aus (ausgenommen bei den Ostlagen). Vor allem für die Sommermonate kann die Bodenwindrichtungsklasse mit der automatischen Klassierung nur bei 30-50% der Fälle gleich erfasst werden wie mit der manuellen Klassifikation. Im Winter ist die Berechnung etwas besser, reicht jedoch längst nicht an die guten Trefferquoten der Hochdrucklagen im Sommer heran.

Tab. 6-4: Übereinstimmung des Parameters Bodenwindrichtungsklasse (D) der automatischen Klassifikation mit der manuellen Klassifikation der Wetterlagen nach SCHÜEPP.

Wl	Winter			Frühjahr			Sommer			Herbst			Jahr		
	HK	TR	PR	HK	TR	PR	HK	TR	PR	HK	TR	PR	HK	TR	PR
Hoch	499	408	82%	371	341	92%	724	704	97%	638	588	92%	2232	2041	91%
Flach	559	431	77%	1045	939	90%	1302	1228	94%	952	856	90%	3858	3454	90%
Tief	214	146	68%	319	266	83%	320	299	93%	247	209	85%	1100	920	84%
Konv.	1272	985	77%	1735	1546	89%	2346	2231	95%	1837	1653	90%	7190	6415	89%
West	504	302	60%	331	154	<u>47%</u>	351	135	<u>38%</u>	400	203	<u>51%</u>	1586	794	<u>50%</u>
Nord	837	457	<u>55%</u>	579	325	<u>56%</u>	457	234	<u>51%</u>	542	317	<u>58%</u>	2415	1333	<u>55%</u>
Ost	287	248	86%	239	177	74%	76	57	75%	155	108	70%	757	590	78%
Süd	368	236	64%	435	178	<u>41%</u>	220	64	<u>29%</u>	405	233	<u>58%</u>	1428	711	<u>50%</u>
Adv.	1996	1243	62%	1584	834	53%	1104	490	44%	1502	861	57%	6186	3428	55%
Misch	256	173	68%	239	131	55%	196	118	60%	212	125	59%	903	547	61%
Total	3524	2401	68%	3558	2511	71%	3646	2839	78%	3551	2639	74%	14279	10390	73%

(Wl: Wetterlage, Hk: absolute Häufigkeit in der AWS, TR: Treffer, gleiche Klassierungen manuell und automatisch, PR: Prozentualer Anteil der Treffer an Hk, fett: Trefferquote $\geq 90\%$, kursiv und unterstrichen: Trefferquote $< 60\%$).

Tabelle 6-5 zeigt die Zuordnung der einzelnen Parameterklassen bei den beiden Methoden. Abbildung 6.9 veranschaulicht diese Zuordnung, jedoch sind darin die Parameterwerte zusammengefasst, die zu derselben SCHÜEPP-Wetterlage führen.

Tab. 6-5: Kreuzfeldtabelle der manuell und automatisch zugeordneten Parameterwerte der Bodenwindrichtung mit absoluter Häufigkeit im Zeitraum 1946 bis 1989. (fett markierte Zahlen: gleiche Zuordnung manuell und automatisch; Felder mit Doppelrahmen: Parameterwerte die bei der SCHÜEPP-Wetterlage zur gleichen Klassierung führen)

Bodenwindrichtung (D)

automatisch manuell		automatisch									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
schwach	0	6637	94	316	81	41	116	143	24	23	0
NE	1	445	526	300	3	0	0	1	0	23	0
E	2	416	371	1098	42	2	5	2	1	5	0
SE	3	78	2	24	76	37	15	2	1	0	0
S	4	104	0	0	9	91	150	13	0	0	0
SW	5	333	4	3	4	22	490	212	4	4	0
W	6	383	77	15	0	4	135	404	67	37	0
NW	7	122	218	20	0	0	2	9	32	81	0
N	8	54	98	34	0	0	0	0	2	31	0
uneinheitlich	9	41	5	4	1	0	1	1	4	4	0

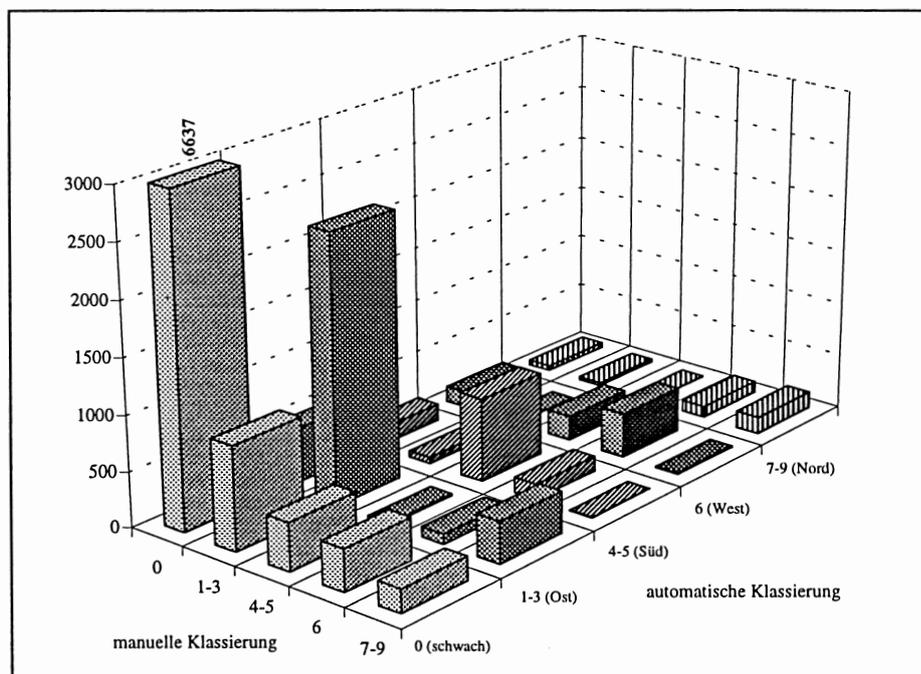


Abb. 6.9: Absolute Häufigkeiten der manuell und automatisch zugeordneten Parameterwert-Kombinationen der Bodenwindrichtung im Zeitraum 1946 bis 1989. Parameterwerte, die dieselbe SCHÜEPP-Wetterlage ergeben, sind zusammengefasst.

Was sich bereits in Abbildung 6.8 abzeichnete, wird durch Tabelle 6-5 bestätigt. Mit der automatischen Klassifikationsmethode wird viel häufiger $D = 0$ zugeordnet als mit der manuellen Methode (vgl. dazu auch Abb. 6.9, Spalte: 0 = schwach). Zudem scheint zwischen der manuellen und der automatischen Zuordnung auch eine leichte Verschiebung der Richtung vorzuliegen. Manuell zugeordnete NW, N, NE, S und SW-Winde werden bei der automatischen Zuordnung im Uhrzeigersinn verschoben, während Ost- und Westwinde leicht im Gegenuhrzeigersinn verschoben werden. Darin zeigt sich die unterschiedliche Klassierung der beiden Methoden. Die automatische Klassifikation verschlüsselt im Parameter D immer die Windrichtung im Zentralpunkt, während die manuelle Klassifikation bei S-förmig gekrümmten Isobaren die Windrichtung im Anströmgebiet berücksichtigt. Es ergeben sich daher zwangsläufig Unterschiede in der Zuordnung des Parameters Bodenwindrichtung und somit auch in der Klassierung der beiden Methoden.

Da die konvektiven Lagen mit $D = 0$ relativ gut erfasst werden, die advektiven Lagen mit $D > 0$ aber eher schlecht, könnte eine mögliche Schwachstelle der Grenzwert von 8.6 ms^{-1} zwischen den beiden Gruppen sein. Ein weiterer Versuch, dieses Kriterium wie bei der Höhenwindrichtung (d) bei 15 Knoten anstelle von 16.8 Knoten anzusetzen, hat gezeigt, dass dadurch eine Verbesserung des Anteils der gleich klassierten Parameter bei den advektiven Lagen erreicht werden kann. Gleichzeitig verschlechtert sich aber der Anteil gleich klassierter bei den konvektiven Lagen, wie Abbildung 6.10 zeigt.

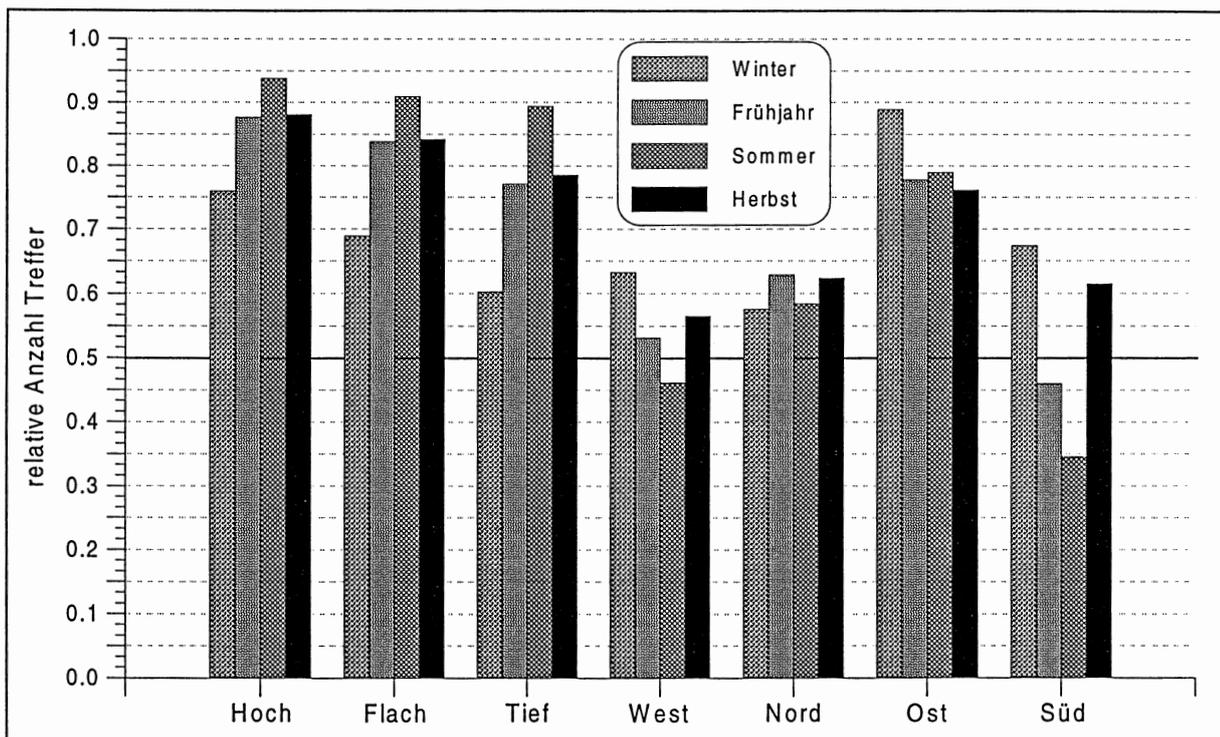


Abb. 6.10: Relativer Anteil der manuell und automatisch gleich klassierten Bodenwindrichtungen (D), dargestellt für die Wetterlagengruppen in allen Jahreszeiten im Zeitraum 1946 bis 1989. Eine Zuteilung zu $D = 0$ erfolgt bei Bodenwindstärken von $FF < 15 \text{ kn}$.

Sowohl bei der Betrachtung der Abbildung 6.10 als auch aus Tabelle 6-4 stellt sich die Frage, ob der Parameter Bodenwindrichtung nicht eventuell für die einzelnen Jahreszeiten auf unterschiedliche Weise zu bestimmen wäre.

2. Vergleich der Parameterwerte der Höhenwindrichtung (d, AWS-Parameter 10)

Die automatische Bestimmung der Höhenwindrichtung stimmt in 73% aller Fälle mit den manuell bestimmten Höhenwindrichtungen überein. Wie Abbildung 6.11 zeigt, bestehen zwischen den einzelnen Gruppen und Jahreszeiten nur geringe Unterschiede. Mit nur 60% gleichen Zuordnungen schneiden die Tiefdrucklagen im Winter am schlechtesten ab. Die Tiefdrucklagen sind aber im Winter auch die seltensten Lagen.

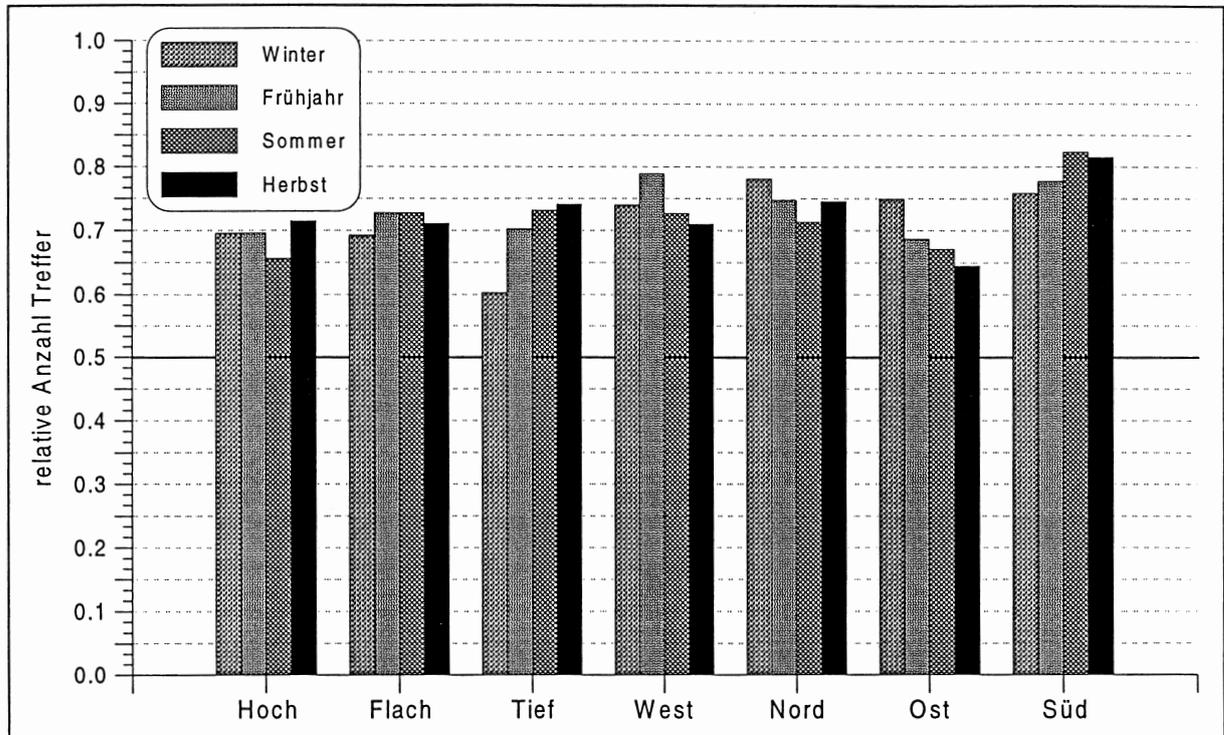


Abb. 6.11: Relativer Anteil der manuell und automatisch gleich klassierten Höhenwindrichtungen (d), dargestellt für die Wetterlagengruppen in allen Jahreszeiten im Zeitraum 1946 bis 1989.

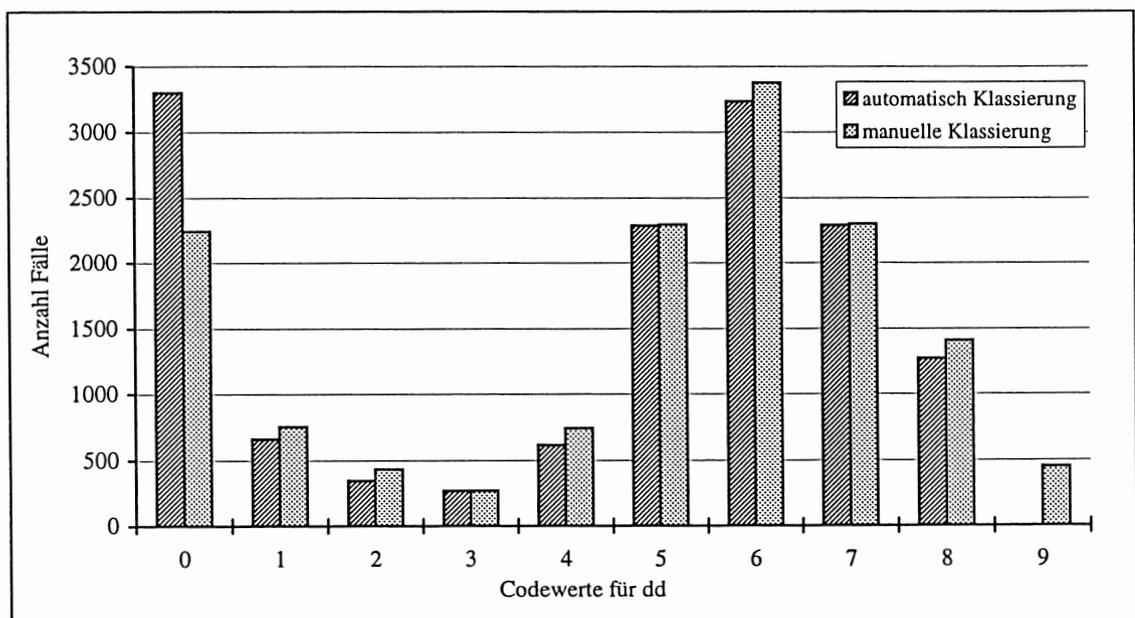


Abb. 6.12: Absolute Häufigkeit der automatisch und manuell zugewiesenen Parameterwerte d während der Zeitperiode 1946 bis 1989.

Wie Abbildung 6.12 zeigt, werden auch bei der Höhenwindrichtung wie schon bei der Bodenwindrichtung mit der automatischen Klassierung viel mehr Fälle (rund 1050) den windschwachen Lagen zugeordnet als mit der manuellen Klassierung. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, dass der Parameter d im Falle von $d = 9$ (uneinheitliche Windrichtung) in der automatischen Klassierung nicht zugeordnet werden kann. Dieser Fall tritt in der manuellen Klassierung im untersuchten Zeitraum 452 mal auf und ist somit nicht zu vernachlässigen. Auch wenn die manuell klassierten ($d = 9$)-Werte bei der automatischen Klassierung $d = 0$ zugerechnet werden (Tab. 6-6), bleiben trotzdem immer noch rund 600 Fälle übrig, bei denen automatisch $d = 0$ klassiert wurde, jedoch manuell $d > 0$.

Tab. 6-6: Kreuzfeldtabelle der manuell und automatisch zugeordneten Parameterwerte der Höhenwindrichtung mit absoluter Häufigkeit im Zeitraum 1946 bis 1989 (fett markierte Zahlen: gleiche Zuordnung manuell und automatisch; Felder mit Doppelrahmen: Parameterwerte, die bei der SCHÜEPP-Wetterlage zur gleichen Klassierung führen).

Höhenwindrichtung (d)

		automatisch									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
manuell	schwach 0	1759	58	36	33	39	61	106	97	56	0
	NE 1	146	418	57	3	0	2	1	12	116	0
	E 2	106	89	207	23	2	0	1	1	4	0
	SE 3	71	2	21	141	34	0	1	0	0	0
	S 4	148	1	2	48	388	150	4	1	0	0
	SW 5	219	0	1	7	126	1637	296	11	1	0
	W 6	276	0	1	2	7	393	2425	265	7	0
	NW 7	201	3	2	1	0	6	340	1589	158	0
	N 8	150	75	1	0	0	2	15	271	894	0
	uneinheitlich 9	226	16	20	11	19	36	47	44	33	0

Aus Tabelle 6-6 ist auch abzulesen, dass keine offensichtlichen Abweichung der Windrichtung in eine bestimmte Richtung vorliegt wie bei der Bodenwindrichtung. Die jeweiligen Zeilen- bzw. Spaltenmaxima (fett markiert) kommen in der Tabelle in die Diagonale zu liegen. Dies bedeutet, dass jeweils der grösste Teil der Fälle bei beiden Klassifikationsmethoden gleich zugeordnet wurde. Im weiteren enthalten die benachbarten Felder der Diagonalfelder die nächst höheren Werte. Es darf daher angenommen werden, dass die Abweichungen zwischen den beiden Methoden eher gering ausfallen.

Für die dennoch auftretenden Unterschiede in der manuellen und der automatischen Klassierung ist die Ursache, wie bereits bei der Bodenwindrichtung, in der unterschiedlichen Berechnungsart zu suchen.

Die Höhenwindrichtung der manuellen Klassifikation wird aus einer Isohypsen-Karte herausgelesen, während bei der automatischen Klassierung die Höhenwindrichtung für den Zentralpunkt berechnet wird. Kritisch ist auch hier der Schwellenwert der Windgeschwindigkeit von 15 Knoten zur Unterteilung in Schwachwind- und Strömungslagen.

Um mit der automatischen Klassierung näher an die Resultate der manuellen Klassierung heranzukommen, müsste auch bei diesem Parameter ein anderer Schwellenwert oder eine andere Berechnungsmethode gewählt werden.

3. Vergleich der Parameterwerte der Höhenwindstärke (f, AWS-Parameter 11)

Die Codierung der Höhenwindstärke geschieht in Schritten von 10 Knoten. Für die Einteilung der SCHÜEPP-Wetterlagen sind jedoch nur 3 Klassen von Bedeutung: 0-15 Knoten für schwache Winde, 15-49 Knoten für mässige bis starke Winde und >50 Knoten für kräftige Höhenströmung (Jet). Werden nur diese drei Klassen berücksichtigt, so führt die automatische Klassierung in 80% der Fälle zur gleichen Zuordnung wie die manuelle Methode. Auch bei diesem Parameter zeigt sich über alle Wetterlagen und Jahreszeiten ein recht ausgeglichenes Bild mit Trefferquoten von 75-85%. Eine tiefere Trefferquote von 72% zeigen lediglich die Ostlagen im Herbst.

Wie Tabelle 6-7 zeigt, werden die Windgeschwindigkeiten mit der automatischen Methode durchschnittlich tiefer berechnet als mit der manuellen. Betrachtet man zum Beispiel die Tage, die manuell als $f = 1$ klassiert wurden (Zeile 2 in Tab. 6-7), so wurden diese mit der automatischen Klassierung zu 24.5% als $f = 0$, zu 54.6% als $f = 1$, zu 17.9% als $f = 2$ und zu 3% als $f = 3, 4$ oder 5 zugeordnet.

Wie bereits bei der Auswertung der Höhenwindrichtung, bei der die 15 Knoten Marke über die Zuteilung zu den Parameterklassen $d = 0$ oder $d < 0$ entscheidet, wird auch die Höhenwindgeschwindigkeit insgesamt bei der automatischen Klassierung tiefer berechnet als mit der manuellen Methode.

Tab. 6-7: Kreuzfeldtabelle der manuell und automatisch zugeordneten Parameterwerte der Höhenwindgeschwindigkeit mit absoluter Häufigkeit im Zeitraum 1946 bis 1989. (fett markierte Zahlen: gleiche Zuordnung manuell und automatisch; Felder mit Doppelrahmen: Parameterwerte, die bei der SCHÜEPP-Wetterlage zur gleichen Klassierung führen)

Höhenwindgeschwindigkeit (f)											
		automatisch									
manuell		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0 - 9 kn	0	538	314	21	1	2	0	0	0	0	0
10 - 19 kn	1	906	2023	664	89	20	2	0	0	0	0
20 - 29 kn	2	123	987	1918	688	104	12		0	0	1
30 - 39 kn	3	17	128	800	1336	574	90	7	1	1	0
40 - 49 kn	4	9	28	108	433	744	314	57	6	0	0
50 - 59 kn	5	0	2	14	74	243	287	127	24	1	0
60 - 69 kn	6	0	1	2	12	37	98	96	48	7	1
70 - 79 kn	7	0	0	1	3	8	17	34	20	7	2
80 - 89 kn	8	0	0	0	1	1	3	9	11	9	3
90 - 99 kn	9	0	0	0	0	0	0	0	3	3	2

Die Bestimmung der Höhenwindstärke in der AWS erfolgt aus den drei Radiosondierungen Payerne, München und Milano-Linate, letztere wird doppelt gewichtet. Es handelt sich somit um die Mittelung von drei Einzelpunktwerten. Im Programm dagegen wird eine mittlere Windgeschwindigkeit über das ganze Gebiet (vgl. 3. Schritt) für den Zentralpunkt (46.5° N/9° E) berechnet. Möglicherweise könnte auch bei diesem Parameter durch die Verschiebung der beiden Grenzen (15 und 50 Knoten) eine Annäherung der automatischen an die manuelle Klassifikation erreicht werden.

4. Auswertung der mittleren Höhenlage der 500 hPa-Fläche beziehungsweise Zuordnung zu den Quartilen (hh, AWS-Parameter 17)

Bei der Einteilung der Wetterlagen interessieren nicht in erster Linie die absoluten Werte der mittleren Höhe des 500 hPa-Niveaus, sondern deren Quartilzuteilung (über oder unter dem Zentralwert bei advektiven Lagen und Quartilwerte bei den konvektiven Lagen; vgl. Abb. 6.5). Die codierten Werte (Parameter 17 der AWS) eignen sich nur bedingt für einen Vergleich, denn zwei Werte, die nur 1 gpm (geopotentieller Meter) auseinander liegen, können durchaus unterschiedlich verschlüsselt werden, wie das Beispiel in Tabelle 6-8 zeigt.

Tab. 6-8: Beispiele für die Codierung der mittleren Höhe des 500 hPa-Niveaus.

effektiver Wert in [gpm]	Code (verschlüsselter Wert)
5529	52
5530	53
5521	52

Das Beispiel zeigt auch, dass der umgekehrte Fall möglich ist, indem Werte, die 9 gpm auseinander liegen, gleich verschlüsselt werden können.

Ein ähnliches Problem stellt sich beim Vergleich der Einteilung der Quartile, die nicht als Parameter in der AWS codiert vorliegen. Die Quartilzuteilung müsste daher bei der manuellen Klassifikation mit Hilfe des Programms der SMA vorgenommen werden, welches auch für die Quartilzuteilung in der automatischen Klassifikation verwendet wurde. Um die in Parameter 17 codierten Werte den Quartilen zuordnen zu können, müssten vorgängig die Quartilgrenzwerte, welche für jeden Tag in geopotentiellen Metern berechnet werden, codiert werden. Dies wiederum bedeutet, dass sehr viel Information verloren ginge. Die in dieser Art codierten Quartilgrenzwerte bleiben zum Teil über einen Monat hinweg stabil, obschon sie von Tag zu Tag um 1 bis 2 gpm variieren können.

Trotz all dieser Vorbehalte wurde ein Vergleich der automatisch und manuell berechneten Höhe der 500 hPa-Fläche vorgenommen.

Gemäss SMA (1985) erfolgt die Codierung der mittleren Höhe der 500 hPa-Fläche in Dekametern abzüglich 500. Es können somit Codierungswerte von 00 (entspricht 500 Dekameter, beziehungsweise 5000 - 5009 Meter) bis 99 (599 Dekameter = 5990 - 5999 Meter) auftreten.

Da es nicht möglich ist einen Vergleich mit 100 möglichen Werten anzustellen, wurden diese in 10er Klassen zusammengefasst. Der Vergleich der beiden Methoden wird dadurch noch ungenauer, weil die einzelnen Klassen somit 10 gpdam (geopotentielle Dekameter) umfassen. Wie Tabelle 6-9 zeigt, lassen sich daraus aber trotzdem Schlüsse ziehen.

Die manuell codierten Werte liegen insgesamt leicht unter den automatisch codierten. Dies wird im Folgenden an einem Beispiel veranschaulicht.

Die 3. Zeile von Tabelle 6-9 enthält alle manuell codierten Werte der Klasse 3 (5300 m bis 5399 m). Dazu kann in Spalte 3 (Klasse 3 der automatischen Klassifikation) der Wert 690 abgelesen werden. Das heisst, dass in 690 Fällen sowohl von der manuellen als auch von der automatischen Klassifikation mittlere Höhen des 500 hPa-Niveaus von 5300 m bis 5399 m berechnet wurden. Im Feld rechts daneben (Spalte 4 = Klasse 4 der automatischen Klassierung) steht die Zahl 128, was bedeutet, dass in 128 Fällen, in denen manuell die Klasse 3 zugeordnet wurde, mit der automatischen Methode die Klasse 4 zugeordnet wurde.

Tab. 6-9: Kreuzfeldtabelle der manuell und automatisch zugeordneten Parameterwerte der mittleren Höhe der 500 hPa-Fläche (Angaben in der ersten Spalte in [gpdam]) mit absoluter Häufigkeit im Zeitraum 1946 bis 1989 (fett markierte Zahlen: gleiche Zuordnung manuell und automatisch).

mittlere Höhe der 500 hPa-Fläche (hh)

		automatisch								
manuell		1	2	3	4	5	6	7	8	9
510 - 519	1	11	5	0	0	0	0	0	0	0
520 - 529	2	6	167	41	0	0	0	0	0	0
530 - 539	3	0	19	690	128	1	0	0	0	0
540 - 549	4	0	0	64	1554	224	4	0	0	0
550 - 559	5	0	0	0	114	2276	286	1	0	0
560 - 569	6	0	1	0	1	133	2935	337	2	0
570 - 579	7	0	0	0	4	0	102	3211	300	0
580 - 589	8	0	0	0	0	0	0	113	1420	57
590 - 599	9	0	0	0	0	0	0	0	12	60

Auch hier muss wie bei anderen Parametern auf die unterschiedliche Berechnungsweise hingewiesen werden. Bei der manuellen Methode wird die mittlere Höhe der 500 hPa-Fläche aus den drei Radiosondenwerten Payerne, München und Milano-Linate (doppelt gewichtet) berechnet. Die automatische Klassifikation berechnet die mittlere Höhe des 500 hPa-Niveaus aus den Geopotentialwerten der vier Gitterpunkte (45° N / 7° E, 45° N / 11° E, 48° N / 7° E, 48° N / 11° E). Es ist daher nicht erstaunlich, dass die beiden Methoden nicht zu denselben Resultaten führen. Jedoch gibt es auch keinen zwingenden Grund, weshalb eine systematische Abweichung (die automatische Klassierung führt zu höheren Werten als die manuelle) vorliegen sollte.

Auf Grund der ausgeführten Auswertungen wird nicht ersichtlich, wie und ob es möglich wäre, die automatische Klassierung in diesem Parameter näher an die manuelle Klassierung heranzubringen.

5. Vergleich der Parameterwerte der Winddrehung mit der Höhe (b, AWS-Parameter 14)

Die Beziehung zwischen Boden- und Höhenströmung b wird in der Wetterlagenklassifikation nur zur Unterteilung der advektiven Lagen (und nur bei nicht-Jetlagen) benötigt.

Wie im 6. Schritt beschrieben wurde, stellt der Parameter b im wesentlichen eine Kombination der beiden Parameter D (Bodenwindrichtung) und d (Höhenwindrichtung) dar. Welche Kombinationen der Parameterwerte D und d zu welcher Codierung beim Parameter b führen, ist aus der Beschreibung des Parameters 14 in SMA (1985) zu entnehmen.

Da bei der automatischen Klassierung bei diesem Parameter nur die Unterscheidung in Gleichstrom- oder Gegenstromlage (mit $D > 0$, $d > 0$ und $f < 5$) interessiert, wurde bei anderen Parameterwerten der Parameter b gar nicht zugewiesen. Bei der Auswertung dieses Parameters stellte sich noch ein weiteres Problem. Aus der Alpenwetterstatistik (SMA, 1985) geht nicht klar hervor, ob der Parameter b auf Grund der beiden Parameter 9 und 10 (Boden- und Höhenwindrichtungsklasse) oder auf Grund der effektiven Drehung der Windrichtung mit der Höhe (effektive Abweichung der Boden- und Höhenwindrichtung in Grad) zugeordnet wurde. Im Programm erfolgt die Zuordnung mit Hilfe des Winkels zwischen Boden- und Höhenwindrichtung und nicht mit den beiden Parametern D und d. Aus diesen Gründen wird auf eine Gegenüberstellung dieses Parameters in beiden Methoden verzichtet, zumal der Parameter b nur die Kombination der bereits besprochenen Parameter darstellt. Es ist daher auch nicht zu erwarten, dass eine Auswertung dieses Parameters neue Erkenntnisse bringen würde.

Fazit

Mit durchschnittlich nur 47% gleichen Klassierungen und einer Spannbreite von 0-100% kann diese Methode der automatischen Klassifikation von SCHÜEPP-Wetterlagen aus 4 Gitterpunkten in dieser Form für die Extrapolation beziehungsweise Fortführung der manuellen Klassifikation in die Zukunft nicht verwendet werden.

Am Beispiel des Vergleichs der 'automatischen' Zuordnung der manuell als Wetterlage -Nx klassierten Tage im Zeitraum 1946 -1989 wird die Problematik noch einmal verdeutlicht.

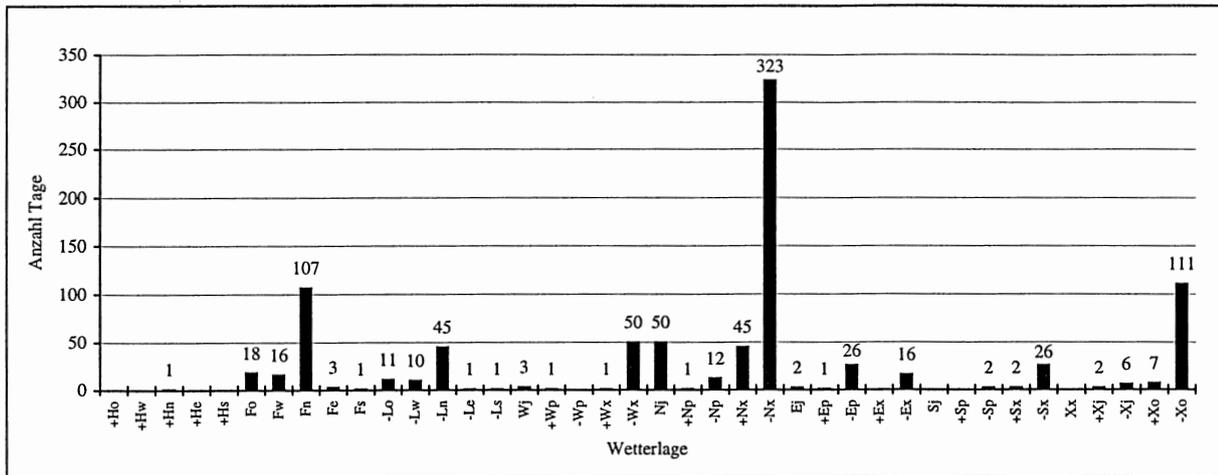


Abb. 6.13: Absolute Häufigkeit der automatisch zugeordneten Wetterlagen zu den manuell klassierten Tagen mit Wetterlage -Nx im Zeitraum 1946 bis 1989.

Aus Abbildung 6.13 ist ersichtlich, dass

- 323 der insgesamt 901 Fälle der Wetterlage -Nx auch 'automatisch' derselben Wetterlage zugeordnet wurden.
- 111 Fälle 'automatisch' der Wetterlage -Xo zugeordnet wurden.
Der Unterschied in der Zuordnung zu -Nx oder -Xo liegt in der Zuordnung des Parameters ff (Höhenwindgeschwindigkeit). Bei der Wetterlage -Xo ist $ff \leq 15$ Knoten, bei der Wetterlage -Nx liegt ff zwischen 15 und 50 Knoten (vgl. Abb. 6.2).
- weitere 107 Fälle der manuell als -Nx klassierten Tage automatisch den Flachdrucklagen mit nördlicher Höhenströmung (Fn) zugeordnet wurden.
Ausschlaggebend für diesen Unterschied der Zuordnung ist die Bodenwindgeschwindigkeit ($FF < 8.6 \text{ ms}^{-1}$ bei Fn, $FF \geq 8.6 \text{ ms}^{-1}$ bei -Nx).
- der eben genannte Unterschied in der Parameterzuordnung der Bodenwindgeschwindigkeit auch für die 45 'automatisch' zugeordneten Tiefdrucklagen mit nördlicher Höhenströmung (-Ln) gilt.
Der Unterschied zwischen der Zuteilung zu Fn und -Ln liegt in der Quartilzuteilung (durchschnittlich beziehungsweise unterdurchschnittlich). Bei den advektiven Lagen wie -Nx wird nur zwischen über- und unternormal unterschieden.
- 50 Fälle auf die Wetterlage Nj entfallen.
Bei diesen Fällen ist erneut die Höhenwindstärke für die anders ausfallende 'automatische' Zuteilung verantwortlich. Bei -Nx liegt die Höhenwindstärke zwischen 15 und 50 Knoten, bei Nj übertrifft sie die 50 Knoten Marke.

- in genau gleich vielen Fällen die Höhenwindrichtung 'automatisch' der Klasse 6 (Westwinde, Wetterlage -Wx) zugeteilt wurde, während die Höhenwindrichtung der manuellen Klassifikation eine Zuteilung zu der Klasse 7, 8 oder 9 ergab.
- bei den 45 +Nx-Fällen der 'automatischen' Klassierung die mittlere Höhe der 500 hPa-Fläche den Ausschlag zur unterschiedlichen Zuteilung der beiden Klassierungsmethoden gab. Bei der automatischen Methode wurde die mittlere Höhe der 500 hPa-Fläche als überdurchschnittlich eingestuft (folglich wurde +Nx klassiert), während sie bei der manuellen Klassifikation unter den Zentralwert fiel und somit als unterdurchschnittlich eingestuft wurde (Zuteilung zu -Nx).
- die verbleibenden Fälle in mehreren Parametern abweichende Klassierungen aufweisen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die grössten Unterschiede in der Zuordnung der *Windgeschwindigkeit* sowohl im *Bodenniveau* (für die Unterscheidung $D = 0$, $D > 0$) als auch im *500 hPa-Niveau* ($ff < 15$ kn, $15 < ff < 50$ kn, $ff > 50$ kn) vorkommen.

Das Kriterium für die Zuteilung zu konvektiven oder advektiven Lagen bei der manuellen Klassierung mit Hilfe des Parameters FF (Bodenwindgeschwindigkeit) anstelle der absoluten Druckdifferenz im Klassifikationsgebiet, müsste daher noch einmal überdacht werden. Ebenfalls müsste eine eventuelle Anpassung der 15 Knoten Grenze im 500 hPa-Niveau für die Einteilung in Schwachwind- und Strömungslagen ins Auge gefasst werden.

Die mässige Übereinstimmung der manuellen und der automatischen Klassierungen und die festgestellten, zum Teil systematischen Abweichungen in der Klassifikation der einzelnen Parameter lassen eine Extrapolation der manuellen Klassifikation mit der automatischen Klassifikation nicht zu. Das bedeutet aber nicht, dass die Zeitreihe der SCHÜEPP-Wetterlagen aus GCM-Daten nicht hergeleitet werden könnte. Die automatische Klassierung der SCHÜEPP-Wetterlagen auf Grund der GCM-Gitternetzdaten ist ohne Probleme möglich. Aber auch die manuelle Klassierung auf Grund von Isobaren- und Isohypsenkarten der GCM-Daten ist machbar.

Es ist lediglich nicht möglich, die beiden Methoden (manuell und automatisch) in einer einzigen Zeitreihe zusammen zu verwenden.

Es müssten daher alle GCM-Daten entweder manuell klassiert werden, was einen sehr grossen Arbeitsaufwand bedeuten würde, oder die Zeitreihe der automatischen Klassierung müsste auch für die Vergangenheit ausgewertet werden.

Die zweite Variante erscheint aus verschiedenen Gründen vorteilhafter:

- Die automatische Klassierung arbeitet direkt mit Gitternetzdaten. Es ist daher keine Vorverarbeitung der GCM-Daten, die als Gitternetzdaten vorliegen, nötig.
- Die automatische Methode garantiert eine weitgehend 'objektive' Zuordnung zu den einzelnen Wetterlagen.

Vor der routinemässigen Anwendung der automatischen Methode sowohl retrospektiv wie prospektiv sollte jedoch versucht werden, diese noch enger an die Klassierungen der manuellen Methode heranzuführen, was, wie die vorangehenden Ausführungen gezeigt haben, für mehrere Parameter noch möglich sein dürfte.

6.3 Automatische Klassifikation von HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen

Die Europäischen Grosswetterlagen werden durch einen Prognostiker klassiert. Dazu braucht es sehr viel fachliches Wissen und Erfahrung. Die Zuordnung der Grosswetterlagen erfolgt auf Grund der Lage der steuernden Zentren und der Erstreckung der Frontalzonen. Beschreibungen zur Lage der steuernden Zentren und der Erstreckung der Frontalzonen für jede Grosswetterlage finden sich in GERSTENGARBE et al. (1993). Als Beispiel wird hier die Beschreibung der Lage 'Hochdruckbrücke Mitteleuropa' (BM) wiedergegeben: "Zwischen einem nördlich bis nordöstlich der Azoren liegenden Subtropenhoch und einem osteuropäischen Hoch besteht über Mitteleuropa hinweg eine brückenförmige Verbindung. In *manchen* Fällen erstreckt sich eine lange west-ost ausgerichtete Hochdruckzone im selben Raum. Nordwärts der Hochdruckbrücke verläuft eine von West nach Ost gerichtete Frontalzone, in der Einzelstörungen ostwärts wandern und mit ihren Kaltfronten *zeitweise* die Brücke durchbrechen. Über dem Mittelmeer herrscht bis in die Höhe tiefer Luftdruck. *In selteneren Fällen* liegt die Achse der Brücke nördlich von 50° N, so dass über ganz Mitteleuropa eine nordöstliche bis östliche Strömung zu beobachten ist." (GERSTENGARBE et. al., 1993). Aus dieser Beschreibung, vorallem den kursiv markierten Worten geht hervor, dass sich die einzelne Lage in unterschiedlichen Ausprägungen zeigen kann. Es ist daher nicht möglich, für jede Lage klare Kriterien für die Zuordnung zu definieren, was wiederum eine direkte Programmierung, basierend auf einzelnen Parametern wie bei den SCHÜEPP-Wetterlagen, verhindert. Wie aus den Ausführungen hervorgeht, ist der Objektivierungsgrad bei den HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen im Gegensatz zu den SCHÜEPP-Wetterlagen gering. Für die automatische Klassierung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen wurde daher ein Ansatz gewählt, der sich die bereits klassierten Tage zu nutze macht. Der zuzuordnende Tag (Basis) wird mit allen anderen Tagen verglichen werden, wobei der "am besten" passende Tag die Grosswetterlage bestimmt. Diese Methode der Zuordnung wird in der Wetterprognose Analogfallsuche genannt.

6.3.1 Die Analogfall-Methode

Die Analogfall-Methode geht auf die Zeit während und nach dem zweiten Weltkrieg zurück (BARRY and PERRY, 1973). Sie wurde damals entwickelt, um das Wetter für bestimmte militärische Aktionen einschätzen zu können.

Die Analogfall-Methode wird auch dazu verwendet, eine Menge ungeordneter Objekte (in unserem Fall Wetterkarten) aufgrund von Ähnlichkeiten in kleinere, homogenere und praktisch nützliche Klassen oder Gruppen zusammenzufassen (BOCK, 1974). Dieses Verfahren wurde von verschiedenen Autoren (LUND, 1963; KIRCHHOFER, 1974; YARNAL, 1993) für die korrelationsbasierte Klassifikation von Wetterlagen (engl. correlation-based map-pattern classification) verwendet. Es handelt sich dabei um eine automatische Gruppierung von Wetterkarten. In den 70er Jahren wurde die Analogfallsuche auch bei der Wetterprognose v.a. im Holländischen Wetterdienst wieder angewendet (LEMCKE en KRUIZINGA, 1984).

Um einer bestimmten Basis (Wetterkarte) die Grosswetterlage zuzuweisen, ist es daher naheliegend, die Analogfall-Methode zu verwenden.

Die Idee, die hinter der Analogfall-Methode steht, ist einfach:

- 1) Es wird eine Wetterkarte (Isobaren- oder Isohypsenkarte) ausgewählt. Dies können je nach Zielsetzung eine Prognosekarte, eine auf Gitternetzdaten basierende Darstellung eines GCMs oder eine Karte eines bestimmten Tages sein. Diese Karte wird im Folgenden als **Basis** bezeichnet.
- 2) Die Basiskarte wird mit allen zur Verfügung stehenden Karten verglichen.
- 3) Die ähnlichste Karte (grösste Übereinstimmung mit der Basis auf Grund des Ähnlichkeitsmasses) wird als Analogfall bezeichnet und dient je nach Fragestellung als Leitlinie für die Prognose oder bestimmt bei der 'correlation-based map-pattern classification' die Klassenzugehörigkeit. In der vorliegenden Arbeit bestimmt die Grosswetterlage des Analogfalls die europäische Grosswetterlage der Basis.

Abbildung 6.14 zeigt die Analogfall-Methode, wie sie in dieser Arbeit angewendet wird.

Die mit Hilfe der Analogfall-Methode entwickelte automatische Klassierung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen soll später auf Gitternetzdaten eines GCMs angewendet werden. Es wird daher davon ausgegangen, dass es sich bei der Basis um Gitternetzdaten eines GCMs handle. Zur Basis (in Abb. 6.14 ist die Basis der 14.10. im Jahr 03 eines GCM-Durchlaufes mit doppelter CO₂-Konzentration) wird im NMC-Gitternetzdatensatz mit Hilfe eines Ähnlichkeitsmasses nach Analogfällen gesucht. Vom ähnlichsten Tag, der gefunden wird, wird mit Hilfe des Datums die Grosswetterlage aus der Zeitreihe der europäischen Grosswetterlagen herausgelesen. Die so gefundene Grosswetterlage kann der Basis zugeordnet werden. Damit ist die Analogfallsuche für diese Basis abgeschlossen, und es kann eine neue Basis gewählt werden.

6.3.1.1 Vorgängig zu bestimmende Grössen bei der Analogfall-Methode

Die Analogfall-Methode ist keine starr definierte Methode. Es ist daher nötig, vor der Durchführung einige Definitionen und Initialisierungen vorzunehmen. Im Folgenden sind 5 Punkte aufgeführt, für welche Definitionen vorgenommen werden müssen.

- 1) Als erstes muss die **Gebietsgrösse** festgelegt werden. Je kleiner das Gebiet ist, um so einfacher wird es sein, einen 'perfekten' Analogfall zu finden. Im Extremfall, wenn nur ein einziger Punkt berücksichtigt wird, können viele perfekte Analogfälle gefunden werden. Im Hinblick darauf, dass durch den Analogfall die Grosswetterlage zugeordnet werden soll, muss jedoch eine mittlere Gebietsgrösse gefunden werden, die möglichst gute Analogfälle liefert, aber auch den Zusammenhang mit der Grosswetterlage herstellt, was bei der Berücksichtigung nur eines einzigen Punktes sicher nicht möglich ist.
- 2) Auch der **Gitterpunktabstand** (engl. 'spacing') muss im voraus bestimmt werden. Das heisst, es muss festgelegt werden, ob die Gitterpunkte in einem 10°-, 5°- oder 1°-Abstand oder in einem anderen definierten Abstand verwendet werden sollen. Zudem muss festgelegt werden, ob der Abstand in Nord-Süd-Richtung gleich gross sein soll wie in West-Ost-Richtung. Durch die Gebietsgrösse und den Gitterpunktabstand ist die Anzahl Gitterpunkte bestimmt. Durch die Wahl des Gitterpunktabstands soll ein optimales Verhältnis zwischen der Anzahl Punkte und der Gebietsgrösse geschaffen werden.
- 3) Für die einzelnen Punkte kann eine **Gewichtung** vorgenommen werden. Dies erlaubt den Einbezug eines grösseren Gebietes mit besonderer Berücksichtigung eines kleineren Gebietes durch eine entsprechende Gewichtung dieser Punkte. Dies hat den Vorteil, dass nebst dem Hauptgebiet auch die umliegenden Gebiete mitberücksichtigt werden können, jedoch mit kleineren Gewichten, so dass grosse Abweichungen in den Randgebieten weniger Einfluss auf das Gesamtergebnis haben als solche im Hauptgebiet.

- 4) Durch die Wahl eines geeigneten *Ähnlichkeitsmasses* soll eine möglichst gute Übereinstimmung der Basis und des Analogfalls erreicht werden. Es gibt viele verschiedene Ähnlichkeits- oder Distanzmasse (BOCK, 1974). Meistens wird jedoch bei Vergleichen von Wetterkarten die quadratische Abweichung beziehungsweise der Korrelationskoeffizient verwendet.
- 5) Als *potentielle Analogfälle* (= Tage (Karten), die überhaupt als Analogfälle in Frage kommen) zu einer bestimmten Basis müssen nicht alle Tage im Jahr zugelassen werden. Es können Einschränkungen gemacht werden. In der Regel werden alle Tage als Analogfälle zugelassen, die zur Basis nicht mehr als 20 Tage entfernt liegen (LEMCKE en KRUIZINGE, 1984). Hat die Basis das Datum 14. November, so sind alle Tage vom 25. Oktober bis 4. Dezember als Analogfälle zugelassen. Beim Datensatz für die Analogfälle muss es sich auch nicht unbedingt um einzelne Tage handeln. Es können auch gemittelte Karten (etwa die Monatsmittelkarten der Grosswetterlagen im Anhang) als potentielle Analogfälle dienen.

6.3.1.2 Resultate der Analogfall-Methode

Gemäss dem vorangehenden Kapitel können bei der Analogfallsuche die 5 Grössen Gebietsgrösse, Gitterpunktabstand, Gewichtung, Ähnlichkeitsmass und potentielle Analogfälle variiert werden. Im Folgenden wird für jede dieser Grössen beschrieben, welche Möglichkeiten im Rahmen dieser Arbeit durchgetestet wurden. Die Resultate der Tests werden danach zusammenfassend dargestellt.

Verwendete Variationen der 5 vorgängig zu bestimmenden Grössen

1) *unterschiedliche Gebietsgrössen*

Die Analogfall-Methode wurde mit 3 verschiedenen Gebietsgrössen (Abb. 6.15) durchgeführt:

- A) 29.719° N - 70.092° N 40.5° W - 40.5° E
- B) 29.719° N - 70.092° N 20.25° W - 30.375° E
- C) 35.3265° N - 70.092° N 10.125° W - 30.375° E

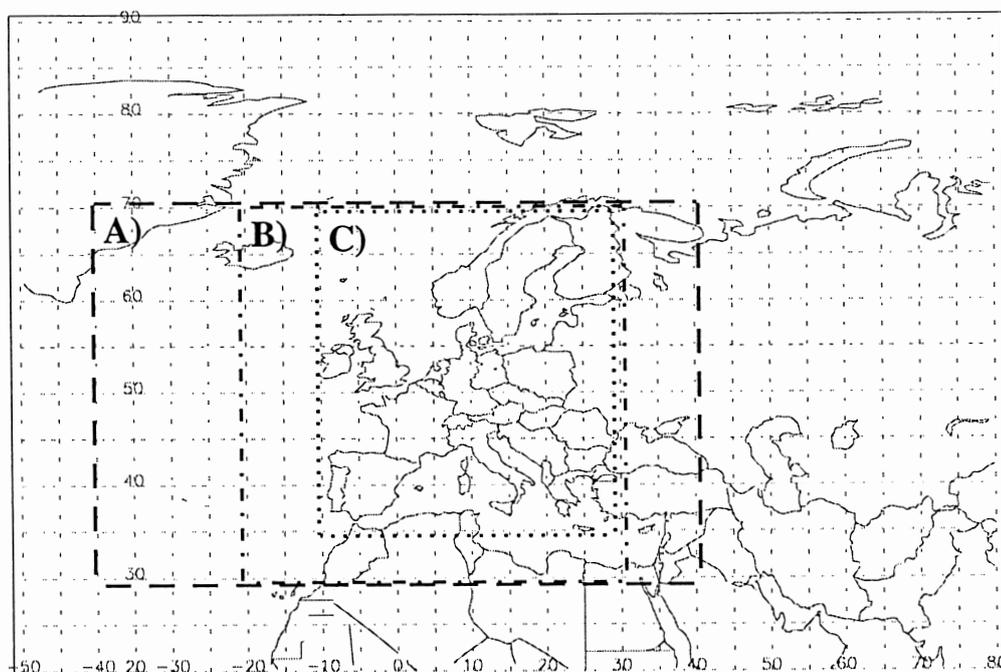


Abb. 6.15: Die zur Analogfallsuche verwendeten drei verschiedenen Gebietsgrössen.

Bei der Gebietsgrösse A) handelt es sich praktisch um das Definitionsgebiet der Grosswetterlagen mit etwas geringerer Nord-Süd-Ausdehnung und leicht verschobener West-Ost-Ausdehnung. Die Gebietsgrösse B) weist dieselbe Nord-Süd-Erstreckung auf, berücksichtigt aber in der West-Ost-Ausdehnung ein deutlich schmaleres Gebiet, als das Gebiet A). Die Gebietsgrösse C) umfasst im wesentlichen Europa ohne Osteuropa und deckt somit das kleinste Gebiet der drei Gebietsgrössen ab.

2) Gitterpunktabstand und Anzahl Gitterpunkte

Die Versuche wurden mit Gitterpunktabständen von $\sim 5^\circ$ und $\sim 10^\circ$ durchgeführt. Da die Analogfallsuche später auf die GCM-Daten des ECHAM3 (T-106 Auflösung) angewendet werden soll, wurde das Gitter für die Versuche dem GCM-Gitter angeglichen. Das Gitter des ECHAM3 T-106 weist eine West-Ost-Auflösung von 1.125° auf (MPI, 1992). Die Nord-Süd-Auflösung entspricht einer Gauss-Funktion und weist daher nicht überall gleiche Abstände auf. Da mit den NMC-Daten jedoch nur mit konstanten Abständen zwischen den einzelnen Gitterpunkten gearbeitet werden kann, wurde in Nord-Süd-Richtung ein Abstand von 1.1215° zwischen den Gitterpunkten gewählt. Mit dieser Wahl der Maschenweite liegt der "Fehler" erst in der 3. Nachkommastelle.

Im ECHAM3 T-106 Gitternetz von 40.5° W bis 40.5° E und 29.719° N bis 70.092° N ergeben sich somit $73 \times 37 = 2701$ Gitterpunkte. Die Analogfallsuche auf dieser Basis durchzuführen, wäre auf Grund zu langer Berechnungszeiten zu wenig präzise, denn es ist praktisch unmöglich, einen Analogfall zu finden, der in 2701 Gitterpunkten auch nur annähernd übereinstimmt (VAN DEN DOOL, 1989). Es wurden daher nicht alle Punkte des Gitternetzes berücksichtigt, sondern nur jeder 4. oder 5. beim 5° Gitter und jeder 9. im 10° Gitter.

Aus der Definition der Gebietsgrösse und des Gitterpunktabstandes ergibt sich die in Tabelle 6-10 angegebene Anzahl von Gitterpunkten.

Tab. 6-10: Anzahl Gitterpunkte, die sich für jede Gebietsgrösse und jedes 'spacing' ergeben.

Gebietsgrösse \ Gitterpunktabstand	A)	B)	C)
	40.5° W - 40.5° E 29.719° N - 70.092° N	20.25° W - 30.375° E 29.719° N - 70.092° N	10.125° W - 30.375° E 35.3265° N - 70.092° N
$\sim 5^\circ$	17 x 9 = 153	11 x 9 = 99	9 x 8 = 72
$\sim 10^\circ$	9 x 5 = 45	6 x 5 = 30	5 x 4 = 20

Das verwendete Gitter, respektive die Bezeichnung der einzelnen Gitterpunkte sowie Angaben über geographische Länge und Breite sind in Abbildung 6.16 für die Gebietsgrösse A) mit einem Gitterpunktabstand von $\sim 5^\circ$ dargestellt.

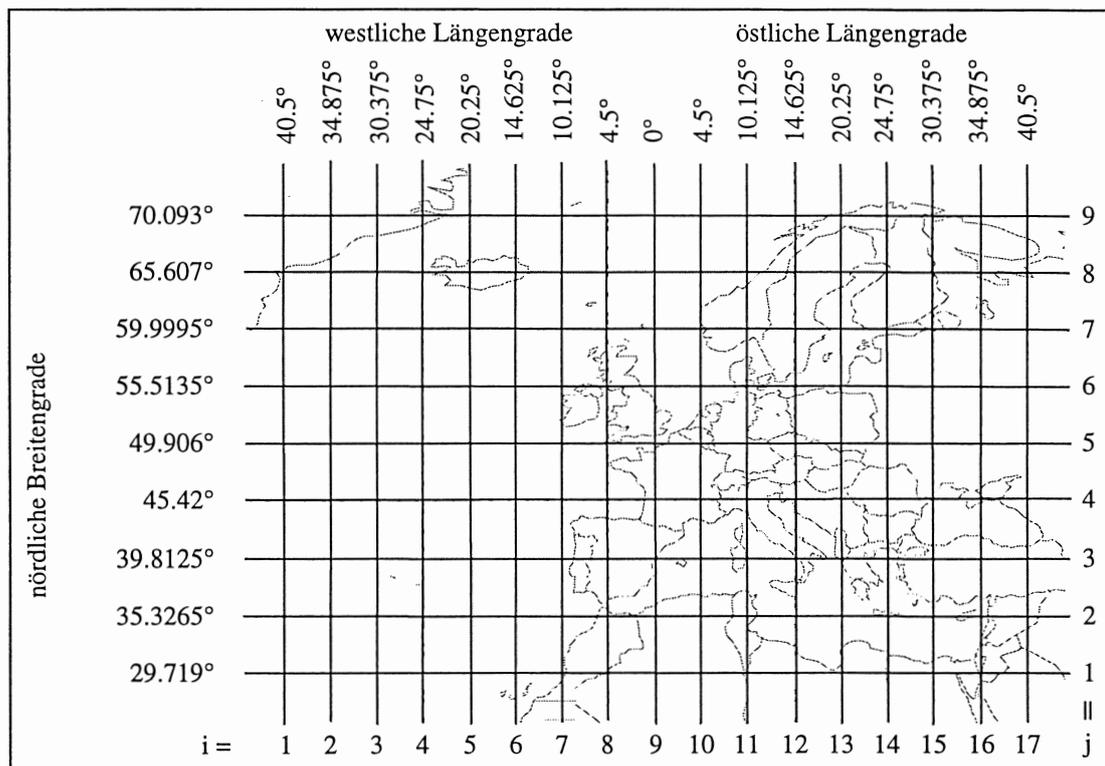


Abb. 6.16: Für die Analogfallsuche verwendetes Gitternetz (Gebietsgröße A, Gitterpunktabstand $\sim 5^\circ$) mit Angabe von geographischer Länge und Breite.

3) Gewichtung von Gitterpunkten

Bei der Analogfallsuche für die Zuordnung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen eine Gewichtung vorzunehmen, ist relativ schwierig. Für jede Grosswetterlage oder zumindest für jeden Grosswettertyp ist eine andere Region wichtig und müsste deshalb speziell gewichtet werden. Die Analogfall-Methode soll aber für alle Grosswetterlagen angewendet werden können, weshalb eine Gewichtung meist nicht sinnvoll ist. Aus dieser Überlegung wurde nur ein einziger Versuch mit Gewichtung vorgenommen. Dabei wurde das Deutsche Gebiet (Gitterpunkte (10,4); (11,4); (12,4); (10,5); (11,5); (12,5); (10,6); (11,6); (12,6) vgl. Abb. 6.16) 3-fach gewichtet. Dies geschah mit der Überlegung, dass erstens die Grosswetterlagen in Deutschland entwickelt wurden, zweitens durch den DWD zugeordnet werden und drittens die allgemeine Strömung über Deutschland über die zyklonale oder antizyklonale Ausprägung einer Grosswetterlage entscheidet.

4) Verschiedene Ähnlichkeitsmasse

Das Ähnlichkeitsmass soll helfen, den besten Analogfall zur Basis zu finden. Das heisst, es soll das am besten passende Muster gefunden werden. Daher ist es sinnlos, Distanzmasse wie etwa die Summe der Differenzen zwischen den beiden Mustern zu verwenden. Das könnte etwa zur Folge haben, dass der gefundene Analogfall genau spiegelbildlich zur Basis ist (Hochdruckgebiete der Basis wären Tiefdruckgebiete beim Analogfall). Dies würde bestimmt nicht dieselbe Grosswetterlage ergeben..

Es müssen daher Distanzmasse verwendet werden, die die Abweichungen und nicht deren Richtung berücksichtigen. Folgende Distanzmasse wurden verwendet.

1. absoluter Abstand:

$$D = \sum_{i=1}^N |x_{Ai} - x_{Bi}|$$

2. mittlere quadratische Abweichung:

$$Q = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_{Ai} - x_{Bi})^2$$

3. Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient:

$$r_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{Ai} - \bar{x}_A) \cdot (x_{Bi} - \bar{x}_B)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{Ai} - \bar{x}_A)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (x_{Bi} - \bar{x}_B)^2}}$$

4. KIRCHHOFER-Score:

$$S = \sum_{i=1}^N (z_{Ai} - z_{Bi})^2$$

In den Formeln bedeuten:

N:= Anzahl Gitterpunkte

x_{Ai} := i^{ter} Gitterpunkt des potentiellen Analogfalls

z_{Ai} := standardisierter i^{ter} Gitterpunkt des potentiellen Analogfalls

\bar{x}_A := Mittelwert der N Gitterpunkte des potentiellen Analogfalls

x_{Bi} := i^{ter} Gitterpunkt der Basis

z_{Bi} := standardisierter i^{ter} Gitterpunkt der Basis

\bar{x}_B := Mittelwert der N Gitterpunkte der Basis

Beim KIRCHHOFER-Score handelt es sich um die Summe der quadratischen Abweichungen der standardisierten Gitterpunkte, welche linear mit dem Korrelationskoeffizienten über die Beziehung $S \cdot n^{-1} = 2 \cdot (1 - r_{AB})$ verbunden ist (WILLMOTT, 1987). In den Untersuchungen werden insgesamt 3 Ähnlichkeitsmasse (1, 2 und 3 oder 4) verwendet.

5) Daten für potentielle Analogfälle

Für die Analogfallsuche wurden 3 unterschiedliche Datensätze verwendet:

- i) Gitternetzdaten mit allen im Datensatz des NMC enthaltenen Tagen von 1946 bis 1989
- ii) Gitternetzdaten der mittleren monatlichen Grosswetterlagen (vgl. Karten im Anhang)
- iii) Gitternetzdaten der Musterbeispiele der Grosswetterlagen aus GERSTENGARBE et al. (1993).

Bei der Verwendung des Datensatzes i) wurden die potentiellen Analogfälle beschränkt. Wie bereits in Punkt 5 des Kapitels 6.3.1.1 beschrieben, wurde für einen potentiellen Analogfall höchstens eine Abweichung von 20 Tagen zum Tag der Basis toleriert. Zudem durfte der Analogfall nicht aus demselben Jahr stammen wie die Basis. Im Idealfall standen somit für eine bestimmte Basis 1763 potentielle Analogfälle (43 Jahre x 41 Tage) zur Verfügung.

Gäbe es von allen Grosswetterlagen in jedem Monat eine Mittelkarte, so stünden bei Verwendung des Datensatzes ii) pro Basis 348 potentielle Analogfälle (29 Grosswetterlagen x 12 Monate) zur Verfügung. Da aber während der Jahre 1946 bis 1989 nicht alle Grosswetterlagen in allen Monaten aufgetreten sind, fehlen 15 mittlere monatliche Grosswetterlagen (vgl. Anhang). In manchen Fällen wurde die Analogfallsuche mit dem Datensatz ii) noch weiter eingeschränkt, indem nur die mittleren monatlichen Grosswetterlagen des Monats der Basis als potentielle Analogfälle zugelassen wurden.

Beim letzten Datensatz iii) schliesslich handelt es sich um die Gitterwerte der in GERSTENGARBE et al. (1993) abgedruckten Musterbeispiele. Die drei Musterbeispiele der Grosswetterlagen WZ, HNFA und SA (vgl. Abkürzungsverzeichnis) liegen ausserhalb des Zeitintervalls, das vom NMC-Datensatz abgedeckt wird und mussten daher durch andere typische Muster im Zeitintervall 1946 bis 1989 ersetzt werden. Anstelle der ursprünglichen Musterbeispiele wurden

für **WZ** der 28. Januar 1983 00 UTC,

für **HNFA** der 21. Mai 1989 00 UTC und

für **SA** der 20. September 1980 00 UTC

verwendet. Insgesamt standen so bei Verwendung des Datensatzes iii) für jede Basis 29 potentielle Analogfälle zur Verfügung.

Resultate der 17 durchgeführten Analogfallsuchen

Bei einer erneuten *manuellen* Klassierung von bestehenden Wetterlagenklassifikationen kann nach BARRY and PERRY (1973) etwa in 70% der Fälle mit einer Übereinstimmung der beiden Klassierungen gerechnet werden. Die automatische Klassierung (Analogfall-Methode) soll später auch auf GCM-Daten angewendet werden können, um die Zeitreihe der Grosswetterlagen in die Zukunft zu extrapolieren. Es ist daher angebracht, für die automatische Klassierung eine Übereinstimmung mit der manuellen Klassierung von ebenfalls mindestens 70% zu fordern.

Bei der Zuordnung von Grosswetterlagen mit Hilfe der Analogfall-Methode sind nicht in erster Linie die absoluten Druckwerte oder geopotentiellen Höhen entscheidend, sondern das allgemeine Muster und die Druckgradientrichtung. Bei der Analogfall-Methode ist es daher nicht zwingend, mit absoluten Werten (Druckwerte in hPa oder Geopotentiale in gpm) zu arbeiten. Allgemein wird angenommen, dass eine Standardisierung die saisonalen Unterschiede der einzelnen Muster herausfiltert (KIRCHHOFER, 1974; EL-KADI and SMITHSON, 1992; YARNAL, 1993; MCGREGOR and RYE, 1994). Dies ist jedoch nur dann der Fall, wenn die saisonalen Schwankungen über das ganze Untersuchungsgebiet hinweg dieselben sind. Wenn verschiedene Teile des betrachteten Gebietes unterschiedliche saisonale Schwankungen aufweisen, so kann eine Standardisierung zwar eine Reduktion der Schwankungen bewirken, diese aber nicht vollständig aus den Daten entfernen (KEY and CRANE, 1986).

Bei den drei Gebietsgrössen A), B) und C), die bei den Versuchen zur Anwendung kamen, muss angenommen werden, dass nicht im gesamten Gebiet die gleichen saisonalen Schwankungen auftreten. Die Beschränkung der potentiellen Analogfälle auf höchstens ± 20 Tage Unterschied zur Basis, wurde daher auch bei der Auswertung von standardisierten Daten beibehalten.

Die Auswertungen für die beiden Ähnlichkeitsmasse 'absolute' und 'mittlere quadratische Abweichung' wurden mit absoluten Werten durchgeführt. Die Auswertungen haben jedoch gezeigt, dass die Verwendung von standardisierten Werten bei absoluten Abweichungen kaum andere Resultate ergeben als absolute Werte. Bei den mittleren quadratischen Abweichungen ist es wenig sinnvoll, mit standardisierten Werten zu arbeiten, denn in diesem Fall würden die Resultate den Auswertungen mit dem KIRCHHOFER-Score entsprechen. Die beiden Grössen sind bei standardisierten Werten linear miteinander verbunden durch $S \cdot n^{-1} = Q$.

Bei der Verwendung des Korrelationskoeffizienten als Ähnlichkeitsmass spielt es keine Rolle, ob standardisierte oder absolute Werte verwendet werden. Das Ergebnis bleibt dasselbe. Entscheidend ist lediglich das allgemeine Muster (Verteilung von Hoch- und Tiefdruckgebieten) und die Richtung des Druckgradienten.

Der Korrelationskoeffizient und der KIRCHHOFER-Score liefern dieselben Resultate. Da jedoch der KIRCHHOFER-Score einfacher und schneller berechnet werden kann, wurde dieser vorgezogen, was bedingte, dass die entsprechenden Berechnungen mit standardisierten Werten durchgeführt wurden.

Die Analogfallsuche, das heisst die Berechnung des Ähnlichkeitsmasses zwischen der Basis und den potentiellen Analogfällen, erfolgte bei allen Versuchen ausser beim letzten (Nr. 17 in Tab. 6-11) zuerst auf dem 500 hPa-Niveau. Für die 10 ähnlichsten Fälle des 500 hPa-Niveaus erfolgte anschliessend eine Berechnung des Ähnlichkeitsmasses für die Daten im Bodenniveau, was aber durchwegs nur eine geringe Verbesserung der Ergebnisse von rund 1% erbrachte. Versuche der Berechnung in umgekehrter Reihenfolge (zuerst Bodenniveau, dann 500 hPa-Niveau) erbrachten nur geringfügig schlechtere Resultate. Für den Versuch 17 wurde nur das Bodenniveau berücksichtigt. Dieser Versuch bezieht jeweils 3 Tage in die Analogfallsuche mit ein. Da aber im Boden- und 500 hPa-Niveau die Daten von verschiedenen Tagen fehlen, hätte der Einbezug beider Niveaus nur zu einer unnötigen Datenreduktion geführt, zumal die Ergebnisse durch den Einbezug von beiden Niveaus kaum verbessert werden können.

Wie die Werte in Tabelle 6-11 (Versuch 1 bis 3 und 4 bis 6) zeigen, scheint das *Ähnlichkeitsmass* kaum einen Einfluss auf das Resultat der Analogfallsuche zu haben. Die Zahl der mit der Analogfall-Methode gleich wie manuell klassierten Grosswetterlagen schwankt beim 10°-Gitter (Versuch 1 bis 3) nur um 0.6%, beim 5°-Gitter gar nur um 0.3%. Diese geringen Abweichungen werden als rein zufällig betrachtet.

Aus dem Vergleich der Versuche 1 bis 3 mit den Versuchen 4 bis 6 geht ebenfalls hervor, dass der *Gitterpunktabstand* (5° oder 10°) das Resultat kaum beeinflusst. Beim 10°-Gitter werden durchschnittlich 25% der Grosswetterlagen (Mittelwert über die Versuche 1 bis 3) mit der Analogfall-Methode gleich klassiert wie manuell, beim 5°-Gitter sind es wenig mehr, das heisst im Durchschnitt 25.7% der Grosswetterlagen (Mittelwert über die Versuche 4 bis 6).

Da weder die Variationen des Gitterabstandes noch diejenigen des Ähnlichkeitsmasses deutliche Verbesserungen in der Klassierung mittels Analogfall-Methode brachten, wurden die anschliessenden Versuche nicht mehr für sämtliche möglichen Kombinationen durchgeführt. Da mit dem 5°-Gitter und dem Korrelationskoeffizienten in den ersten 6 Versuchen die besten Resultate erzielt wurden, wurden diese für die anschliessenden Versuche ausgewählt.

Tab. 6-11: Zusammenfassung der Resultate der 17 Versuche der mittels Analogfall-Methode klassierten HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen.

V	Gebietsgrösse			'spacing'		Gewichtung	Ähnlichkeitsmass			Datensatz			Gleich Klassierte in % bei		
	A)	B)	C)	~5°	~10°		1	2	3/4	i)	ii)	iii)	GWL	GWT	RiGr
1	✓				✓	—	✓			✓			24.8	47.5	41
2	✓				✓	—		✓		✓			24.9	47.3	40.5
3	✓				✓	—			✓	✓			25.4	48.2	41
4	✓			✓		—	✓			✓			25.8	48.3	41.8
5	✓			✓		—		✓		✓			25.6	48.3	41.7
6	✓			✓		—			✓	✓			25.7	47.6	41.4
7	✓			✓		—			✓		✓		38.1	60.4	53.8
8	✓			✓		—			✓		✓ ^{mt}		38.6	58.6	52.5
9	✓			✓		—			✓			✓	19.6	46	35.9
10		✓		✓		—			✓	✓			28.1	50.7	44.7
11		✓		✓		—			✓		✓		37.9	60.7	54.9
12		✓		✓		—			✓		✓ ^{mt}		39	60	54
13			✓	✓		—			✓	✓			27.1	49.9	43.8
14			✓	✓		—			✓		✓		35.9	58.8	52.7
15			✓	✓		—			✓		✓ ^{mt}		37	58.8	52.5
16			✓	✓		✓			✓		✓ ^{mt}		37.4	59.1	53.4
17	✓			✓		✓			✓	✓ ^{3tg}			25.6	49.4	41.9

V: Versuchsnummer; 'spacing': Gitterpunktabstand

Gebietsgrössen: A) 40.5° W - 40.5° E / 29.719° N - 70.092° N,
B) 20.25° W - 30.375° E / 29.719° N - 70.092° N,
C) 10.125° W - 30.375° E / 35.3265° N - 70.092° N;

Ähnlichkeitsmass: 1: absoluter Abstand,
2: mittlere quadratische Abweichung,
3/4: Korrelationskoeffizient oder KIRCHHOFER-Score;

Datensatz: i) Gitternetzdaten des NMC,
✓^{3tg}: Berücksichtigung von 3 aufeinanderfolgenden Tagen;
ii) Gitternetzdaten der mittleren monatlichen Grosswetterlagen,
✓^{mt}: nur der Basis entsprechende Monat wurde berücksichtigt
iii) Gitternetzdaten der Musterbeispiele;

gleich Klassierte in % bei: automatisch und manuell gleich Klassierte
GWL (Grosswetterlagen),
GWT (Grosswettertypen),
RiGr (alpin-synoptische Gruppierung für den Alpenraum nach RICKLI)
gerastert: Spaltenmaxima bei den jeweiligen Gebietsgrössen

Eine deutliche Verbesserung der Klassierung durch die Analogfall-Methode lässt sich erzielen, wenn an Stelle aller Tage nur die mittleren monatlichen HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen (vgl. Anhang) als *potentielle Analogfälle* zugelassen werden (Versuche 7, 11 und 14). Durch die Verwendung dieses Datensatzes kann der Anteil der manuell und automatisch gleich klassierten Grosswetterlagen um rund 10% angehoben werden.

Wie sich jedoch bei den Resultaten der Versuche 8, 12 und 15 zeigt, kann dieses Resultat durch die weitere Einschränkung der *potentiellen Analogfälle* auf einen Monat (nur die mittleren monatlichen Grosswetterlagen des Monats der Basis sind als potentielle Analogfälle zugelassen) kaum mehr angehoben werden.

Durch den Vergleich der Versuche 7, 11 und 14 mit den Versuchen 8, 12 und 15 zeigt sich, dass die Wahl der *Gebietsgrösse* nur geringe Unterschiede in den Resultaten bewirkt. Dass es sich dabei um eher zufällige Abweichungen handelt, zeigt ein Quervergleich zwischen den Versuchen 7 und 11. Bei der Zuordnung der Grosswetterlagen schneidet der Versuch 7 um 0.2% besser ab als der Versuch 11. Betrachtet man jedoch die Spalten der gleich Klassierten für die Grosswettertypen und die alpin-synoptischen Gruppen, so schneidet in beiden Fällen Versuch 11 besser ab als Versuch 7.

Im 16. Versuch wurde eine 3-fache *Gewichtung* des deutschen Gebietes (vgl. Punkt 3, Gewichtung von Gitterpunkten) vorgenommen. Dieser Versuch wurde unternommen, weil KLAUS (1995, persönliche Mitteilung) darauf hinwies, dass sich die Meteorologen bei der Zuweisung der Grosswetterlagen vor allem an der Witterung von Deutschland orientierten. Wie die Resultate dieses Versuches zeigen, lassen sich jedoch auch dadurch keine merklichen Verbesserungen in der Übereinstimmung der beiden Klassifikationsmethoden erreichen.

Ebenfalls eine *Gewichtung*, jedoch etwas anderer Art, wurde im letzten Versuch (17) unternommen: Da es sich bei den Grosswetterlagen eigentlich um Witterungslagen handelt, die per Definition mindestens 3 Tage andauern sollen, wurde bei diesem Versuch sowohl der Vortag, als auch der Folgetag zur Basis berücksichtigt. Die Basis wurde dabei doppelt gewichtet. Der Vergleich der Zeilen 6 und 17 der Tabelle 6-11 zeigt jedoch, dass durch den Einbezug der an die Basis grenzenden Tage keine Verbesserung der Klassierung erreicht werden kann.

Fazit

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass keiner der 17 unternommenen Versuche auch nur annähernd an das gesteckte Ziel von 70% Übereinstimmung der Analogfall-Methode mit der manuellen Klassifikation der Grosswetterlagen herankommt. Ein Grund dafür liegt wohl in der Definition der Grosswetterlagen selbst. Durch die geforderte Andauer von mindestens 3 Tagen beinhalten die einzelnen Grosswetterlagen eine Dynamik, die grosse interne Varianzen verursacht.

Ähnliche Muster können in der manuellen Klassierung unter Umständen unterschiedlichen Grosswetterlagen zugeordnet werden, wenn sie in einer entsprechenden Sequenz von mehreren Tagen auftreten. Bei der Analogfall-Methode dagegen entscheidet das ähnlichste Muster über die Zuordnung zu den einzelnen Grosswetterlagen, unabhängig von der Grosswetterlage des Vortages.

Auch die Zuordnung von Übergangstagen oder unbestimmten Tagen bei der Analogfall-Methode gestaltet sich schwieriger. Die manuelle Methode ordnet Übergangstage der vorangehenden oder nachfolgenden Sequenz zu. Falls das Muster eine solche Zuordnung nicht zulässt, wird der betreffende Tag als unbestimmt eingeordnet. Bei der Analogfall-Methode dagegen kann einer Basis nur das Prädikat unbestimmt zugeordnet werden, wenn der beste Analogfall auch als unbestimmt eingestuft wurde.

6.3.2 Klassierung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen mit Hilfe von Windrichtungssektoren an verschiedenen Gittermittelpunkten

Zur automatischen Klassifikation von Grosswetterlagen wurde ein weiterer Ansatz getestet. Dieser bestand darin, die Grosswetterlagen über die Windrichtungen in bestimmten Gitterpunkten zu klassieren.

6.3.2.1 Die Windrichtungs-Methode

Der dabei verwendete Gebietsausschnitt entspricht dem Gebiet A) in Abbildung 6.15. Der Gitterpunktabstand wurde auf rund 5° sowohl in West-Ost- als auch in Nord-Süd-Richtung festgesetzt. Aus dieser Kombination ergeben sich 17×9 Gitterpunkte, gemäss Tabelle 6-10. Zur Berechnung der Windrichtung aus Druck- oder Geopotentialwerten werden jeweils 4 Gitterpunkte benötigt (vgl. Kap. 6.2.1 Formeln 1 bis 4). Bei der vorliegenden Anzahl von Gitterpunkten ergeben sich somit 16×8 Mittelpunkte von 4 Gitterpunkten, für die die Windrichtung berechnet werden kann. Pro Tag oder Muster lassen sich an 128 Mittelpunkten Windrichtungen berechnet wie Abbildung 6.17 zeigt.

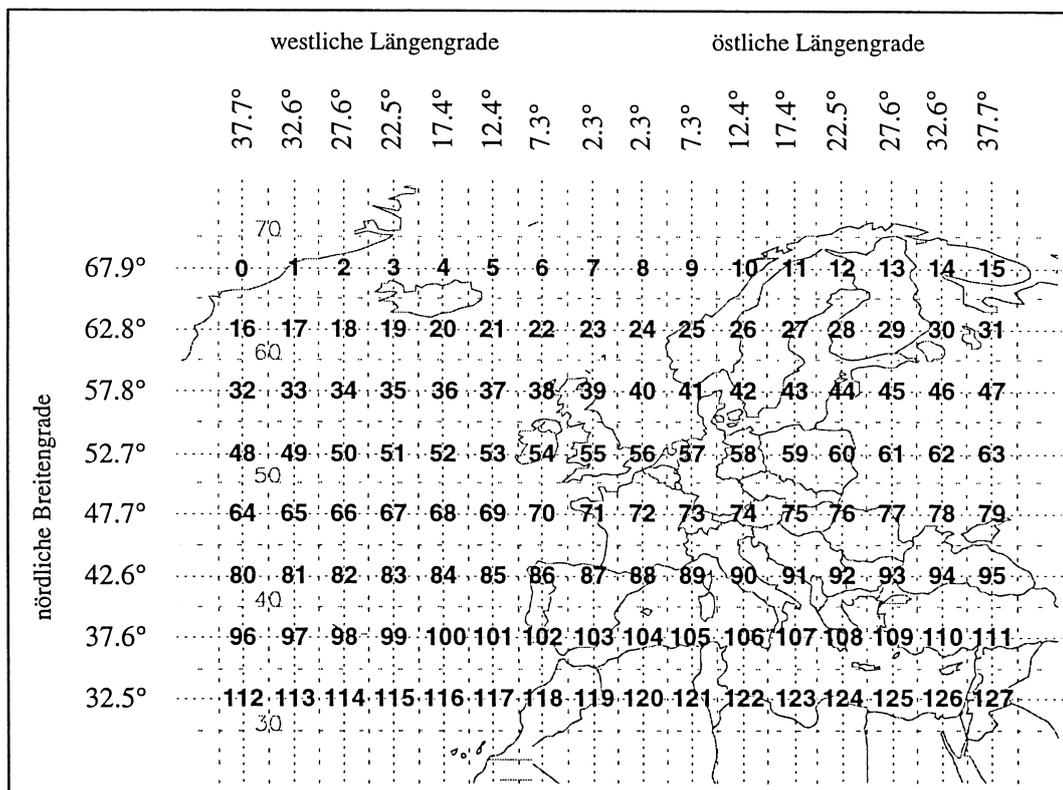


Abb. 6.17: Für die Berechnung der Windrichtung verwendete Gittermittelpunkte, numeriert von Westen nach Osten und Norden nach Süden mit Angabe von Punktnummer und geographischer Breite und Länge.

Für jede Grosswetterlage und jeden Monat wurden anschliessend für jeden Mittelpunkt Häufigkeitsverteilungen der Windrichtung (in 10° -Klassen) erstellt. Diese 128 Häufigkeitsverteilungen pro Grosswetterlage bildeten die Basis für die Klassierung.

Es wurde angenommen, dass sich die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Grosswetterlagen zumindest an einigen Mittelpunkten deutlich voneinander unterscheiden lassen.

Um die einzelnen Grosswetterlagen voneinander unterscheiden zu können, müssen sie mindestens an einigen Mittelpunkten (Mittelpunkte von 4 Gitterpunkten) möglichst viele Fälle in möglichst wenigen Windrichtungsklassen aufweisen. Ein für die Grosswetterlage WZ im Januar idealer Mittelpunkt wäre der in Abbildung 6.18 a) dargestellte. An diesem Mittelpunkt sind während der Untersuchungsperiode (1946 bis 1989) im Januar nur Windrichtungen von 180° bis 340° , also Süd über West bis Nord aufgetreten.

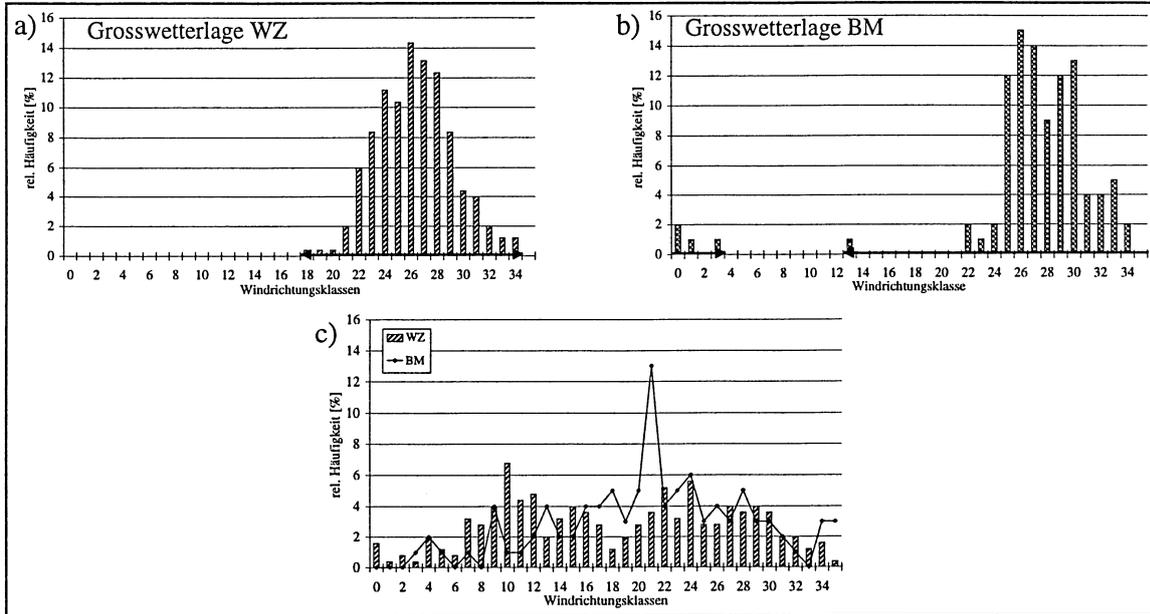


Abb. 6.18: Verteilung der Windrichtungsklassen der Grosswetterlagen WZ und BM an den drei Mittelpunkten a) $52.7^\circ \text{ N } 17.5^\circ \text{ W}$, b) $67.9^\circ \text{ N } 27.5^\circ \text{ E}$ und c) $67.9^\circ \text{ N } 37.7^\circ \text{ W}$ im Monat Januar für die Jahre 1946 bis 1989. Der Idealbereich ist bei a) und b) mit einem Pfeil markiert.

Die Verteilung der Windrichtungen ist jedoch nicht an jedem Mittelpunkt ideal, wie Abbildung 6.18 c) zeigt. Darin sind die Windrichtungsverteilungen der Grosswetterlagen WZ und BM im Mittelpunkt 15 im Januar dargestellt. Es ist offensichtlich, dass an einem solchen Mittelpunkt die beiden Grosswetterlagen nicht voneinander unterschieden werden können.

Für jede Grosswetterlage müssen also Mittelpunkte gefunden werden, bei denen es gelingt, die betreffenden Grosswetterlagen durch die Definition eines Windrichtungs-Intervalls möglichst gut von den andern abzugrenzen. Es muss daher für jede Grosswetterlage und jeden Monat bei den Windrichtungsverteilungen an den Mittelpunkten ein sogenannter 'Idealbereich' abgegrenzt werden. Dieser Idealbereich umfasst im Beispiel a) von Abbildung 6.18 die Windrichtungsklassen 18 bis 34, im Beispiel b) die Windrichtungsklassen 0 bis 3 und 13 bis 35.

Alle Fälle der betreffenden Grosswetterlage müssen innerhalb des Idealbereichs liegen. Das bedeutet, dass im Beispiel b) die Windrichtungsklasse 13 auch in den Idealbereich miteinbezogen werden muss, obwohl diese nur einen einzigen Fall beinhaltet. Dieser darf nicht weggelassen werden, weil es sich bei der besagten Windrichtungsverteilung um die Verteilung an einem einzigen von 128 Mittelpunkten handelt. Würde schon nur bei jedem zweiten Mittelpunkt (also bei 64 Mittelpunkten von insgesamt 128) ein Fall weggelassen und nimmt man an, dass es sich bei der Hälfte der Fälle um dieselben Tage handelt, so würden zum vornherein 32 Fälle dieser Grosswetterlage ausgeschlossen. Diese Fälle könnten mit Sicherheit nicht zu der 'richtigen' Grosswetterlage zugeordnet werden. Folglich muss der Idealbereich eines bestimmten Mittelpunktes alle Tage der betreffenden Grosswetterlage umfassen.

Umgekehrt sollten im Idealbereich einer Grosswetterlage möglichst wenig Fälle anderer Grosswetterlagen liegen. Ein gutes Beispiel hierfür liefert der Mittelpunkt 57 ($52.7^\circ \text{ N } 7.3^\circ \text{ E}$) in

Abbildung 6.19, durch den die beiden Grosswetterlagen WZ und NEA im Januar vollständig voneinander getrennt werden können.

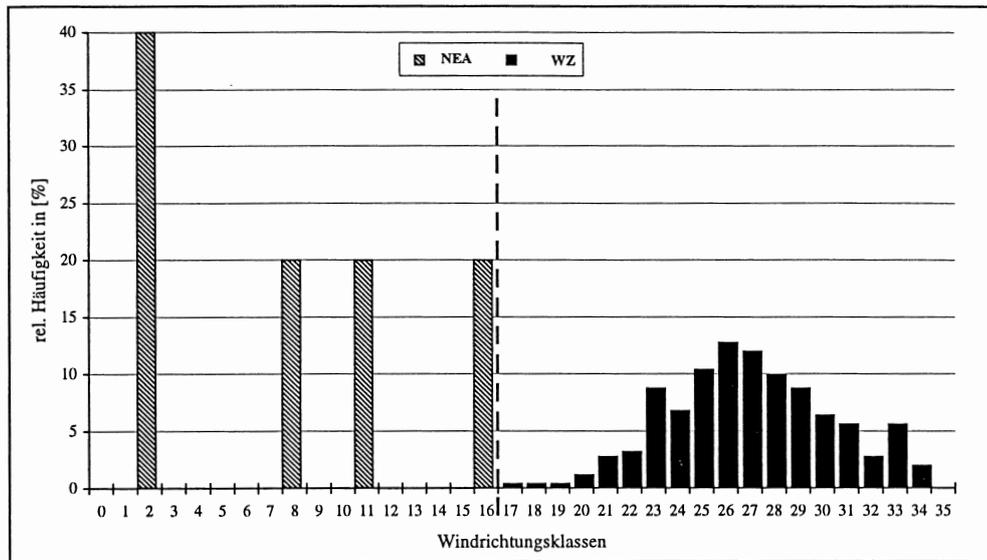


Abb. 6.19: Verteilung der Windrichtungsklassen der Grosswetterlagen WZ und NEA in den Januarmonaten 1946 bis 1989 im Mittelpunkt 52.7° N 7.3° E.

Es kann aber nicht das Ziel sein, jede Grosswetterlage einzeln von jeder anderen zu trennen. Vielmehr müssen für jede Grosswetterlage relevante Mittelpunkte gefunden werden, deren definierter Idealbereich grosse Teile der anderen Grosswetterlagen ausschliesst. Um die relevanten Mittelpunkte zu finden, wurde für jede Grosswetterlage und jeden der 128 Mittelpunkte ein Idealbereich definiert. Ein Idealbereich wurde jedoch nur für Mittelpunkte definiert, deren Windrichtungsverteilungen in mindestens vier aneinandergrenzenden Windrichtungsklassen eine relative Häufigkeit von 0% aufwiesen. Das bedeutet beispielsweise, dass für die Grosswetterlagen WZ und BM im Mittelpunkt 67.9° N 37.7° W (vgl. Abb. 6.18 c) kein Idealbereich definiert wurde.

Anschliessend wurde für jede Grosswetterlage und jeden Mittelpunkt mit definiertem Idealbereich die Anzahl Fälle der anderen Grosswetterlagen aufsummiert, die *nicht* im Idealbereich lagen. Für jede Grosswetterlage kann somit festgestellt werden, welche Mittelpunkte wie viele Fälle der anderen Grosswetterlagen zu eliminieren vermögen. In Abbildung 6.20 ist pro Mittelpunkt die Anzahl eliminerter Fälle in Prozent der gesamten Anzahl Fälle dieses Monats aufgetragen.

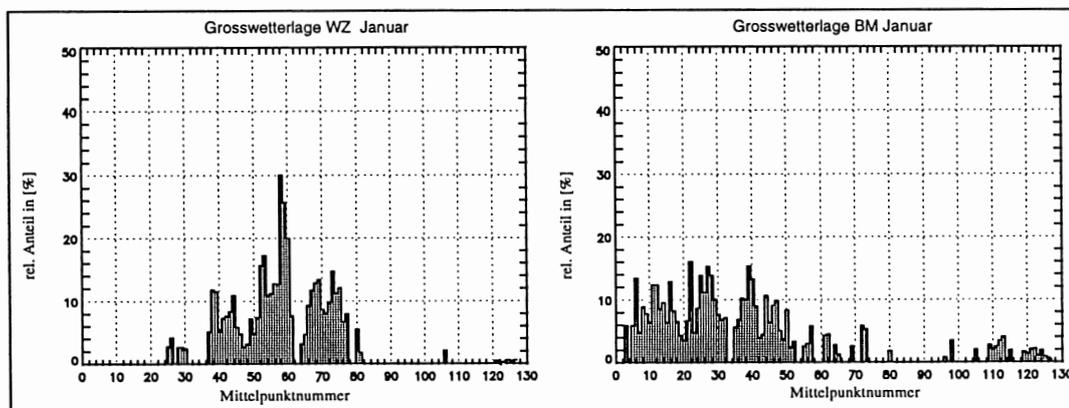


Abb. 6.20: Relativer Anteil der durch die einzelnen Mittelpunkte ausgeschlossenen Fälle der übrigen Grosswetterlagen (links: Grosswetterlage WZ, rechts: Grosswetterlage BM), für den Monat Januar. (Die Numerierung der Mittelpunkte entspricht derjenigen in Abbildung 6.17).

Wie aus Abbildung 6.20 links ersichtlich ist, können allein durch den Mittelpunkt 58 (52.7° N 12.4° E) rund 30% der übrigen Grosswetterlagen eliminiert werden. Das heisst, dass deren Windrichtung im Mittelpunkt 58 ausserhalb des definierten Idealbereiches der Grosswetterlage WZ liegt. Bei der Grosswetterlage BM (Abb. 6.20, rechte Seite) stehen die Verhältnisse ungünstiger. Der beste Mittelpunkt, Nr. 22 (62.8° N 7.3° W) eliminiert nur 16% der anderen Grosswetterlagen. Es sind jedoch zwei weitere Mittelpunkte vorhanden (39, 27), die annähernd den gleichen Anteil eliminieren. Leider sind die Anteile der durch die verschiedenen Mittelpunkte eliminierten Grosswetterlagen nicht ausschliessend. Oft werden durch zwei benachbarte Mittelpunkte annähernd dieselben Grosswetterlagen eliminiert. Das bedeutet folgendes: Es genügt nicht, dass einfach die relativen Anteile der einzelnen Mittelpunkte aufsummiert werden können bis 100% erreicht sind, damit dann alle anderen Grosswetterlagen vollständig eliminiert sind. Jedoch können manchmal auch gerade durch den Einbezug mehrerer benachbarter Mittelpunkte verschiedene Fälle ausgeschlossen werden. Für die Bestimmung der Relevanz der einzelnen Mittelpunkte für bestimmte Grosswetterlagen wurde der relative Anteil verwendet, der durch einzelne Mittelpunkte eliminiert werden kann. Die zehn besten Mittelpunkte wurden anschliessend benutzt, um die Grosswetterlagen voneinander abzugrenzen.

6.3.2.2 Resultate

Während zu Beginn des Versuches optimistisch damit gerechnet wurde, dass die Verwendung von vier bis sechs Mittelpunkten pro Grosswetterlage genügen würde, um diese von den anderen abzugrenzen, mussten in den abschliessenden Versuchen 10 Mittelpunkte einbezogen werden. Die Ergebnisse und Schwierigkeiten werden im Folgenden an den beiden Beispielen der Grosswetterlagen WZ und BM dargestellt, welche in den Januarmonaten des Untersuchungszeitraums 1946 bis 1989 am häufigsten aufgetreten sind. Die dargestellten Resultate beziehen sich, wenn nichts anderes vermerkt wird, auf die Berechnungen der Windrichtungen im 500 hPa-Niveau.

Für die Abgrenzung der beiden Grosswetterlagen WZ und BM (vgl. Abkürzungsverzeichnis) von den restlichen Grosswetterlagen wurden im 500 hPa-Niveau die in Abbildung 6.21 eingezeichneten Mittelpunkte verwendet.

Um einen bestimmten Tag als Grosswetterlage WZ respektive BM klassieren zu können, musste er an den 10 definierten Mittelpunkten im 500 hPa-Niveau Windrichtungen innerhalb der definierten Idealbereiche aufweisen.

Die Resultate aus diesem Versuch zeigt Tabelle 6-12. Es handelt sich dabei ausschliesslich um die Resultate für den Monat Januar.

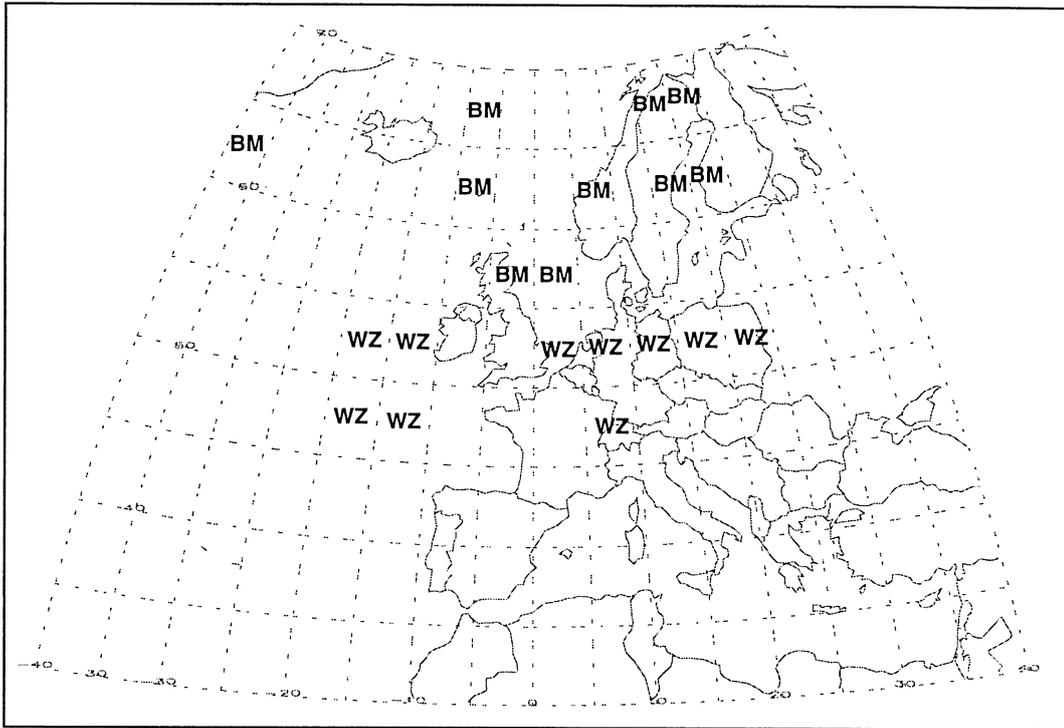


Abb. 6.21: Verwendete Mittelpunkte um die Grosswetterlagen WZ resp. BM im Januar von den restlichen Grosswetterlagen abzugrenzen.

Wie die Resultate in Tabelle 6-12 zeigen, gelingt es mit dieser Methode nur in durchschnittlich rund 60% der Fälle, Grosswetterlagen, die nicht den betreffenden Grosswetterlagen (hier WZ und BM) angehören, mit Hilfe der definierten Windrichtungssektoren an den 10 Mittelpunkten zu eliminieren. Wie die Aufstellung nach Grosswetterlagen zeigt, ist der Anteil, der nicht eliminiert werden kann, stark von den einzelnen Grosswetterlagen abhängig. So gelingt die Trennung zwischen der Grosswetterlage WZ und den Grosswetterlagen TM, HNA, HB, NEA, HNFZ und SEA recht gut. Eine schlechte Trennung dagegen erfolgt zwischen der Grosswetterlage WZ und den Grosswetterlagen WA, SWA, SWZ und TB.

Tab. 6-12: Resultate aus den Versuchen der Abgrenzung der Grosswetterlagen mit Hilfe von Windrichtungssektoren an 10 Gitterpunkten für die beiden Grosswetterlagen WZ (links) und BM (rechts) im Monat Januar.

WZ	wl	totwl	elim.	vbl.	relvbl.	BM	wl	totwl	elim.	vbl.	relvbl.
WA	1	56	11	45	80.4	WA	1	56	13	43	76.8
WZ	2	251	0	251	100.0	WZ	2	251	136	115	45.8
WS	3	70	21	49	70.0	WS	3	70	52	18	25.7
WW	4	49	21	28	57.1	WW	4	49	33	16	32.7
SWA	5	32	8	24	75.0	SWA	5	32	15	17	53.1
SWZ	6	70	6	64	91.4	SWZ	6	70	42	28	40.0
NWA	7	11	6	5	45.5	NWA	7	11	2	9	81.8
NWZ	8	91	29	62	68.1	NWZ	8	91	36	55	60.4
HM	9	83	54	29	34.9	HM	9	83	24	59	71.1
BM	10	100	68	32	32.0	BM	10	100	0	100	100.0
TM	11	7	6	1	14.3	TM	11	7	3	4	57.1
NA	12	13	10	3	23.1	NA	12	13	12	1	7.7
NZ	13	47	16	31	66.0	NZ	13	47	38	9	19.1
HNA	14	22	21	1	4.5	HNA	14	22	17	5	22.7
HNZ	15	30	18	12	40.0	HNZ	15	30	24	6	20.0
HB	16	20	19	1	5.0	HB	16	20	8	12	60.0
TRM	17	38	17	21	55.3	TRM	17	38	26	12	31.6
NEA	18	5	5	0	0.0	NEA	18	5	2	3	60.0
NEZ	19	18	15	3	16.7	NEZ	19	18	7	11	61.1
HFA	20	46	43	3	6.5	HFA	20	46	37	9	19.6
HFZ	21	15	12	3	20.0	HFZ	21	15	13	2	13.3
HNFA	22	20	17	3	15.0	HNFA	22	20	20	0	0.0
HNFZ	23	47	43	4	8.5	HNFZ	23	47	42	5	10.6
SEA	24	31	30	1	3.2	SEA	24	31	24	7	22.6
SEZ	25	23	16	7	30.4	SEZ	25	23	20	3	13.0
SA	26	20	12	8	40.0	SA	26	20	12	8	40.0
SZ	27	23	11	12	52.2	SZ	27	23	16	7	30.4
TB	28	20	7	13	65.0	TB	28	20	18	2	10.0
TRW	29	13	6	7	53.8	TRW	29	13	6	7	53.8
Total		1020	548	472	38.35			1171	698	473	37.14

1. Kolonne: Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY (vgl. Abkürzungsverzeichnis);
 2. Kolonne (wl): Grosswetterlagennummer;
 3. Kolonne (totwl): Auftretenszahl der Grosswetterlage in den Januarmonaten 1946 bis 1989;
 4. Kolonne (elim): Anzahl Grosswetterlagen, die durch die Definition der Windrichtung an den 10 Mittelpunkten eliminiert werden;
 5. Kolonne (vbl.): Anzahl verbleibender Fälle, die als Wetterlage WZ klassiert wurden;
 6. Kolonne (relvbl): relativer Anteil von vbl an totwl.
- gerastert: Werte über 80%;
diagonal schraffiert: Werte unter 10%;

Dieses ungenügende Resultat mag im ersten Augenblick erstaunen, vor allem wenn man die Mittelkarten des Monats Januar der einzelnen Grosswetterlagen im Anhang betrachtet, die zum Teil erhebliche Unterschiede zueinander aufweisen. Es muss aber betont werden, dass es sich dabei um Mittelkarten handelt und nicht um Individuen von Grosswetterlagen. Zudem muss berücksichtigt werden, dass der Idealbereich an einem bestimmten Mittelpunkt im Normalfall mehr als 180° umfasst. Dies bedeutet, dass Fälle, die nicht eine deutlich unterschiedliche Windrichtung aufweisen (zum Beispiel entgegengesetzte Windrichtung) nicht eliminiert werden können. Dieser Sachverhalt wird durch Abbildung 6.22 verdeutlicht.

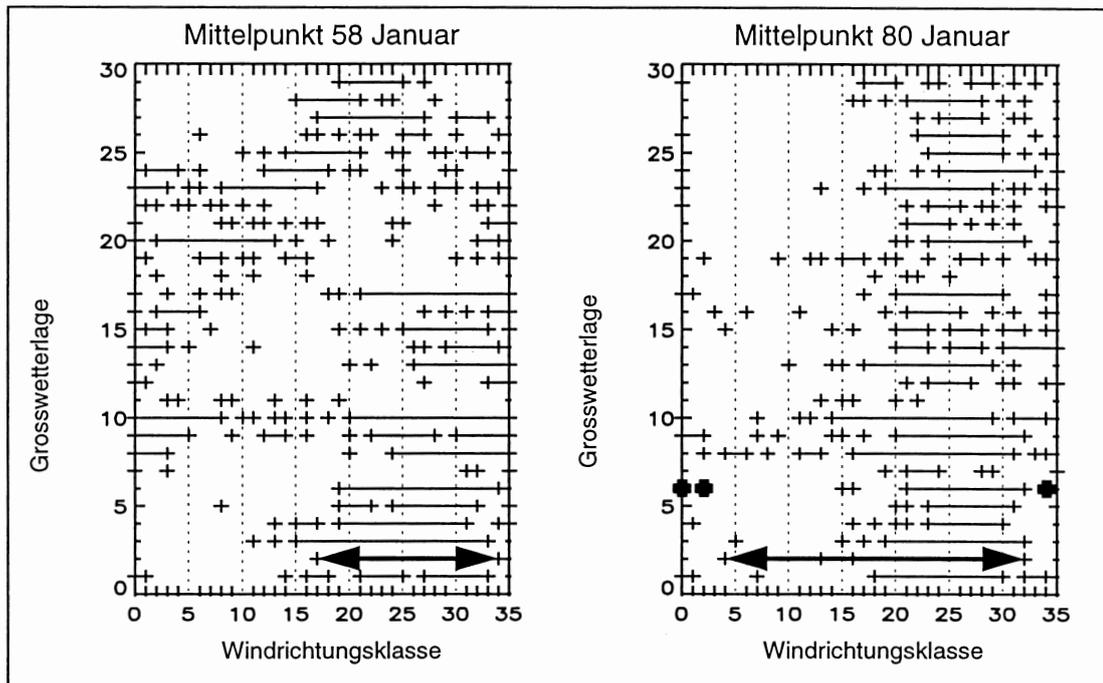


Abb. 6.22: Für jede Wetterlage aufgetretene Windrichtungsklassen im Monat Januar für die Mittelpunkte 58 (links) und 80 (rechts). Der Idealbereich der Grosswetterlage WZ ist mit Pfeilen markiert.

Darin wird gezeigt, wie gross die Streuung der Windrichtungen der Grosswetterlagen an verschiedenen Mittelpunkten sein kann. Über den Idealbereich der Windrichtungen in Punkt 58 (52.7° N 12.4° E) können insgesamt am meisten Grosswetterlagen eliminiert werden, die nicht der Grosswetterlage WZ angehören. Wie Abbildung 6.22 zeigt, liegen jedoch genau an diesem Punkt sämtliche SWZ Grosswetterlagen (6) innerhalb des Idealbereiches von WZ. Mit Hilfe des Punktes 80 (42.6° N 37.7° W) dagegen, der einen viel breiteren Idealbereich für die Grosswetterlage WZ aufweist, liegen drei SWZ Grosswetterlagen (in der Abbildung rechts mit fetten Kreuzen markiert) ausserhalb dieses Bereiches und können deshalb eliminiert werden.

Abbildung 6.22 zeigt auch, dass durch die Verwendung eines einzelnen Mittelpunktes jeweils nur sehr wenig Grosswetterlagen eliminiert werden können. Bei mehreren Grosswetterlagen treten an mehreren Mittelpunkten fast sämtliche Windrichtungen auf, was eine Trennung erschwert.

Die sehr grosse Streuung der Windrichtungen ist nicht zuletzt auf den Umstand zurückzuführen, dass es sich bei den Grosswetterlagen, wie bereits mehrfach erwähnt, um Witterungslagen handelt, die gemäss Definition mehrere Tage anhalten müssen. Die Kernzonen der Druckgebilde wandern in dieser Zeitspanne, was für die einzelnen Mittelpunkte, die stationär sind, zum Teil starke Winddrehungen bewirken kann. Aus diesem Grund kann auch die Windrichtungs-Methode nicht für die automatische Klassierung von Grosswetterlagen verwendet werden.

Fazit

Die Zuordnung der Grosswetterlage gelingt erwartungsgemäss auch über die Definition von Windrichtungssektoren an 10 verschiedenen Mittelpunkten nicht in dem von BARRY und PERRY (1973) geforderten Mass.

Daran kann auch durch eine Änderung des Kriteriums zur Auswahl der relevanten Punkte oder durch die Verwendung der geostrophischen Windrichtung im Bodenniveau kaum etwas geändert werden.

Im Gegensatz zur Analogfallsuche hat diese Methode den grossen Nachteil, dass die einzelnen Tage nicht definitiv den Grosswetterlagen zugeordnet werden können. Viele Tage erfüllen die Kriterien von mehreren Grosswetterlagen und lassen sich somit nicht endgültig einer Grosswetterlage zuordnen. Insgesamt ist keine Aussage über die "Güte" dieser Methode machbar. Es kann lediglich pro Grosswetterlage und Monat der Anteil fälschlicherweise zu der betreffenden Grosswetterlage zugeordnete Grosswetterlagen angegeben werden.

Auch die Windrichtungs-Methode scheitert an der geforderten Andauer von 3 und mehr Tagen, weil sie die Dynamik nicht berücksichtigen kann, beziehungsweise weil durch die Dynamik der Idealbereich an den meisten Mittelpunkten so breit definiert werden muss, dass auch sehr viele andere Tage die Kriterien erfüllen können.

Ein weiteres Problem stellt sich auch bei schwachen Druckgradienten im Sommer und bei flacher Druckverteilung, vorwiegend in Hochdruckgebieten. Die berechnete Windrichtung ist dann eher zufällig und die Windrichtungsverteilung an einem bestimmten Mittelpunkt wird sehr diffus. Das bedeutet, dass an diesem Mittelpunkt praktisch alle Windrichtungen auftreten können. Damit sind solche Mittelpunkte für die Trennung der Grosswetterlagen ungeeignet und können nicht in die 10 besten Mittelpunkte einbezogen werden. Das bedeutet aber auch, dass durch diese Methode die Hochdruckgebiete kaum berücksichtigt werden können. Diese sind jedoch zur Bestimmung der Grosswetterlagen mindestens gleich wichtig wie die Tiefdruckgebiete. Durchwegs schwächere Druckgradienten treten bei allen Grosswetterlagen in den Sommermonaten auf, wie aus den mittleren monatlichen Karten der Grosswetterlagen im Anhang ersichtlich ist. Die Trennung der einzelnen Grosswetterlagen voneinander dürfte daher für die Sommermonate noch deutlich schwieriger sein als im gezeigten Beispiel vom Januar.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das in dieser Arbeit verfolgte witterungsklimatologische Downscaling benötigt als Grundlage nebst GCM-Daten ein Schema zur Klassierung der Wetterlagen. Die meisten Wetterlagenklassifikationen haben den grossen Nachteil der manuellen Zuordnung, was nebst einem grossen zeitlichen Aufwand auch die Gefahr inhomogener Klassierungen in sich birgt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde versucht, zwei heute noch im Deutschen und Schweizerischen Wetterdienst verwendeten Wetterlagenklassifikationen auf der Basis von Gitternetzdaten zu automatisieren.

Es handelt sich um die synoptische Wetterlagenklassifikation nach SCHÜEPP (1968 und 1979) und die Grosswetterlagenklassifikation nach HESS/BREZOWSKY (1952 und 1969). Sie wurden zur Untersuchung von Klimaänderungen im schweizerischen Alpenraum ausgewählt.

Die retrospektiven Auswertungen der Zeitreihen der Wetterlagenklassifikationen zeigten bei mehreren Gruppen Inhomogenitäten. Es stellte sich die Frage, ob diese Inhomogenitäten klimatisch bedingt sind oder technisch verursacht wurden (Bearbeiter; bei der SCHÜEPP-Klassifikation auch Berechnungsart, Messgeräte, Messtermin, Standortverschiebungen).

Während die Zeitreihe der Grosswetterlagen schon verschiedentlich auf technisch verursachte Inhomogenitäten geprüft wurde, lagen bis vor kurzem für die Wetterlagen nach SCHÜEPP noch keine derartigen Untersuchungen vor. M. SCHÜEPP (1996, persönliche Mitteilung) schliesst jedoch technisch verursachte Inhomogenitäten in der manuellen Klassierung der Alpenwetterlage nach SCHÜEPP nicht aus.

Zur Aufdeckung von Inhomogenitäten in Zeitreihen dient der in Kapitel 4.1.2 vorgestellte Wendepunkttest von PETTITT (1979). Aus den Resultaten der durchgeführten Homogenitätstests lassen sich jedoch keine eindeutigen Schlüsse über die Ursachen der Inhomogenitäten (Variabilität des Klimas, Messgeräte, Messtermin, Messplatz, Bearbeiterwechsel) ableiten.

Das Verfahren, das hier angewendet wurde, um bei Inhomogenitäten zwischen klimatisch und technisch bedingten Ursachen zu unterscheiden, besteht in der Berechnung der Differenzen zwischen zwei Zeitreihen, bei denen für eine vorausgesetzt wird, dass sie homogen ist. Mit der in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Methode der automatischen Klassierung der SCHÜEPP-Wetterlagen liegt eine bezüglich der technischen Faktoren homogene Reihe (das Programm klassiert immer gleich) zumindest für die Jahre 1958 bis 1988, vor. Zuerst wurden die Differenzen der relativen Häufigkeiten der 8 Grundtypen der SCHÜEPP-Wetterlagen pro Jahr (relative Häufigkeit der Gruppe X im Jahr Y der manuellen Klassifikation minus relative Häufigkeit der Gruppe X im Jahr Y der automatischen Klassifikation) gebildet. Anschliessend wurde der Homogenitätstest von PETTITT auf die Differenzenreihen angewendet. Abbildung 7.1 zeigt die Differenzen der relativen Häufigkeiten der beiden Klassierungsmethoden.

Positive Differenzen bedeuten, dass im entsprechenden Jahr der relative Anteil der manuell zu diesem Grundtyp zugeordneten Lagen grösser ist als der entsprechende relative Anteil bei der automatischen Klassierung. Umgekehrt gilt für negative Abweichungen, dass der Anteil der automatisch klassierten Lagen grösser ist als der Anteil der manuell zugeordneten.

Die beiden Reihen können als homogen angesehen werden, wenn die Differenzen von ihrem Mittelwert (Mittelwert der Differenzen) zufällig abweichen. Die Zeitreihen der Differenzen dürfen deshalb weder einen Trend noch Wendepunkte aufweisen.

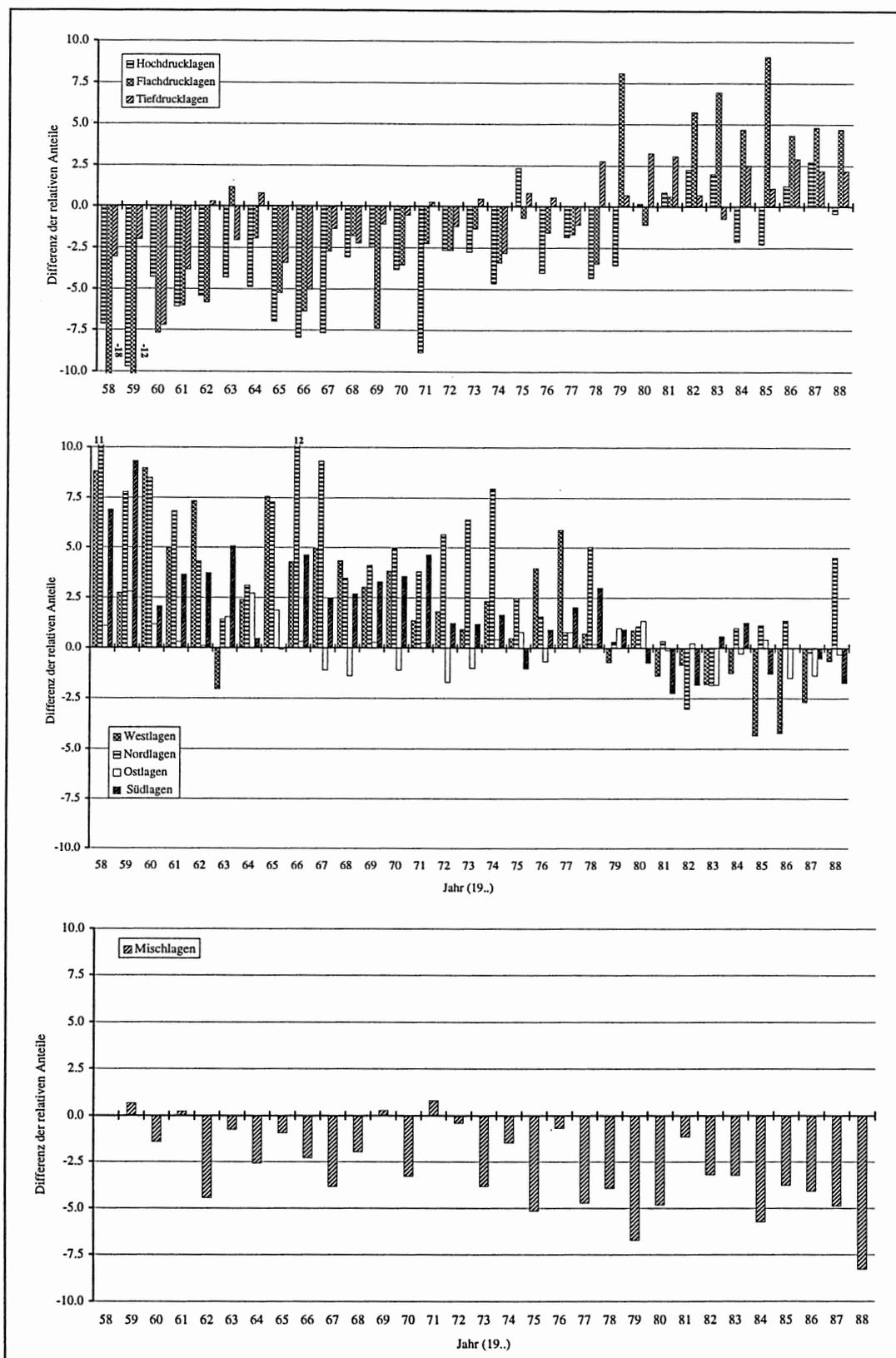


Abb. 7.1: Differenz der jährlichen relativen Häufigkeiten der manuellen und der automatischen Klassifikation der SCHÜEPP-Wetterlagen für die acht Grundtypen im Zeitraum 1958 bis 1988. (oben: konvektive Lagen; mitte: advective Lagen; unten: Mischlagen)

Bereits aus Abbildung 7.1 ist ersichtlich, dass die Zeitreihen der manuell klassierten SCHÜEPP-Wetterlagen Inhomogenitäten aufweisen müssen. Die konvektiven Lagen weisen vor Mitte der 70^{er} Jahre praktisch nur negative Differenzen auf, danach fast nur noch positive. Umgekehrt, mit positiven

Differenzen vor Mitte der 70^{er} Jahre und negativen danach zeigt sich das Bild bei den advektiven Lagen. Die Differenzen der Mischlagen weisen einen Trend auf.

Abbildung 7.2 zeigt die Resultate des Wendepunkttests, der auf die Differenzenreihen der relativen Häufigkeiten angewendet wurde.

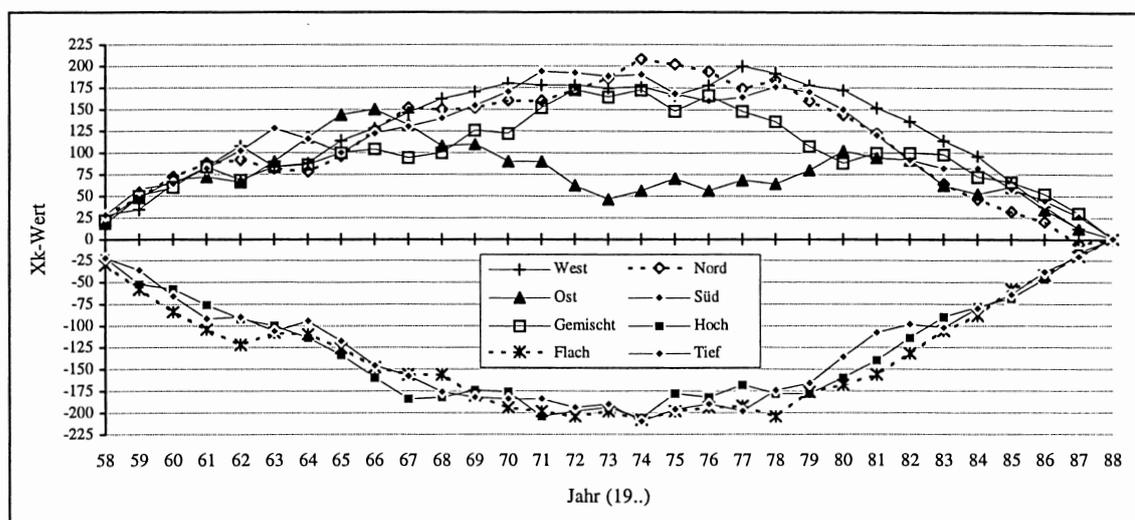


Abb. 7.2: Wendepunkttest für die Differenzen der relativen Häufigkeit der SCHÜEPP-Wetterlagen, manuell und automatisch klassiert.

Daraus ergibt sich, dass fünf der acht Wendepunkte, die mindestens auf dem 99%-Niveau signifikant sind (Ausnahme: Ostlage mit 98%-Niveau), auf das Jahr 1974 fallen (vgl. Tab. 7-1).

Tab. 7-1: Wendepunkt-Jahre und Wahrscheinlichkeiten der Wendepunkte (in %) für die Differenzen der relativen Häufigkeiten der manuell und automatisch zugeordneten SCHÜEPP-Wetterlagen.

SCHÜEPP-Wetterlagen	Hoch	Flach	Tief	West	Nord	Ost	Süd	Gemischt
Wendepunkt-Jahr	1974	1974	1974	1977	1974	1966	1970	1974
Wahrscheinlichkeit des Wendepunktes	99.97	99.98	99.98	99.96	99.98	98.76	99.94	99.69

Basierend auf der Annahme, dass die Zeitreihe der automatisch klassierten Wetterlagen homogen bezüglich technischer Faktoren ist und klimatische Inhomogenitäten in beiden Zeitreihen gleichzeitig auftreten, kann gefolgert werden, dass es sich bei den Wendepunkten im Jahr 1974 um technisch bedingte Inhomogenitäten in der Zeitreihe der manuellen Klassifikation handelt. Übereinstimmend mit SCHWARB (1996), der einen Bearbeiterwechsel zwischen 1974/75 angibt, darf angenommen werden, dass die Inhomogenitäten durch einen Bearbeiterwechsel verursacht wurden. Nach SCHWARB (1996), der ebenfalls einen Bearbeiterwechsel Anfang 1967 angibt, könnte auch der Wendepunkt der Ostlagen im Jahr 1966 darauf zurückgeführt werden.

Insgesamt muss daher die manuell klassierte Zeitreihe der SCHÜEPP-Wetterlagen als inhomogen bezeichnet werden. Es fragt sich deshalb, ob für die Zeitreihenanalyse anstelle der manuellen nicht eine automatische Klassifikation verwendet werden sollte.

Soll die manuelle durch eine automatische Klassifikation ersetzt werden, so muss letztere möglichst gut die manuelle Klassifikation repräsentieren. Dass dies mit der vorliegenden Version der automatischen Wetterlagenklassifikation noch nicht optimal gelingt, haben die Auswertungen in Kapitel 5.2.2 gezeigt.

Um die automatische Klassifikation enger an die manuelle anzupassen, wird bei der manuellen Klassifikation ein Zeitraum verwendet, in dem die Reihe homogen ist. Dabei bietet sich der Zeitraum zwischen 1958 und 1966 an, in dem M. SCHÜEPP die Wetterlagen selber zugeordnet hat (SCHWARB, 1996) und die Zeitreihen homogen sind (keine signifikanten Wendepunkte).

Auswertungen haben gezeigt, dass Änderungen bei der automatischen Klassifikation vor allem bei den beiden Parametern Bodenwindrichtung und Höhenwindrichtung, insbesondere bei den Schwellenwerten zur Trennung von Lagen mit schwachen und mässigen Winden, vorgenommen werden könnten.

Ist man dagegen mehr daran interessiert, eine homogene automatisch zugeordnete Zeitreihe von Wetterlagen zu erhalten, ohne dass diese möglichst gut mit den SCHÜEPP-Wetterlagen übereinstimmen müssen, so kann die bestehende automatische Klassierung durchaus in der bestehenden Form verwendet werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Automatisierung der Klassifikation von SCHÜEPP-Wetterlagen stellt einen ersten Schritt in Richtung automatische Klassierung dar.

Mit einigen Anpassungen könnte die automatische Klassierung noch etwas näher an die manuelle herangebracht werden. Gelingt dieser Schritt, so sollte man sich überlegen, ob nicht in Zukunft an Stelle der manuellen Klassierung besser die automatische anzuwenden wäre, um Inhomogenitäten, wie sie in den 70^{er} Jahren aufgetreten sind, zu vermeiden.

Wie die obenstehenden Ausführungen gezeigt haben, ist es bei den SCHÜEPP-Wetterlagen grundsätzlich möglich, eine Automatisierung vorzunehmen. Dies gelingt jedoch nur, weil die SCHÜEPP-Klassifikation auf weitgehend objektivierbaren Kriterien aufgebaut ist.

Sehr viel diffuser und daher deutlich schwieriger erfassbar sind die Kriterien bei der Zuordnung der HESS/BREZOWSKY-Grosswetterlagen.

Wie die verschiedenen Versuche in dieser Arbeit gezeigt haben, lässt sich eine automatische Klassierung der Grosswetterlagen nach HESS/BREZOWSKY weder mit Hilfe der Methode der Analogfallsuche noch mit Hilfe der Definition von Windrichtungssektoren an bestimmten Gitterpunkten verwirklichen. Sämtliche Versuche scheitern an der Tatsache, dass die Grosswetterlagen mindestens 3 Tage Bestand haben müssen. Die durch diese Forderung in den einzelnen Gruppen enthaltene Variabilität kann mit den hier verwendeten Methoden nicht erfasst werden. Eine Methode, die in diesem Fall zum Erfolg führen soll, muss die interne Variabilität und auch die Überschneidungen der einzelnen Gruppen berücksichtigen können. Es ist daher möglich, dass die Anwendung neuerer Methoden (z.B. fuzzy-logic oder tree-based-models) bei der Lösung dieses Problems eher zum Ziel führen würden.

Zukünftige Klimaänderungen können nur erkannt werden, wenn das Klima der Vergangenheit bekannt ist. Verwendet man für die Untersuchung des zukünftigen Klimas den witterungsklimatologischen Ansatz des Downscalings, so sollte auch das heutige und vergangene Klima an Hand von Wetterlagen untersucht werden. Im Rahmen des witterungsklimatologischen Downscalings ist es einfacher und zeitsparender, die Wetterlagen direkt aus Gitternetzdaten zu klassieren. Sollen die Wetterlagen manuell klassiert werden, so müssen aus den Gitternetzdaten Isolinienkarten hergestellt und diese anschliessend mit grossem Zeitaufwand 'von Hand' klassiert werden. Für die Vergangenheit existieren dagegen momentan nur manuelle Klassifikationen. Manuell klassierte Wetterlagen sind oft mit technischen Fehlern behaftet. Bei technisch bedingten Änderungen in solchen Zeitreihen besteht die Gefahr der Fehlinterpretation. So könnten beispielsweise Bearbeiterwechsel als 'Klimaänderung' interpretiert werden. Will man manuelle Wetterlagenklassifikationen verwenden, dann muss vorerst gründlich abgeklärt werden, ob diese technisch verursachte Inhomogenitäten aufweisen. Erst wenn diese erkannt sind, kann in der Zeitreihe nach klimatisch bedingten Inhomogenitäten (Klimaänderungen) gesucht werden.

Literatur

- Bárdossy, A. und H.J. Caspary, 1990:** Detection of Climate Change in Europe by Analyzing European Atmospheric Circulation Patterns from 1881 to 1989. *Theoretical and Applied Climatology*, **42**, pp. 155-167.
- Barry, R.G. and R.J. Chorley, 1992:** Atmosphere weather and climate. Sixth edition. Routledge London New York.
- Barry, R.G. and A.H. Perry, 1973:** Synoptic Climatology. Methods and Applications. Methuen & Co Ltd, London.
- Baudenbacher, M., 1993:** Wetterlagenabhängige Temperaturfelder in bodennahen Luftschichten der Schweiz. Unpubl. Diplomarbeit, Geographisches Institut Universität Bern, 55 S.
- Beniston, M., 1994:** Climate Scenarios for mountain regions. An overview of possible approaches. In: Beniston, M. (Ed.): Mountain Environments in changing climates. Routledge London New York, pp. 136-152.
- Bock, H. H., 1974:** Automatische Klassifikation. Theoretische und praktische Methoden zur Gruppierung und Strukturierung von Daten. Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen.
- Brezowsky, H., 1952:** Sekuläre Schwankungen der Zirkulation. *Bericht des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone*, Nr. 35. Bad Kissingen, pp.48-54.
- Dzardzeevskii, B., 1962:** Fluctuations of climate and of general circulation of the atmosphere in extra-tropical latitudes of the Northern Hemisphere and some problems of dynamic climatology. *Tellus*, **14**, 3, pp.328-336.
- El-Kadi, A. K. A. and P. A. Smithson, 1992:** Atmospheric classifications and synoptic climatology. *Progress in Physical Geography* **16**, 4, pp. 432-455.
- Fliri, F., 1984:** Synoptische Klimatographie der Alpen zwischen Mont Blanc und Hohen Tauern (Schweiz - Tirol - Oberitalien). Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, Heft 29, Innsbruck.
- Frankenberg, P. und M. Kappas, 1991:** Temperatur- und Wetterlagentrends in Westdeutschland. Mannheimer Geographische Arbeiten Heft 30, Geographisches Institut Universität Mannheim, 185 S.
- Frey-Buness, A., 1993:** Ein statistisch-dynamisches Verfahren zur Regionalisierung globaler Klimasimulationen. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Forschungsbericht 93-47, 149 S.
- Gerstengarbe, F.-W. et al., 1993:** Katalog der Grosswetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmut Brezowski 1881-1992. 4. vollständig neu bearbeitete Auflage. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Nr. 113, Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst, 249 S.
- Giorgi, F., 1990:** On the simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climatology*, **3**, pp. 941-963.
- Giorgi, F. and L.O. Mearns, 1991:** Approaches to the simulation of regional climate change: A review. *Reviews of Geophysics*, **29**, 2, pp. 191-216.
- Grabau, J., 1985:** Klimaschwankungen und Grosswetterlagen in Mitteleuropa seit 1881. Inaugural-Dissertation Universität Paderborn, 241 S.
- Gressel, W., 1954a:** Grosswetterlagen für den Alpenraum. *Wetter und Leben*, Jg. 6, Heft 10-12, pp. 190-191.
- Gressel, W., 1954b:** Zur Aufstellung eines synoptischen Kalendariums für den Alpenraum. *Meteorologische Rundschau*, 7. Jg., Heft 9/10, pp.170-174.

- Gressel, W., 1959:** Zur Klassifikation der Wetterentwicklung im Alpenraum von 1946 bis 1957. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 8. Band, Nr. 54, Offenbach am Main, pp. 212-215.
- Gressel, W., 1978:** Zur Beeinflussung der Wetterentwicklung durch die Alpen. Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Heft 31, Publikation Nr. 227. Bericht über die 14. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie vom 15.-17. Sept. 1976 in Rauris, Salzburg, 1. Teil, Wien, pp.34/1-2.
- Hess, P. und H. Brezowsky, 1952:** Katalog der Grosswetterlagen Europas. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone*, Nr. 33, Bad Kissing, 37 S.
- Hess, P. und H. Brezowsky, 1969:** Katalog der Grosswetterlagen Europas. 2. neu bearbeitete und ergänzte Auflage. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Nr. 113, Offenbach am Main, 70 S.
- Hess, P., 1952:** Der Katalog der Grosswetterlagen Europas: Einführung und erste Zirkulationsuntersuchungen. *Bericht des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone*, Nr. 35. Bad Kissing, pp. 42-48.
- Heyer, E., 1972:** Witterung und Klima: Eine allgemeine Klimatologie. Leipzig, B. G. Teubner.
- Houghton, J.T., B.A. Callander and S.K. Varney (Eds.), 1992:** Climate Change 1992. The supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change. World Meteorological Organisation / United Nations Environment Program. Cambridge University Press.
- IPCC, 1990:** Climate Change. The IPCC Scientific Assessments. In: Houghton, J.T., Jenkins, G.J., Ephraums, J.J. (Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change. World Meteorological Organization /United nations environment program. Cambridge university press.
- Jakob, Ch. und S. Schubert, 1992:** Regionale Klimaszenarien für die Klimaimpaktforschung. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Humboldt-Universität zu Berlin, Reihe Mathematik / Naturwissenschaften* 41, pp. 43-54.
- Jones, P.D., M. Hulme and K.R. Briffa, 1993:** A Comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. *International Journal of Climatology*, Vol. 13, pp. 655-663.
- Kalnicky, R.A. , 1987:** Seasons, Singularities and Climatic changes over the Midlatitudes of the Northern Hemisphere during 1899 - 1969. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 26, American Meteorological Society, pp. 1496-1510.
- Key, J. and R.G. Crane, 1986:** A comparison of synoptic classification schemes based on 'objective' procedures. *Journal of Climatology*, Vol. 6, pp. 375-388.
- Kirchhofer, W., 1974:** Classification of European 500 mb patterns. *Arbeitsbericht der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt* Nr. 43, Geneva, 72 S.
- Klaus, D., 1993:** Zirkulations- und Persistenzänderungen des europäischen Wettergeschehens im Spiegel der Grosswetterlagenstatistik. *Erdkunde*, Band 47, Heft 2. Boss-Verlag, Kleve, pp. 85-104.
- Lamb, H.H., 1972:** British Isles Weather Types and Register of the daily sequence of Circulation Patterns 1861 - 1971. *Geophysical Memoirs* No. 116, Vol. 16. Meteorological Office, London, pp. 1-49.
- Lauscher, F., 1954:** Dynamische Klimaskizze von Österreich. in: Flohn,H. (Ed.):Witterung und Klima in Mitteleuropa. Forschungen zur deutschen Landeskunde, Band 78, zweite erweiterte und neubearbeitete Auflage, pp. 145-158.
- Lauscher, F., 1972:** 25 Jahre mit täglicher Klassifikation der Wetterlage in den Ostalpenländern. *Wetter und Leben*, Jg. 24, pp. 185-189.
- Lauscher, F., 1976:** Synoptische Klimatologie und klimatologische Synoptik. Überblick über ostalpine Studien aus drei Jahrzehnten. *Wetter und Leben*, Jg. 28, pp. 158-165.

- Lauscher, F., 1982:** Anwendungen der ostalpinen Wetterlagenklassifikation. Bericht über die Jahre 1976 - 1980. *Wetter und Leben*, Jg. **34**, pp. 20-28.
- Lauscher, F., 1986:** 40 Jahre ostalpine Wetterlagenklassifikation. Bericht über die Jahre 1981 bis 1985. *Wetter und Leben*, Jg. **38**, pp. 221-230.
- Lemcke, C. en S. Kruizinga, 1984:** Development of guidance forecasts at KNMI. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, Technische Rapporten T.R. 54, De Bilt.
- Lienert, G.A., 1973:** Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. Band I. Verlag Anton Hain. Meisenheim am Glan.
- Lienert, G.A., 1978:** Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik. Band II. Verlag Anton Hain. Meisenheim am Glan.
- Lüthi, D., A. Cress, H.C. Davies, C. Frei and C. Schär, 1996:** Interannual Variability and Regional Climate Simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, **53**, pp. 185-209.
- McGregor, G. R. and G. Rye, 1994:** Sea level pressure map pattern classification over the British Isles 1992-1993. (Manuskript).
- Mertz, J., 1959:** Succession et durée des régimes météorologique sur les Alpes. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 8. Band, Nr. **54**, Offenbach am Main, pp. 231-235.
- Mitchell, J.M., 1980:** History and Mechanisms of Climate. In: Oeschger, H., Messerli, B., Svilar, M. (Hrsg.): *Das Klima. Analysen und Modelle; Geschichte und Zukunft*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, pp. 31-42.
- MPI, 1992:** The ECHAM3 Atmosphere Model. Report No. 6. Modellbetreuungsgruppe des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Hamburg.
- NCAR & UW, 1990:** Compact Disc of the national Meteorological Center Grid Point Data Set: Version II. General Information and User's Guide. Produced by the Department of Atmospheric Sciences, University of Washington and the Data Support Section, National Center for Atmospheric Research.
- Neidhöfer, F. M., 1994:** Niederschlagsfelder ausgewählter Grosswetterlagen im schweizerischen Alpenraum. Unpubl. Diplomarbeit, Geographisches Institut Universität Bern, 134 S.
- Peixoto, J.P., Oort, A.H., 1992:** *Physics of Climate*. American Institute of Physics. New York.
- Pettitt, A.N., 1979:** A Non-parametric Approach to the Change-point Problem. *Applied Statistics* **28**, No. 2, pp. 126-135.
- Pfister, C., B. Messerli, P. Messerli und H. Zumbühl, 1980:** Die Bedeutung verschiedener Datentypen für die Rekonstruktion des Klima- und Witterungsverlaufes der letzten Jahrhunderte. Gletscher und Klima, Jahrbuch 1978 der Schweiz. Naturforsch. Ges., Wissenschaftlicher Teil. Briger Gletschersymposium.
- Pichler, H. and R. Steinacker, 1987:** On the Synoptics and Dynamics of Orographically Induced Cyclones in the Mediterranean. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. **36**, No. 1-4, Springer Verlag Wien New York, pp. 108-117.
- Rickli, R., 1995:** Gruppierung Europäischer Grosswetterlagen nach alpin-synoptischen Kriterien. Arbeitsbericht zuhanden des Nationalen Forschungsprogrammes 31 "Klimaänderung und Naturkatastrophen". Geographisches Institut Universität Bern, 38 S.
- Robinson, P.J. and P.L. Finkelstein, 1991:** The Development of Impact-Oriented Climate Scenarios. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. **72.**, No. 4, pp. 481-490.
- Schüepp, M., 1954:** Die witterungsklimatologische Einteilung der Wetterlagen in Gebirgsländern. Wissenschaftlicher Bericht über die dritte Internationale Tagung für alpine Meteorologie in Davos-Platz, Schweiz, vom 12. bis 14. April 1954. *Wetter und Leben*, Jg. **6**, Heft 10-12, pp. 189-190.

- Schüepp, M., 1968:** Kalender der Wetter- und Witterungslagen von 1955 bis 1967. Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Nr. 11, 42 S.
- Schüepp, M., 1979:** Witterungsklimatologie. Klimatologie der Schweiz Band III. Beiheft zu den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (Jahrgang 1978). Herausgegeben von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Zürich, 93 S.
- Schwarb, M., 1996:** Witterungsanalyse anhand der Alpenwetterstatistik mit Bezug auf den Niederschlag; Periode 1945 - 1994. Berichte und Skripten Nr. 58, Geographisches Institut ETH Zürich. 88 S.
- SMA (Schweizerische Meteorologische Anstalt), 1985:** Alpenwetterstatistik. Witterungskalender. Beschreibung der einzelnen Parameter. Herausgegeben von der SMA, Abteilung Forschung, 26 S.
- Sneyers, R., 1992:** On the use of statistical analysis for the objective determination of climate change. *Meteorologische Zeitschrift*, Neue Folge **1**, pp. 247-256.
- Spekat, A., B. Heller-Schulze und M. Lutz, 1983:** Über Grosswetter und Markov-Ketten. *Meteorologische Rundschau* **36**, Gebrüder Bornträger, pp. 243-248.
- Van den Dool, H. M., 1989:** A new look at weather forecasting through analogues. *Monthly Weather Review*, Vol. **117**, pp. 2230-2247.
- Von Storch, H., E. Zorita and U. Cubasch, 1991:** Downscaling of global climate change estimates to regional scales: An application to iberian rainfall in wintertime. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report No. **64**. Hamburg, 36 S.
- Wanner, H., 1994a:** Die Alpen - Klima und Naturraum. Herausgegeben im Auftrag des Collegium generale von R. Moser und M. Svilar: Lebensräume. Naturwissenschaftliche und soziokulturelle Analysen. Universität Bern, Kulturhistorische Vorlesungen, Peter Lang Bern, Berlin, Frankfurt a. M., New York, Paris, Wien, pp. 71-106.
- Wanner, H., 1994b:** The atlantic - european circulation patterns and their significance for climate change in the alps. Report 1/94 to National Science Foundation.
- Wanner, H. and M. Beniston, 1995:** Approaches to the establishment of future climate scenarios for the alpine region. In: Guisan, A. Holten, J.I., Spichiger, R., Tessier, L. (Eds.): Potential Ecological Impacts of Climate Change in the Alps and Fennoscandian Mountains. An Annex to the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) Second Assessment Report, Working Group II-C (Impacts of Climate Change on Mountain Regions).
- Warnecke, G., 1991:** Meteorologie und Umwelt. Eine Einführung. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Willfarth, J., 1959:** Erfahrungsbericht zur Schüepp'schen Wetterstatistik im Ostalpenraum. *Bericht des Deutschen Wetterdienstes*, 8. Band, Nr. **54**, Offenbach am Main, pp. 174-176.
- Willmott, C. J., 1987:** Synoptic weather-map classification: Correlation versus Sums-of-Squares. *The Professional Geographer*, Vol. **39**, Nr. 2, pp. 205-207.
- Yarnal, B., 1993:** Synoptic climatology in environmental analysis. Belhaven Press, London and Florida, 195 S.

Anhang

Mittelkarten der Grosswetterlagen pro Monat

Die Mittelkarten der Grosswetterlagen stellen Karten der mittleren Druck- und Geopotentialverteilung dar, welche die über die Jahre 1946 bis 1989 gemittelten monatlichen Druck- und Geopotentialwerte enthalten.

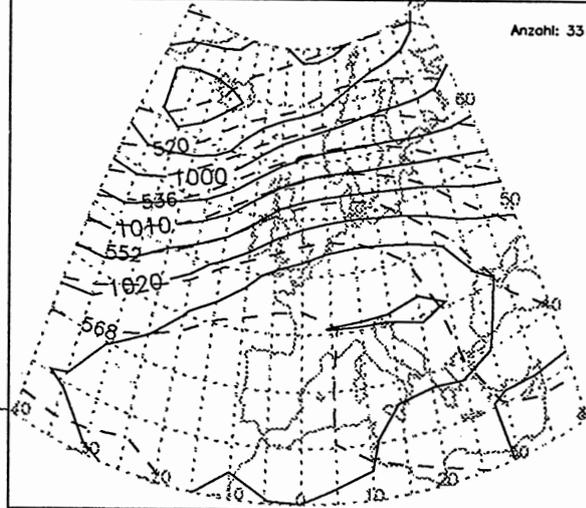
Der verwendete Gebietsausschnitt umfasst die Gitterpunkte (mit den dazugehörigen Datensätzen) von 40° W bis 40° E und 30° N bis 70° N im Gitternetzabstand von 5° in meridionaler und zonaler Richtung. In die Mittelung wurden nur Tage miteinbezogen, die innerhalb einer Sequenz einer bestimmten Grosswetterlage auftraten. Da es sich beim ersten und letzten Tag einer Sequenz meist um Übergangstage handelt, die das Muster der betreffenden Grosswetterlage nicht in typischer Ausprägung zeigen, wurden diese Tage nicht für die Mittelkarten gewertet. Die Anzahl Tage, die für die Berechnung einer Mittelkarte verwendet wurde, ist in allen Karten in der oberen rechten Ecke unter 'Anzahl' vermerkt.

Die Berechnung der Mittelkarten erfolgte für jede Grosswetterlage einzeln, durch Aufsummieren der mittleren Druck- und Geopotentialwerte aller im betrachteten Monat aufgetretenen Tage der entsprechenden Grosswetterlage. Die erhaltene Summe wird anschliessend dividiert durch die Anzahl Fälle (Tage) an denen die Grosswetterlage im entsprechenden Monat des Zeitraums 1946-89 aufgetreten ist. Da in der Zeitspanne Januar 1946 bis Juni 1989 nicht in jedem Monat von jeder Grosswetterlage mindestens eine 3-tägige Sequenz aufgetreten ist, fehlen die Karten der nachfolgend aufgezählten Grosswetterlagen.

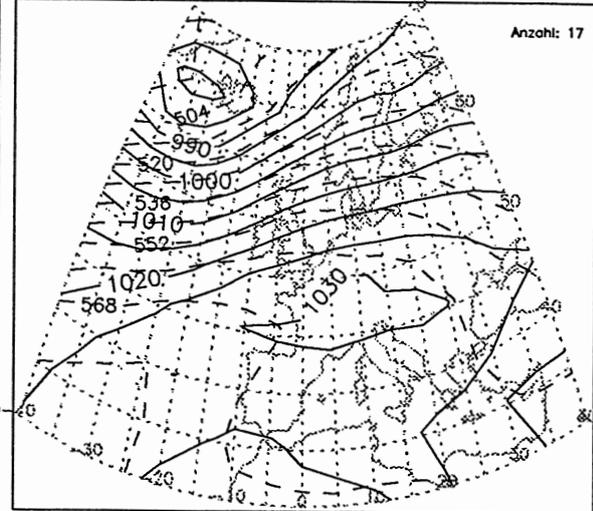
Grosswetterlage	Fehlende Mittelkarten
WA	Juli, September, Oktober und Dezember
NEA	Oktober
NEZ	Februar
HNFA	Oktober
HNFZ	Oktober
SEA	Juli
SEZ	Juli und August
SA	Juli
SZ	Mai, Juli und August

Aus den so berechneten monatlichen mittleren Druck- und Geopotentialwerten an den ausgewählten Gitternetzpunkten konnten für alle Grosswetterlagen Isobaren- (Druck) und Isohypsenkarten (Geopotential) hergestellt werden. Die Isobaren (durchgezogene Linien) sind im Abstand von 5 hPa, die Isohypsen (gestrichelte Linien) im Abstand von 8 geopotentiellen Dekametern [gpdam] eingezeichnet.

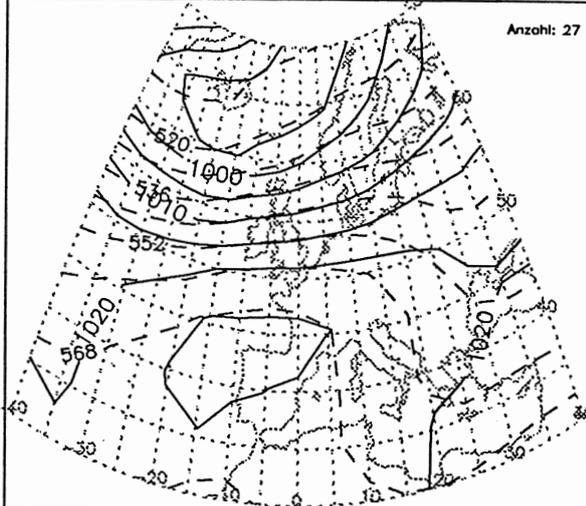
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 1



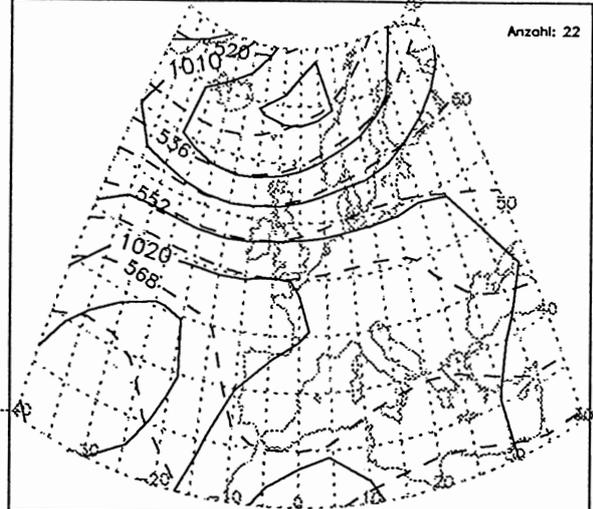
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 2



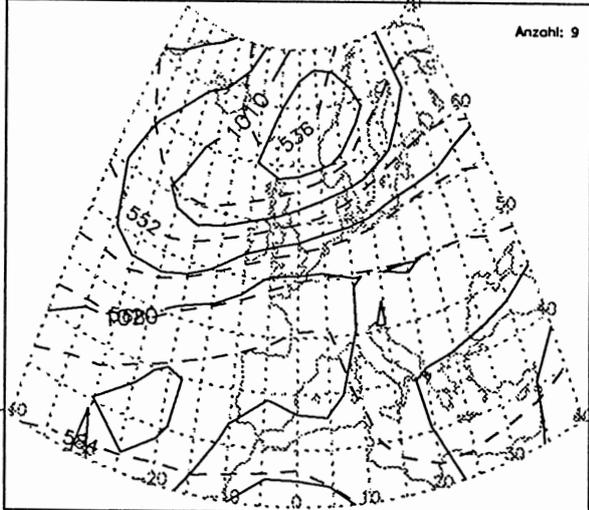
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 3



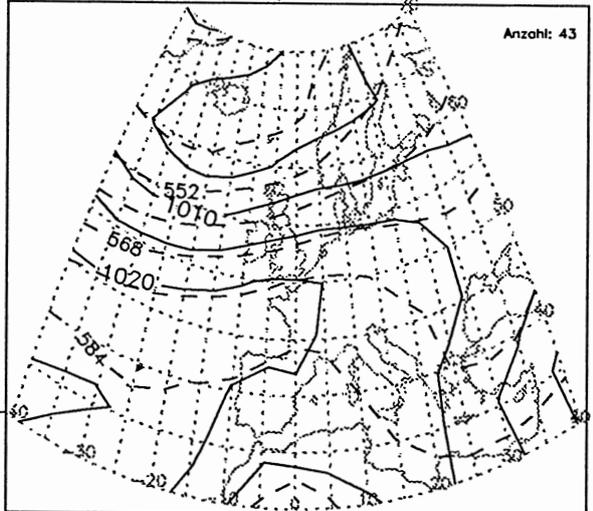
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 4



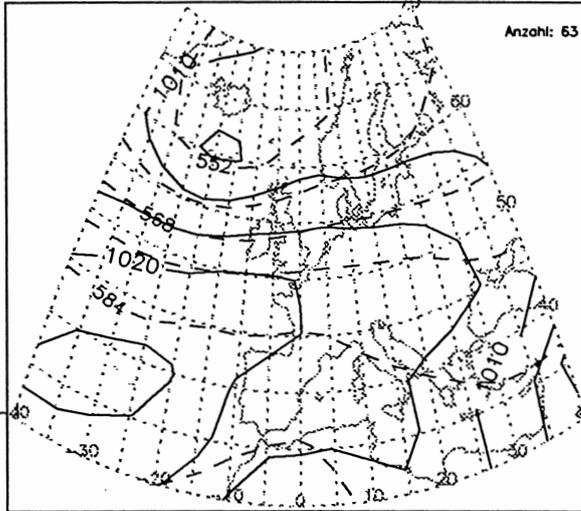
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 5



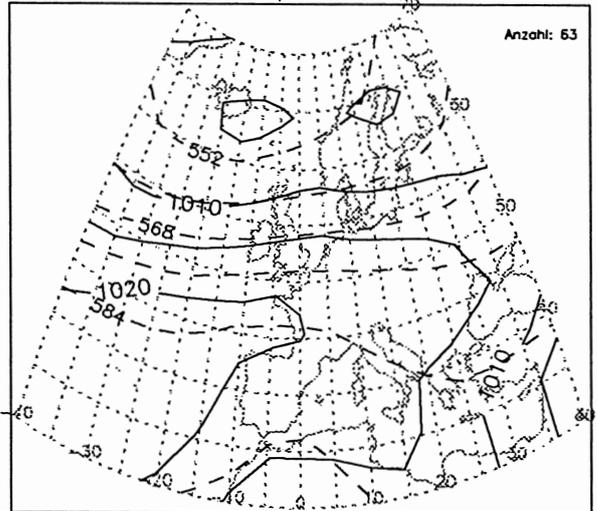
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 6



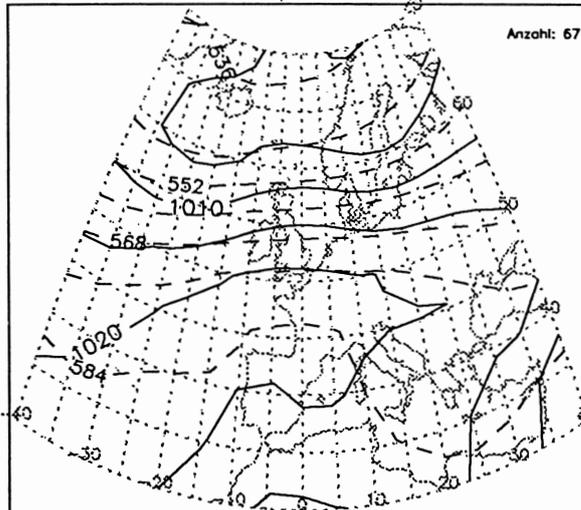
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 7



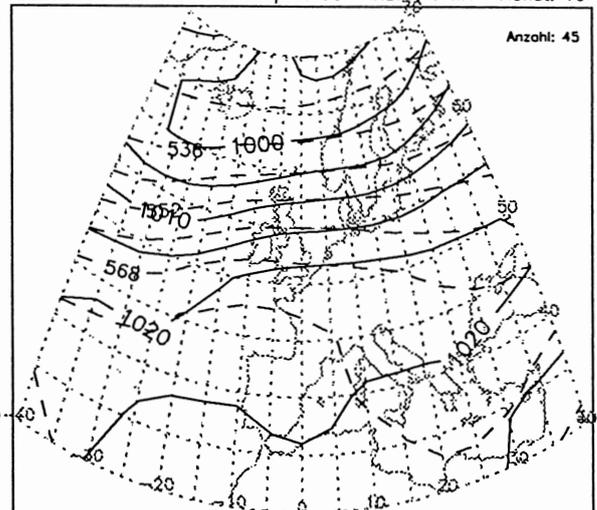
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 8



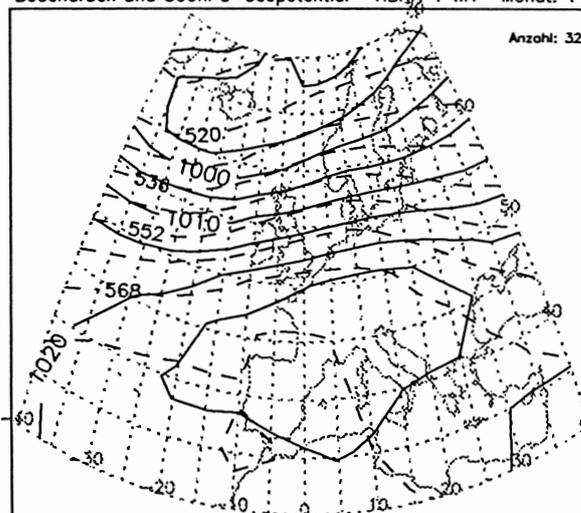
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 9



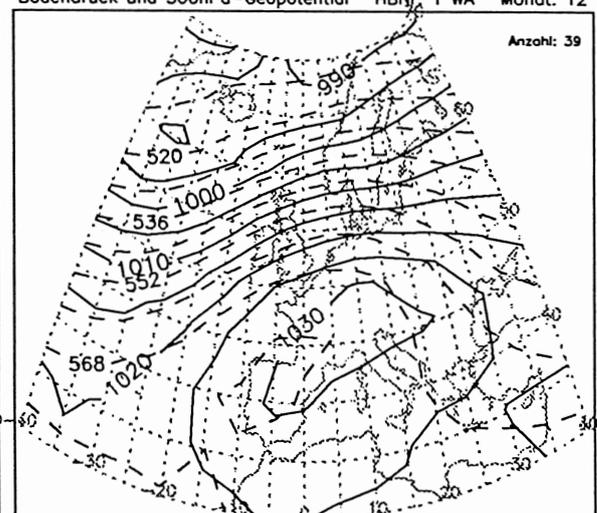
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 10



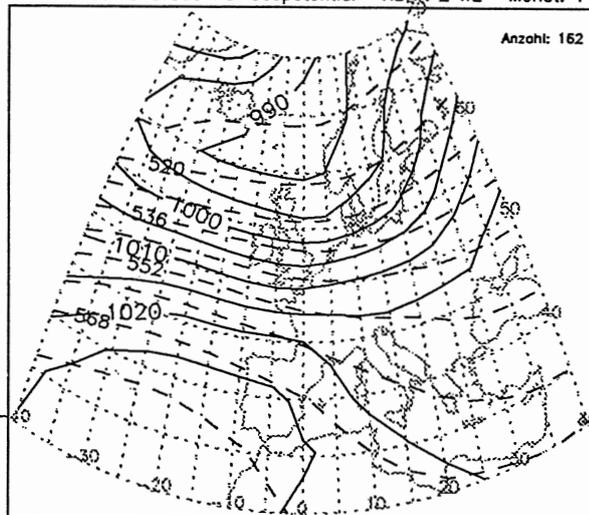
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 11



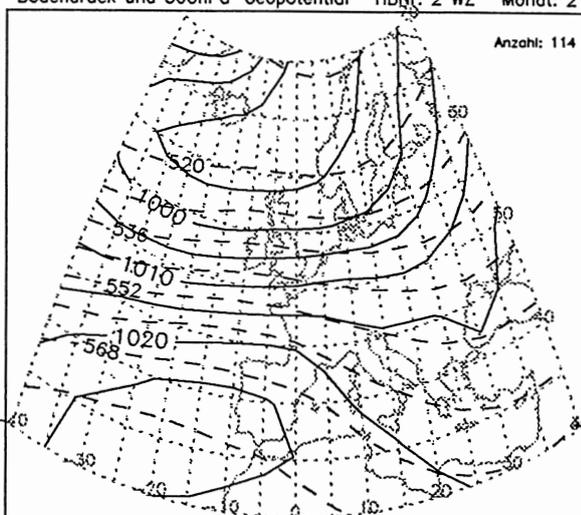
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 1 WA Monat: 12



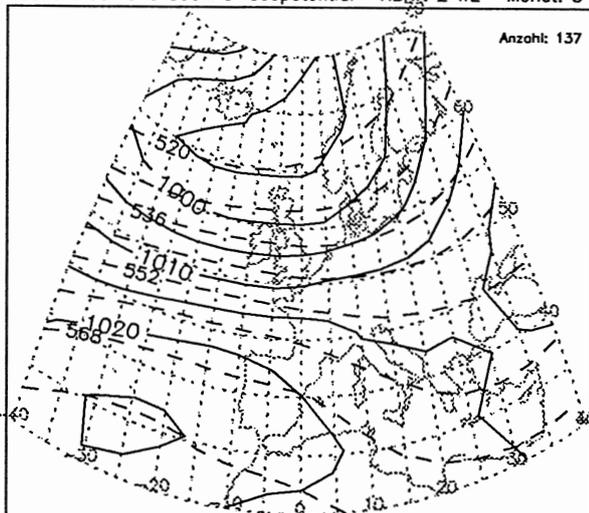
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 1



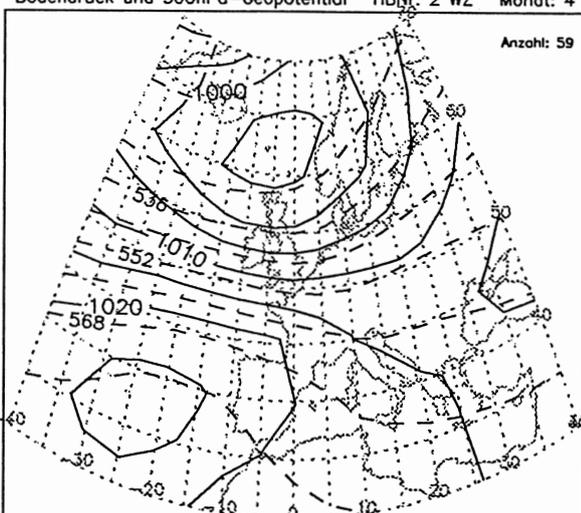
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 2



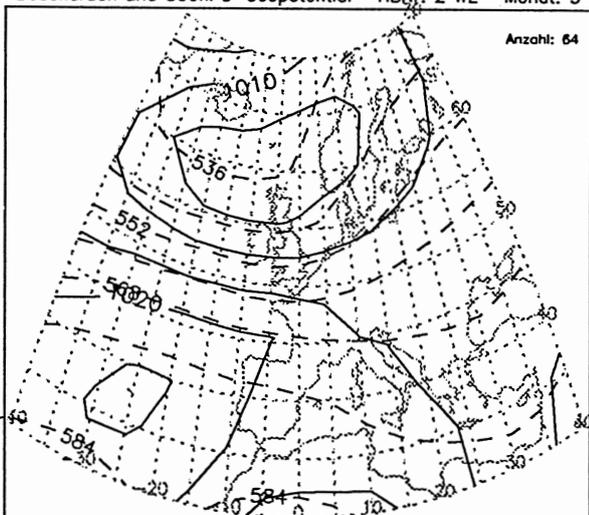
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 3



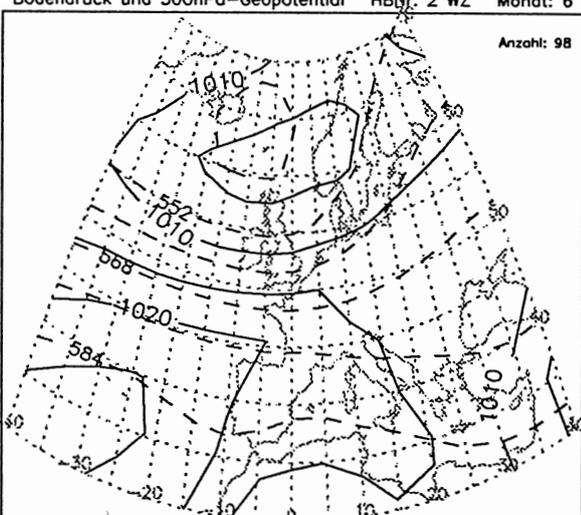
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 4



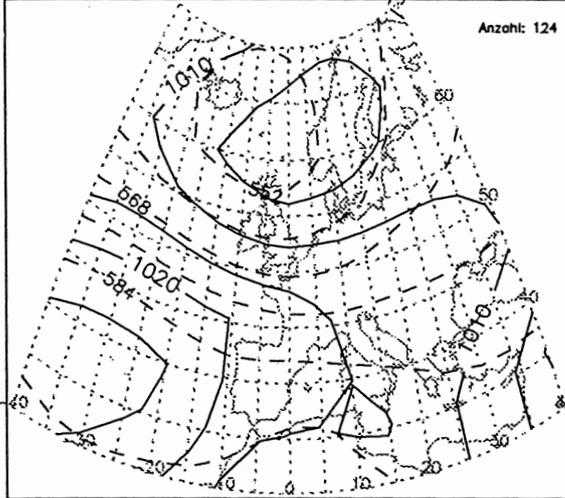
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 5



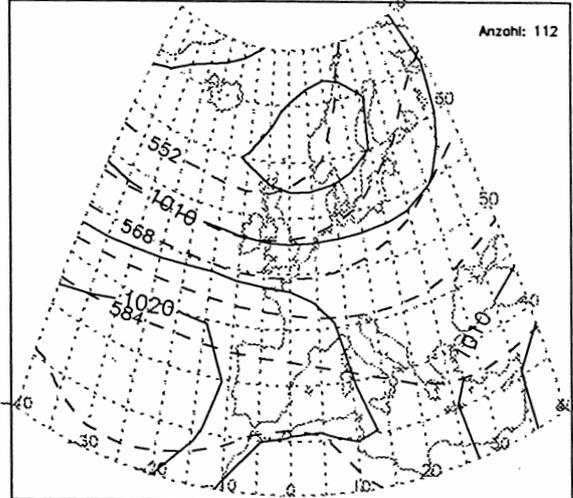
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 6



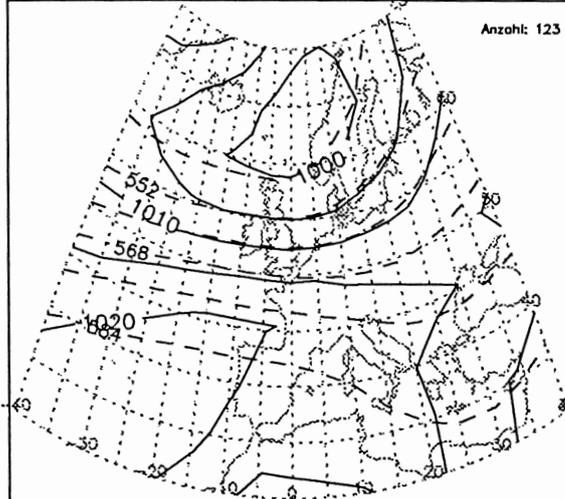
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 7



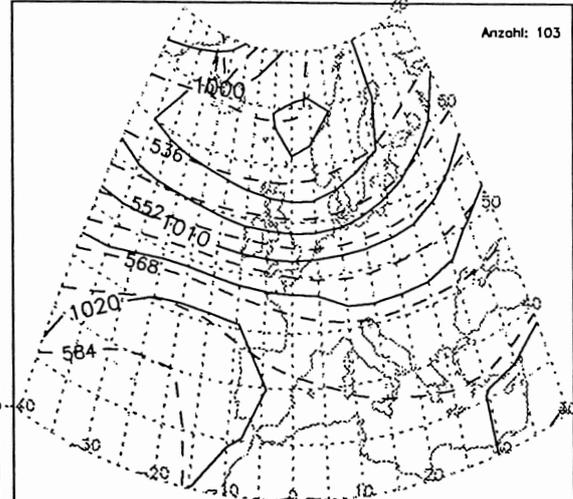
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 8



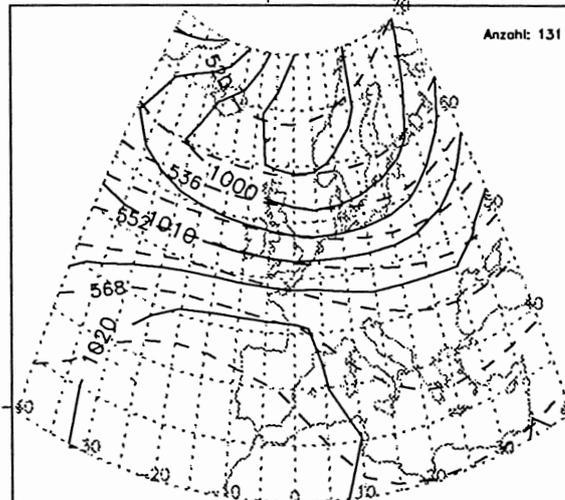
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 9



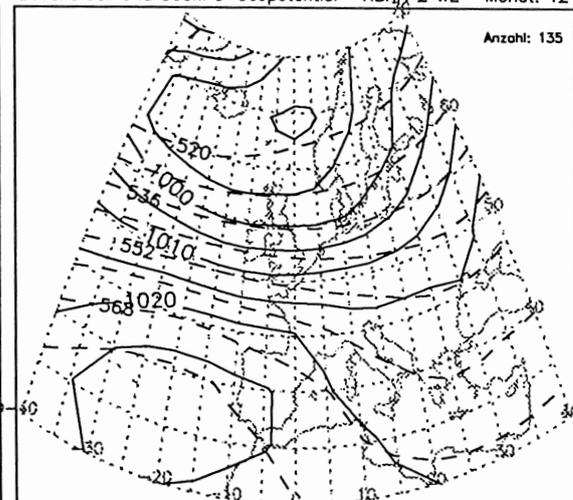
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 10



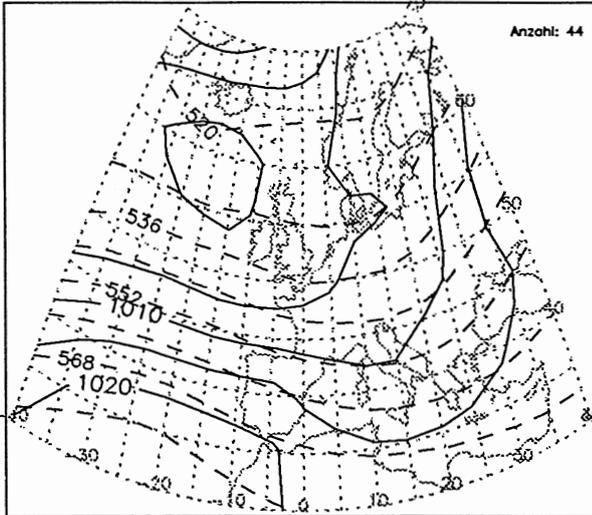
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 11



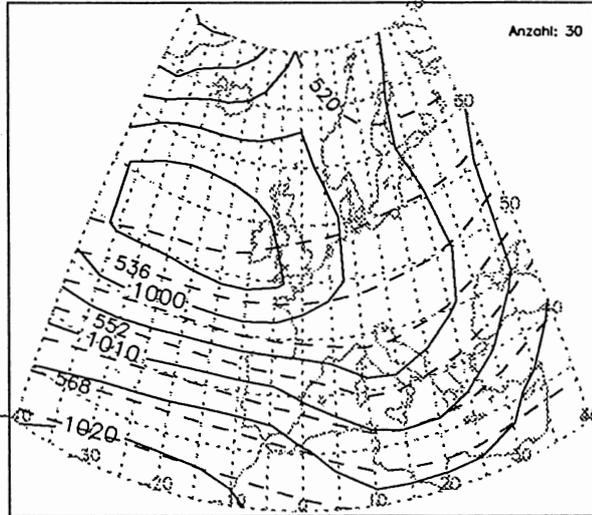
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 2 WZ Monat: 12



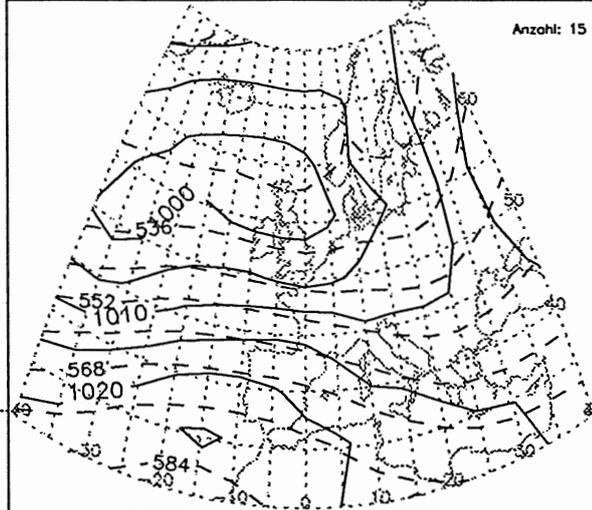
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 1



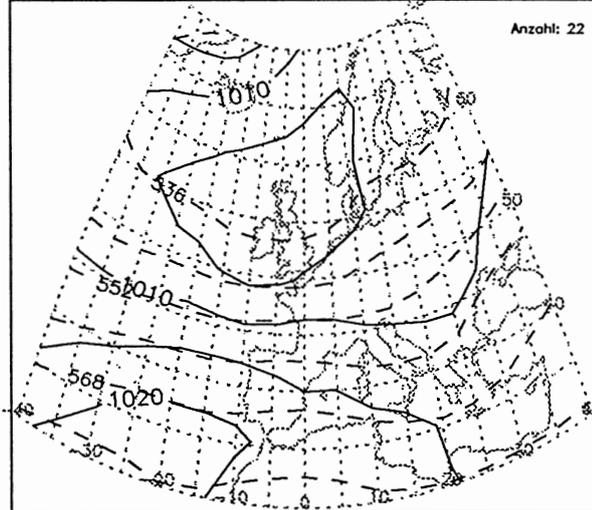
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 2



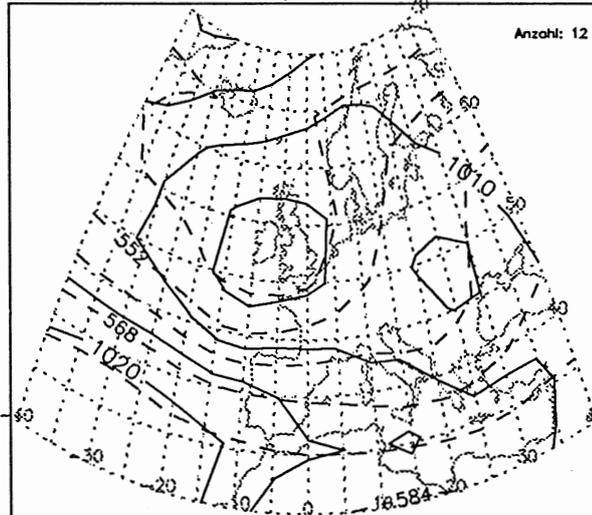
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 3



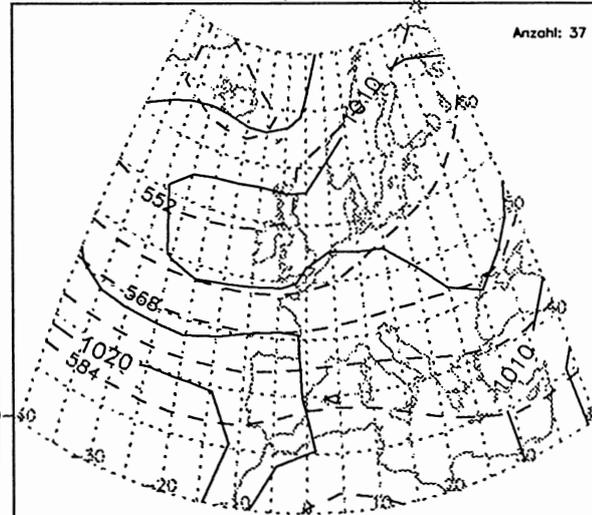
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 4



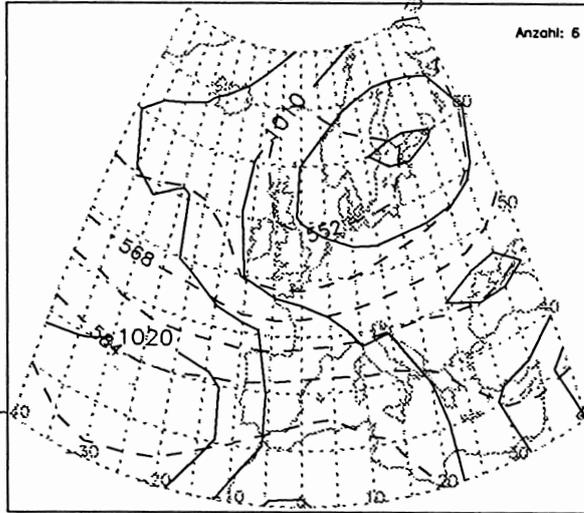
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 5



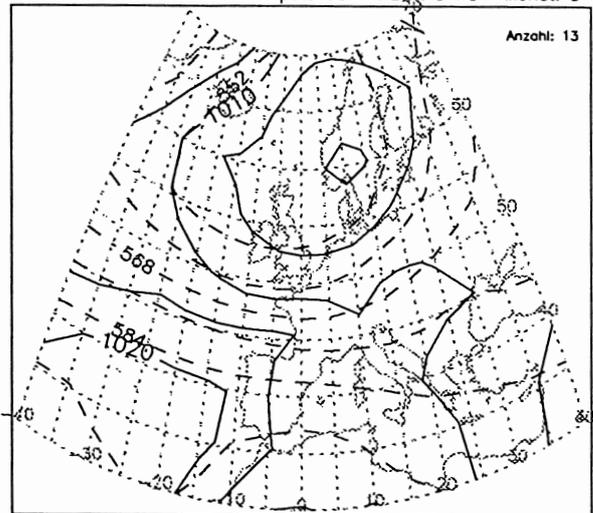
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 6



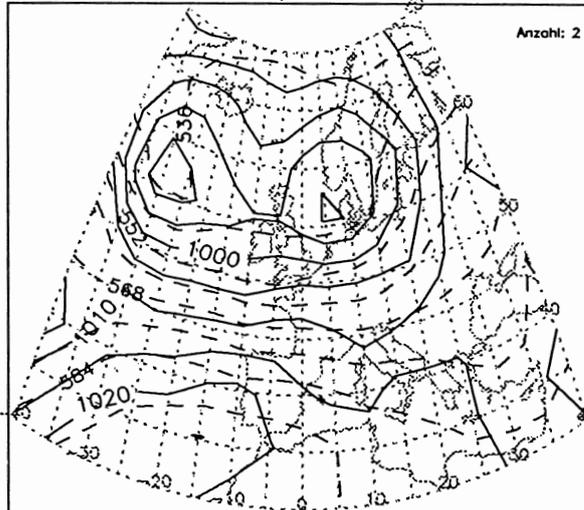
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 7



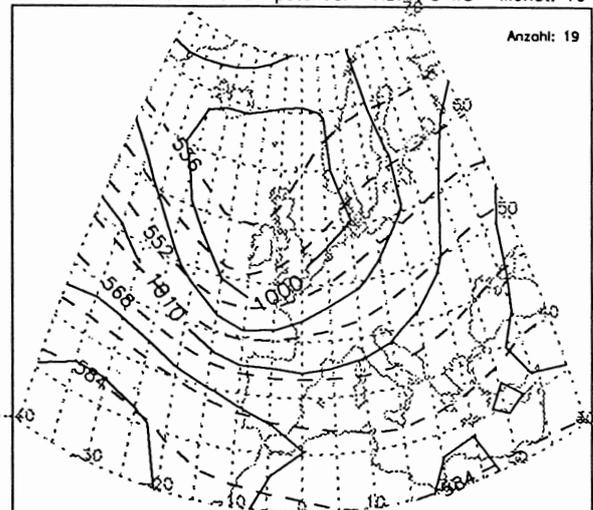
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 8



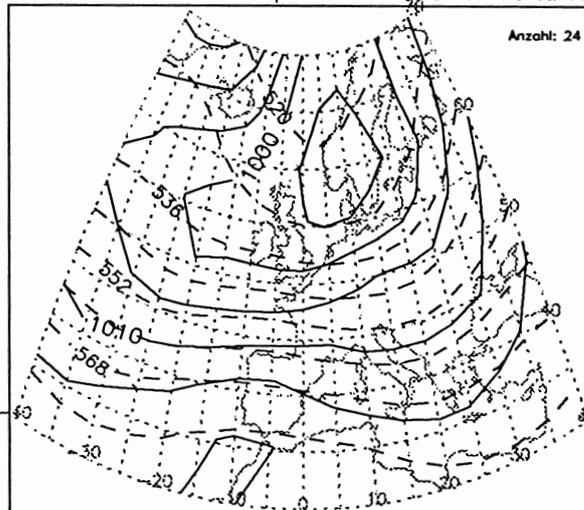
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 9



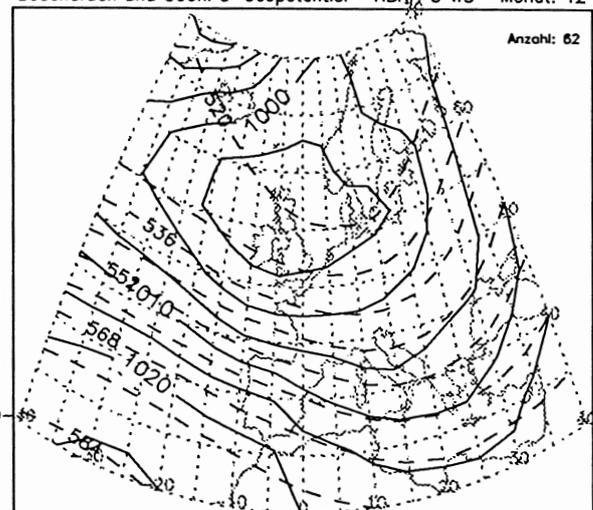
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 10



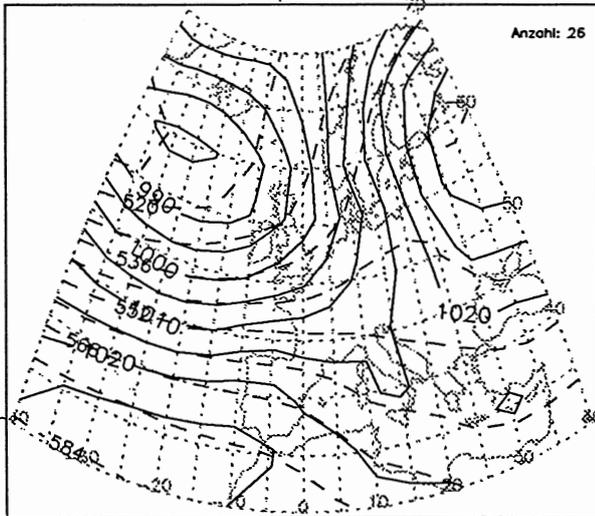
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 11



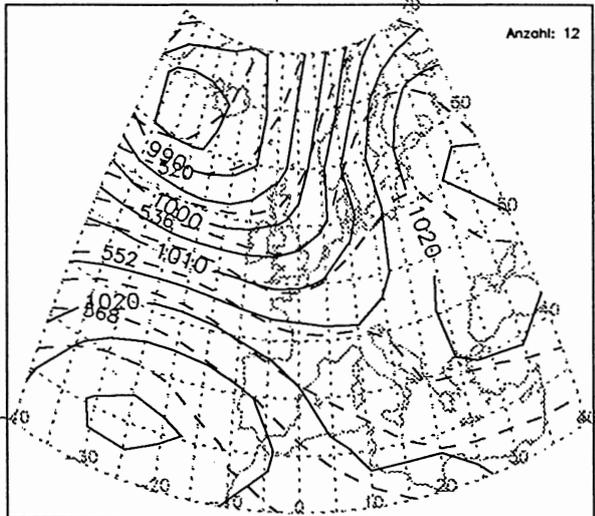
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 3 WS Monat: 12



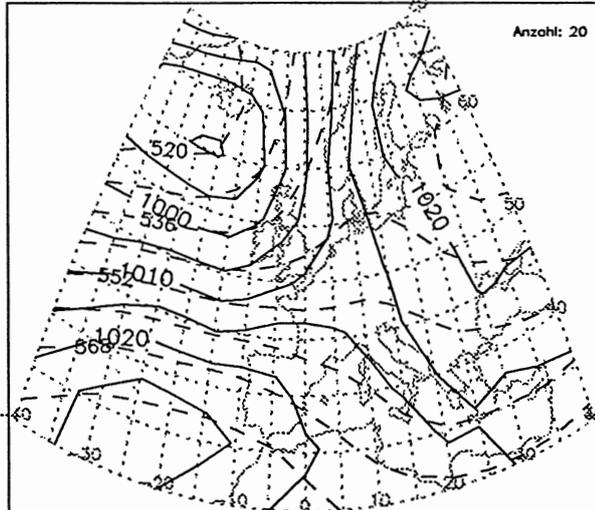
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 1



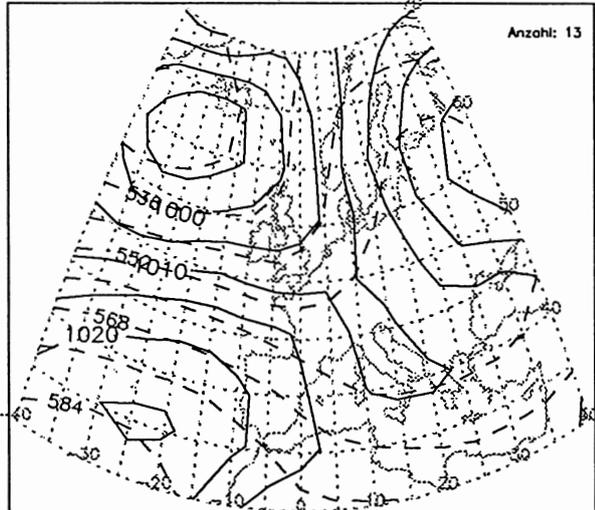
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 2



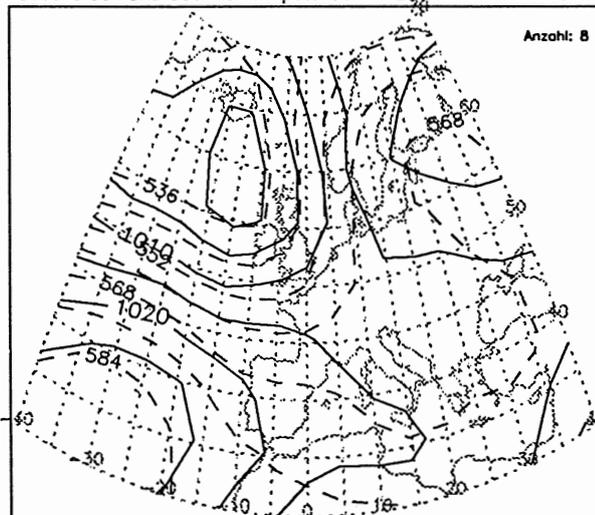
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 3



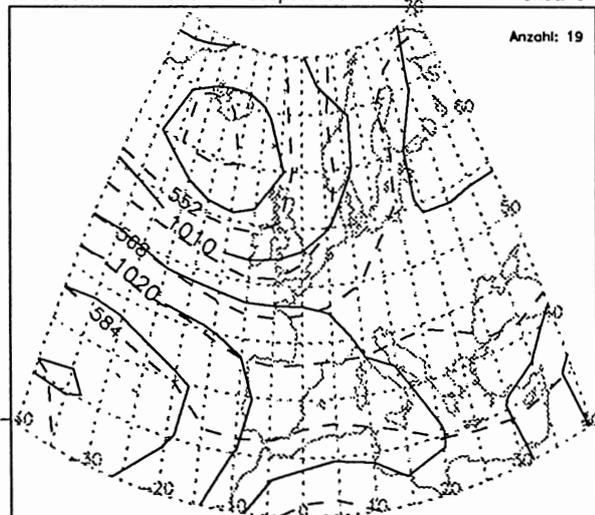
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 4



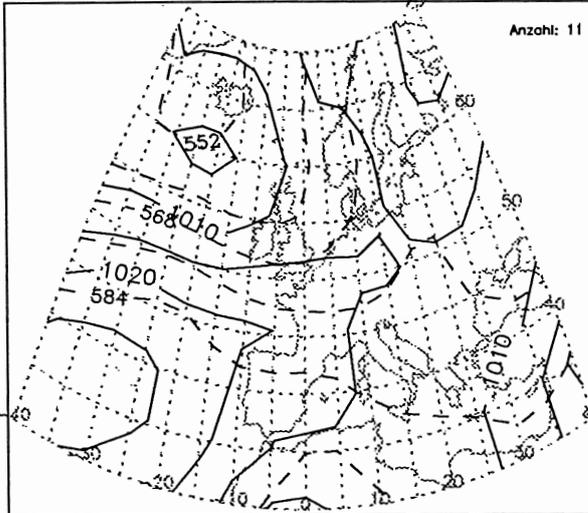
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 5



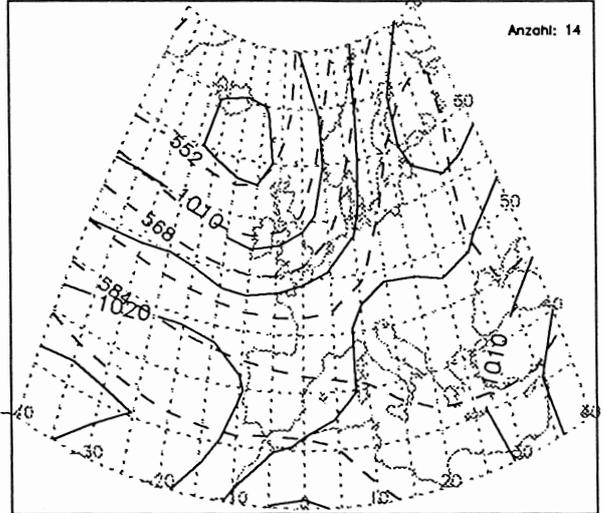
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 6



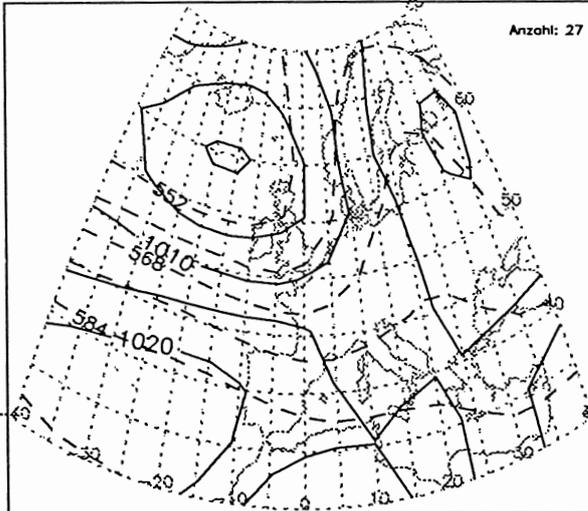
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 7



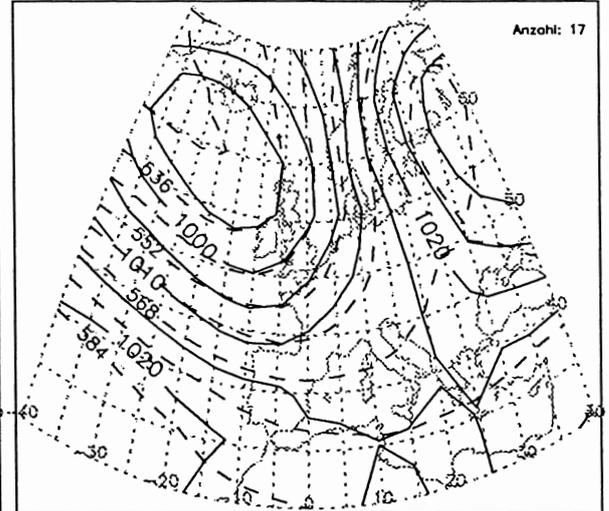
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 8



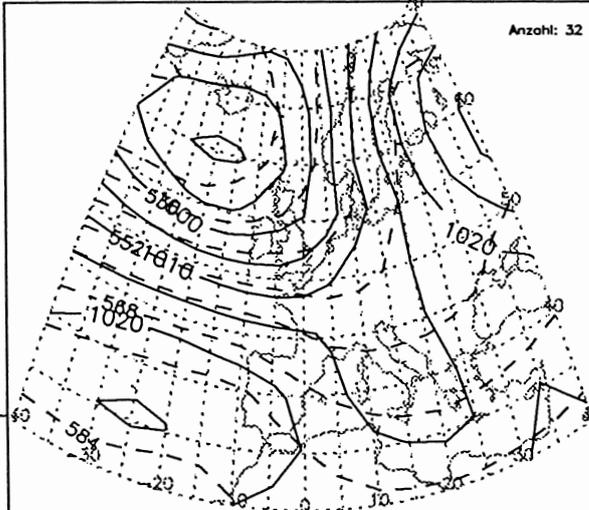
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 9



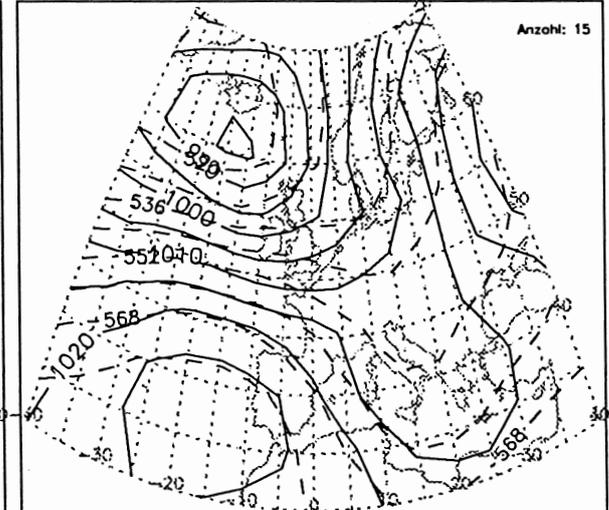
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 10



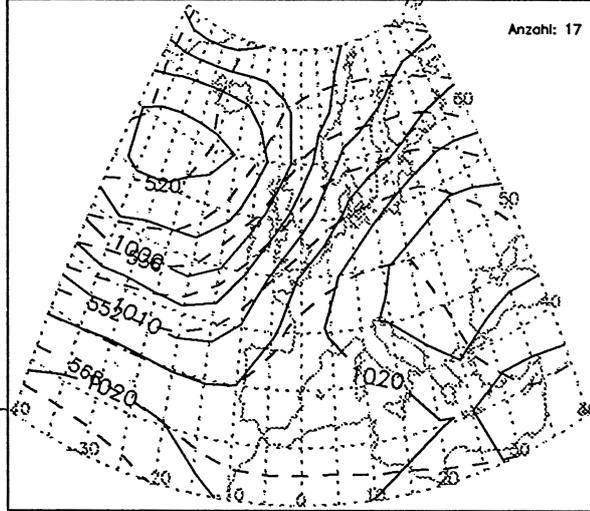
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 11



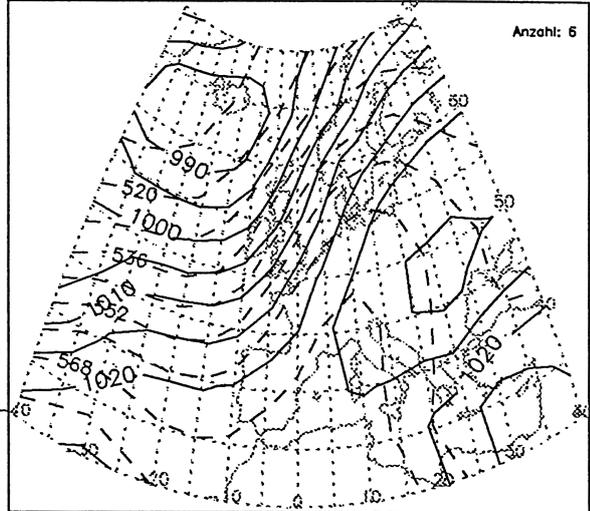
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 4 WW Monat: 12



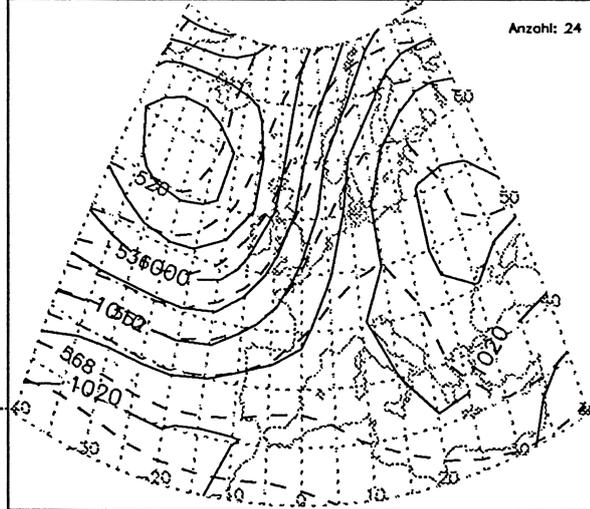
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 1



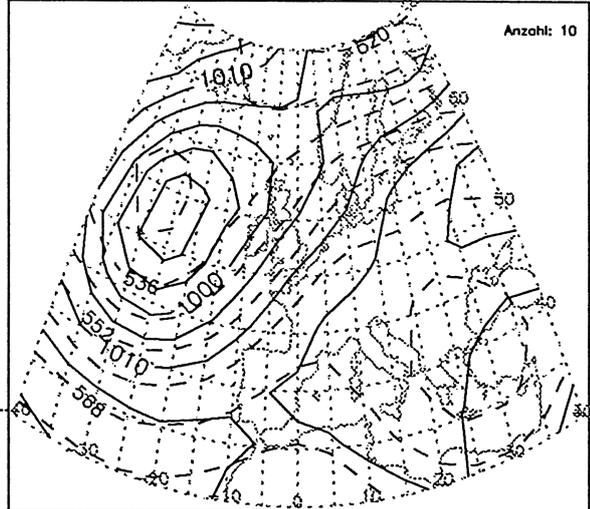
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 2



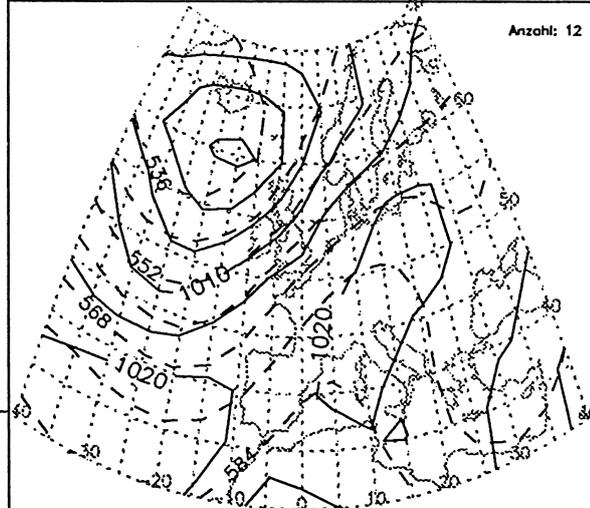
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 3



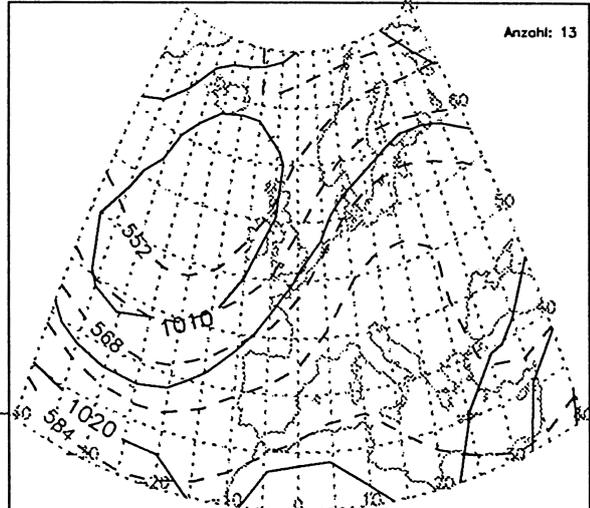
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 4



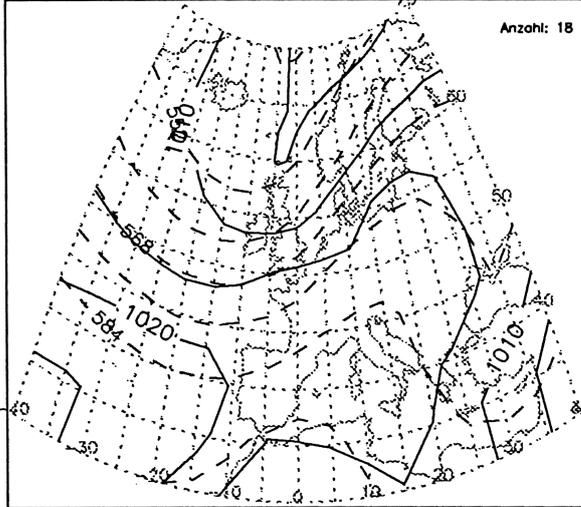
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 5



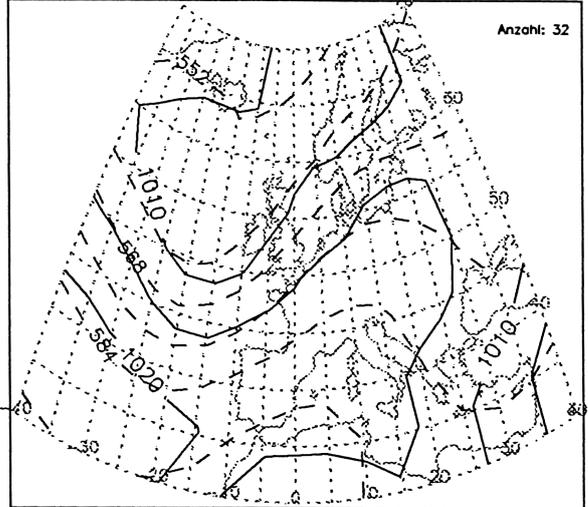
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 6



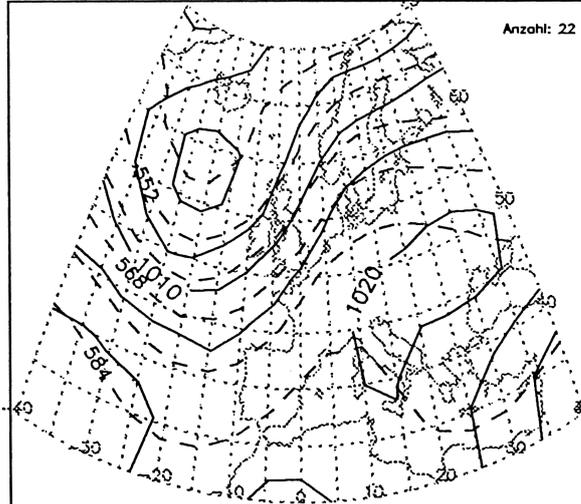
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 7



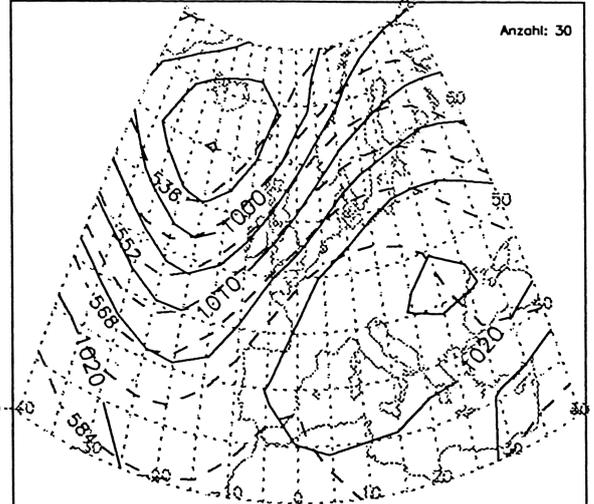
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 8



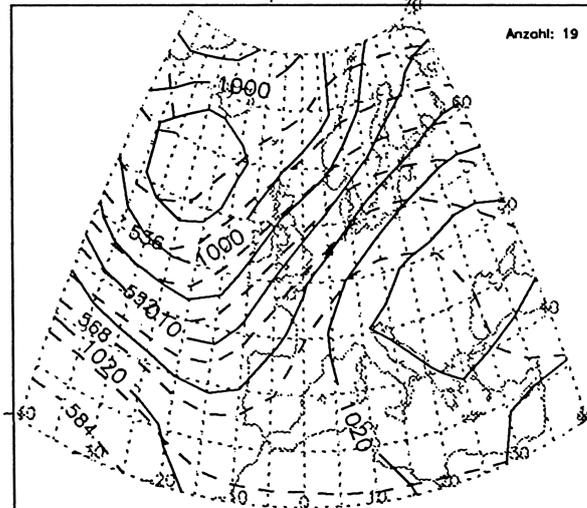
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 9



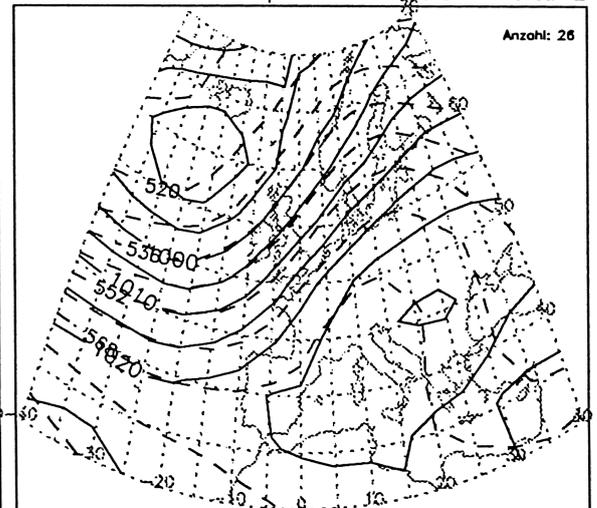
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 10



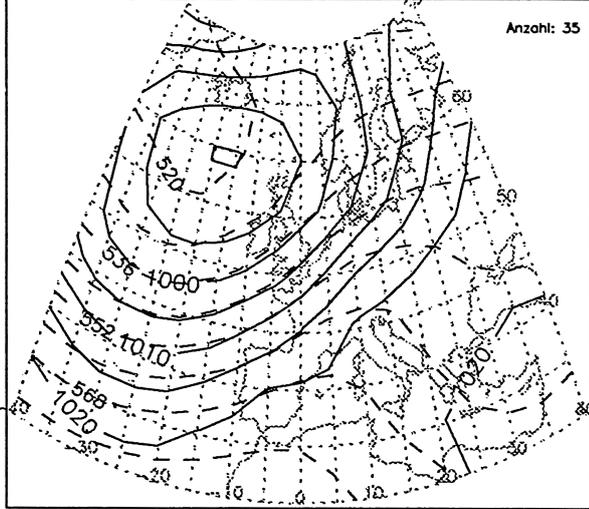
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 11



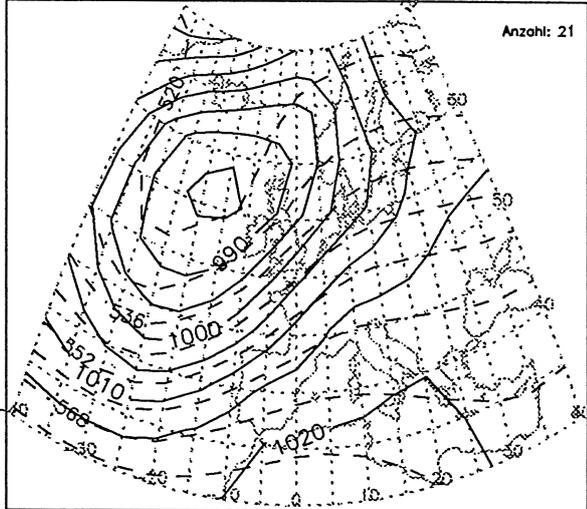
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 5 SWA Monat: 12



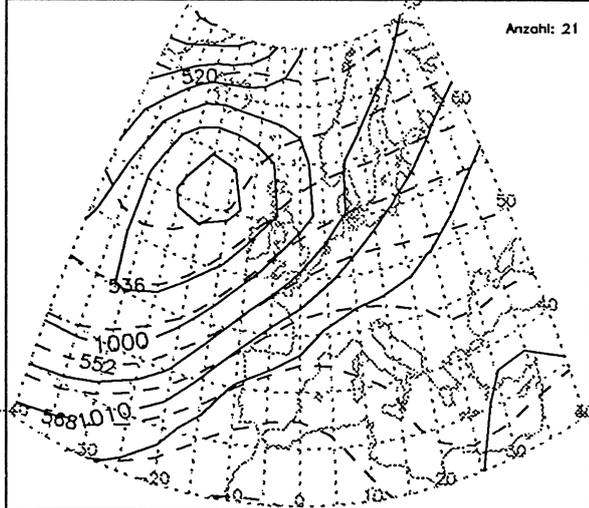
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 1



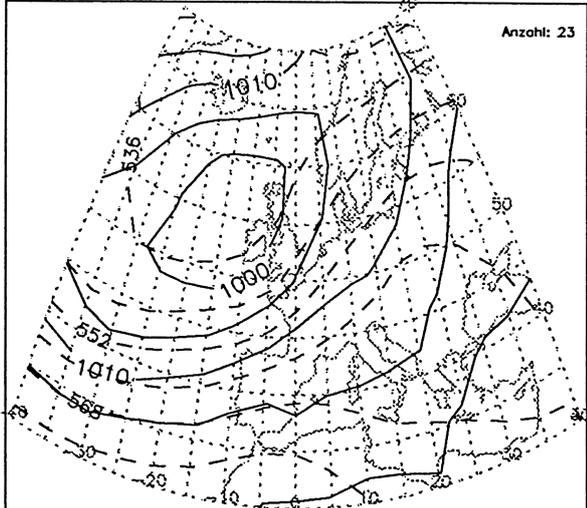
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 2



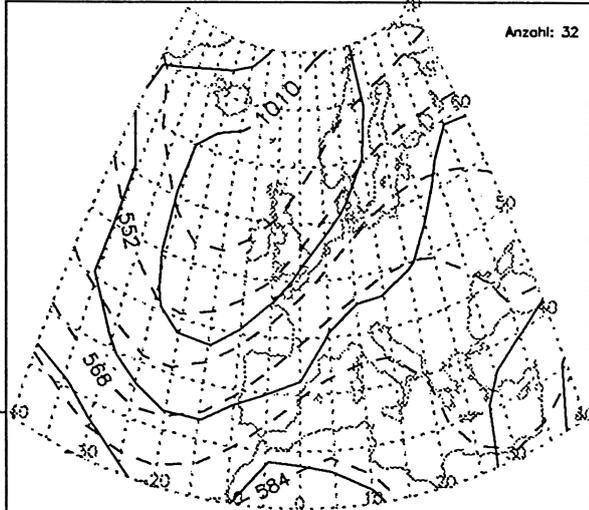
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 3



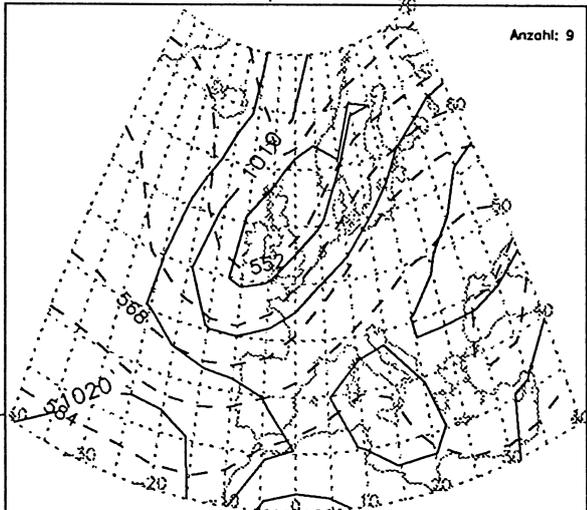
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 4



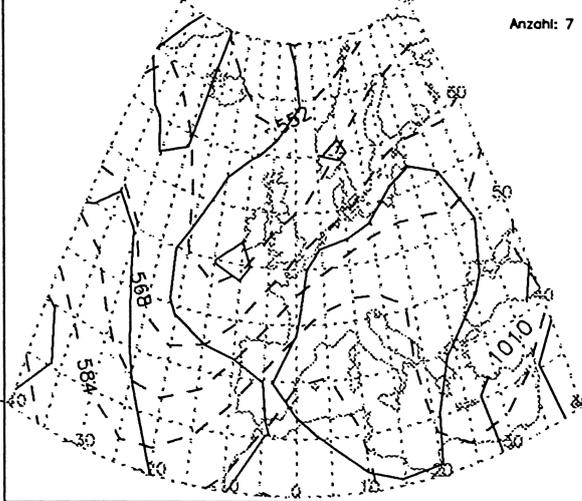
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 5



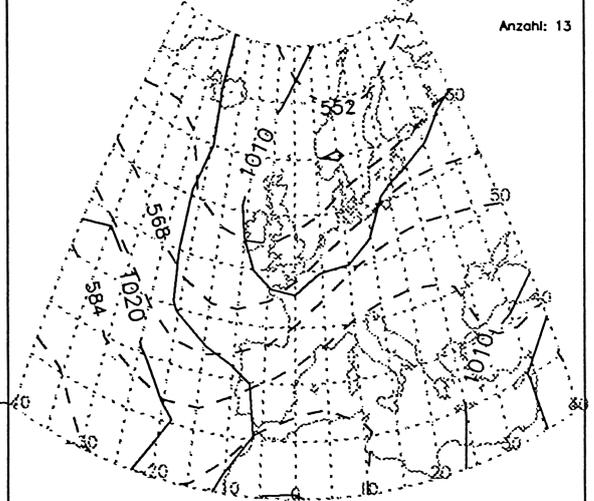
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 6



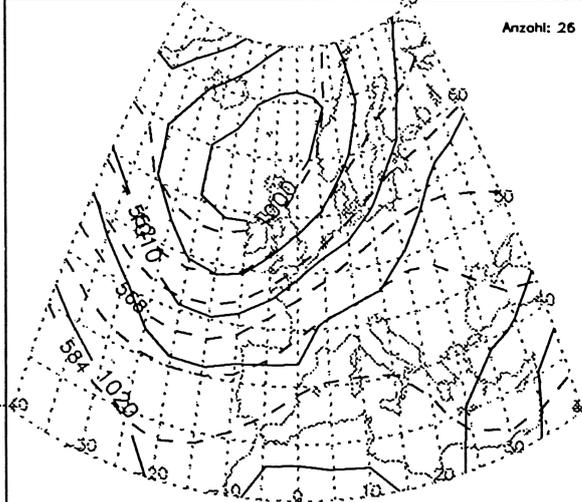
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 7



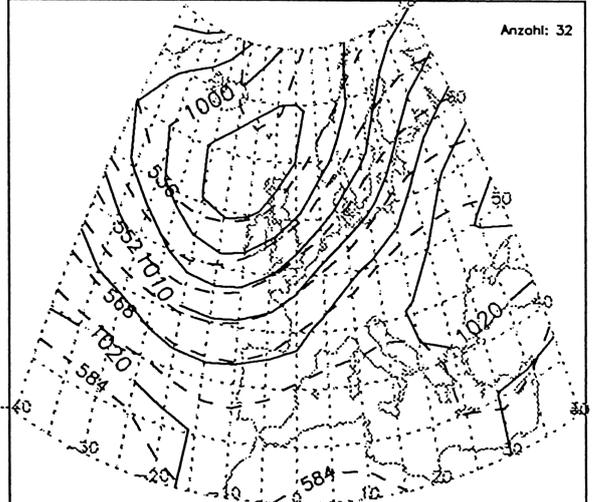
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 8



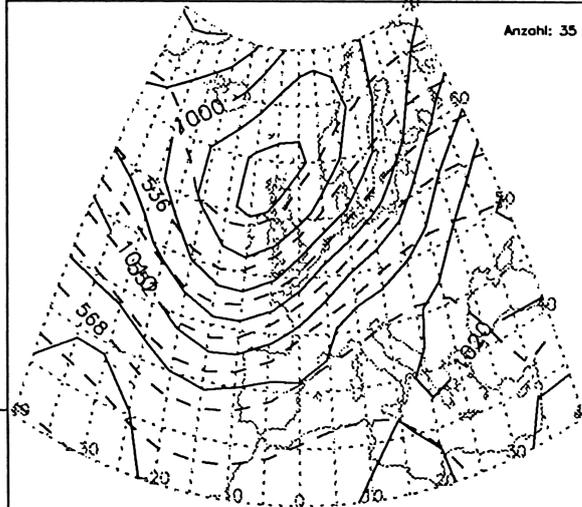
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 9



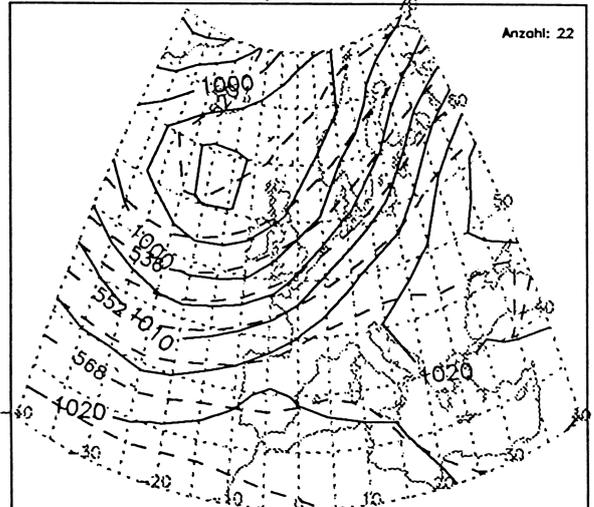
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 10



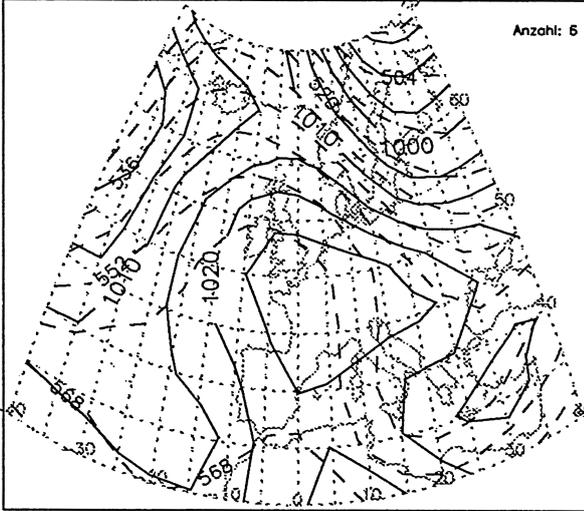
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 11



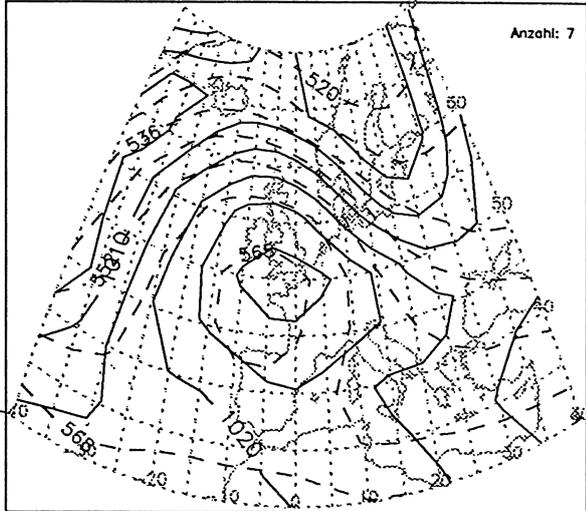
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 6 SWZ Monat: 12



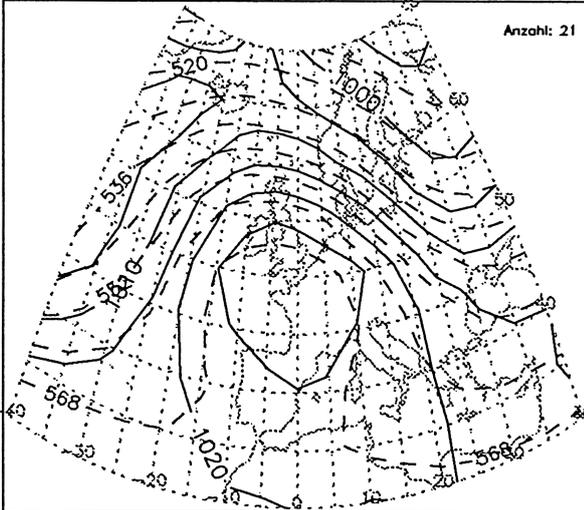
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 1



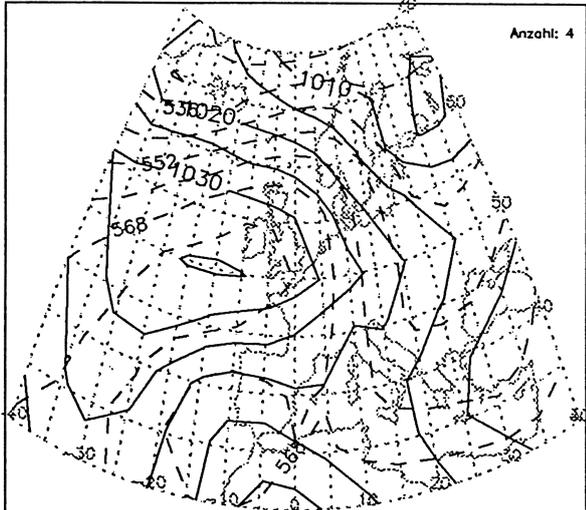
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 2



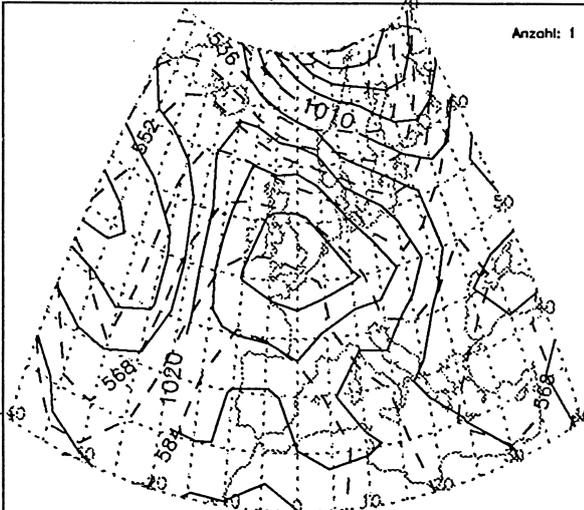
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 3



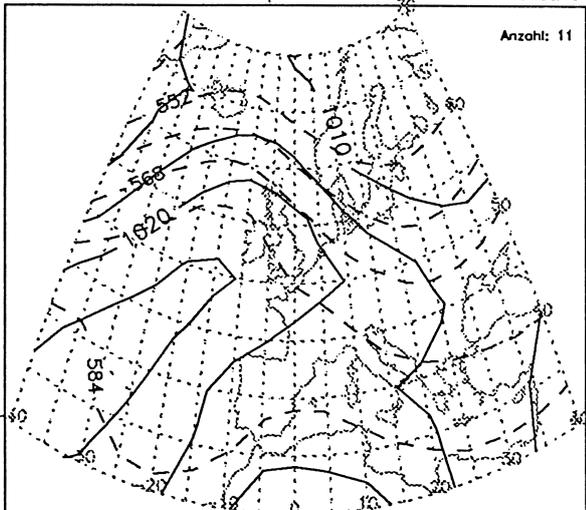
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 4



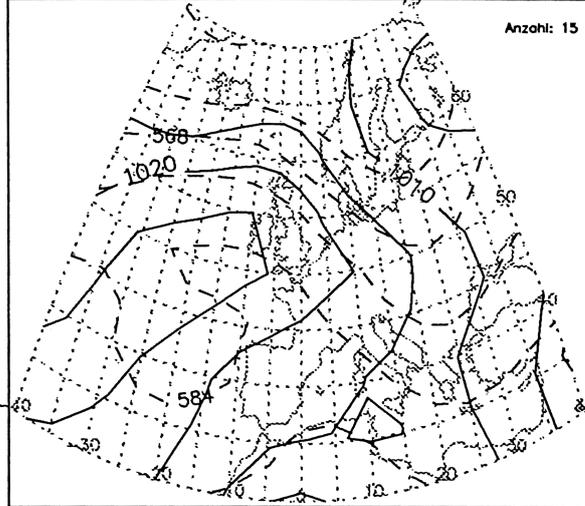
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 5



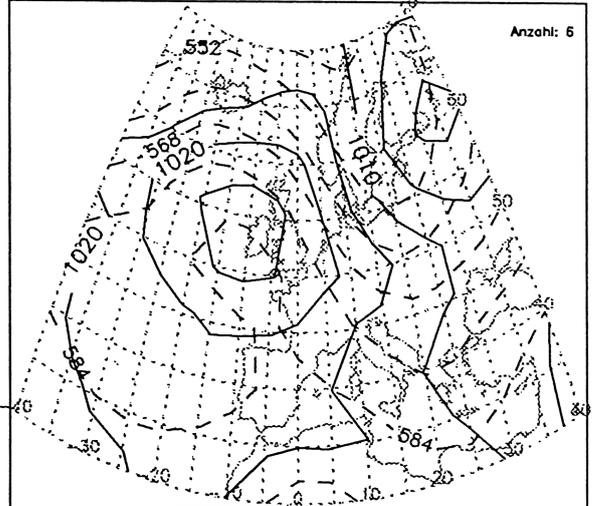
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 6



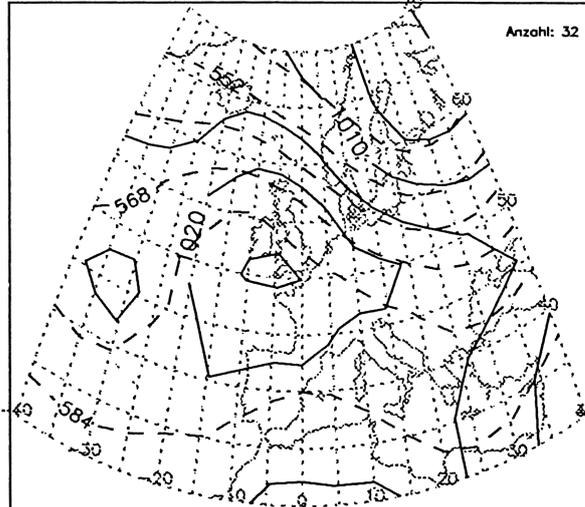
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 7



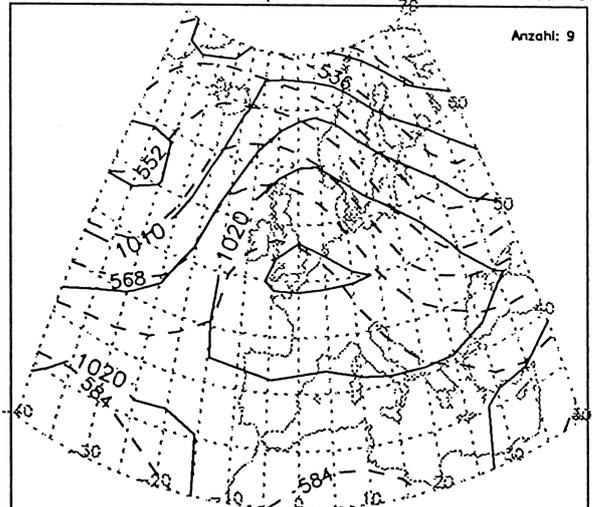
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 8



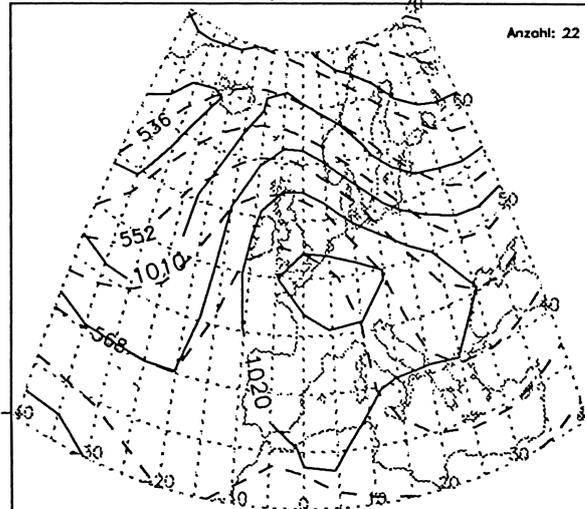
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 9



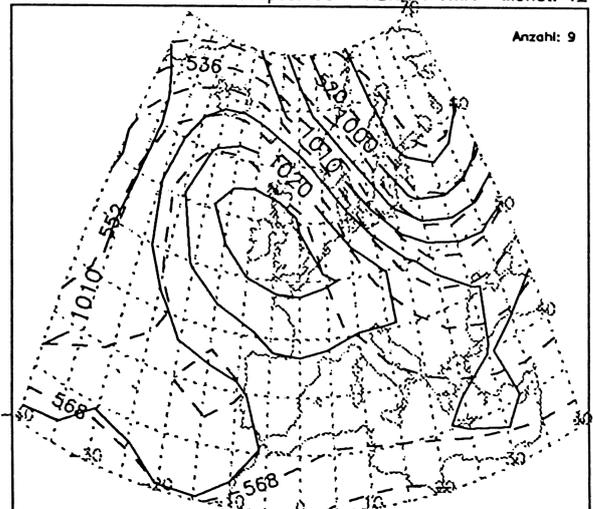
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 10



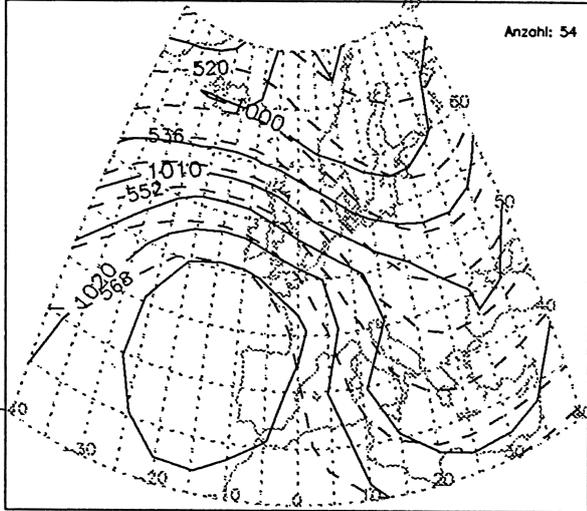
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 11



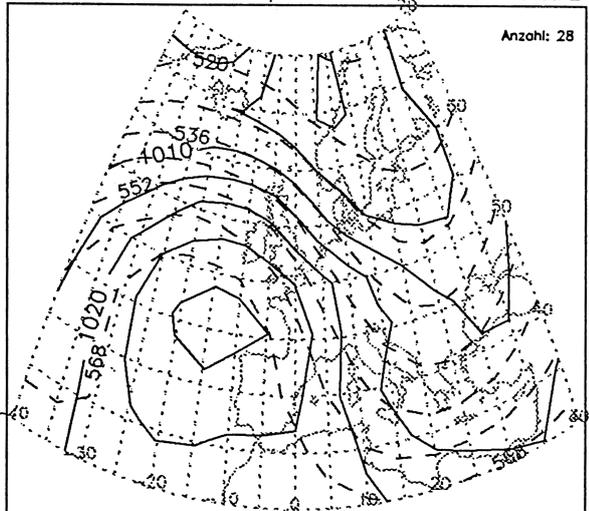
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 7 NWA Monat: 12



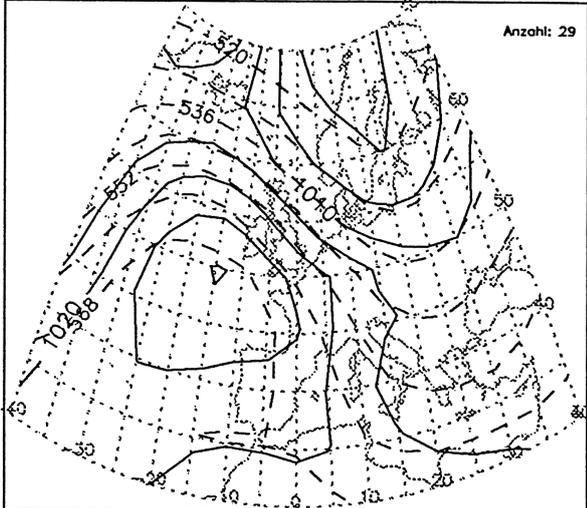
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 1



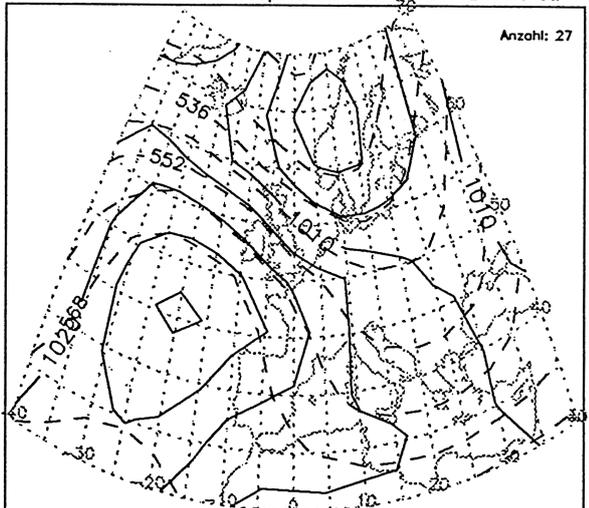
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 2



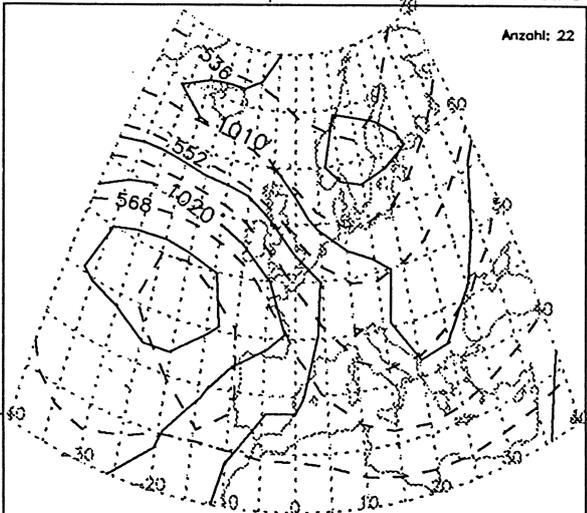
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 3



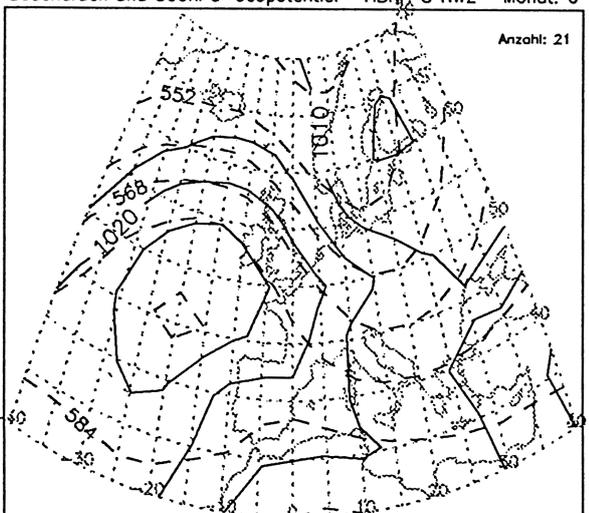
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 4



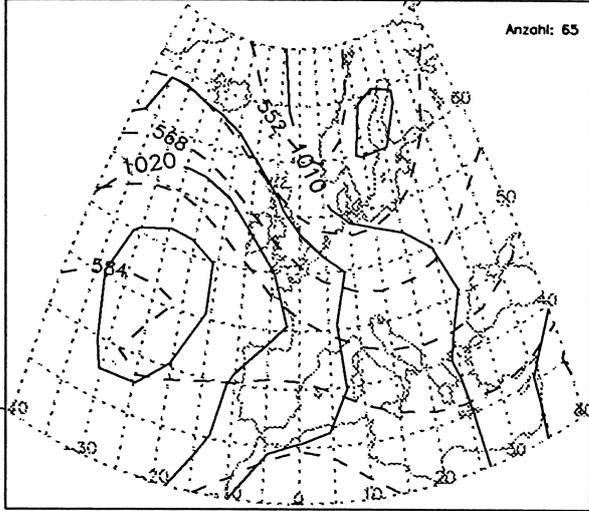
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 5



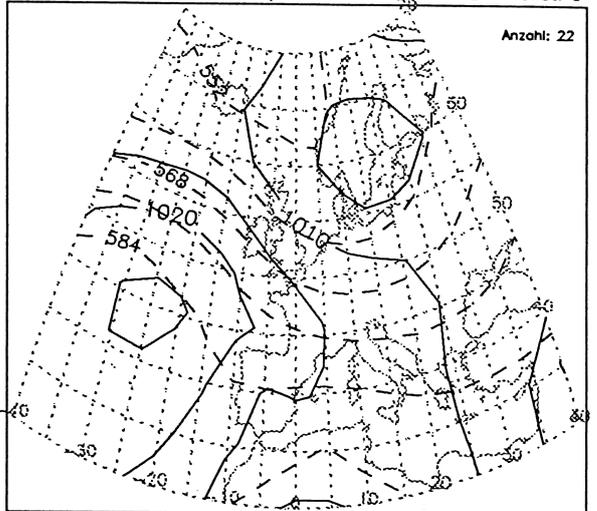
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 6



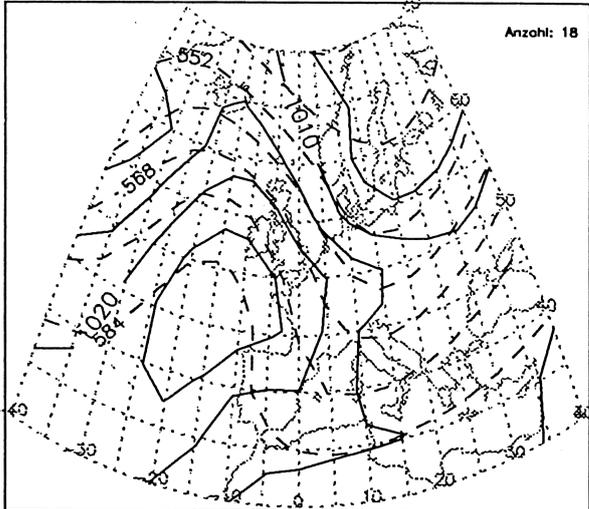
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 7



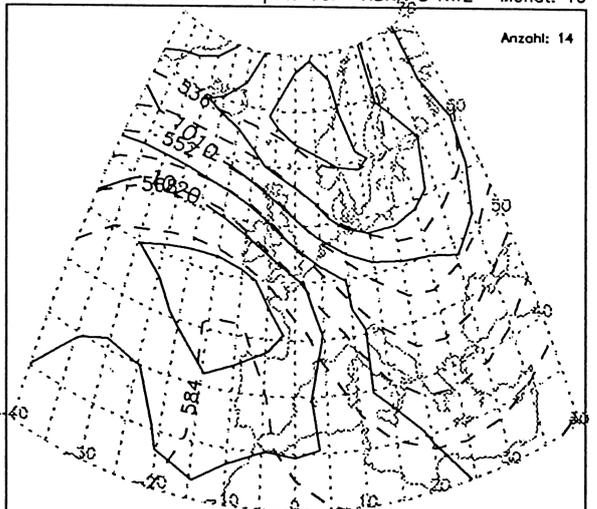
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 8



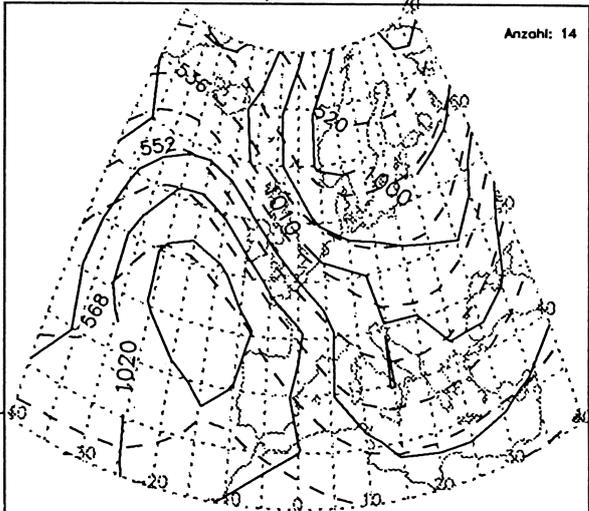
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 9



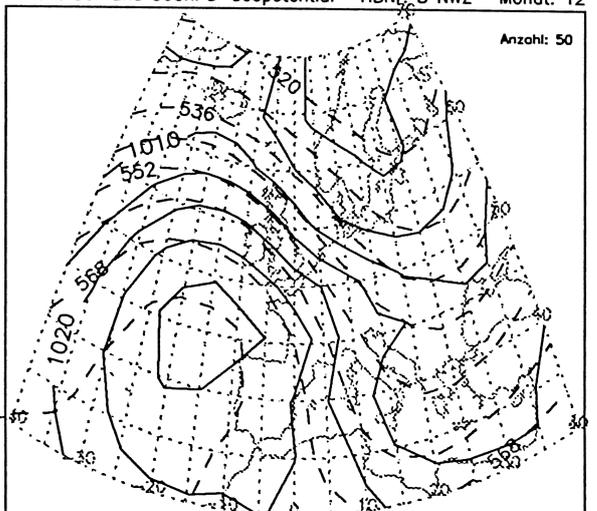
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 10



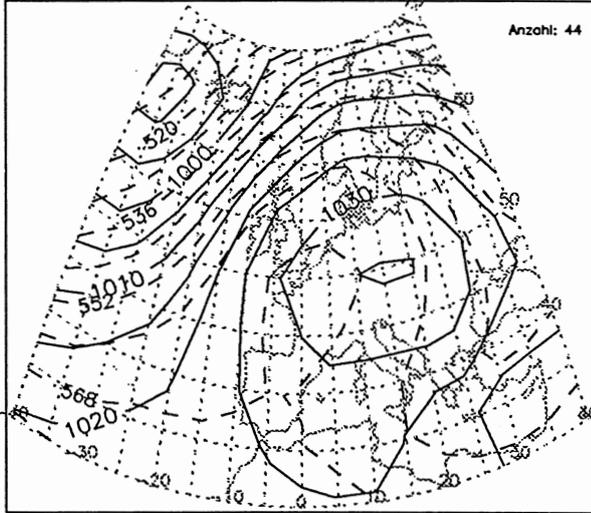
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 11



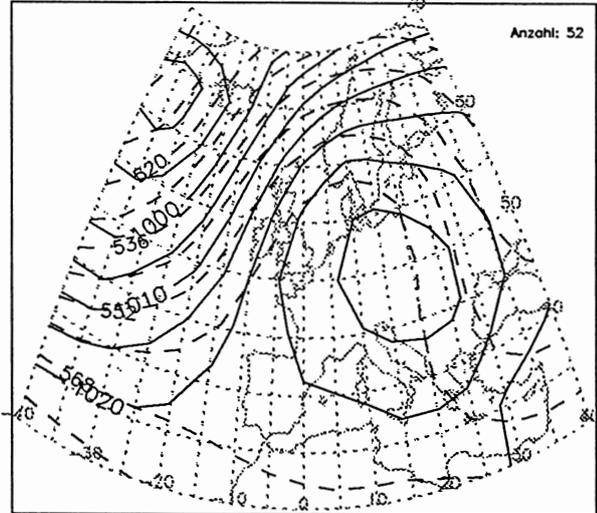
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 8 NWZ Monat: 12



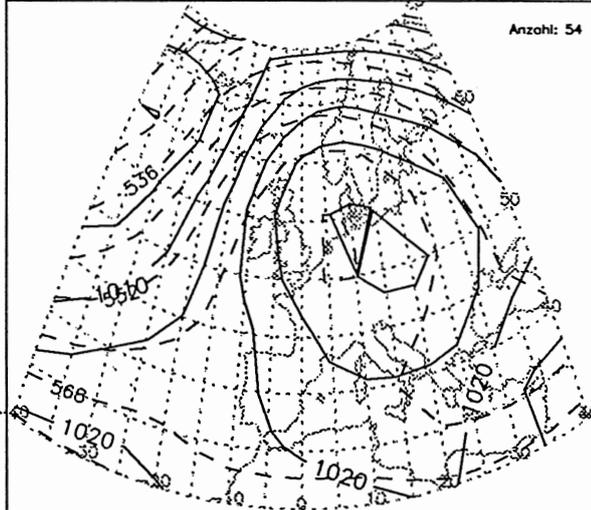
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 1



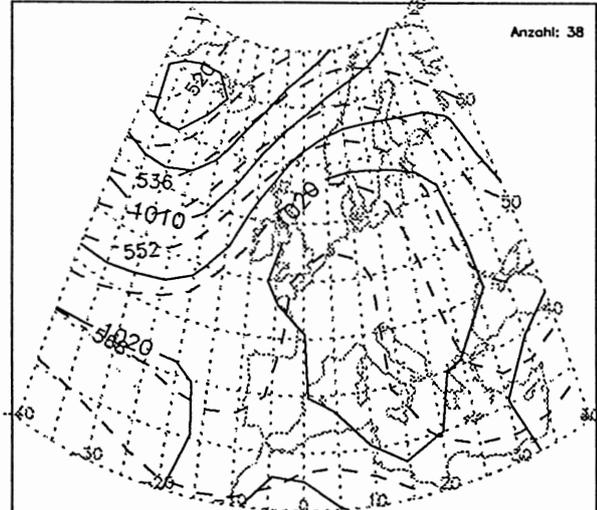
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 2



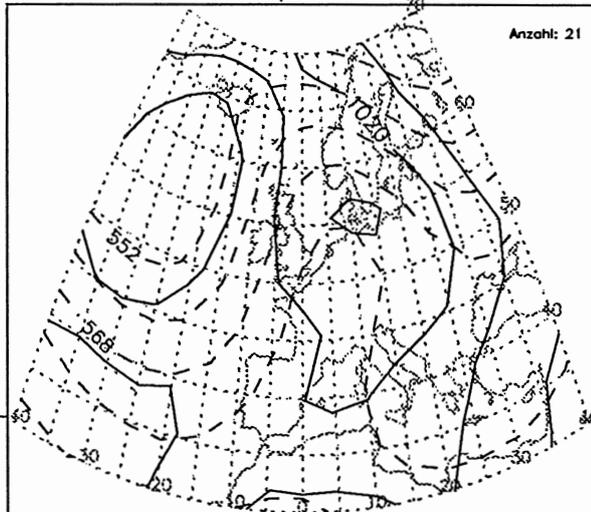
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 3



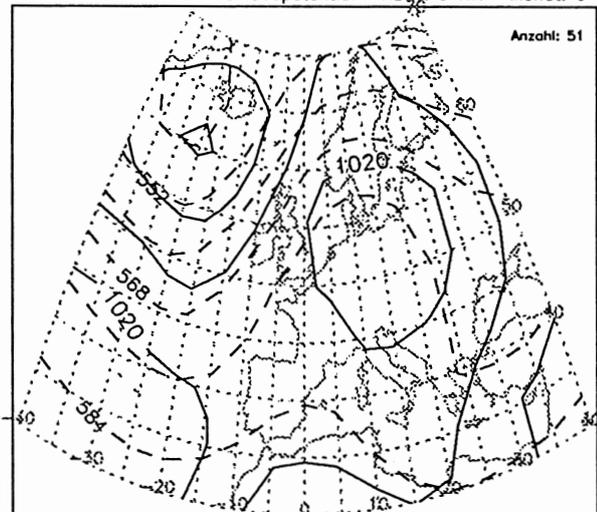
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 4



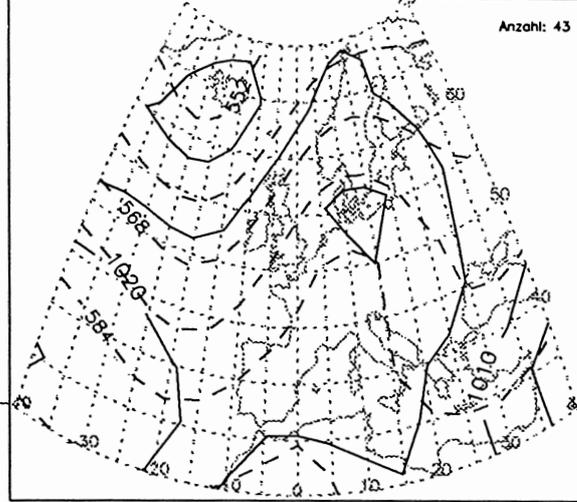
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 5



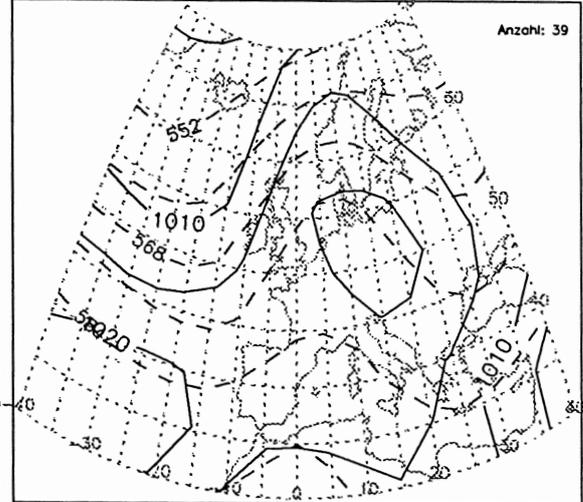
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 6



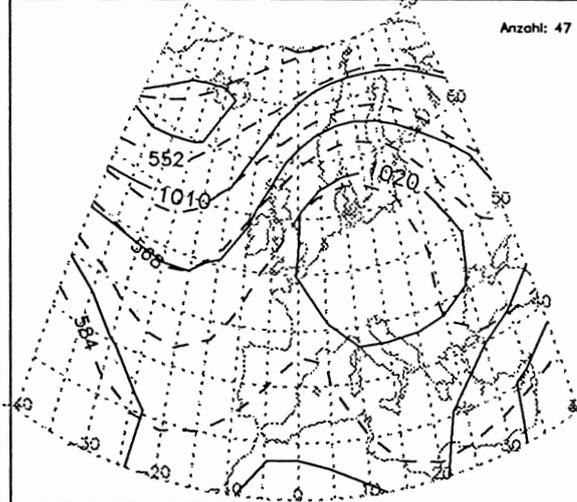
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 7



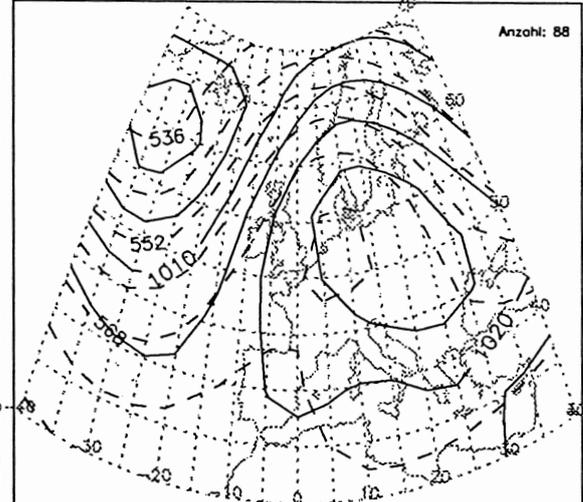
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 8



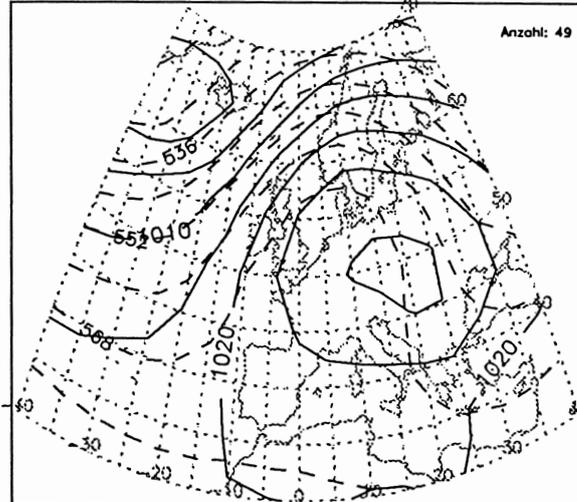
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 9



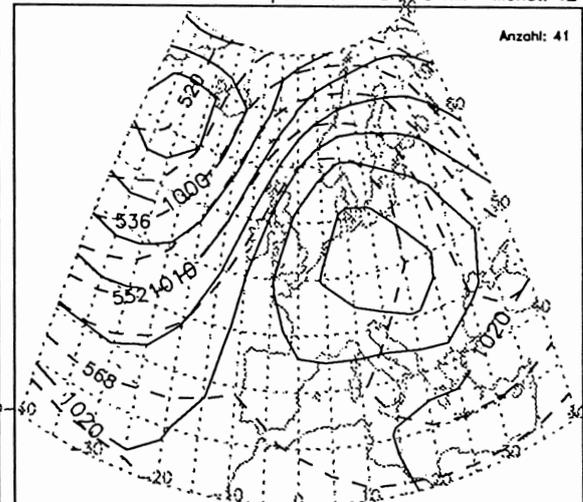
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 10



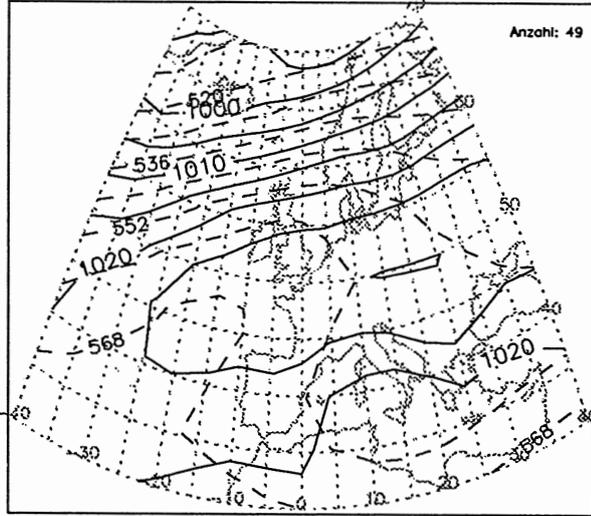
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 11



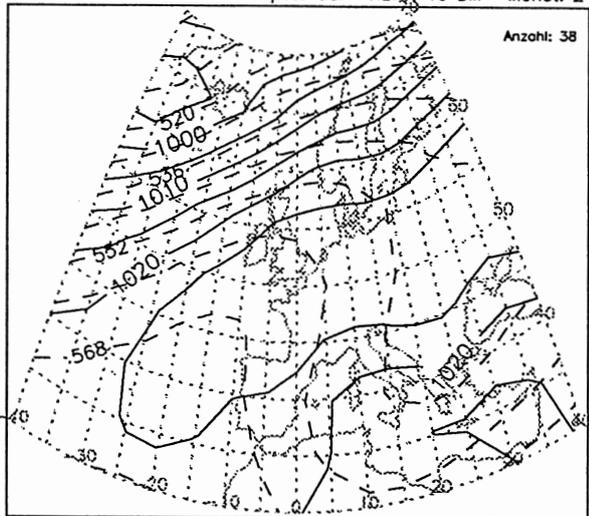
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 9 HM Monat: 12



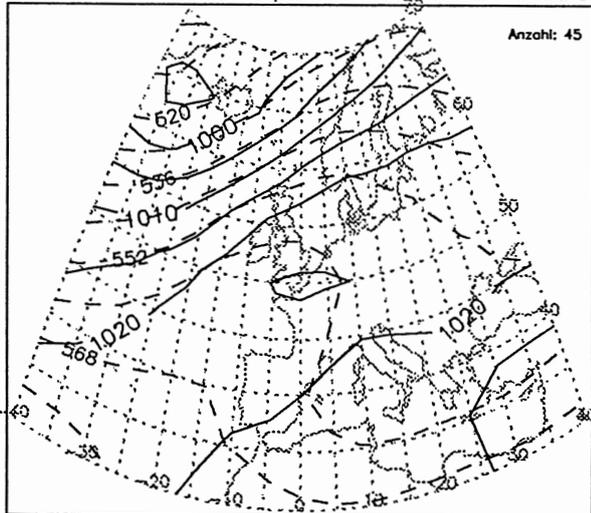
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 1



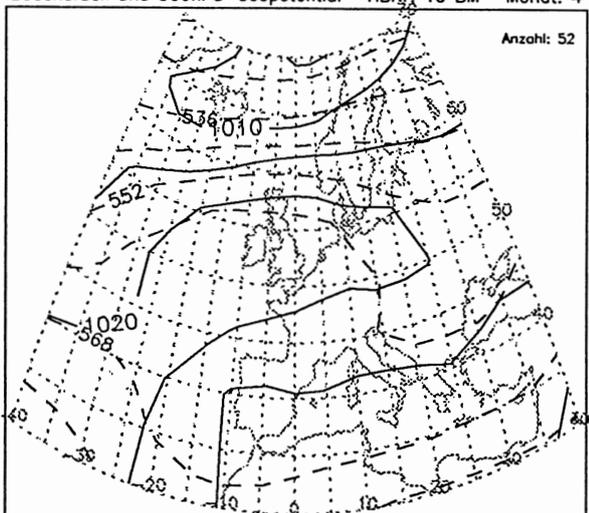
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 2



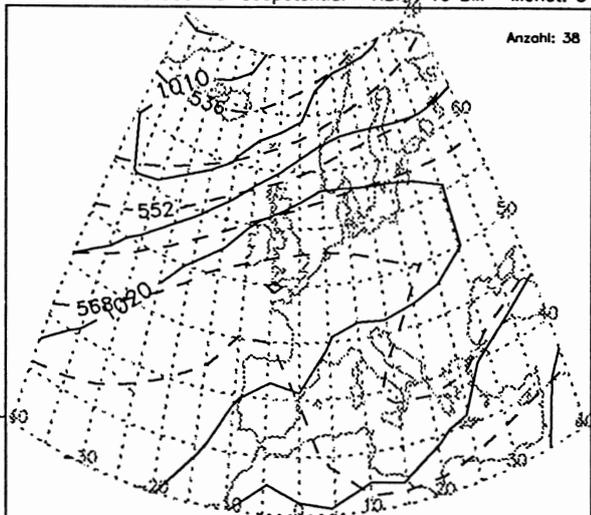
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 3



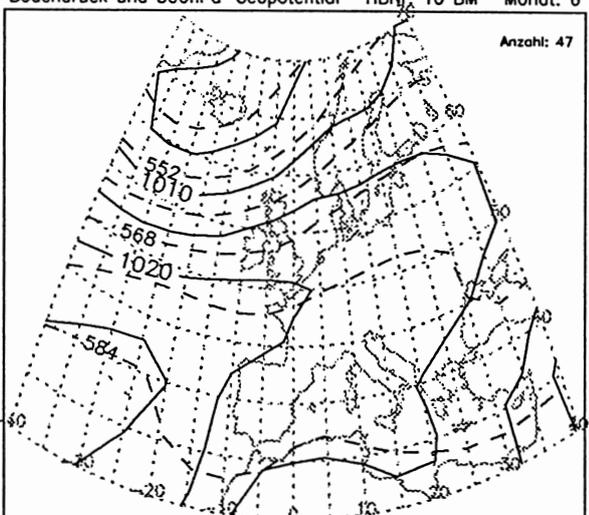
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 4



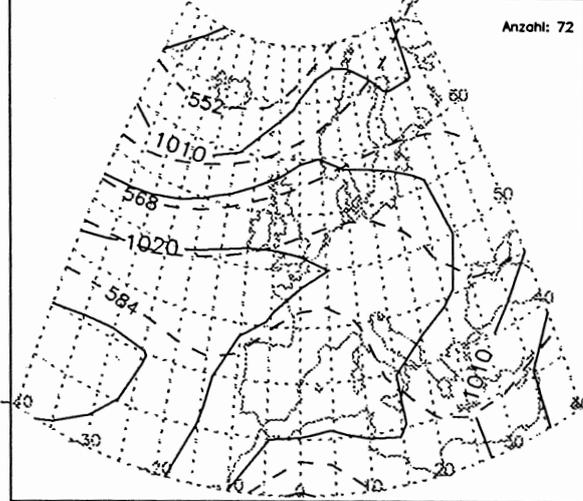
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 5



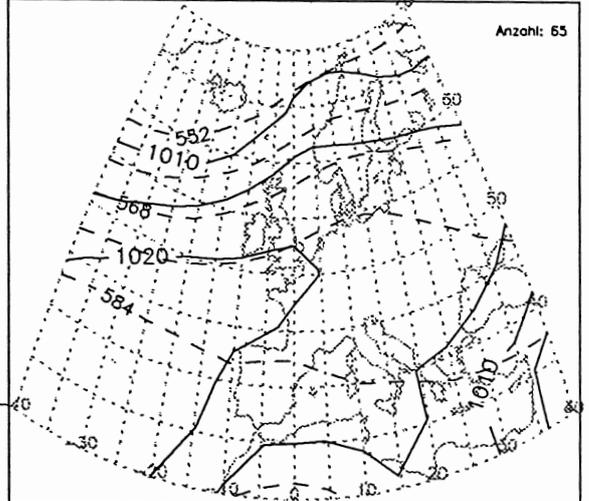
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 6



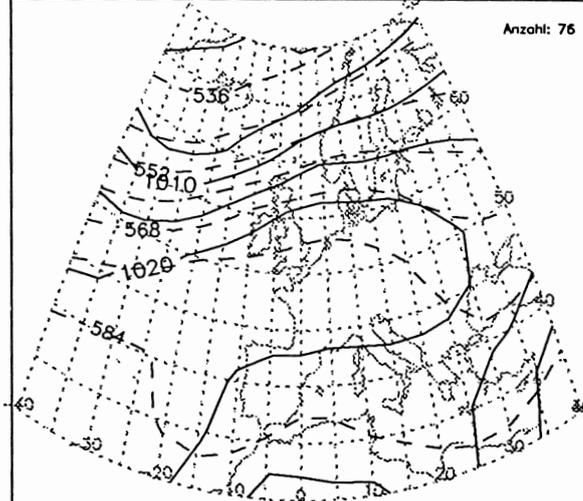
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 7



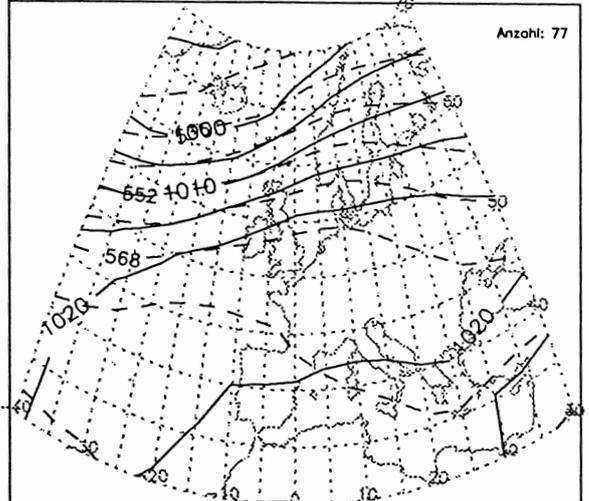
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 8



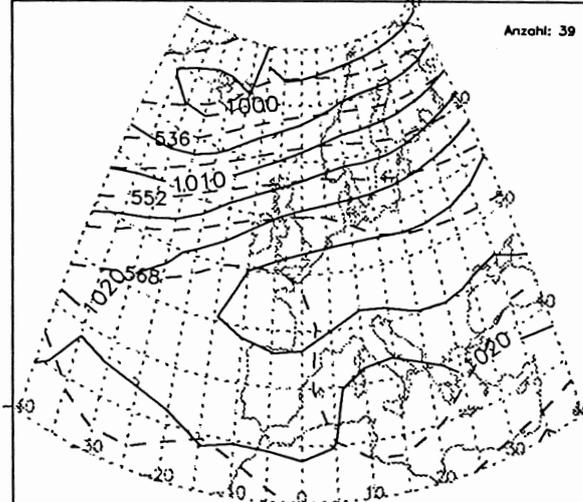
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 9



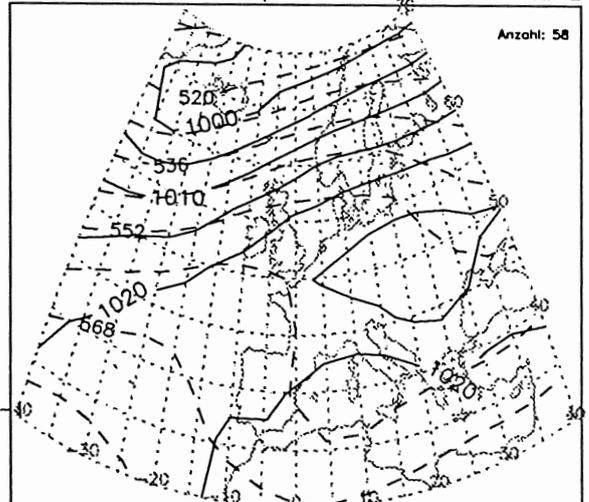
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 10



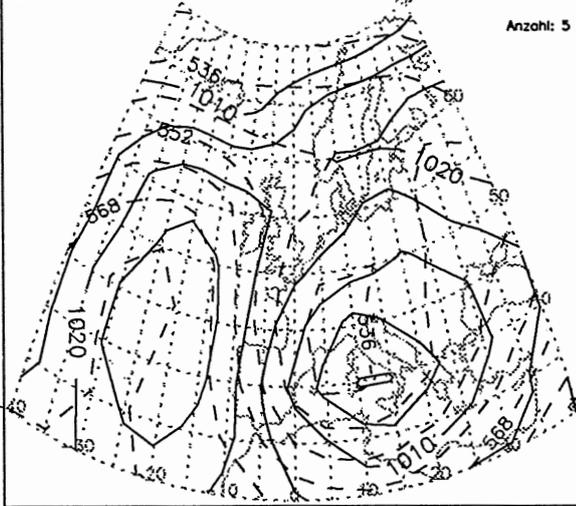
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 11



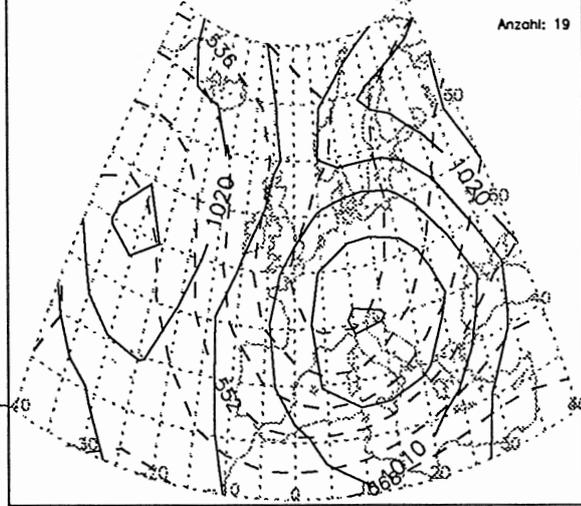
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 10 BM Monat: 12



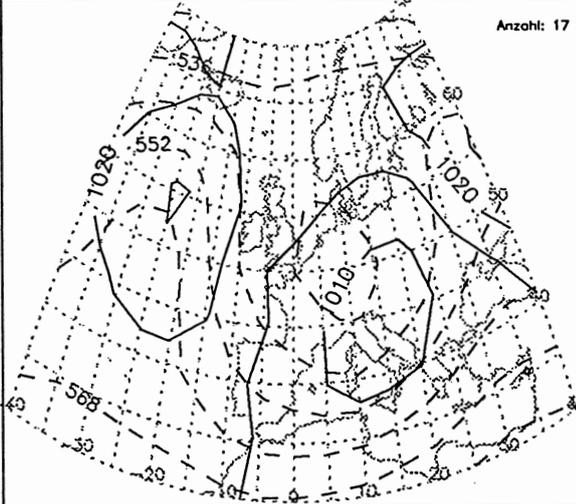
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 1



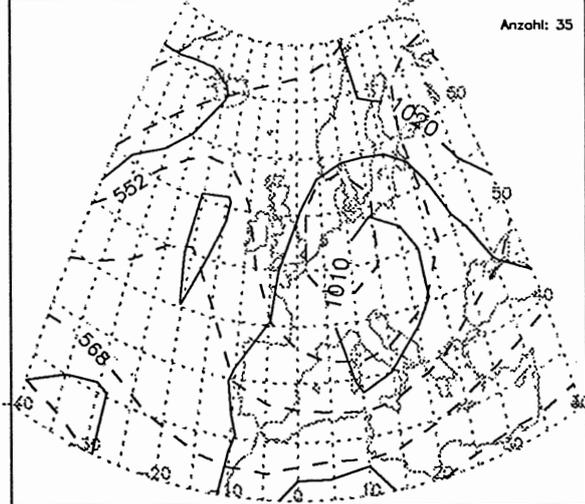
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 2



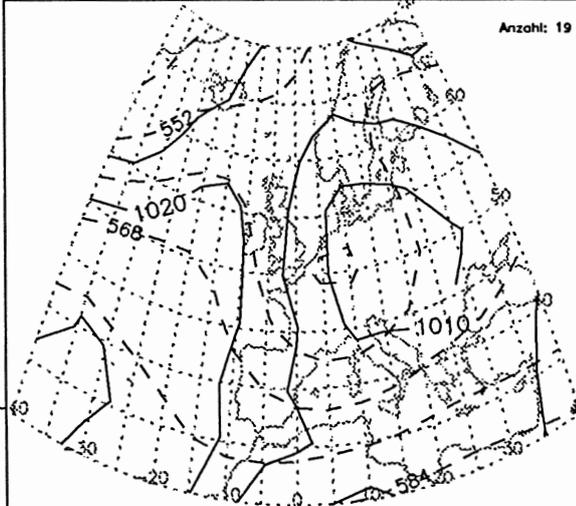
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 3



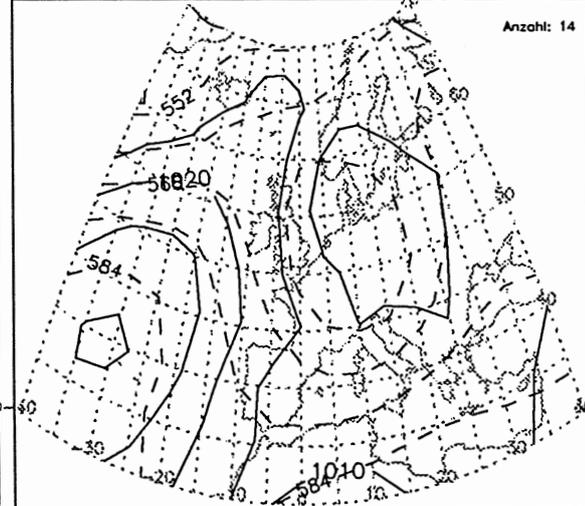
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 4



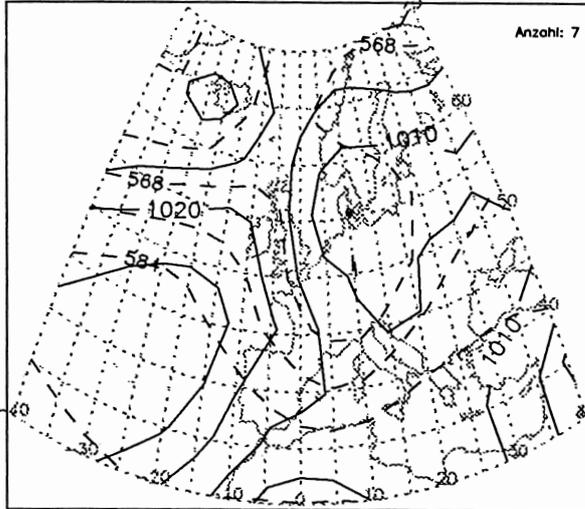
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 5



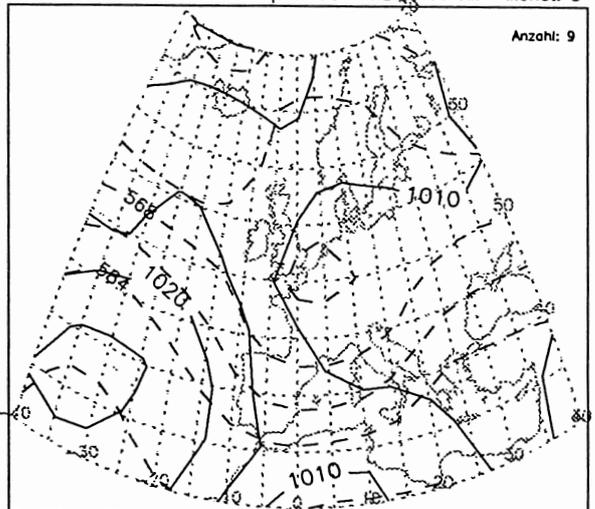
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 6



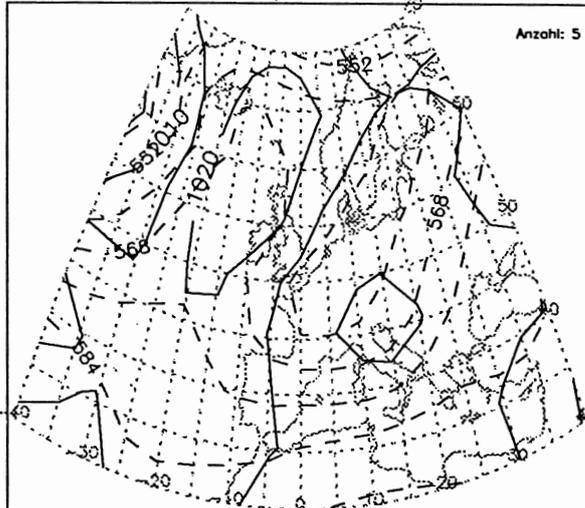
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 7



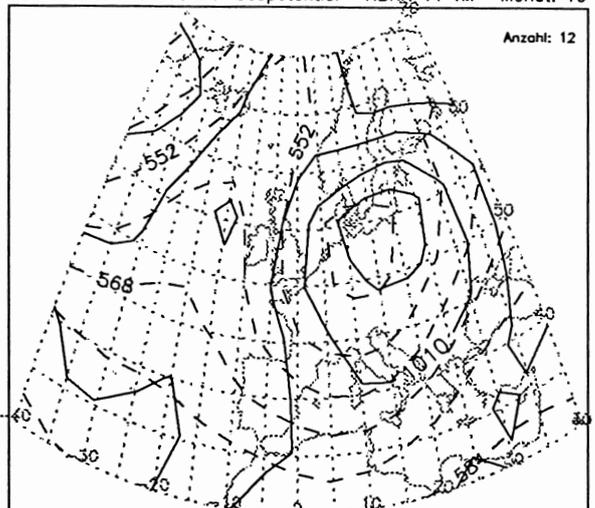
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 8



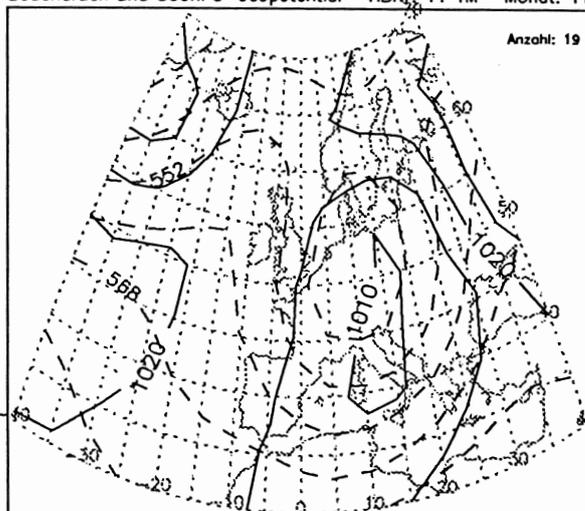
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 9



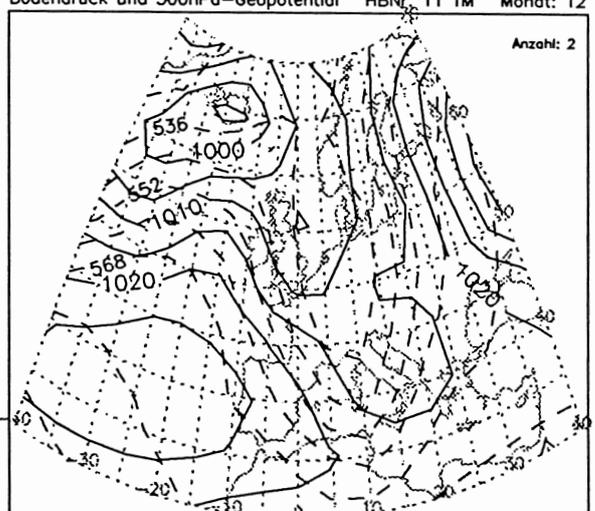
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 10



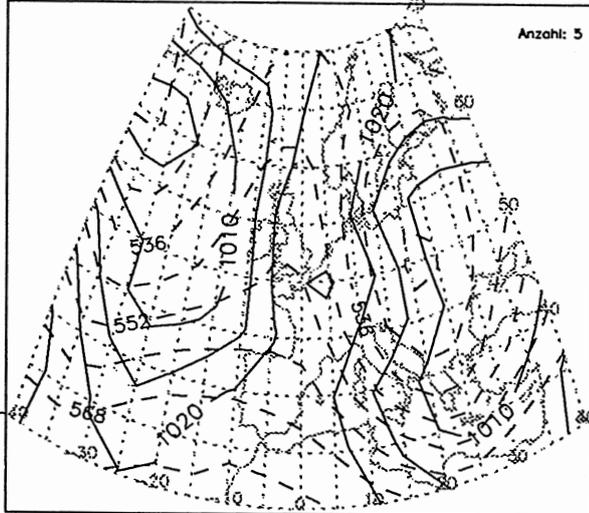
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 11



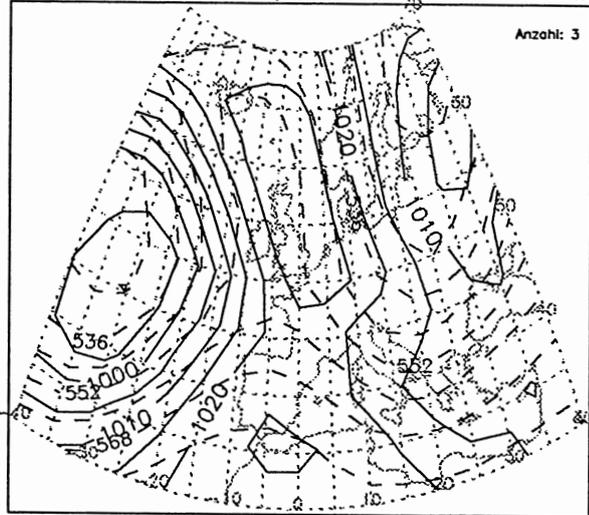
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 11 TM Monat: 12



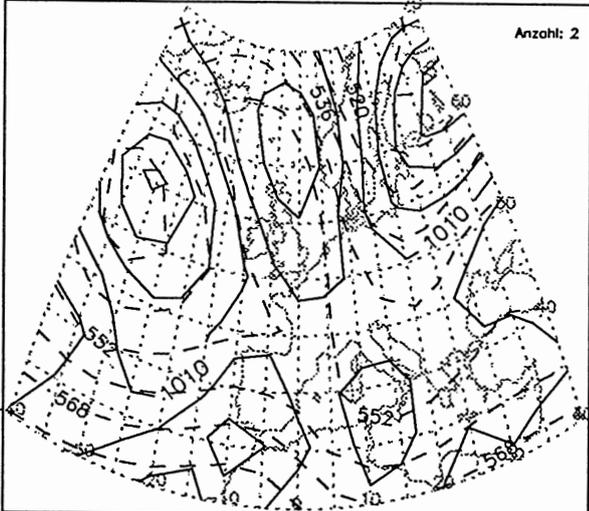
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 1



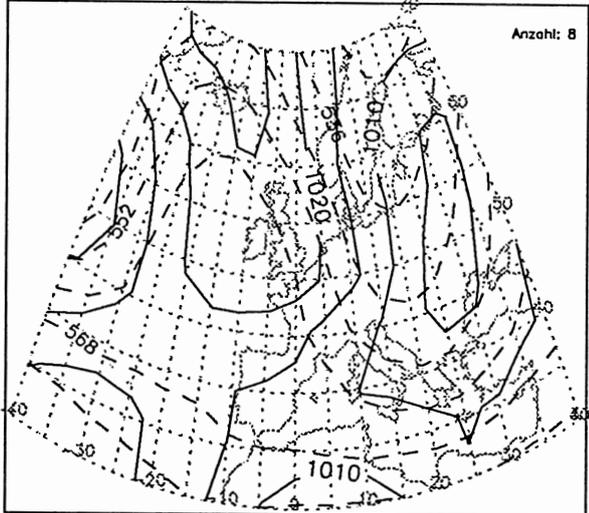
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 2



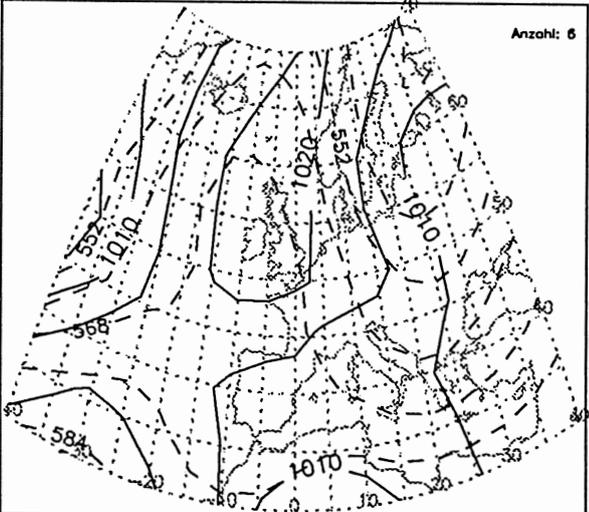
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 3



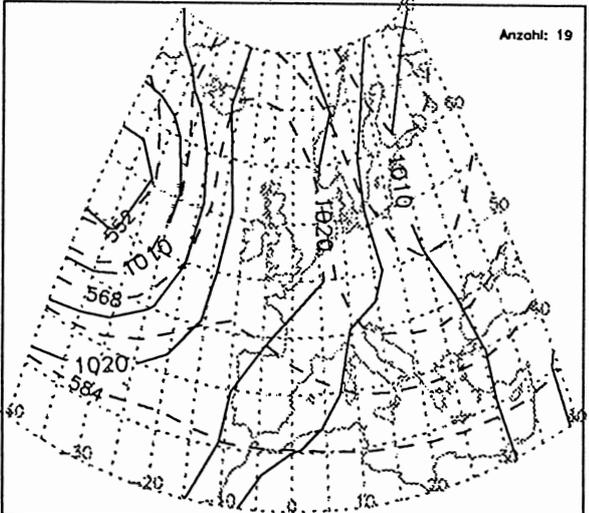
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 4



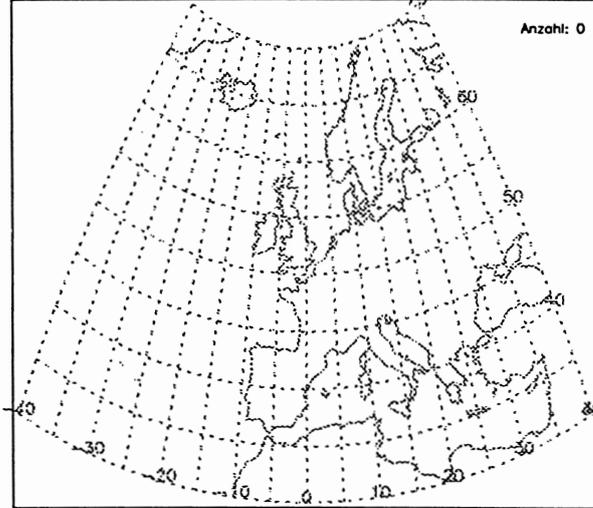
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 5



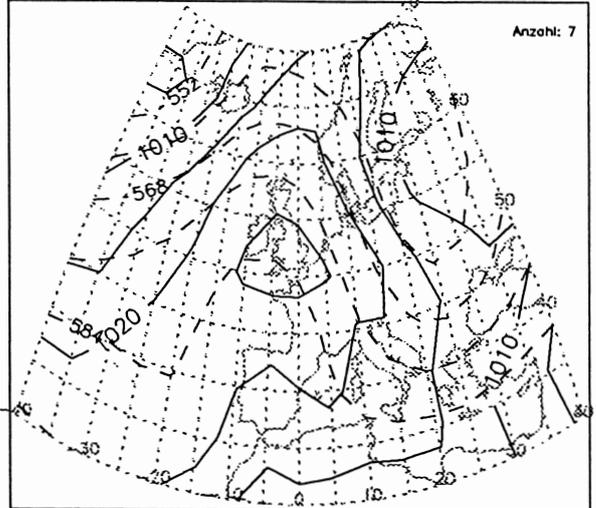
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 6



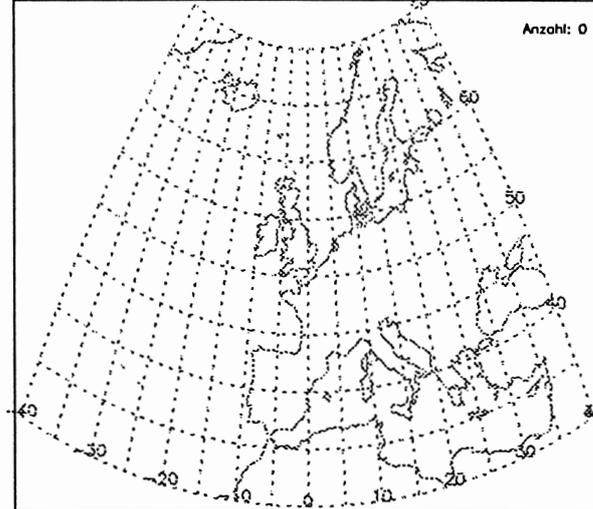
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 7



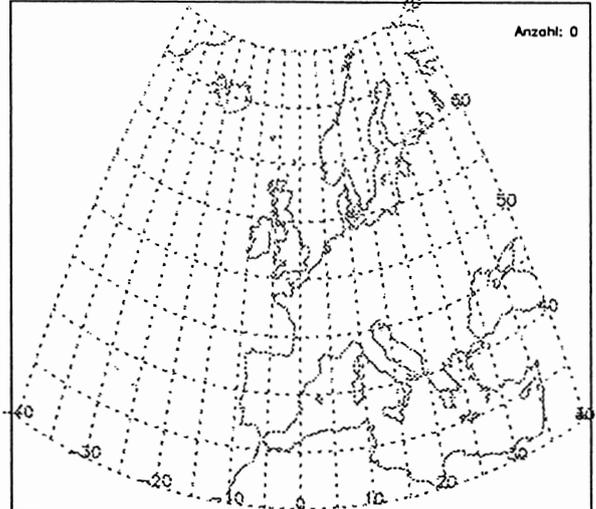
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 8



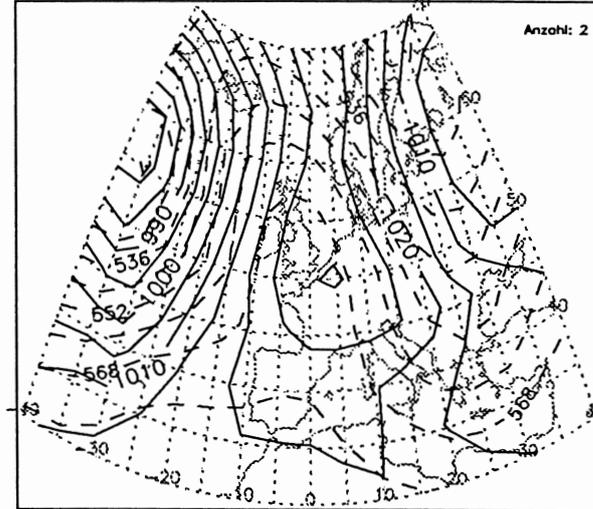
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 9



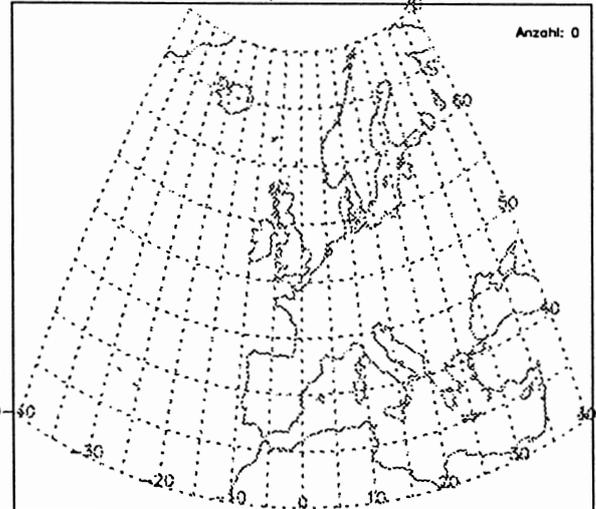
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 10



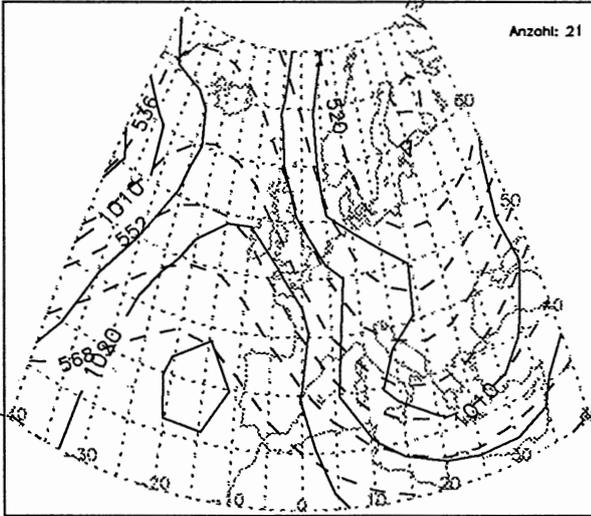
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 11



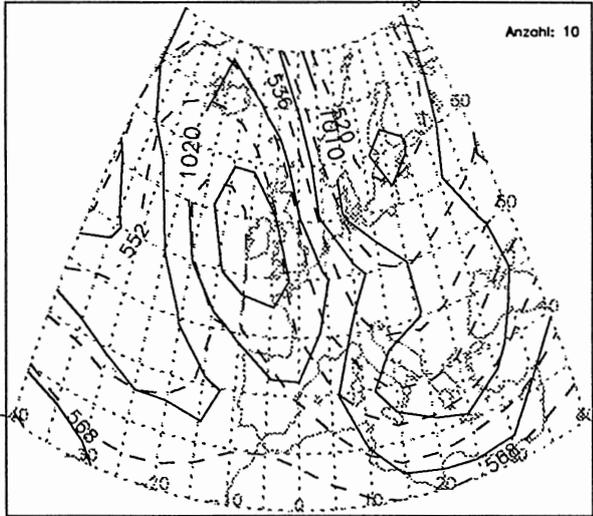
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 12 NA Monat: 12



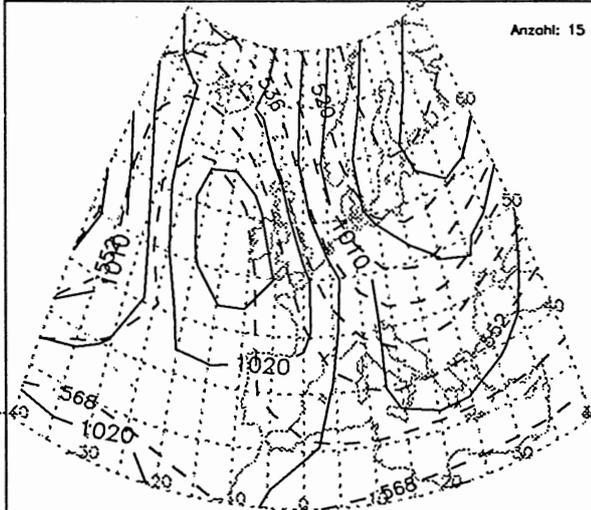
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 1



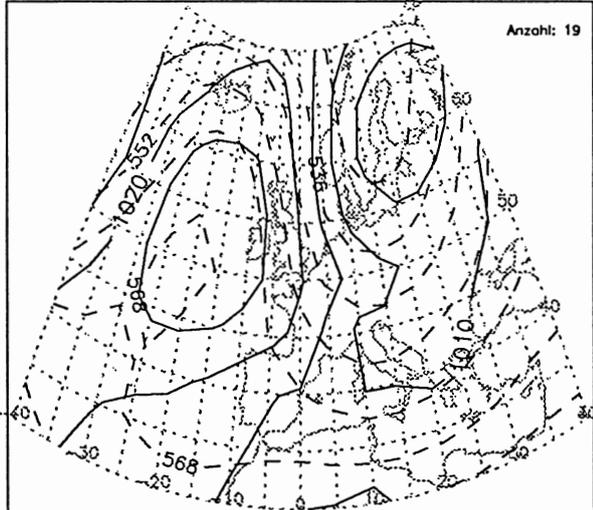
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 2



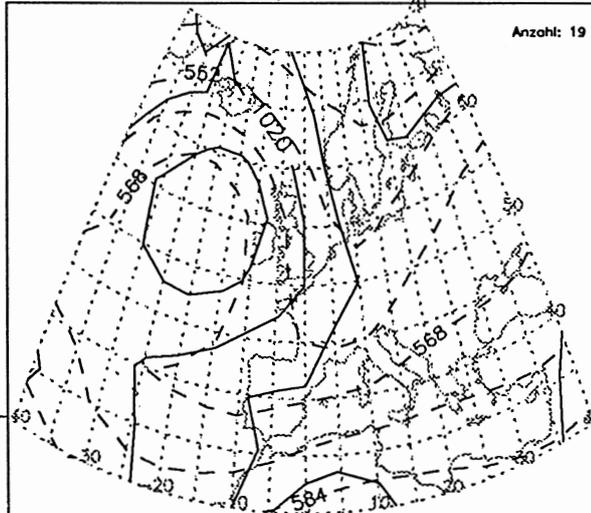
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 3



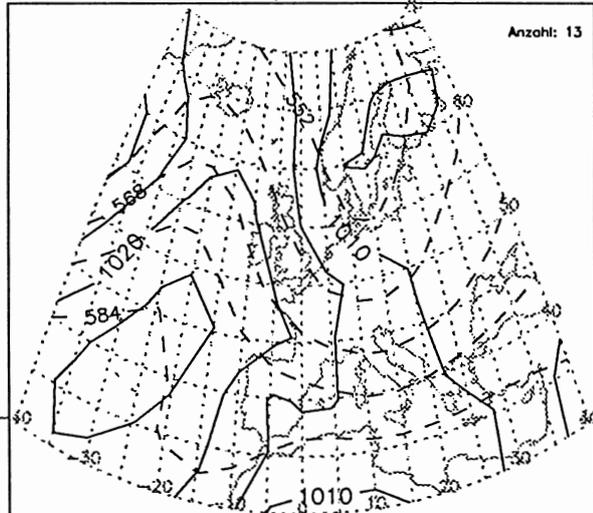
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 4



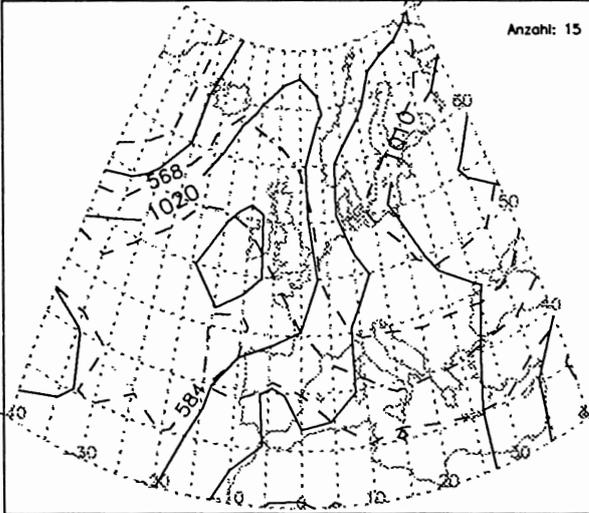
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 5



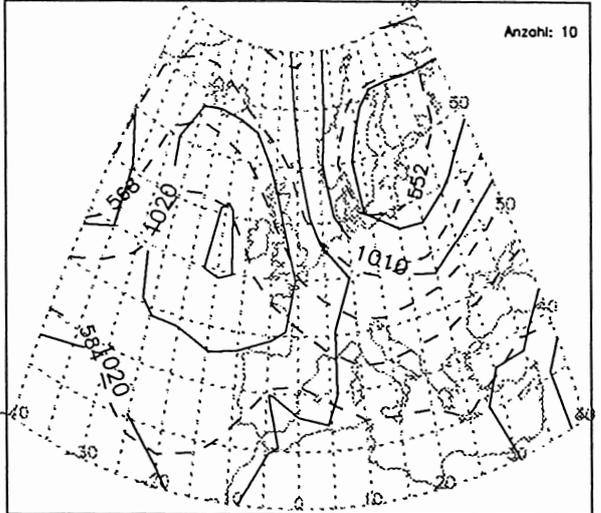
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 6



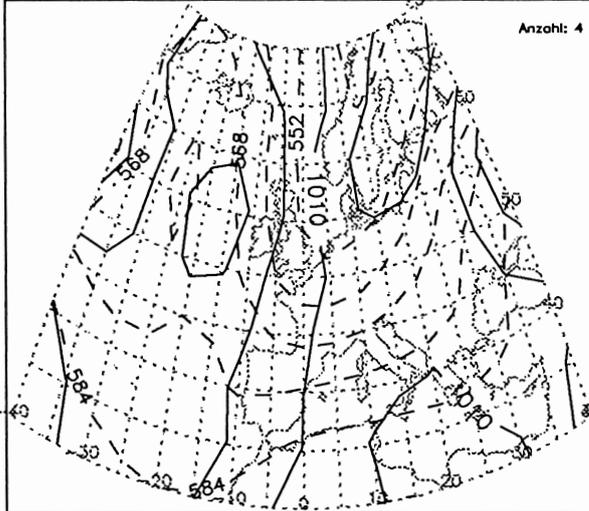
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 7



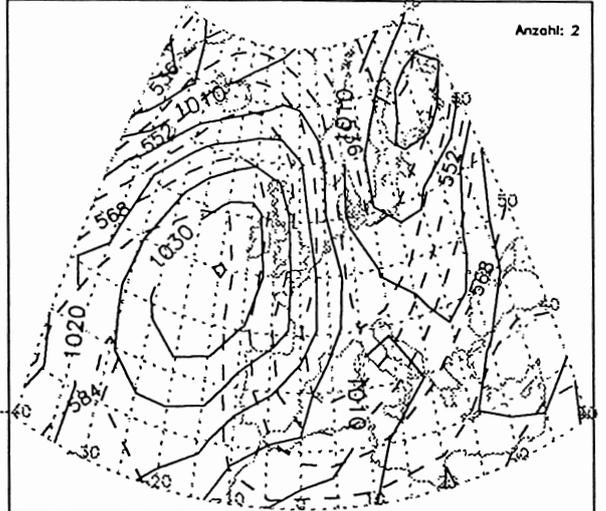
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 8



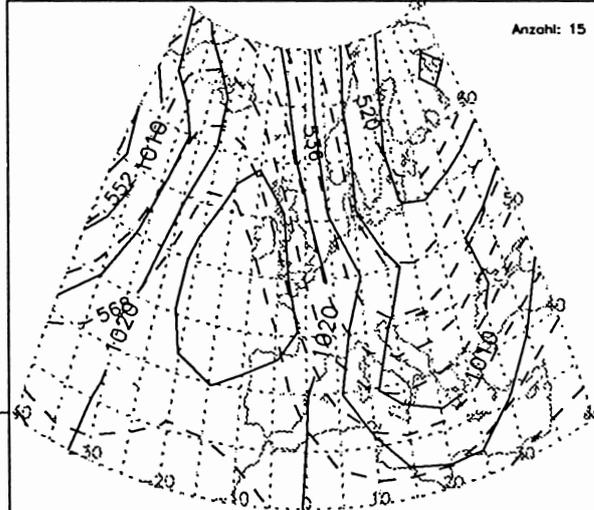
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 9



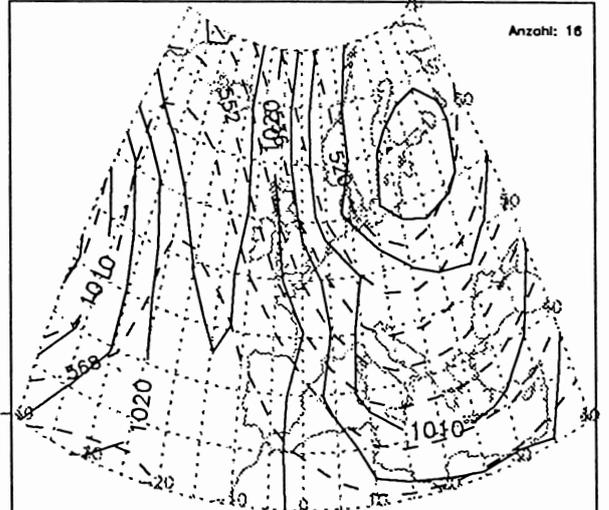
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 10



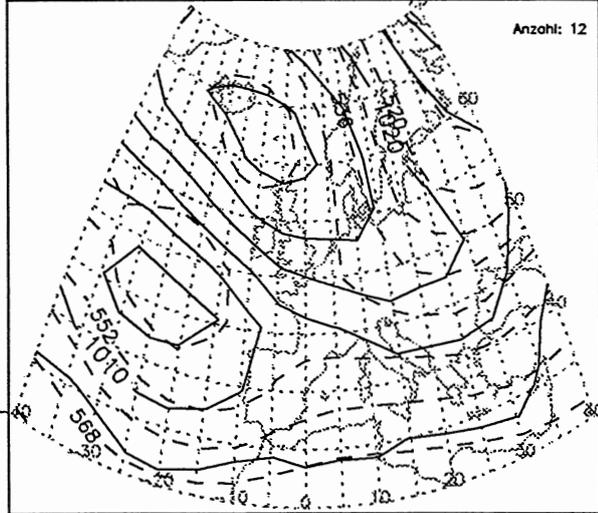
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 11



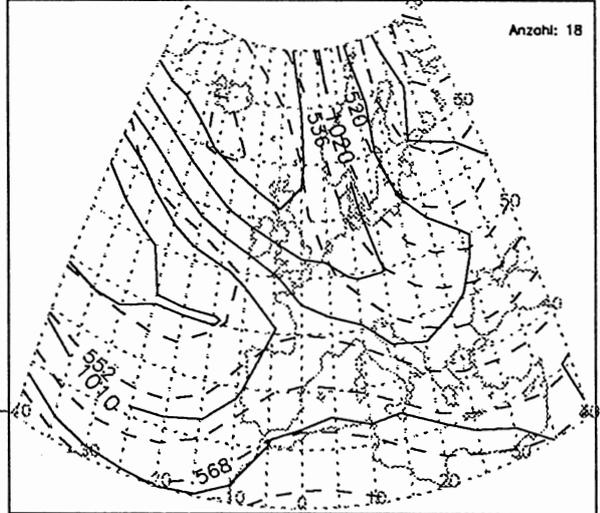
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 13 NZ Monat: 12



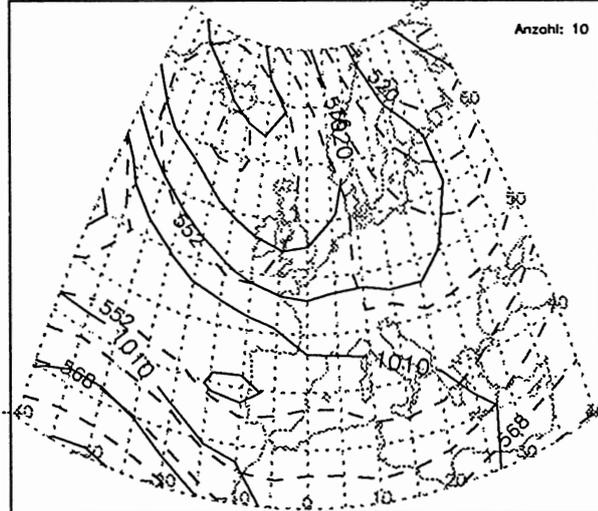
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 1



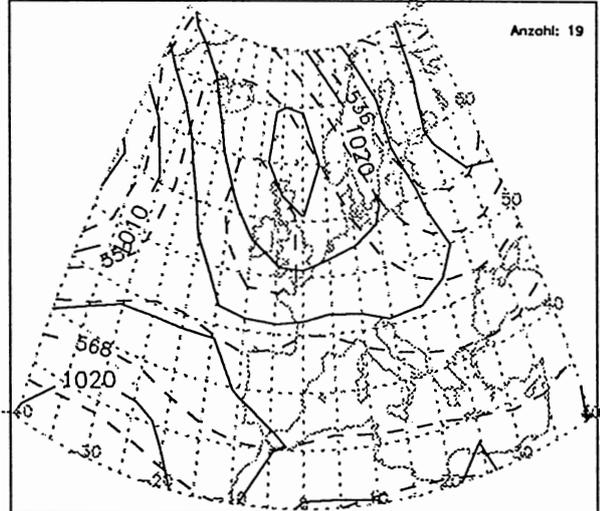
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 2



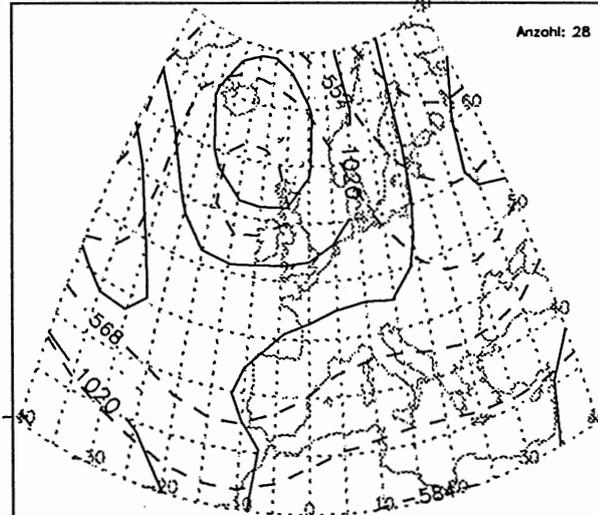
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 3



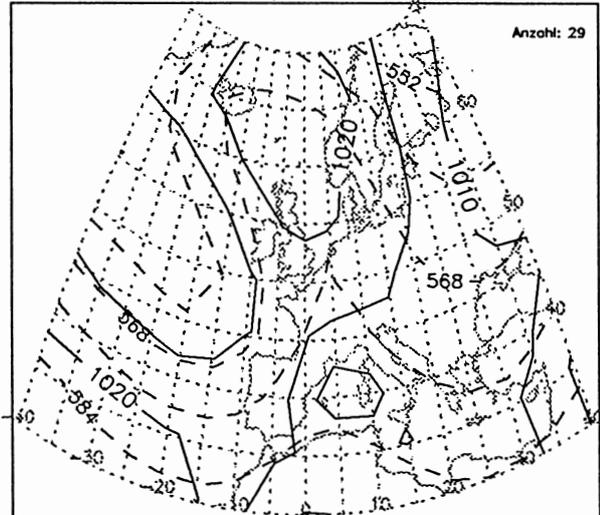
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 4



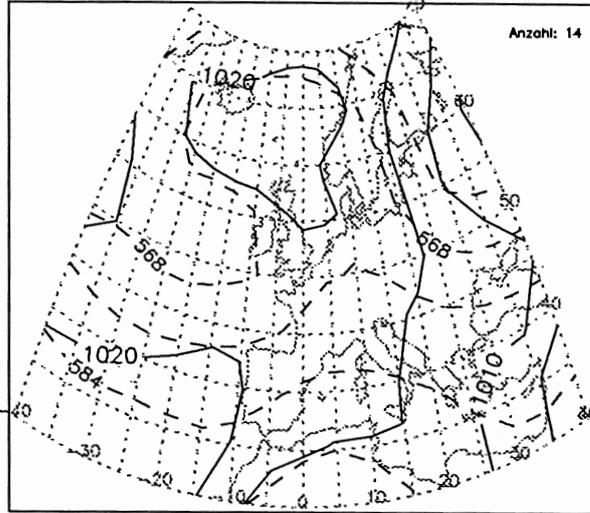
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 5



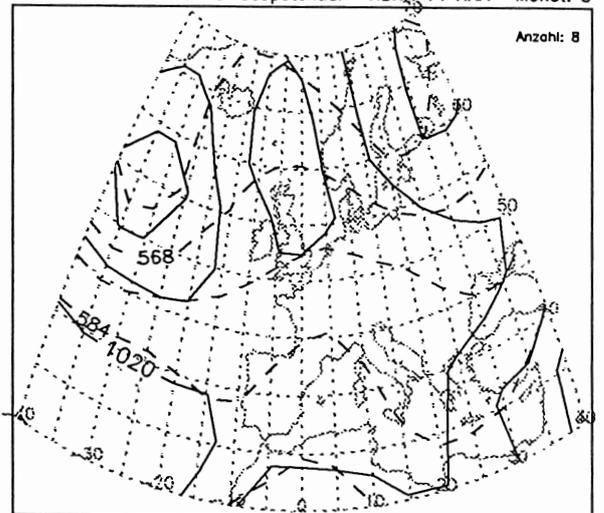
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 6



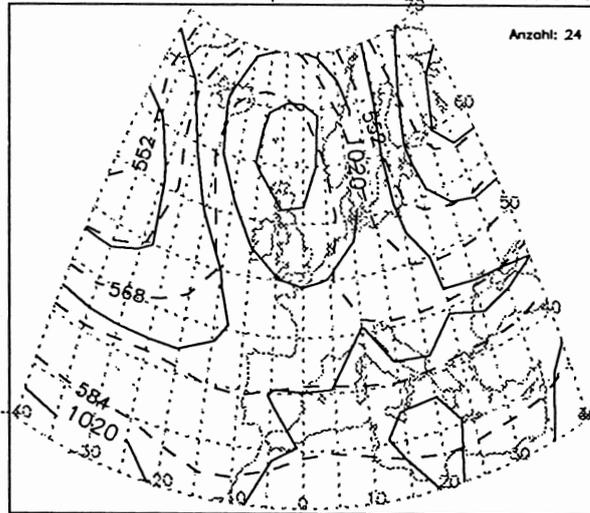
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 7



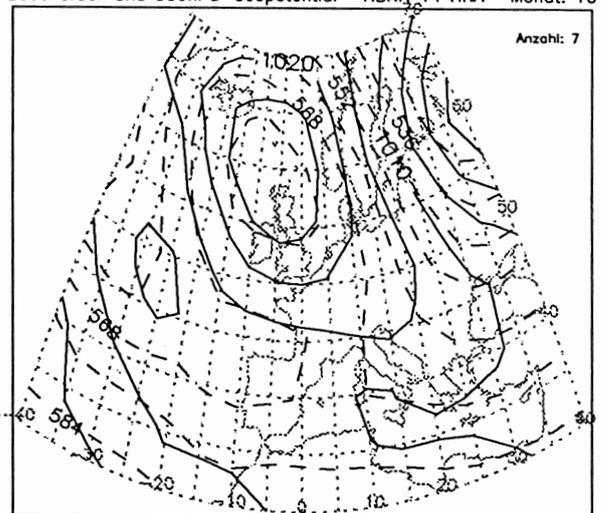
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 8



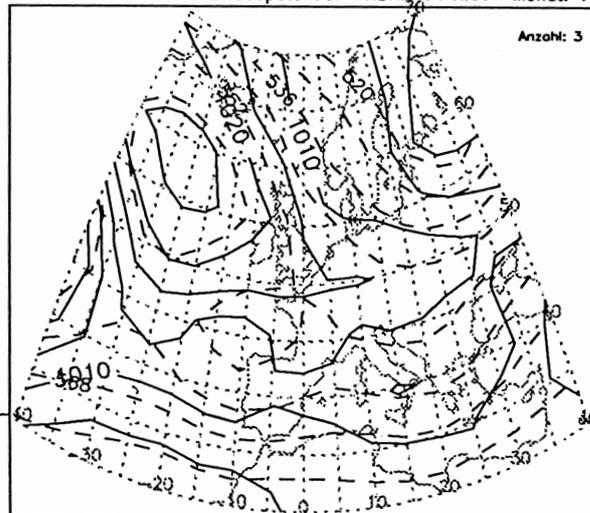
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 9



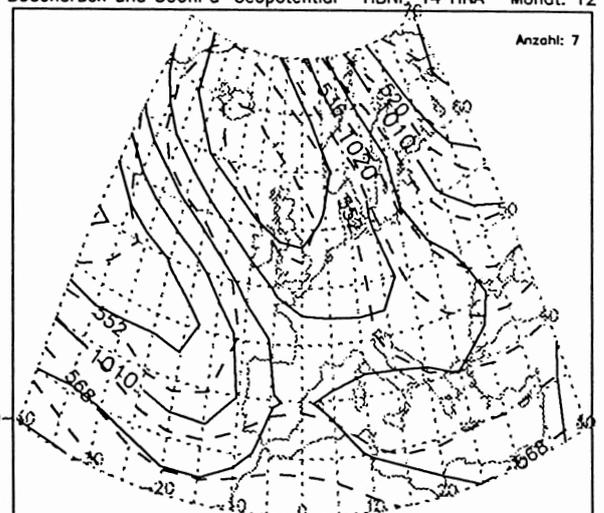
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 10



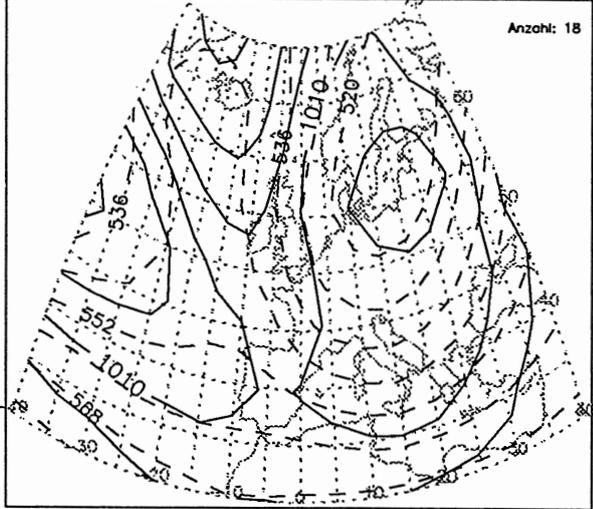
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 11



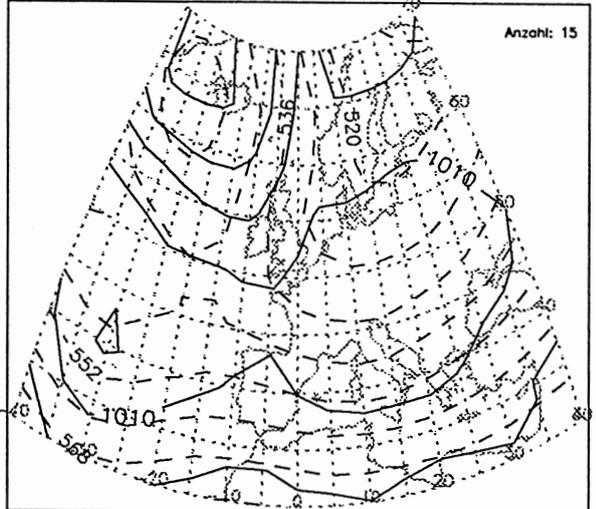
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 14 HNA Monat: 12



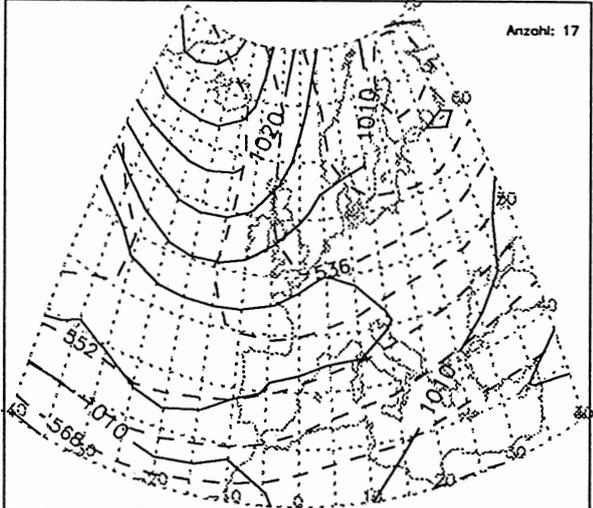
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 1



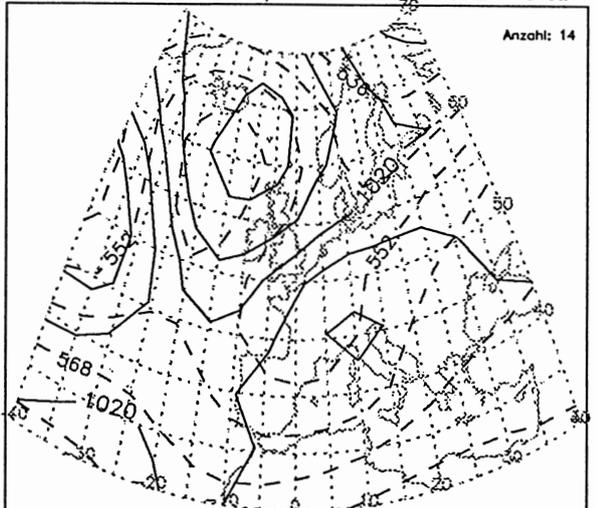
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 2



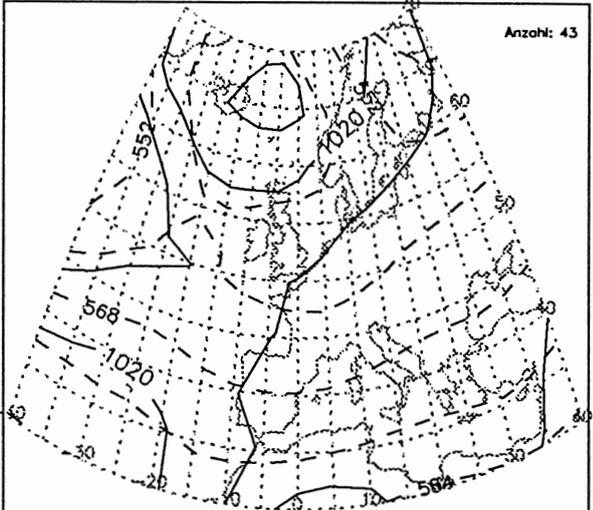
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 3



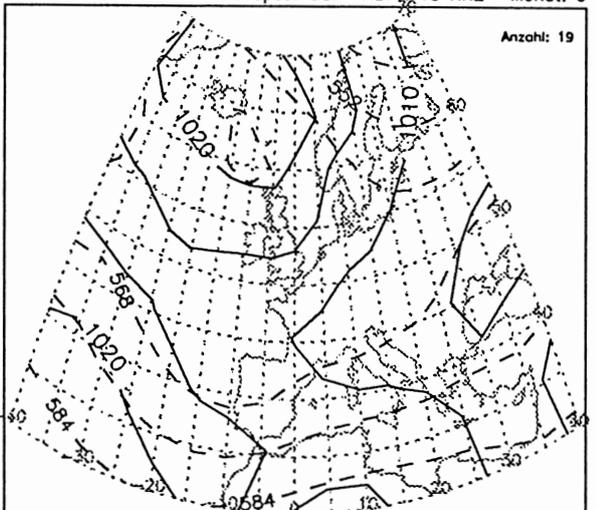
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 4



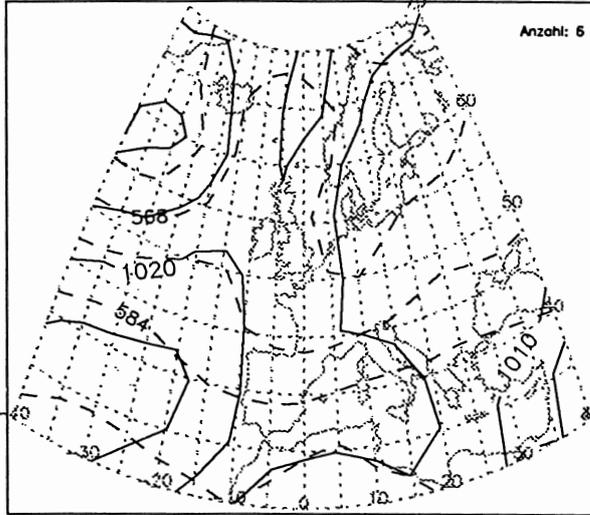
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 5



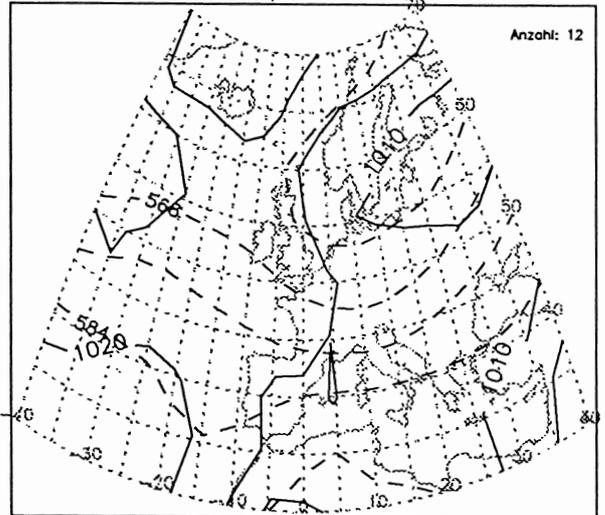
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 6



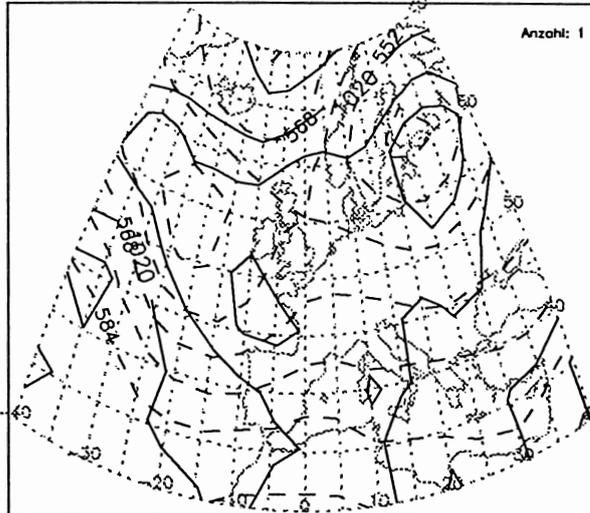
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 7



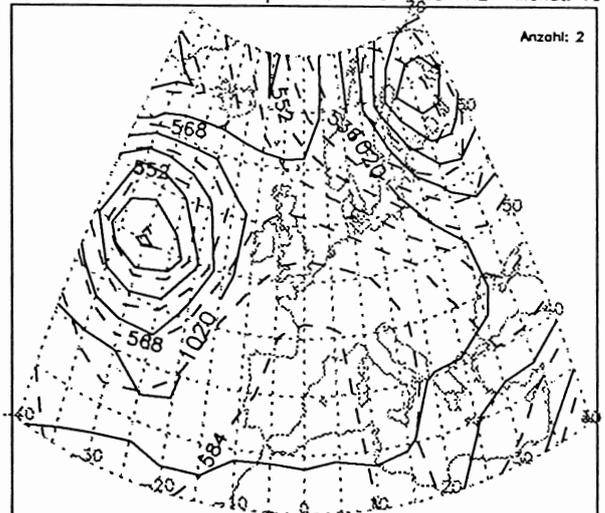
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 8



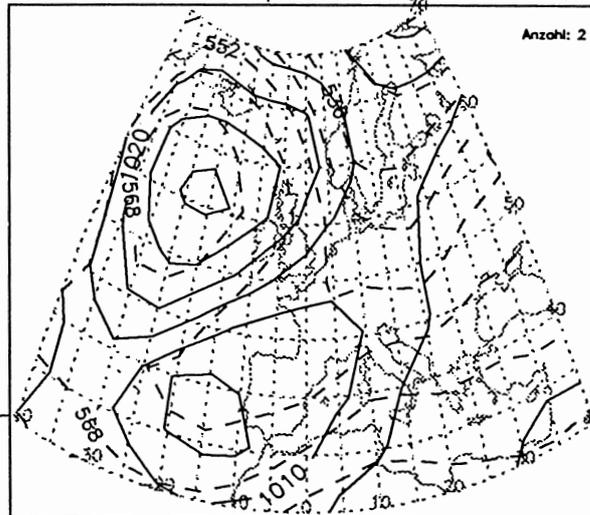
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 9



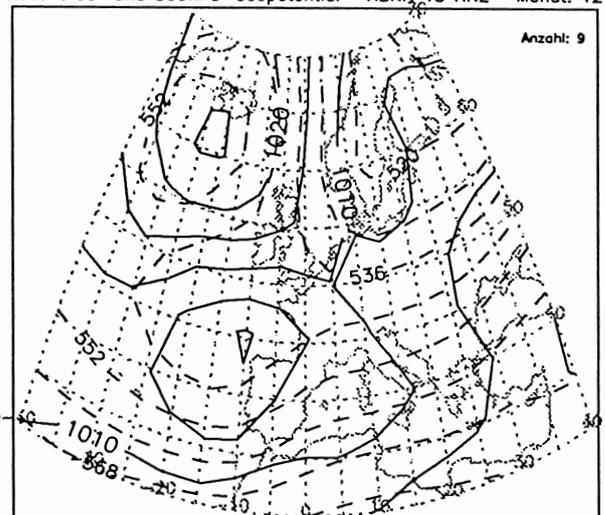
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 10



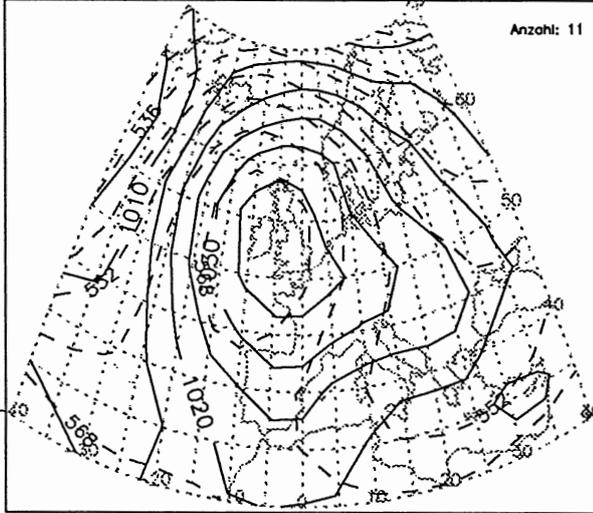
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 11



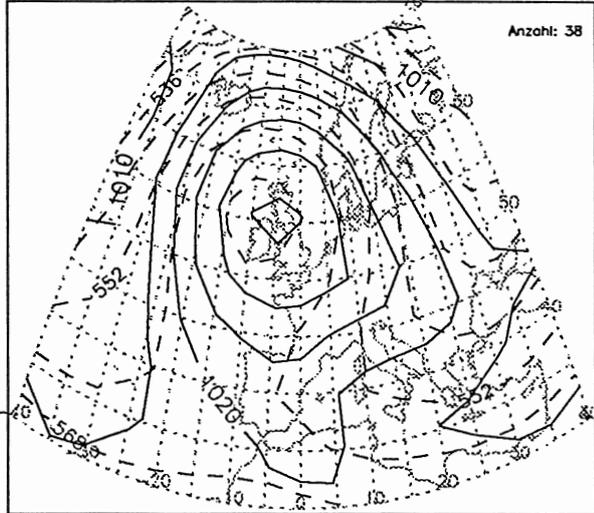
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 15 HNZ Monat: 12



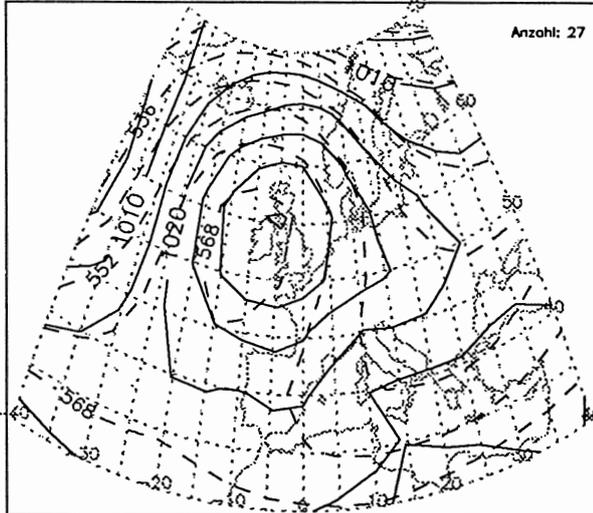
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 1



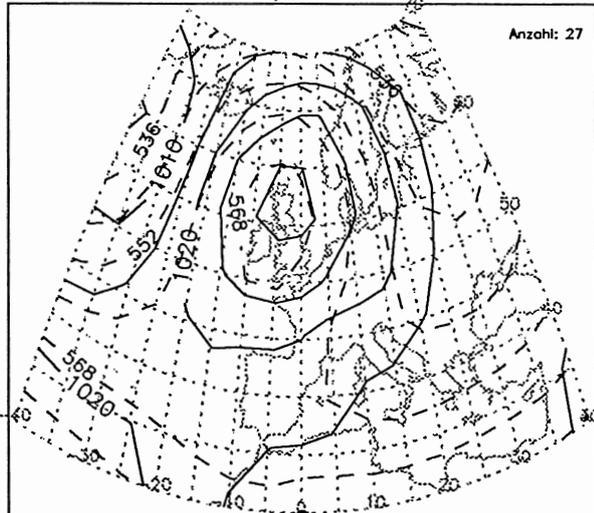
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 2



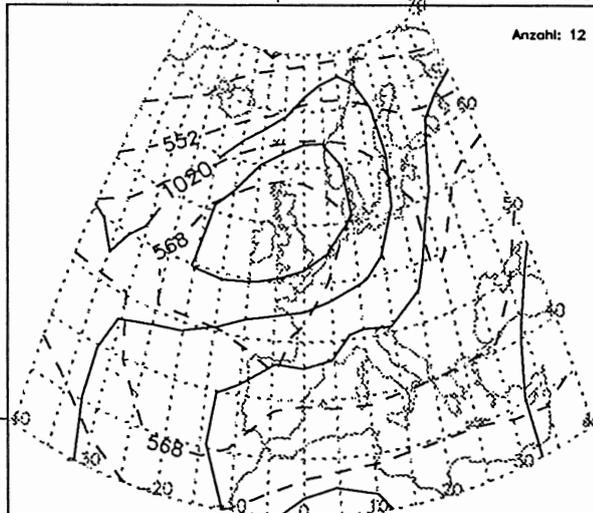
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 3



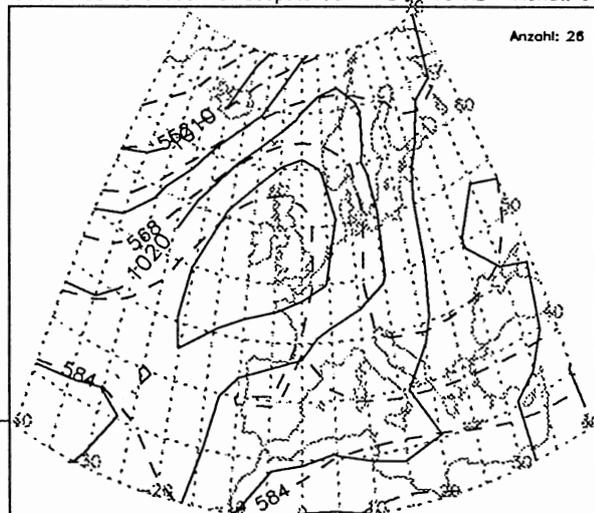
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 4



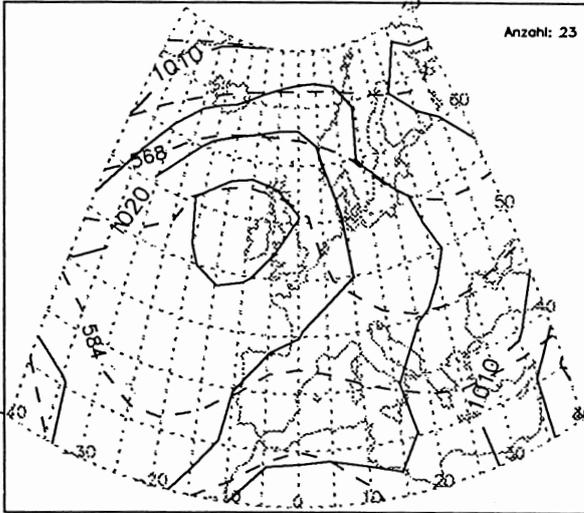
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 5



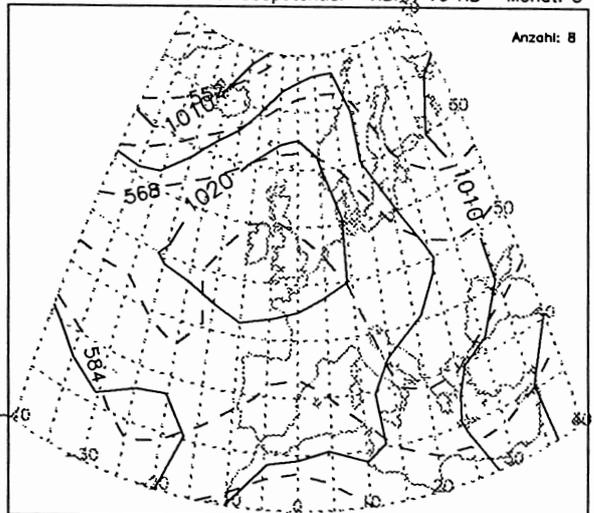
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 6



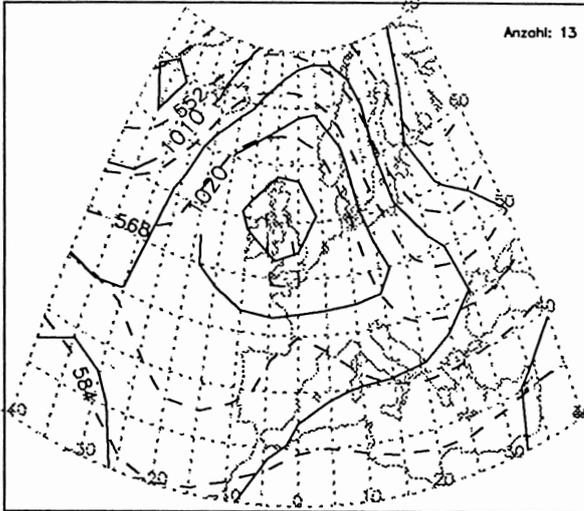
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 7



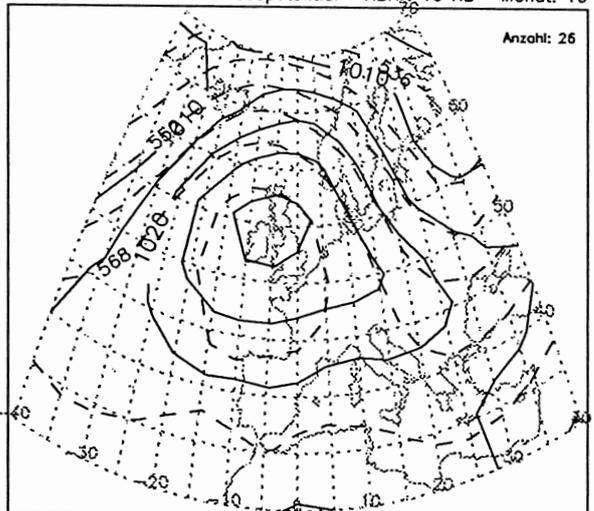
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 8



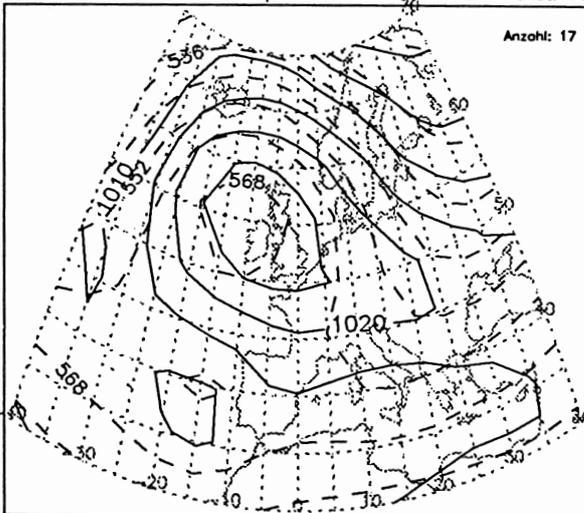
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 9



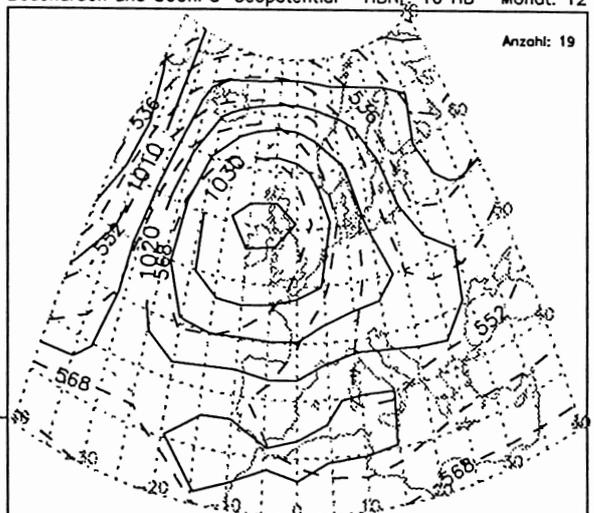
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 10



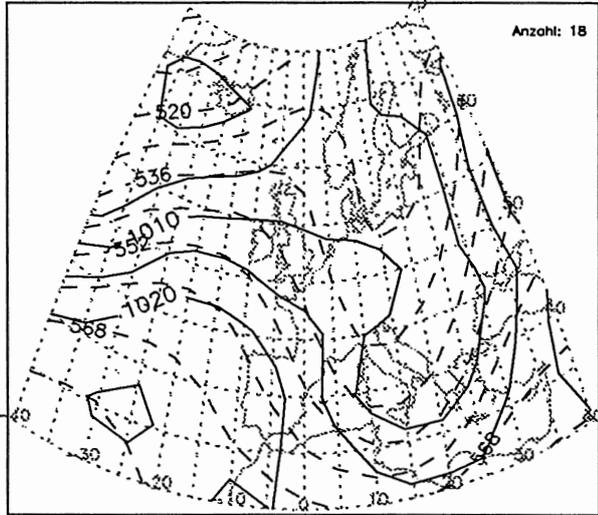
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 11



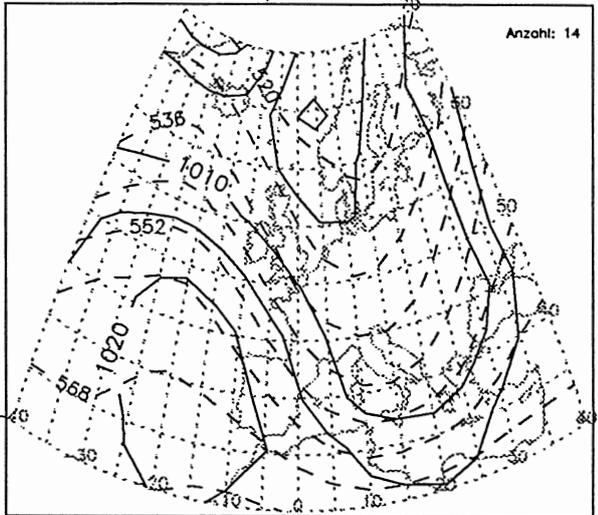
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 16 HB Monat: 12



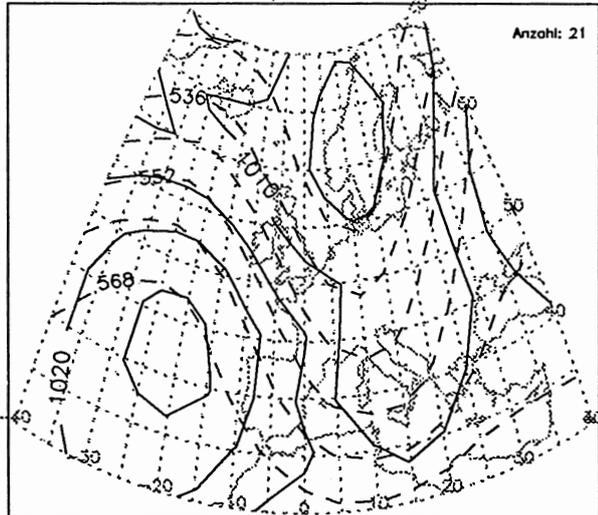
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 1



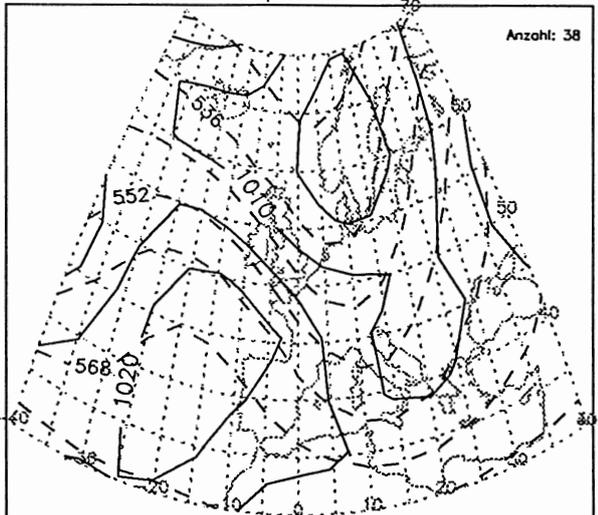
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 2



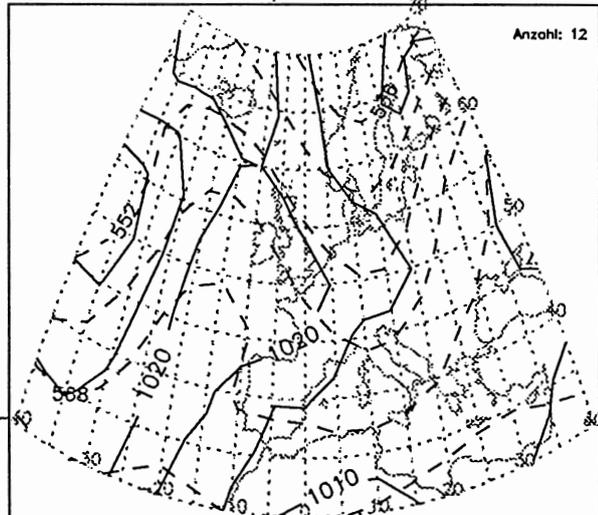
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 3



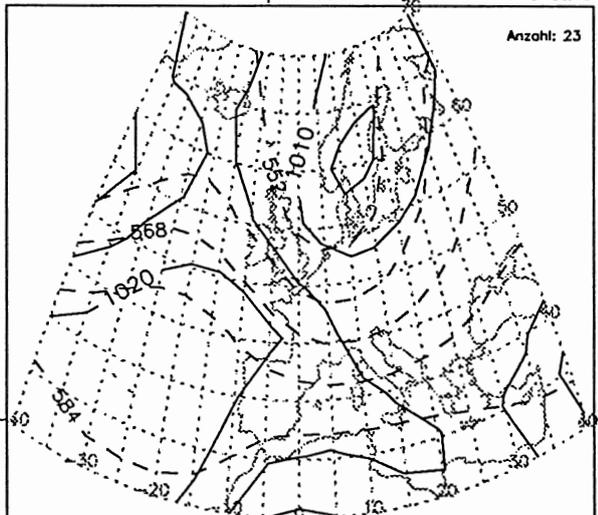
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 4



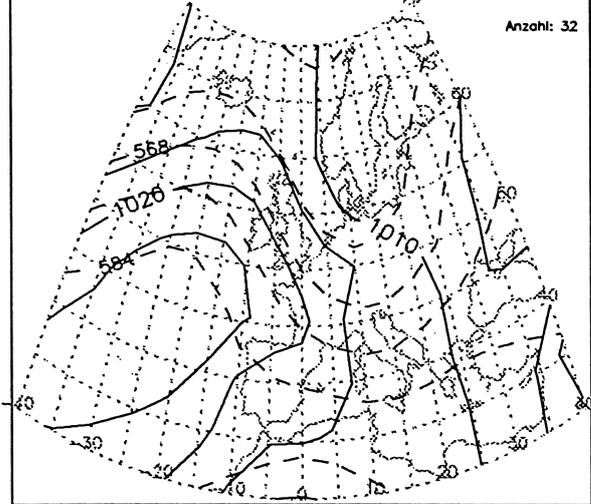
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 5



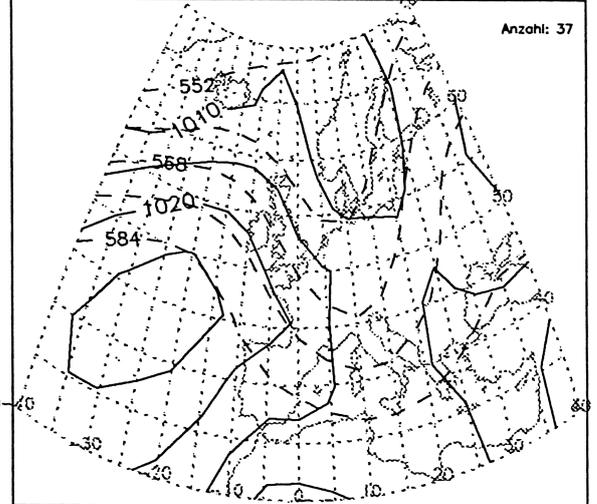
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 6



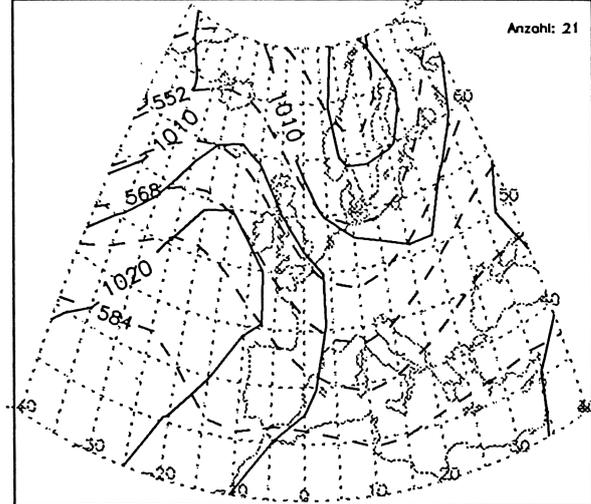
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 7



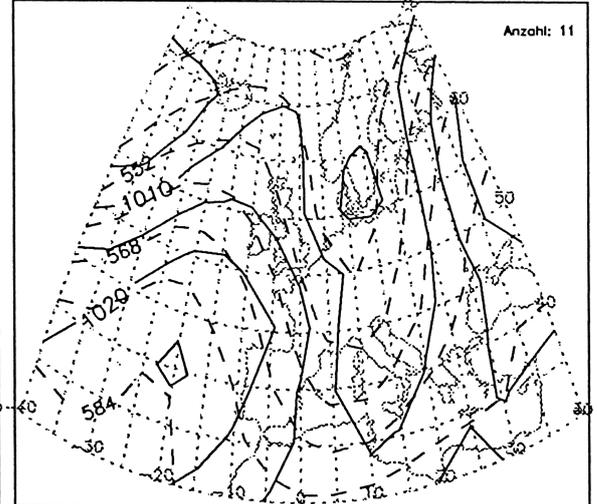
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 8



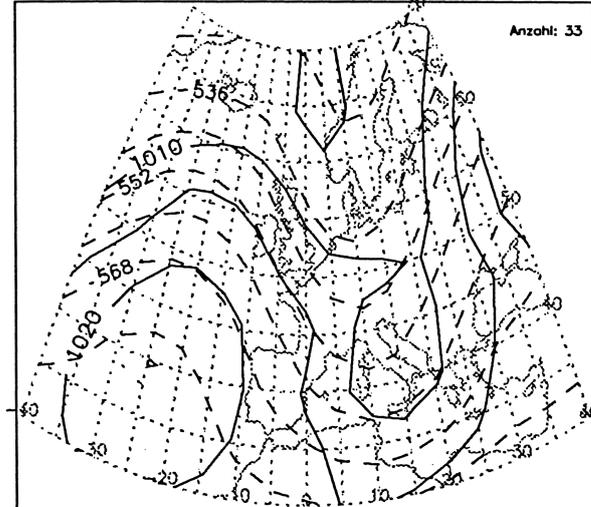
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 9



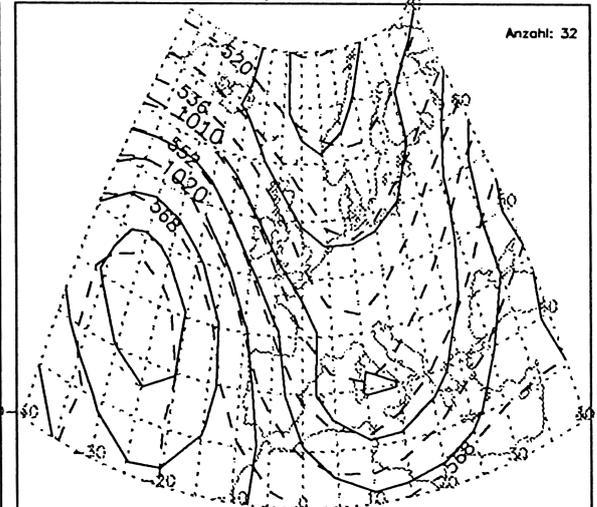
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 10



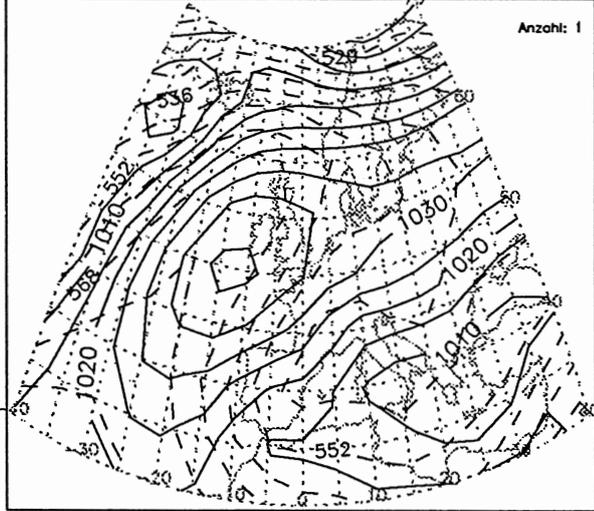
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 11



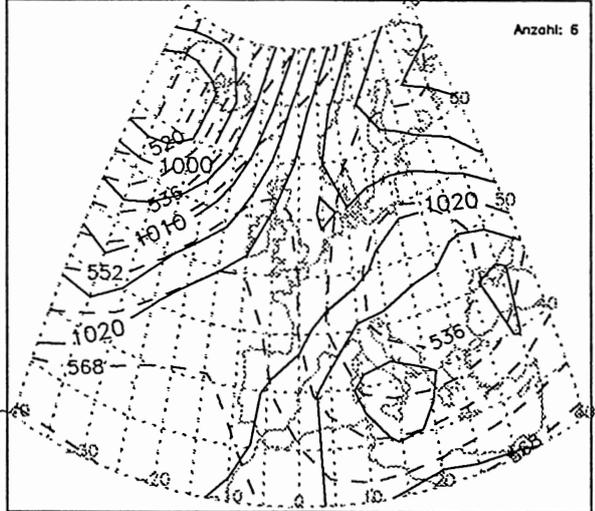
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 17 TRM Monat: 12



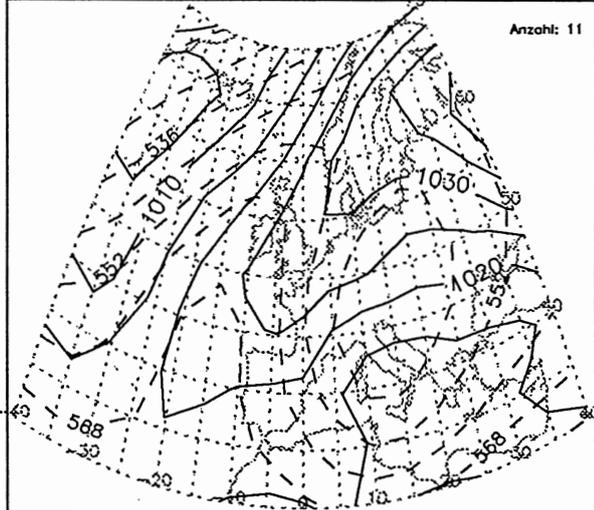
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 1



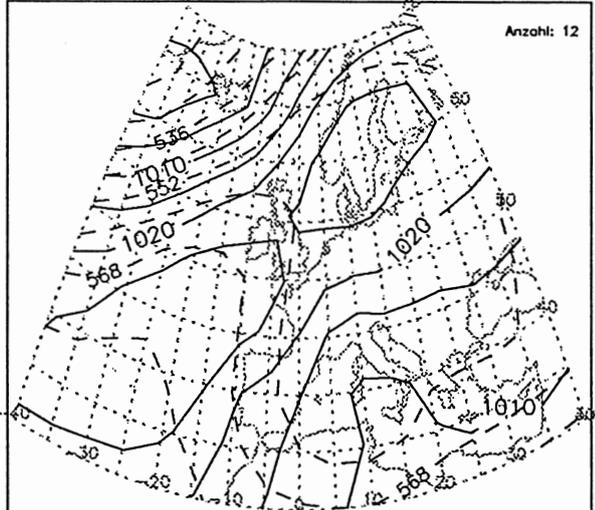
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 2



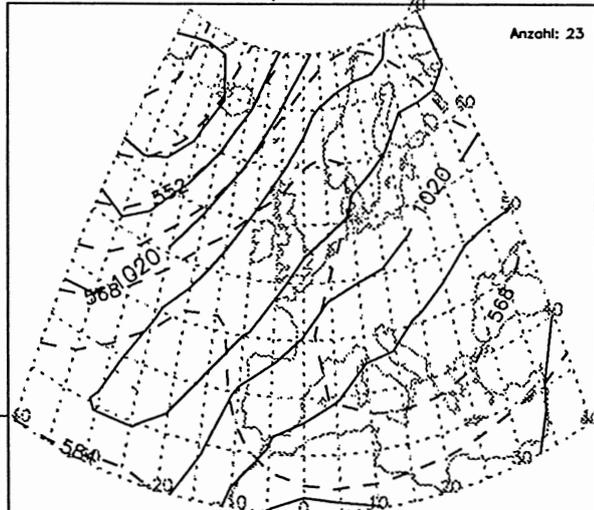
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 3



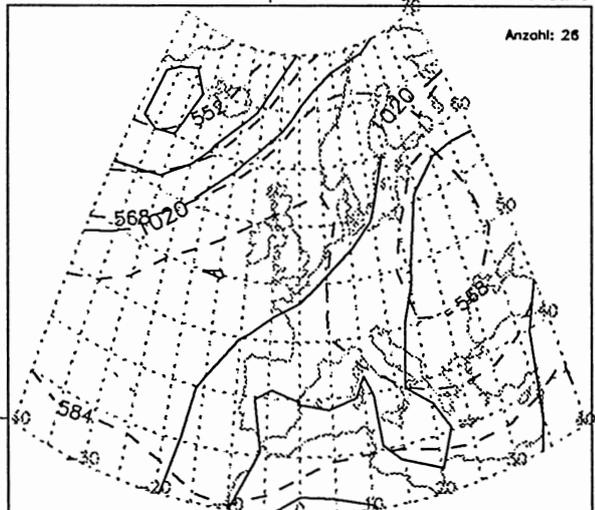
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 4



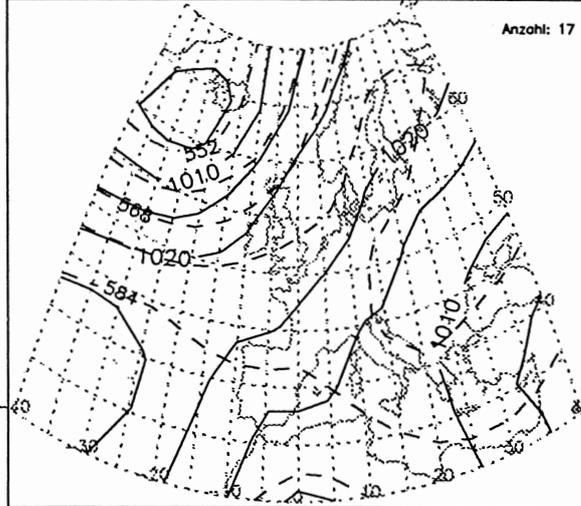
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 5



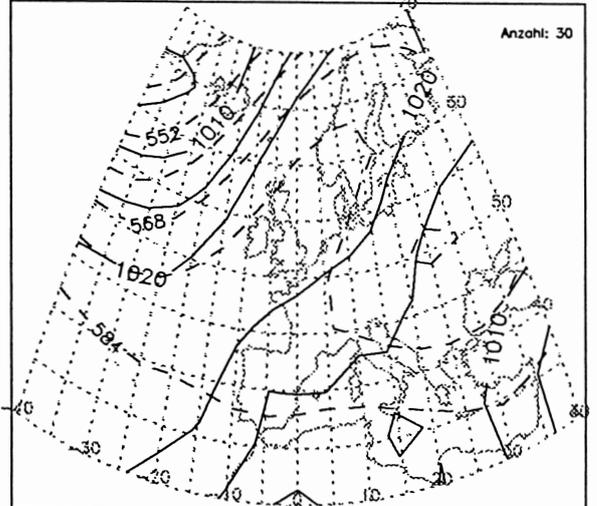
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 6



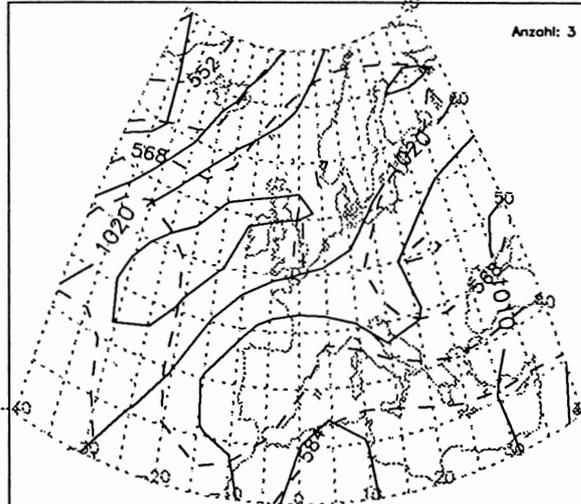
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 7



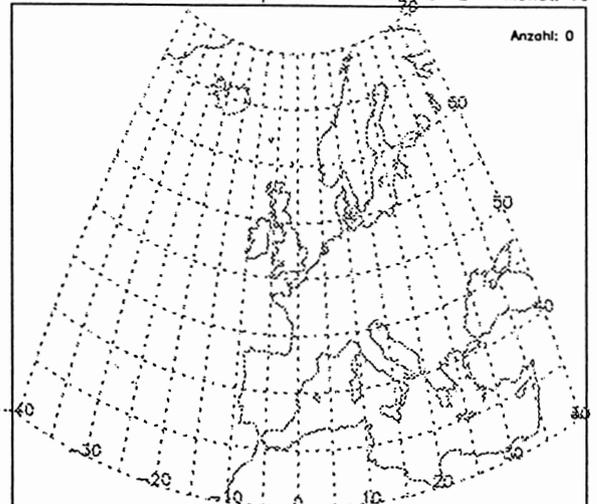
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 8



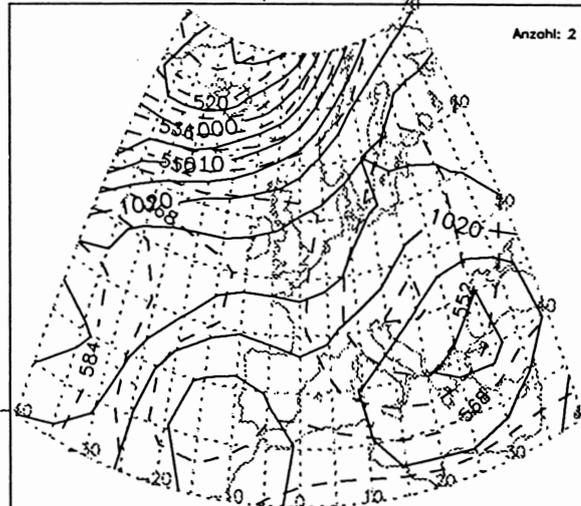
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 9



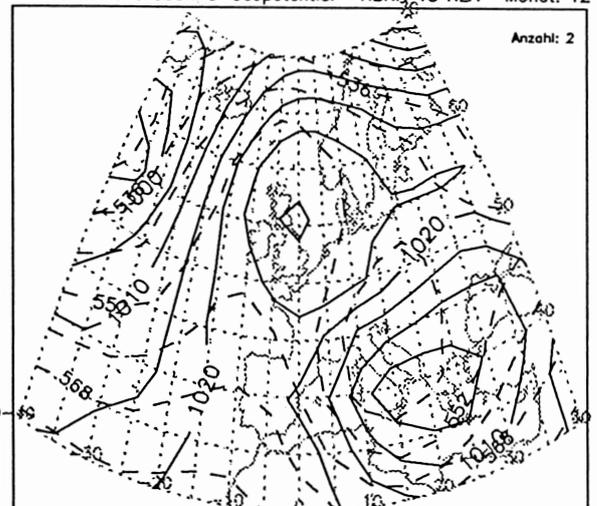
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 10



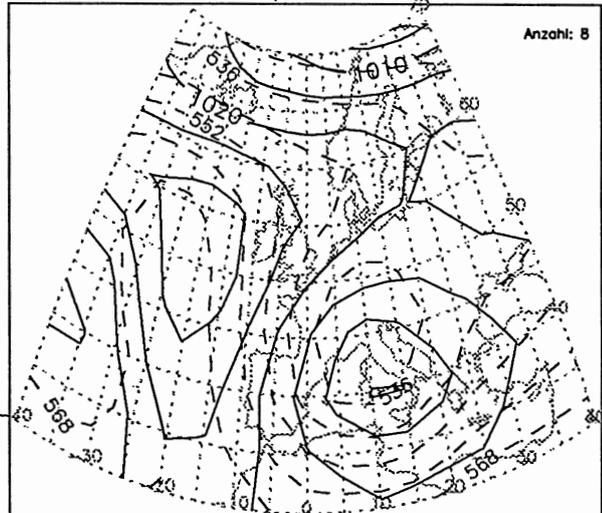
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 11



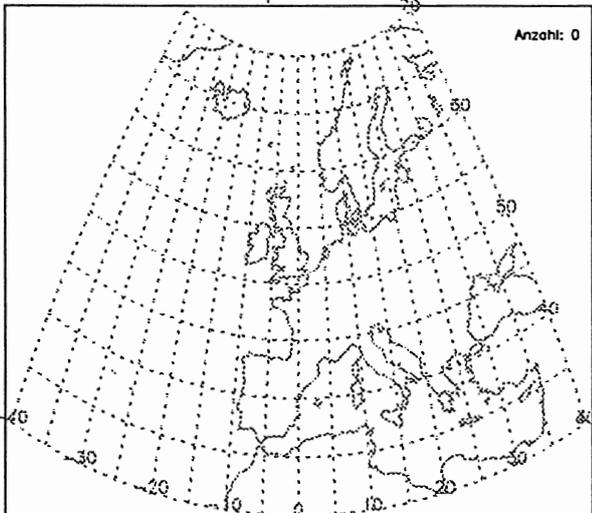
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 18 NEA Monat: 12



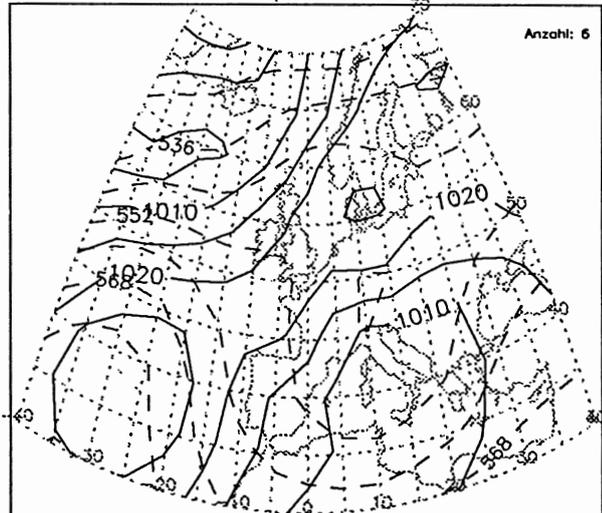
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 1



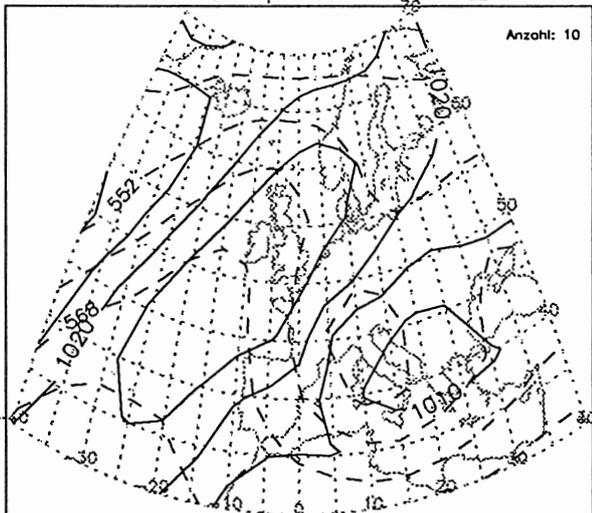
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 2



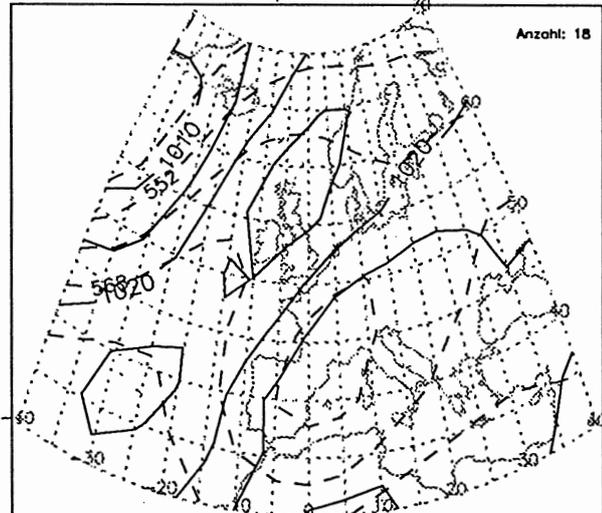
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 3



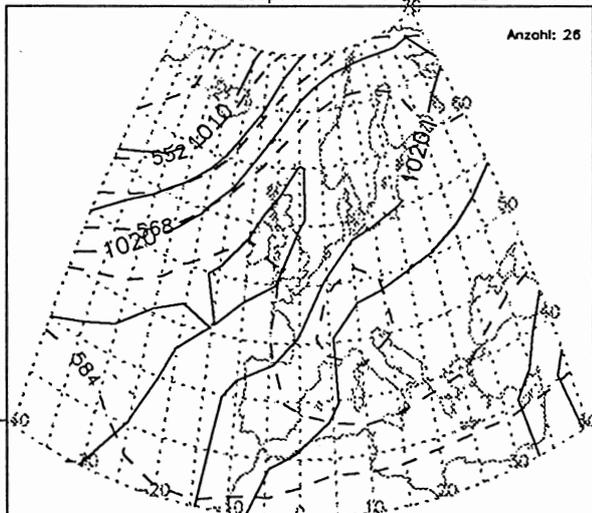
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 4



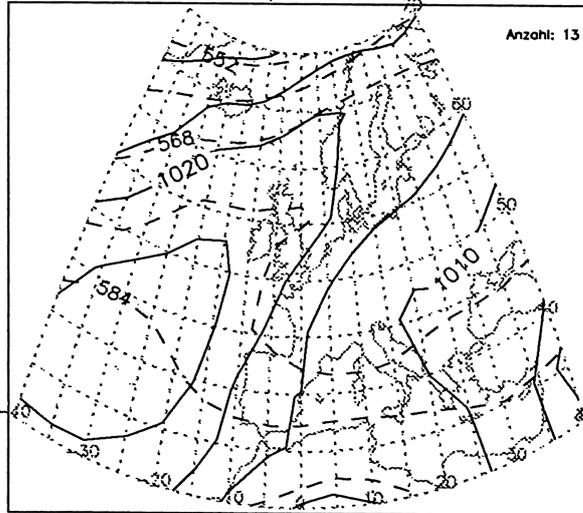
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 5



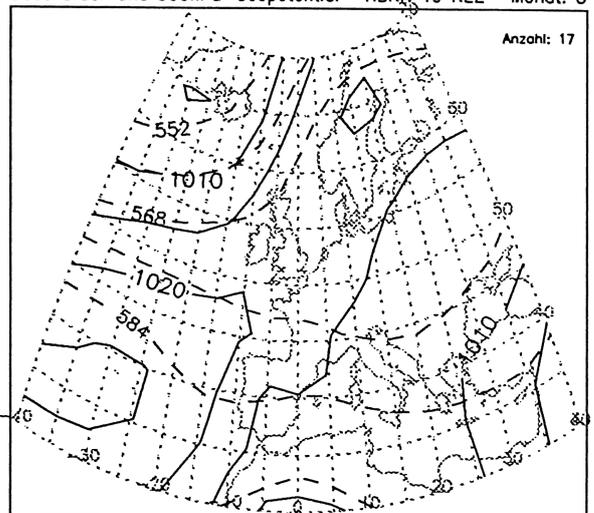
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 6



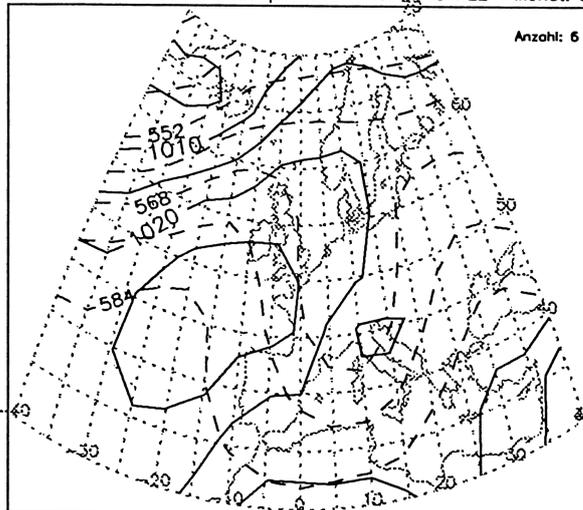
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 7



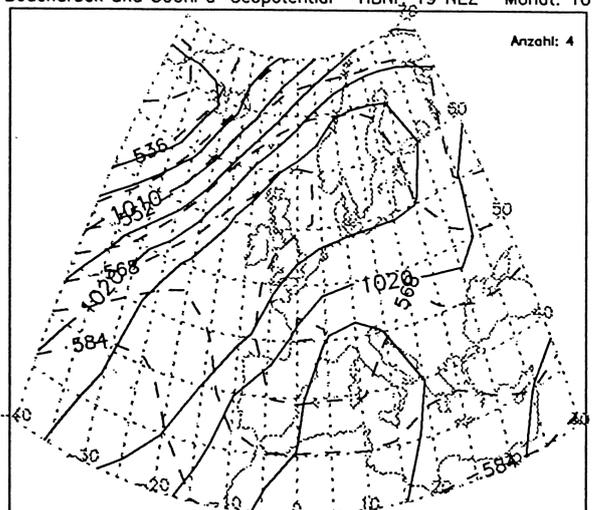
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 8



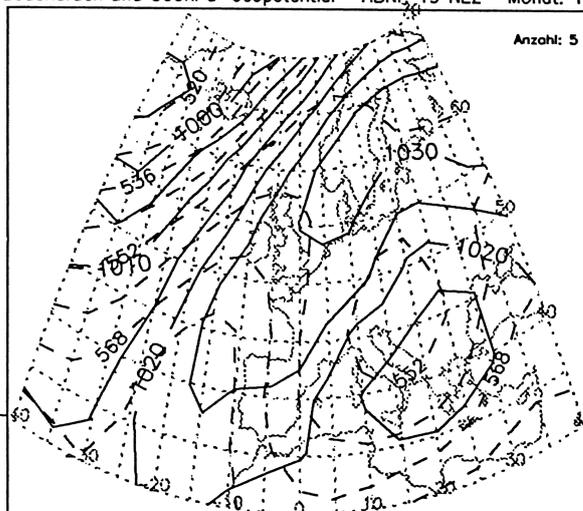
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 9



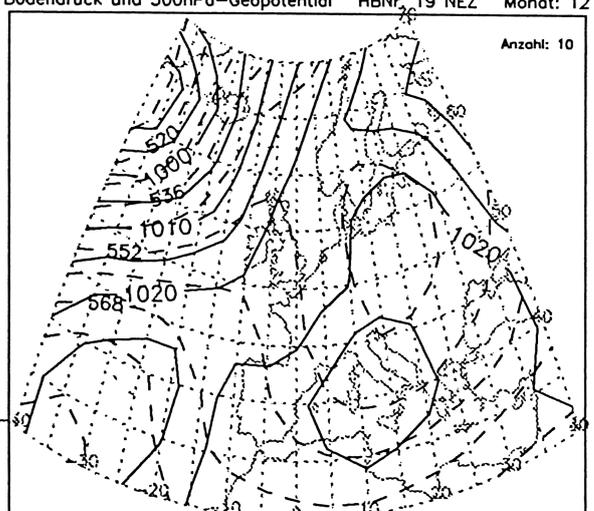
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 10



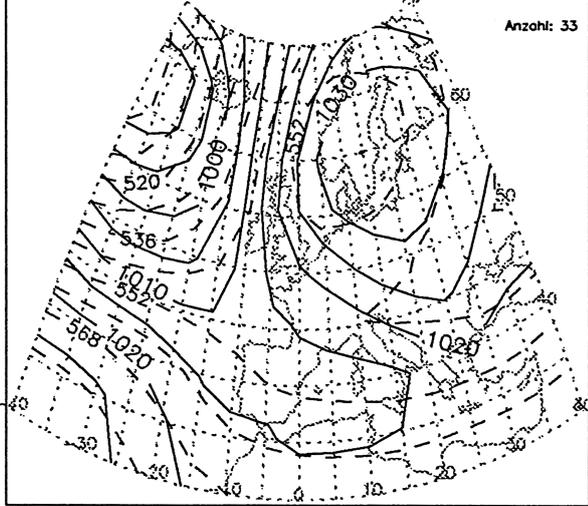
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 11



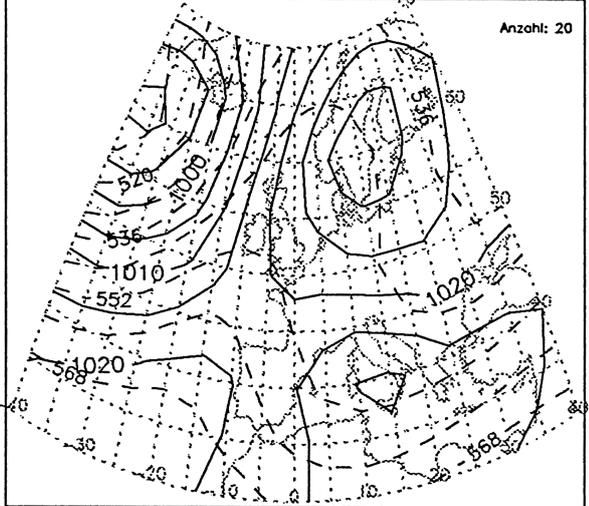
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 19 NEZ Monat: 12



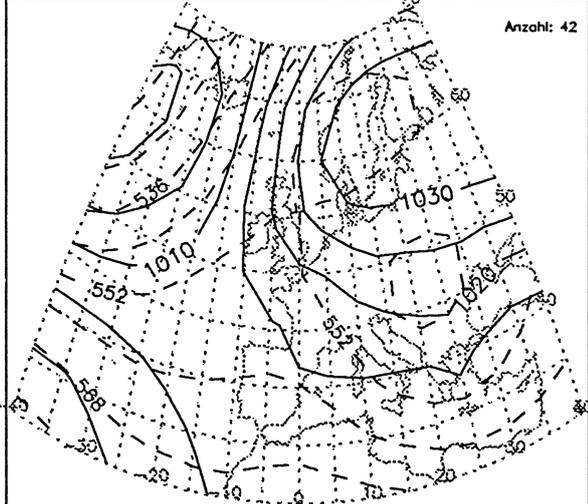
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 1



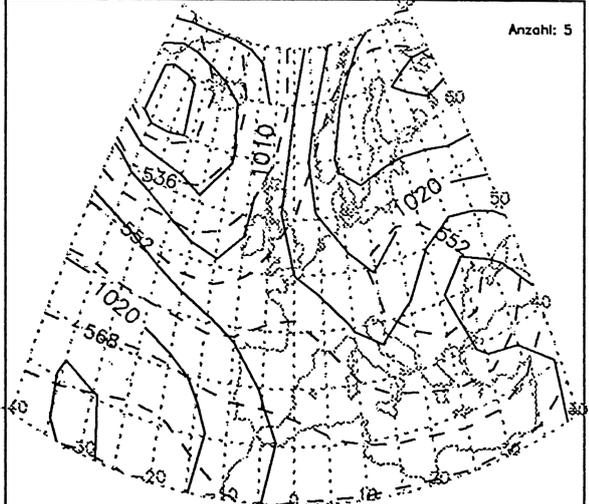
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 2



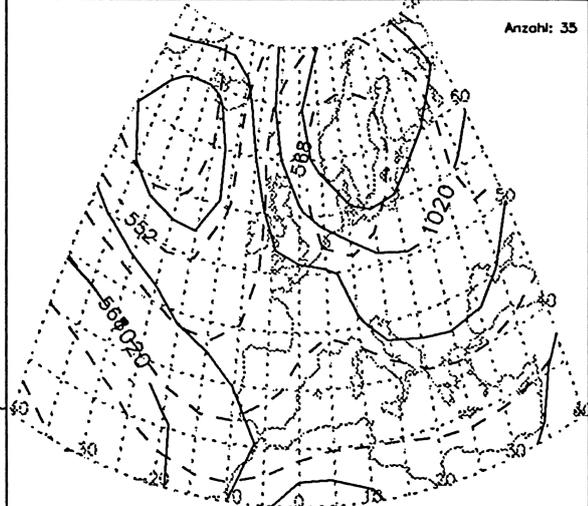
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 3



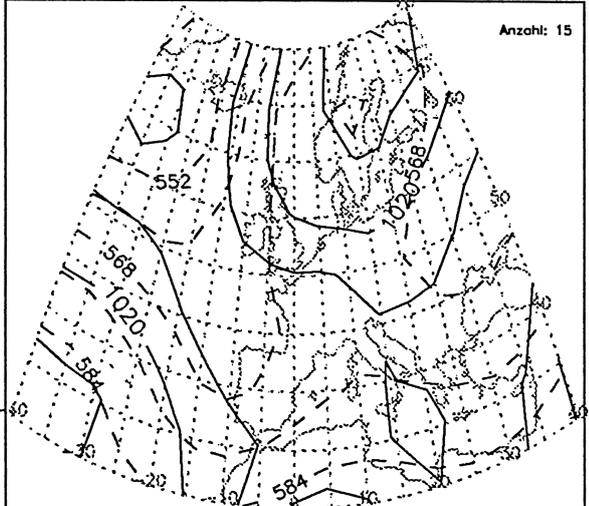
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 4



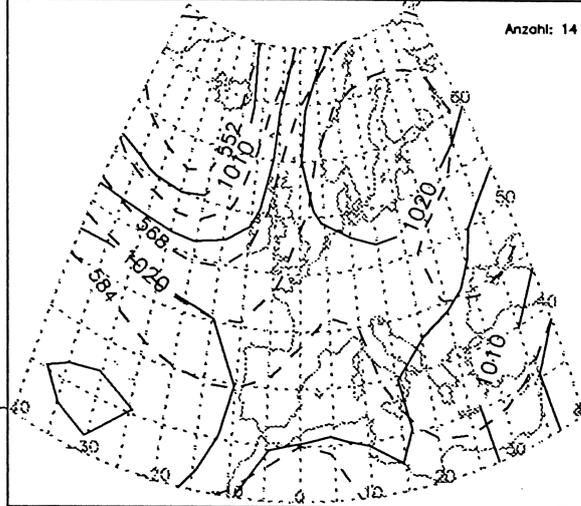
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 5



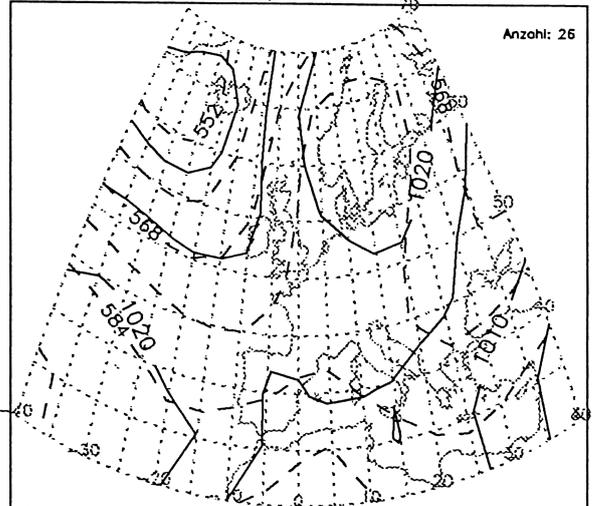
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 6



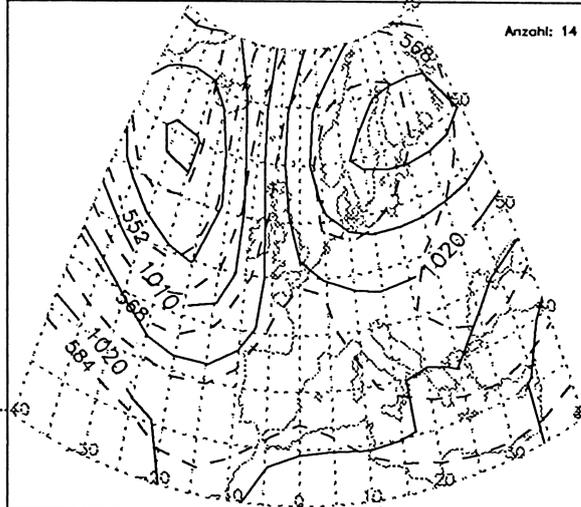
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 7



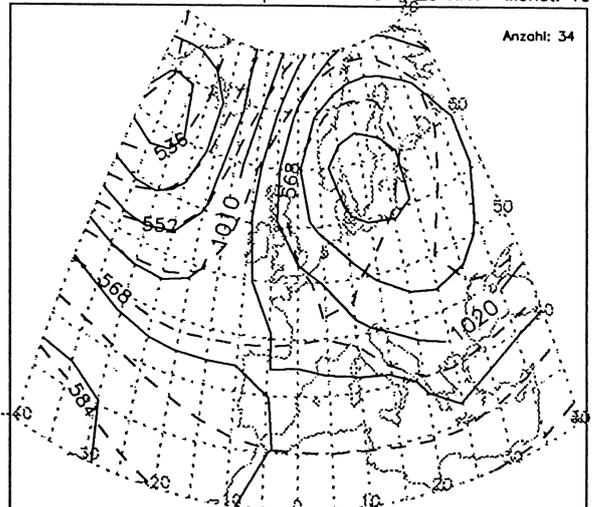
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 8



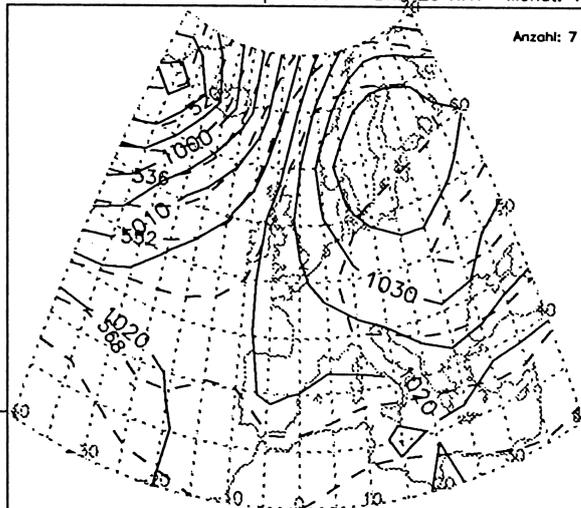
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 9



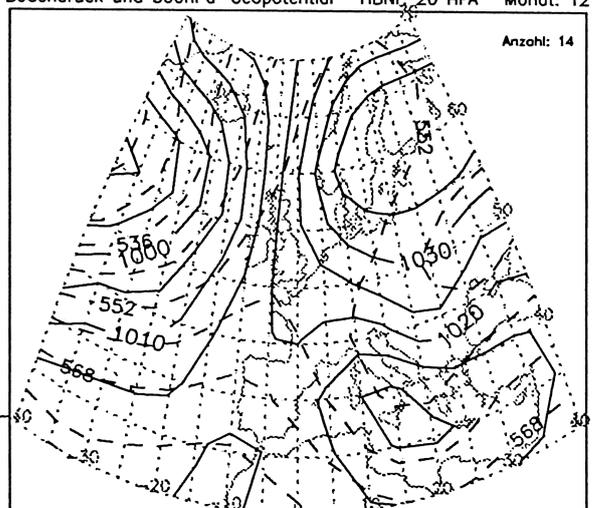
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 10



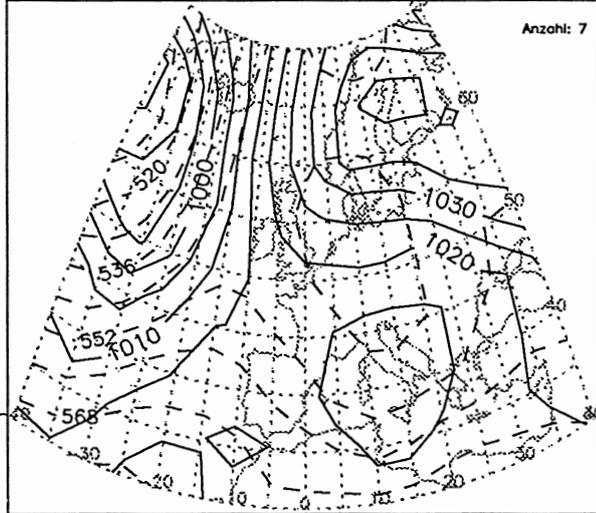
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 11



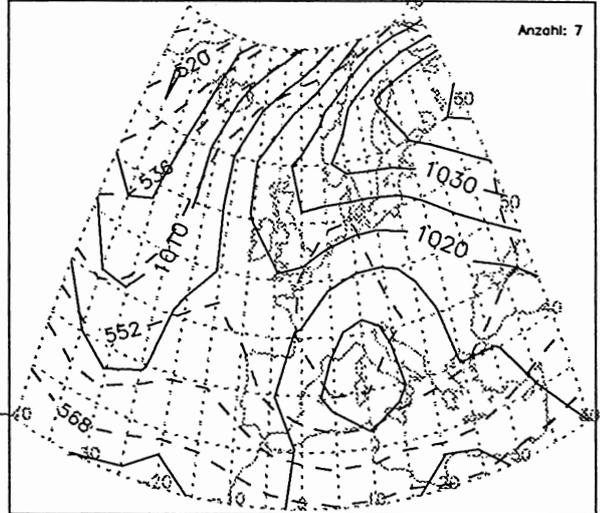
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 20 HFA Monat: 12



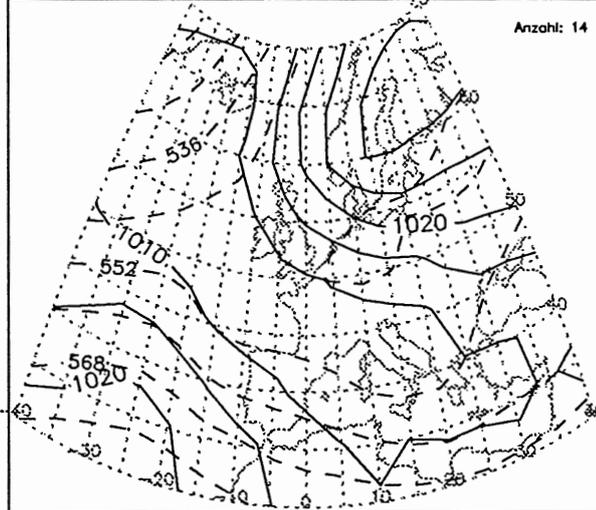
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 1



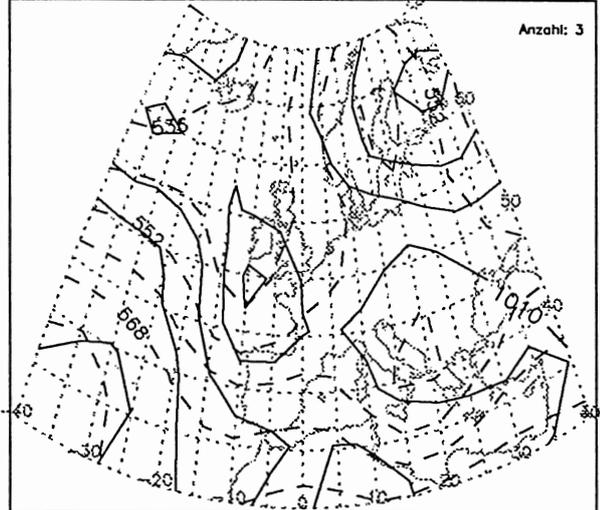
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 2



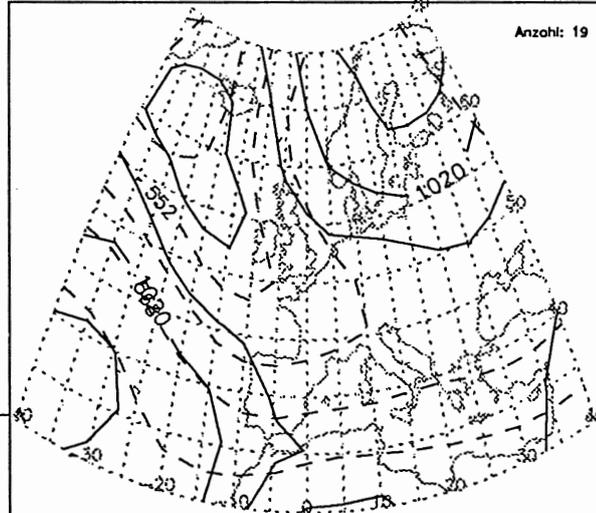
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 3



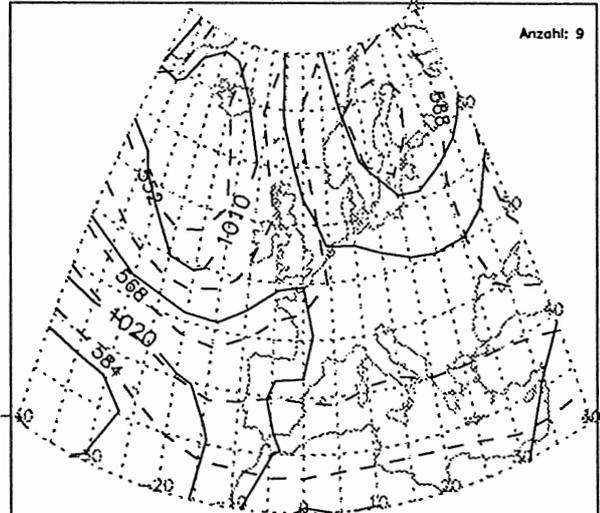
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 4



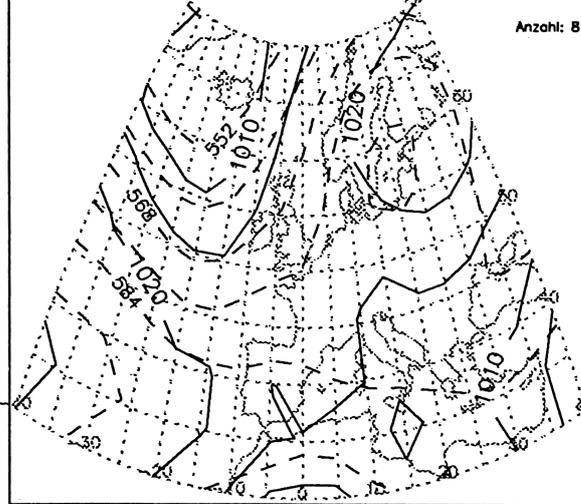
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 5



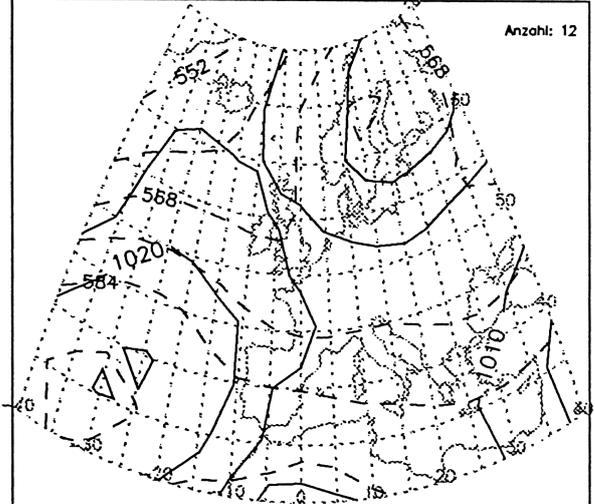
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 6



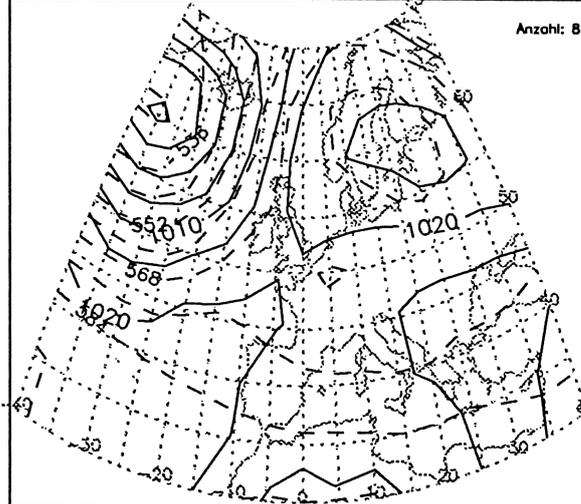
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 7



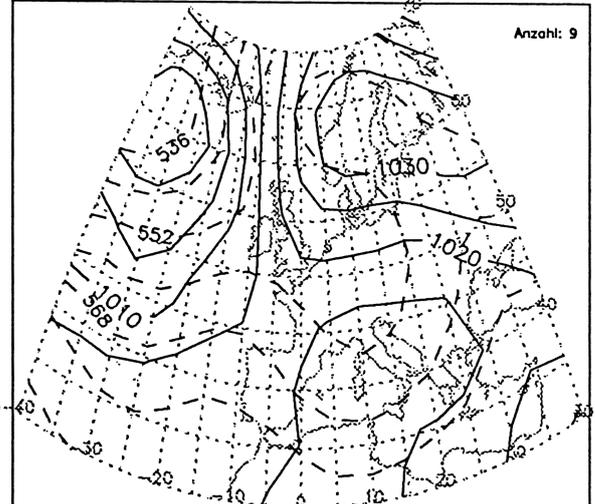
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 8



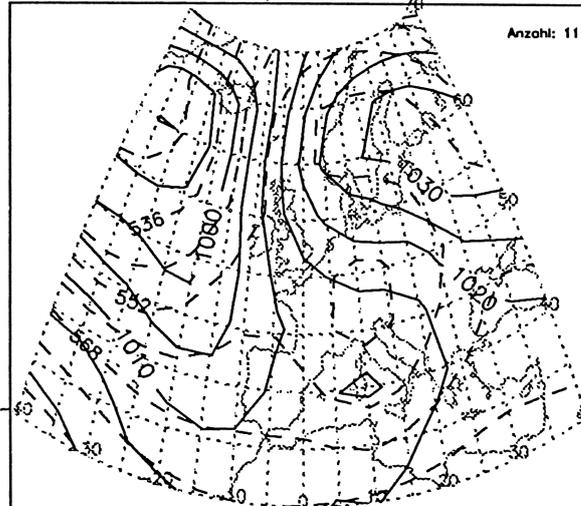
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 9



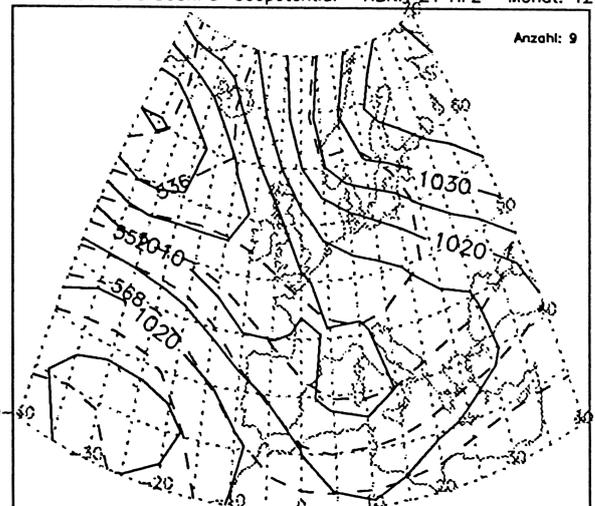
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 10



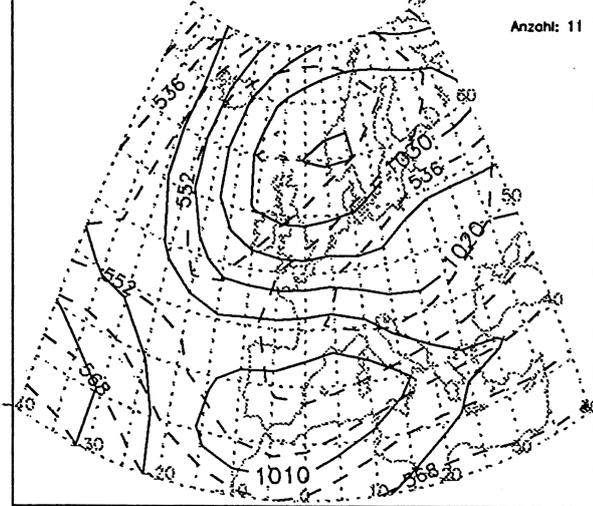
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 11



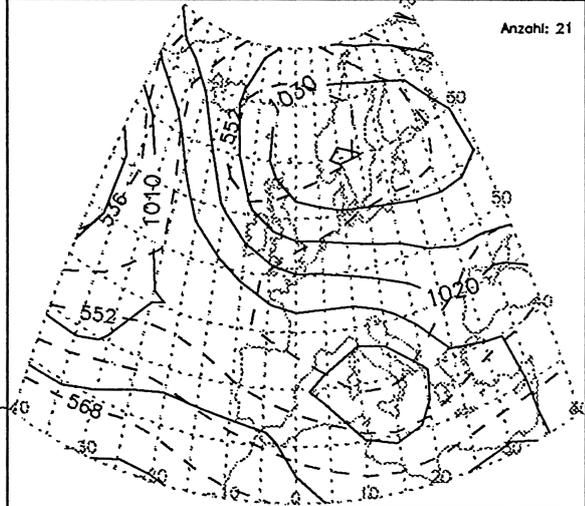
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 21 HFZ Monat: 12



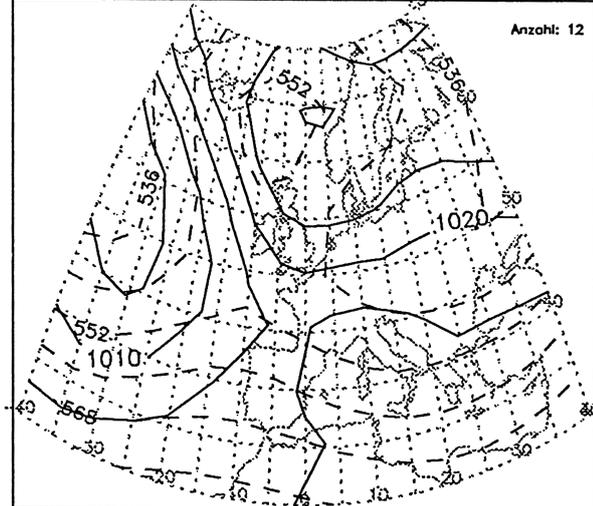
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 1



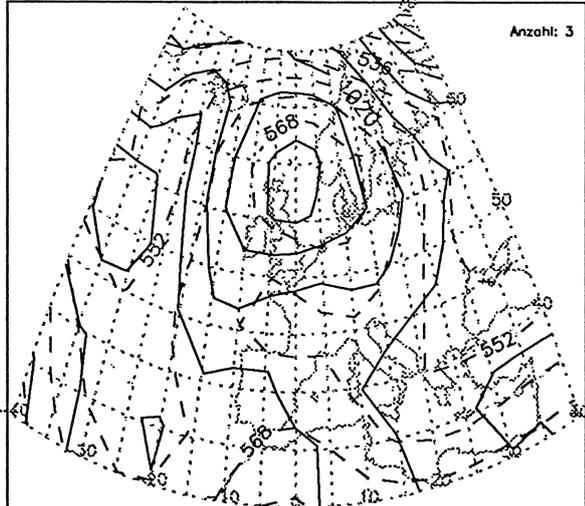
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 2



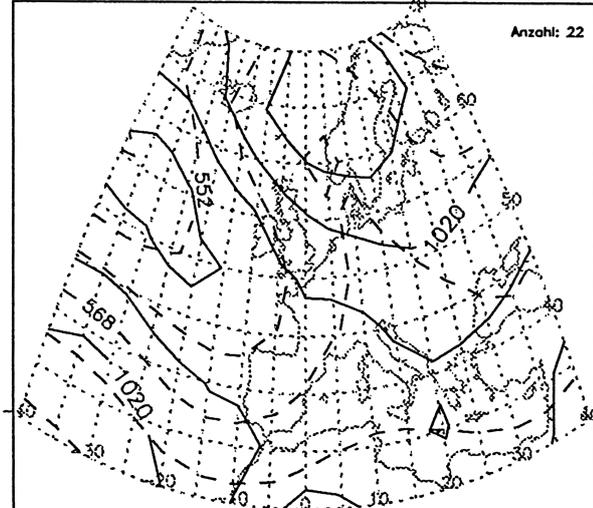
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 3



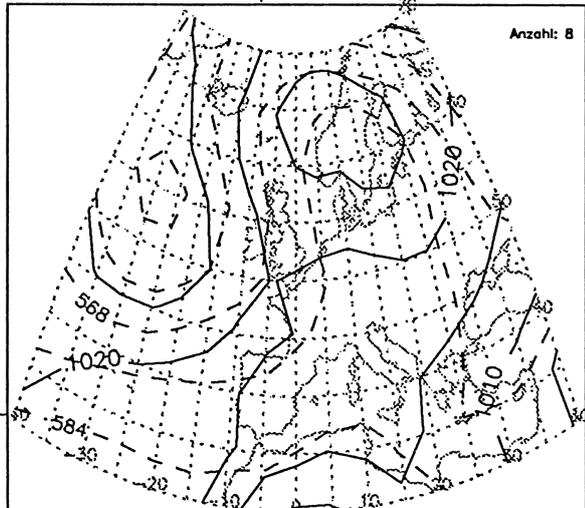
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 4



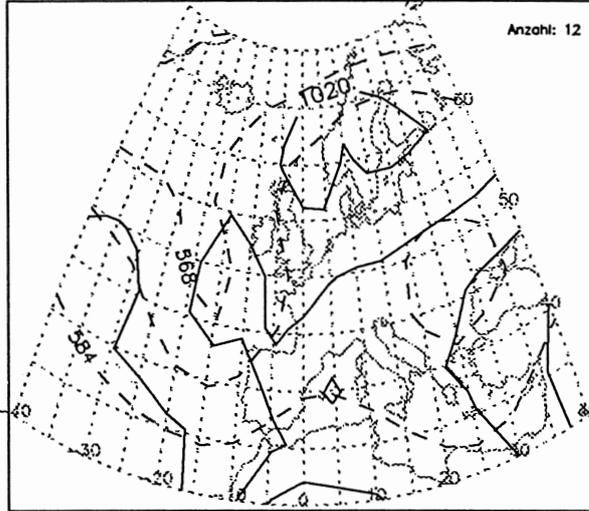
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 5



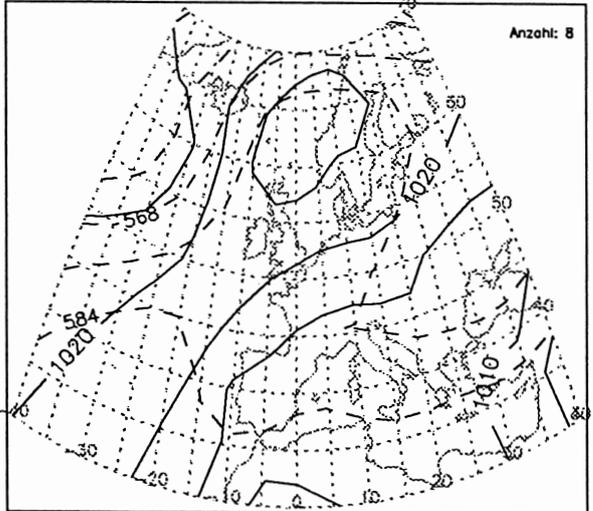
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 6



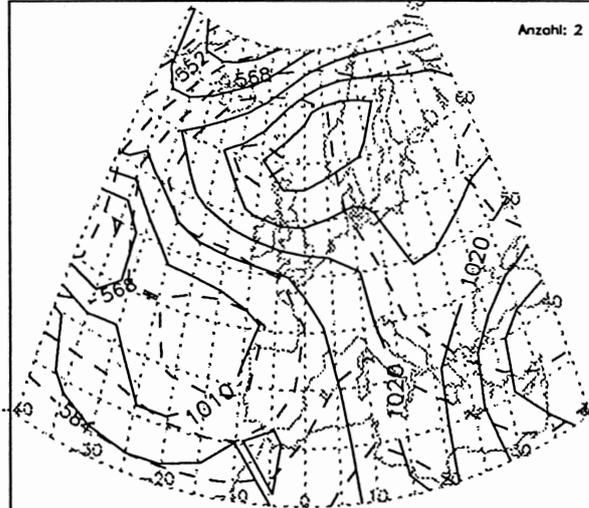
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 7



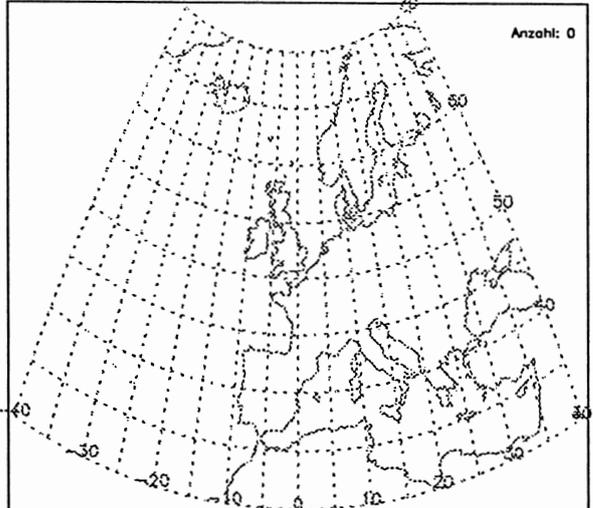
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 8



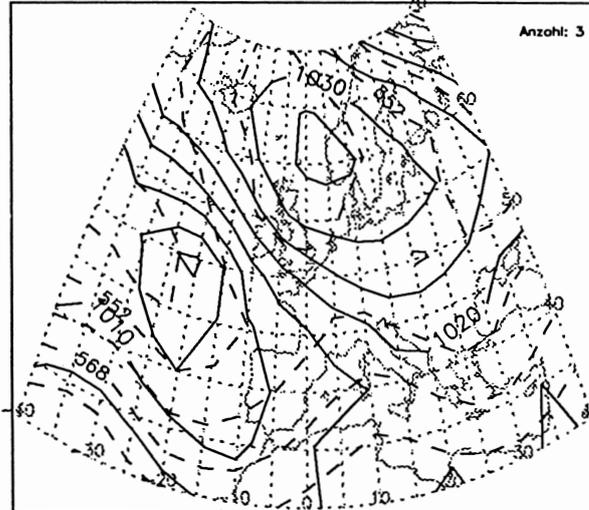
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 9



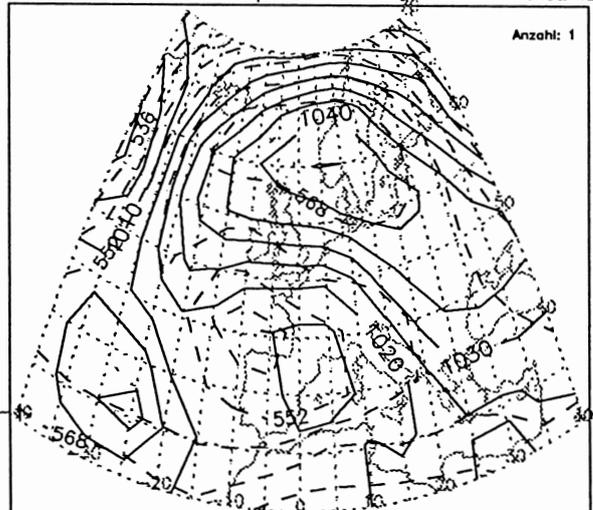
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 10



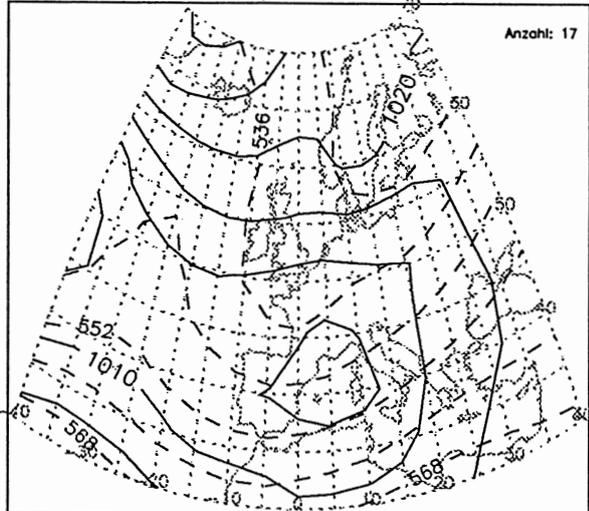
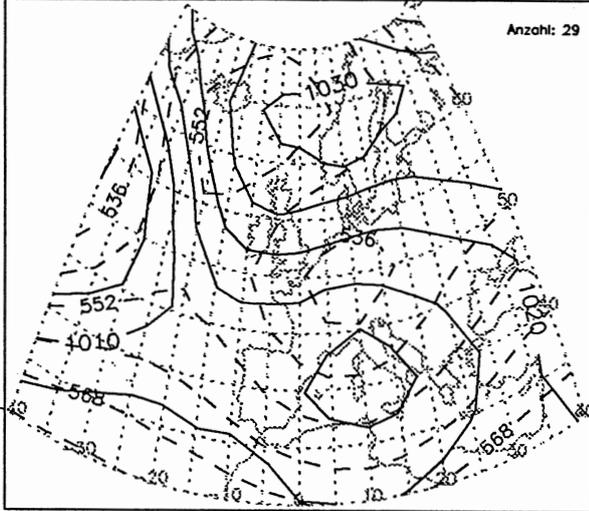
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 11



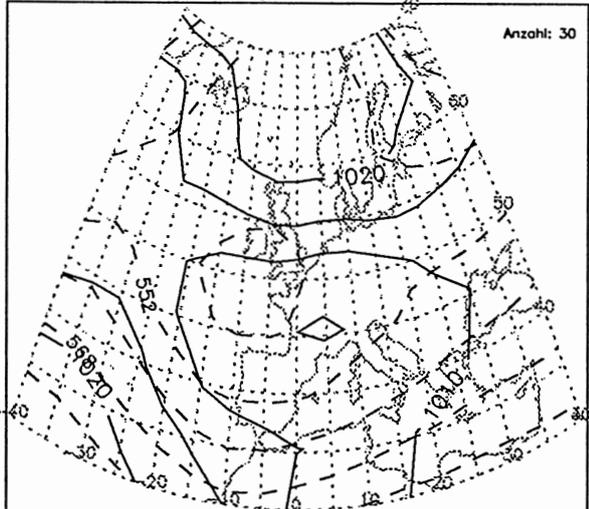
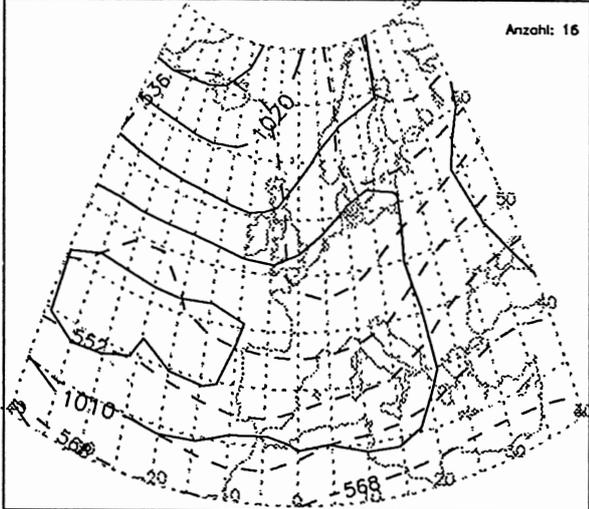
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 22 HNFA Monat: 12



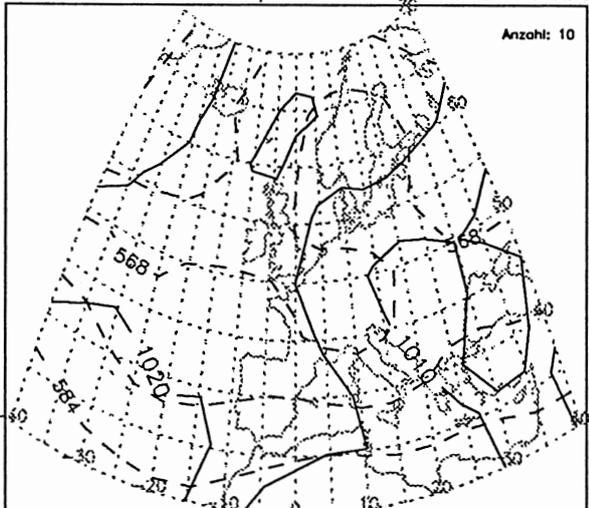
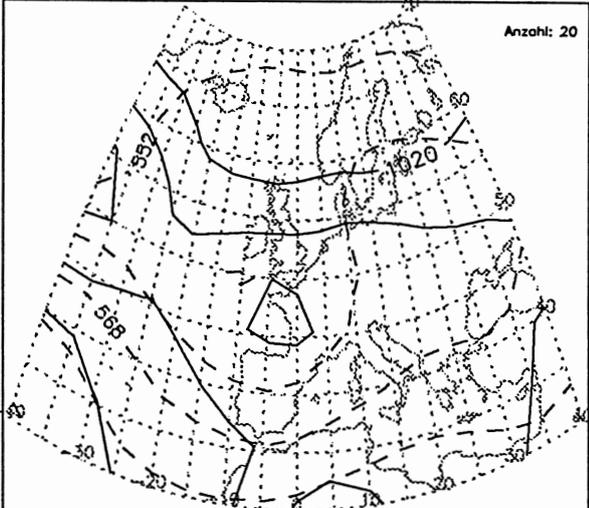
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 1 Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 2



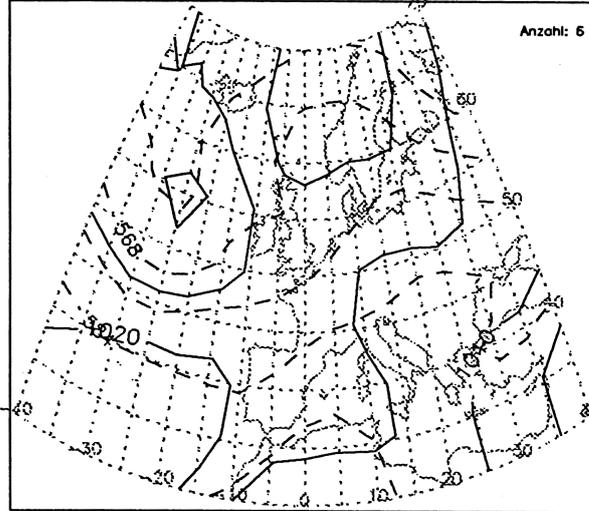
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 3 Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 4



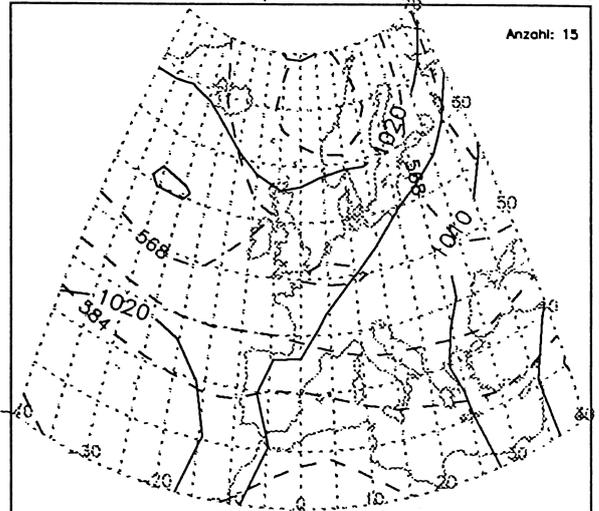
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 5 Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 6



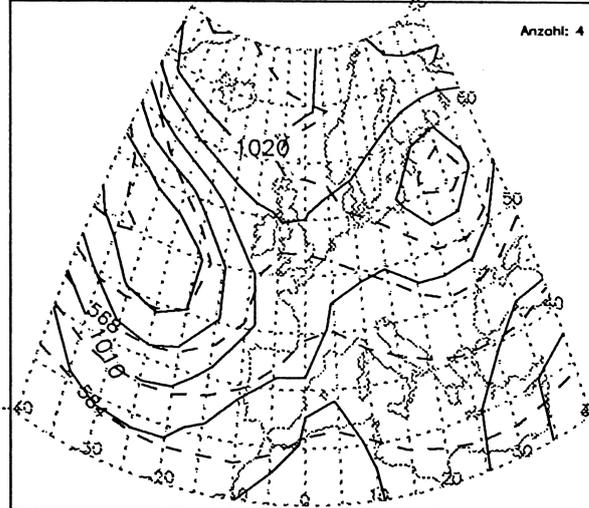
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 7



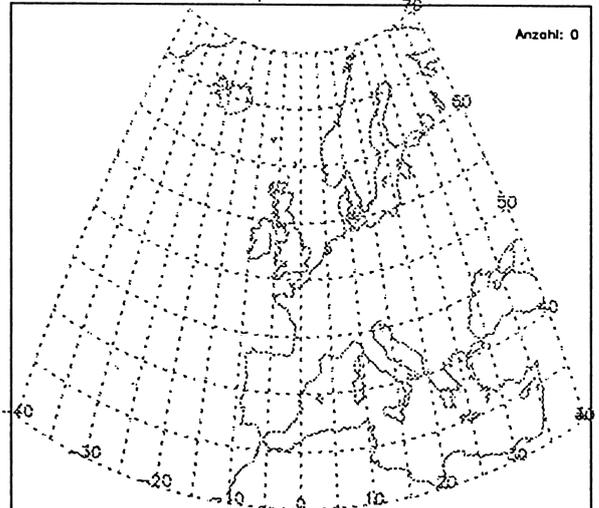
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 8



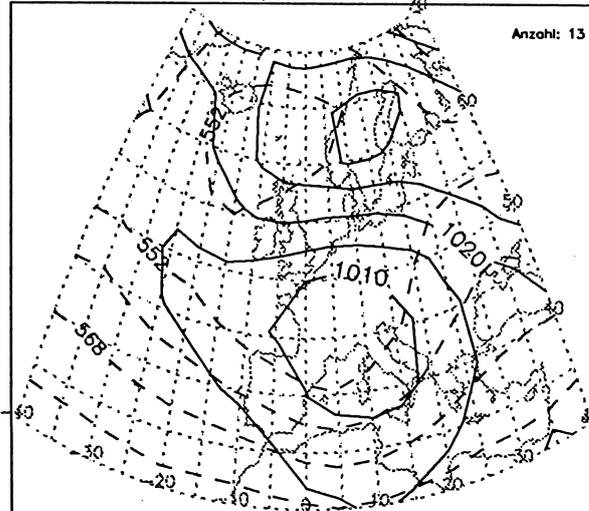
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 9



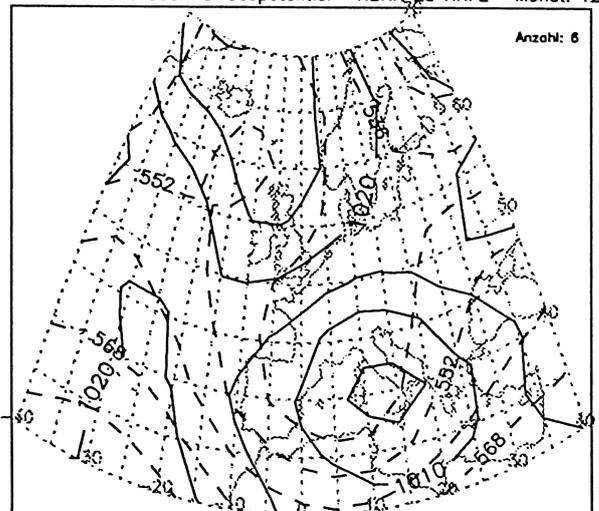
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 10



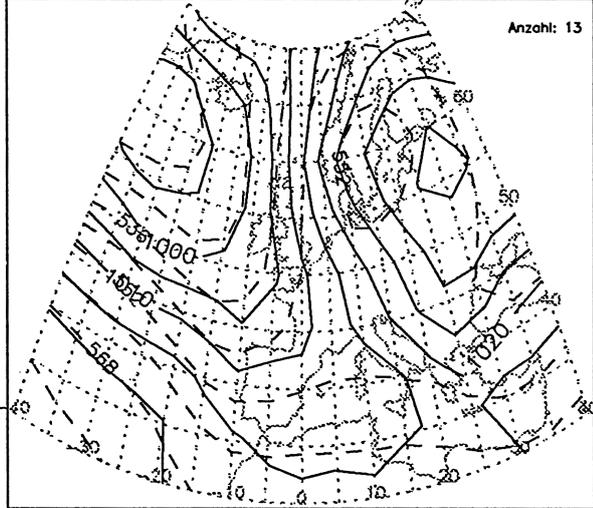
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 11



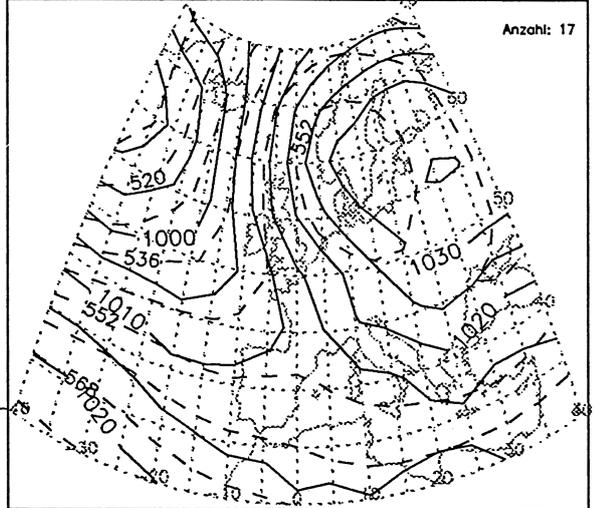
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 23 HNFZ Monat: 12



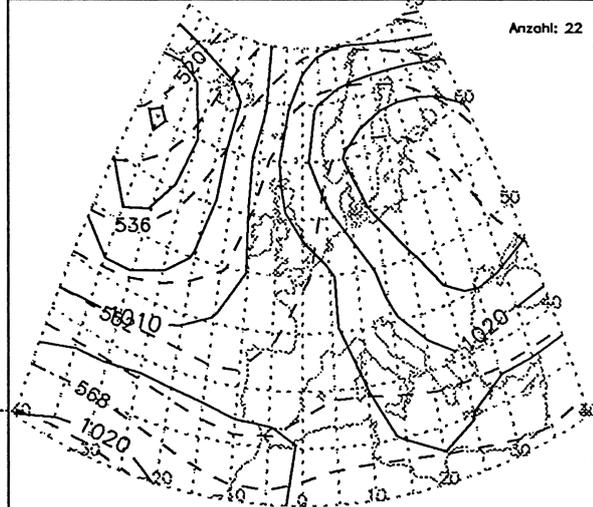
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 1



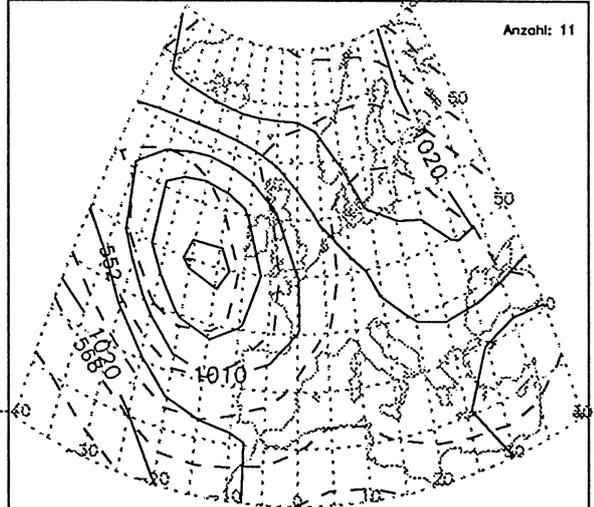
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 2



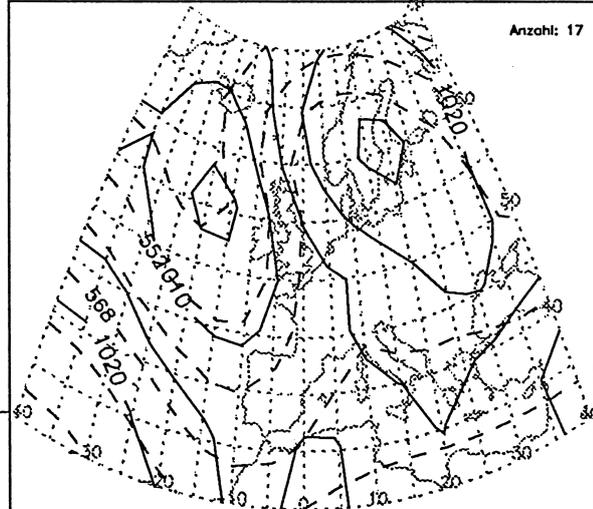
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 3



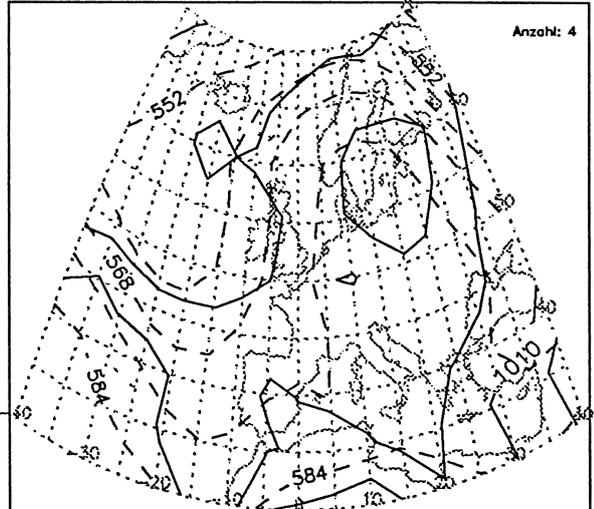
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 4



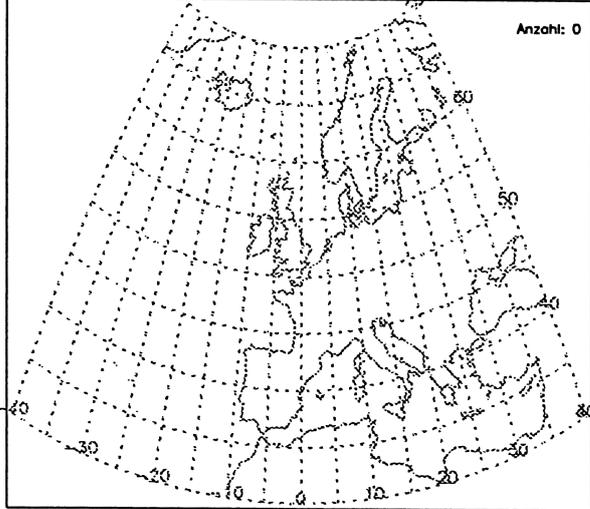
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 5



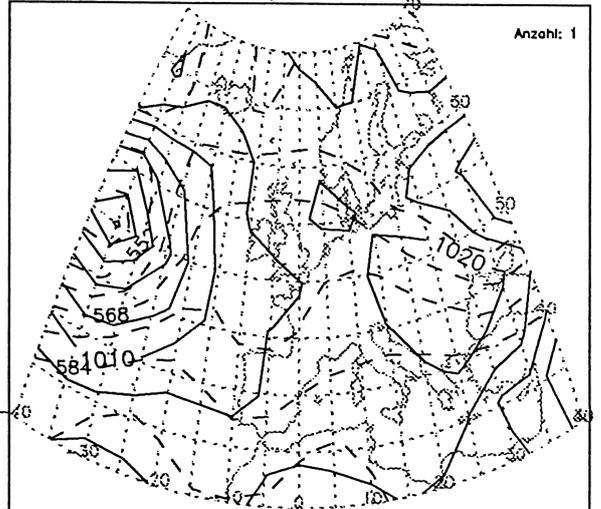
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 6



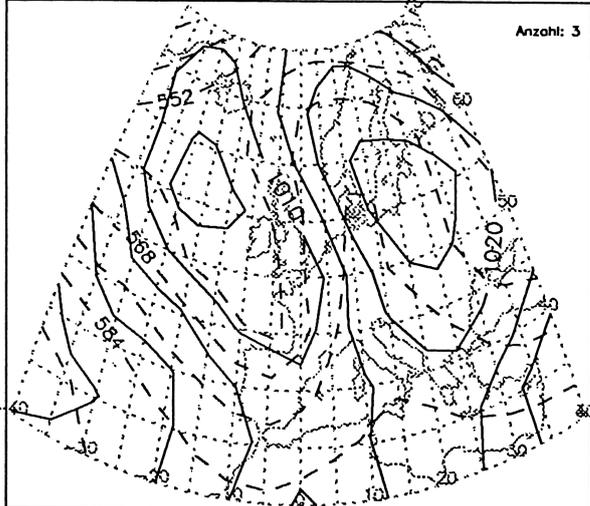
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 7



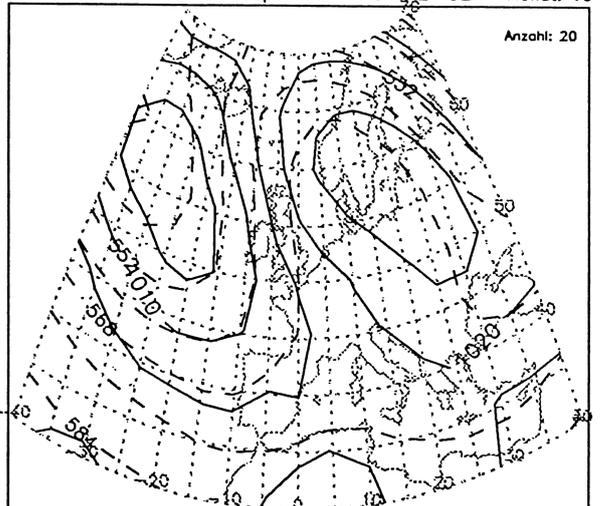
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 8



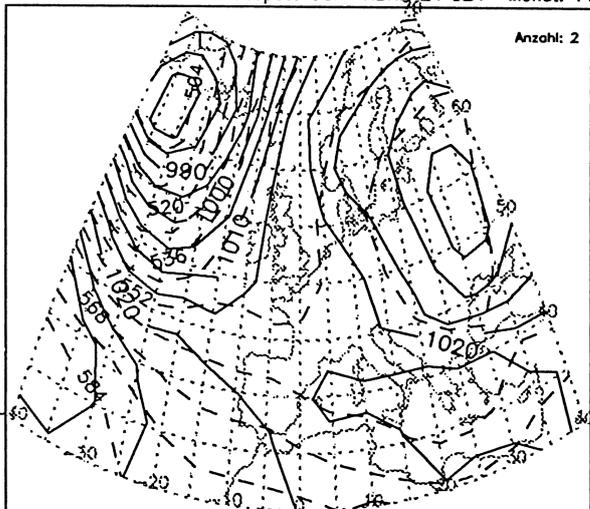
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 9



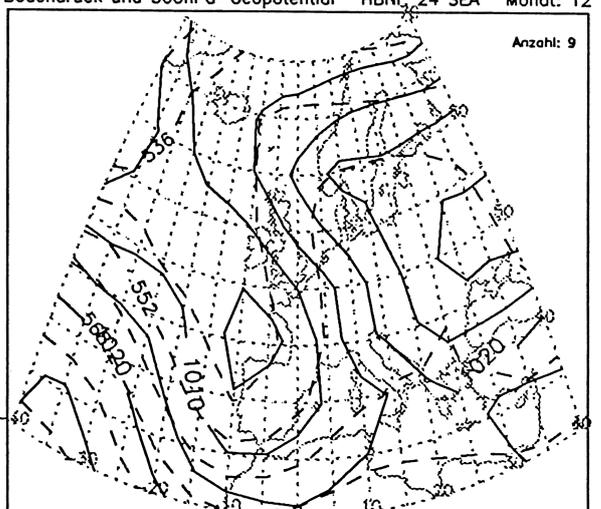
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 10



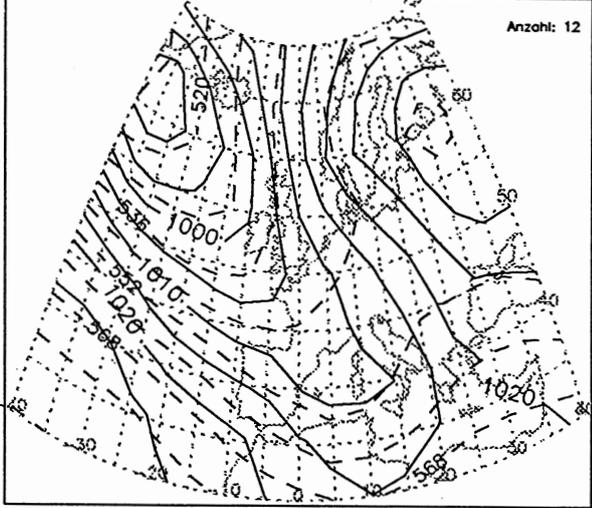
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 11



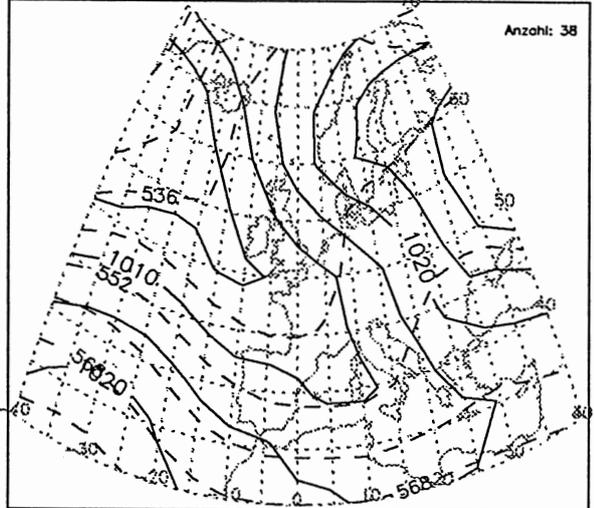
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 24 SEA Monat: 12



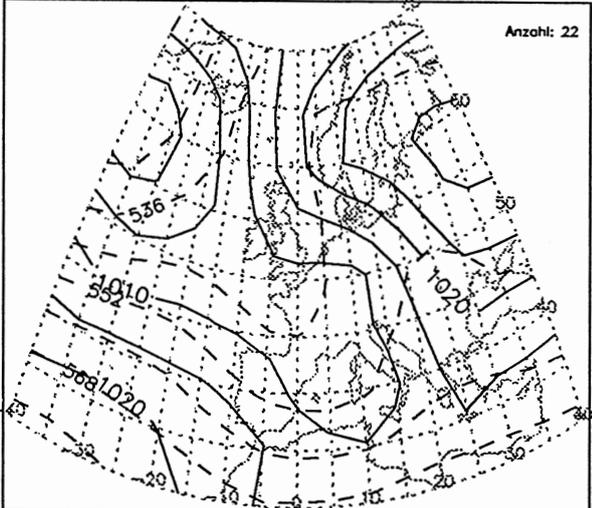
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 1



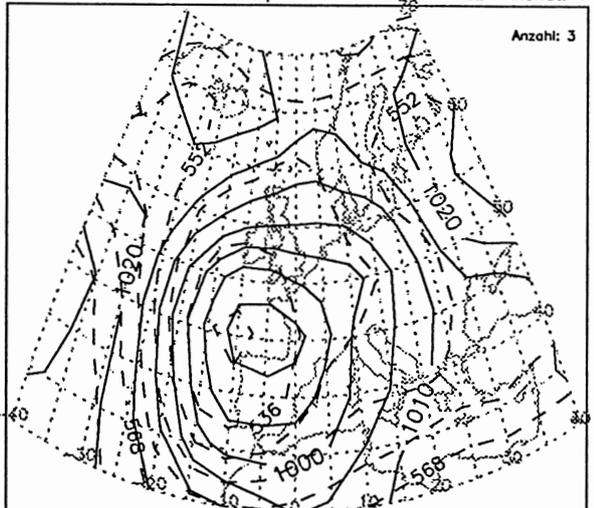
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 2



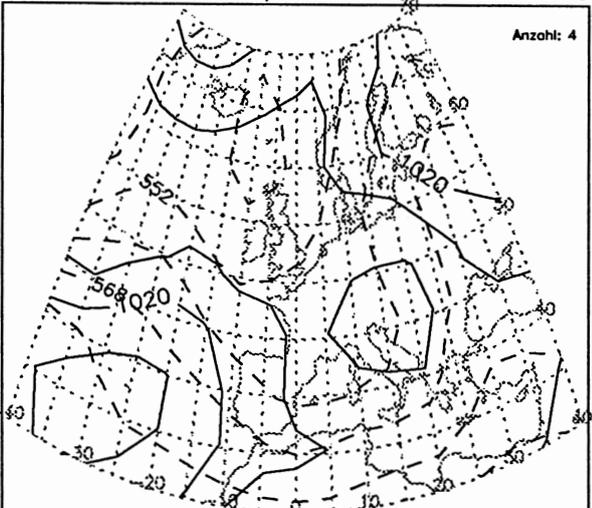
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 3



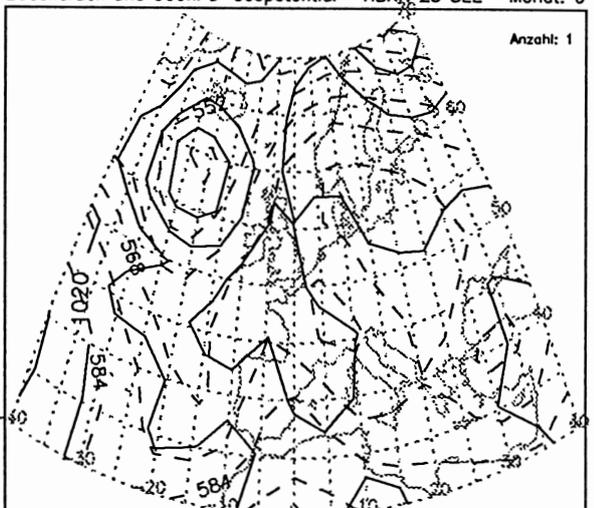
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 4



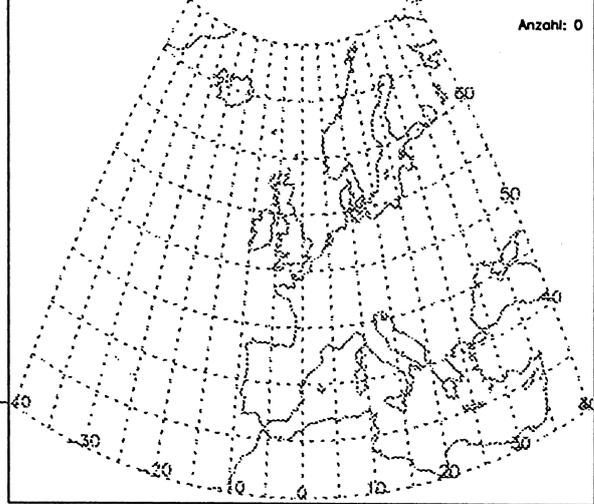
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 5



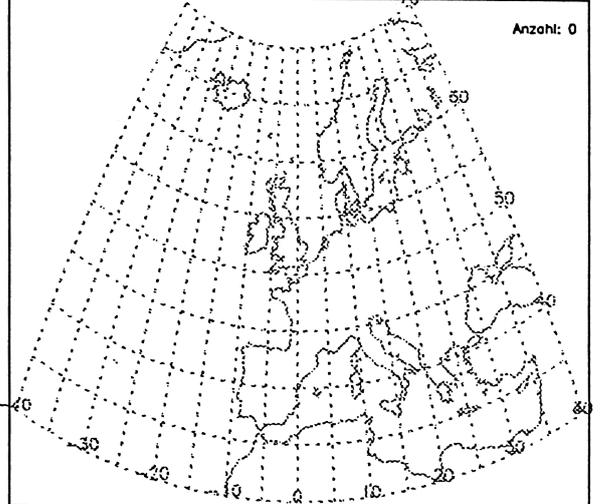
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 6



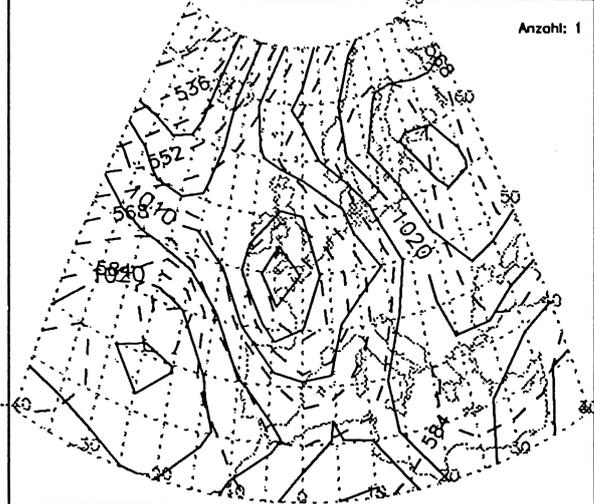
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 7



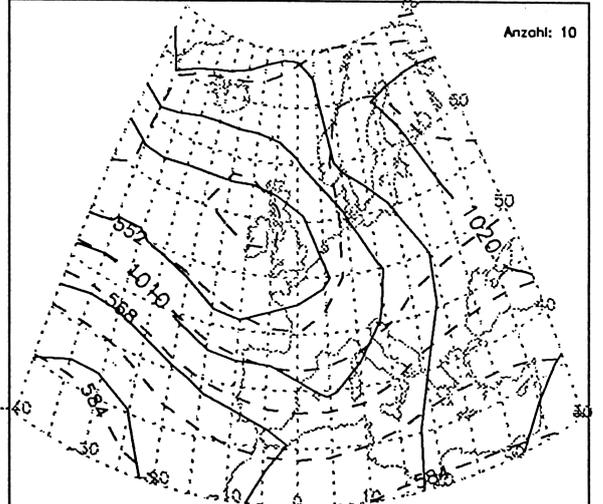
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 8



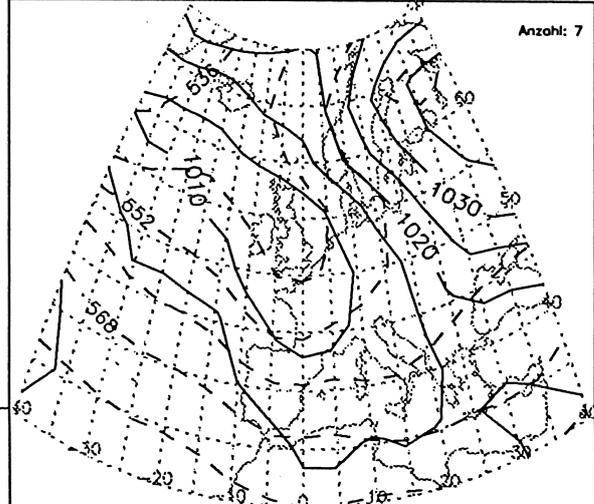
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 9



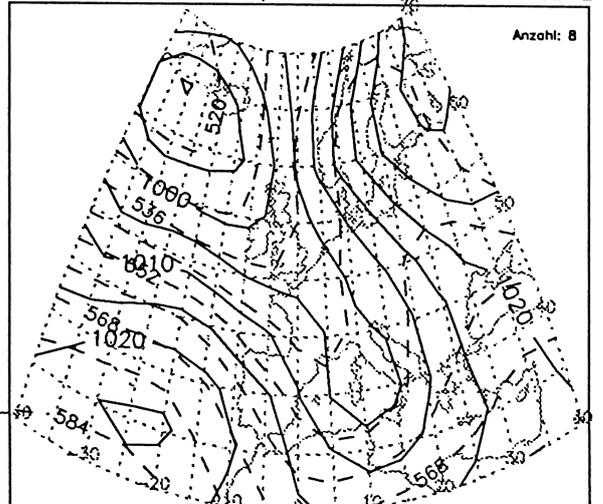
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 10



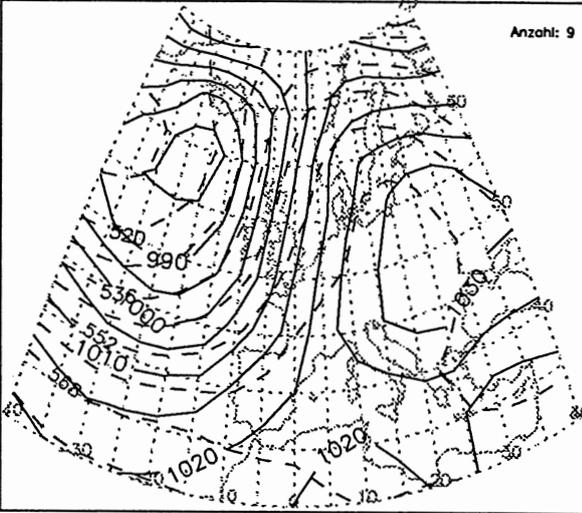
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 11



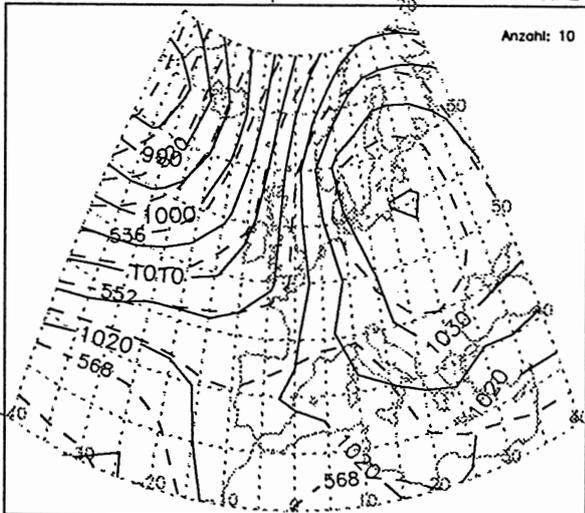
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 25 SEZ Monat: 12



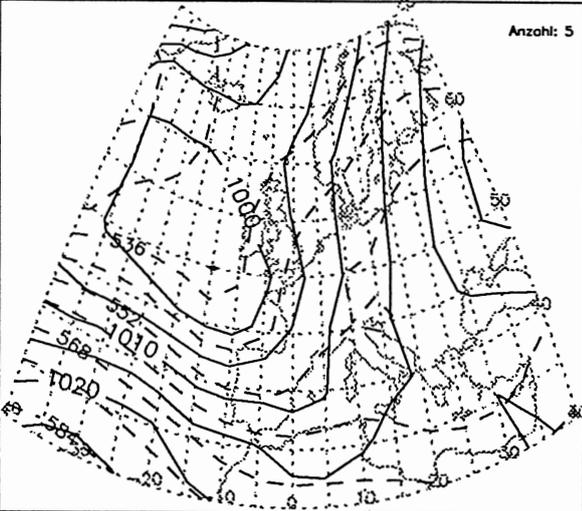
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 1



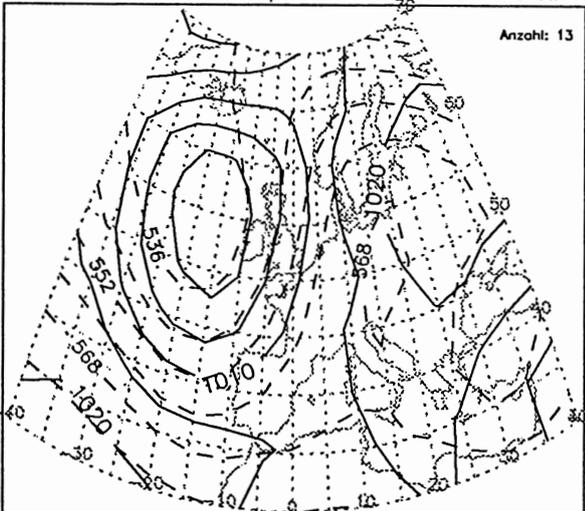
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 2



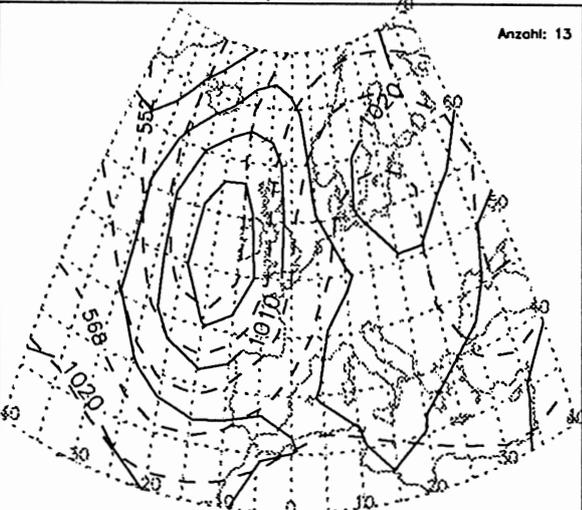
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 3



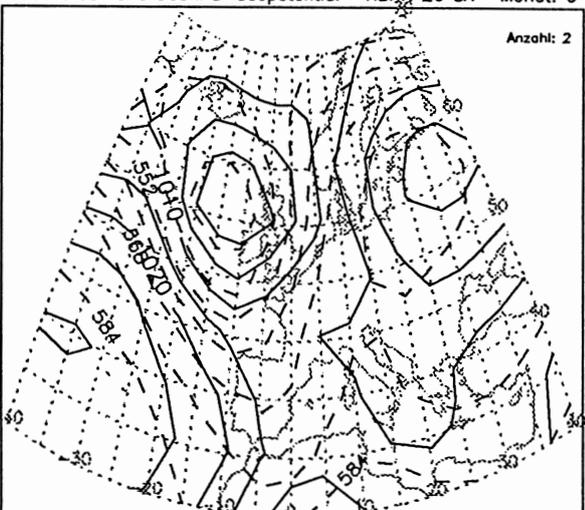
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 4



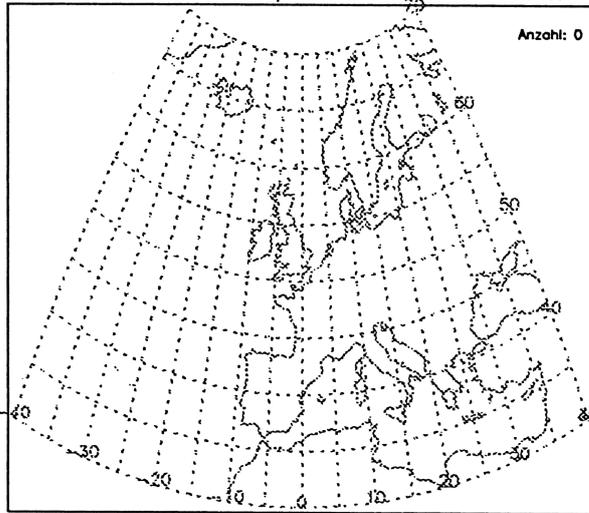
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 5



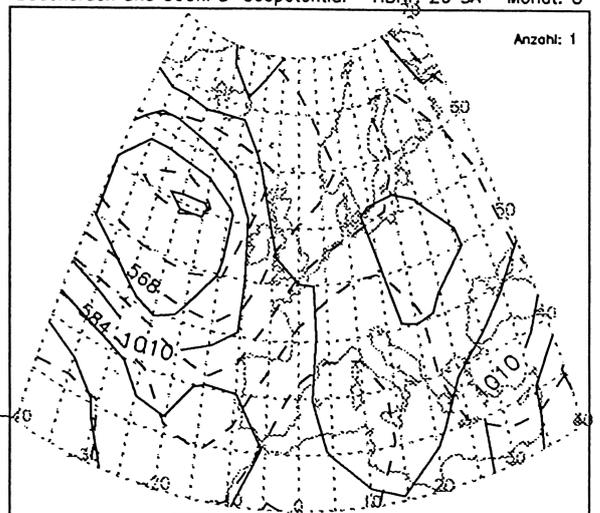
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 6



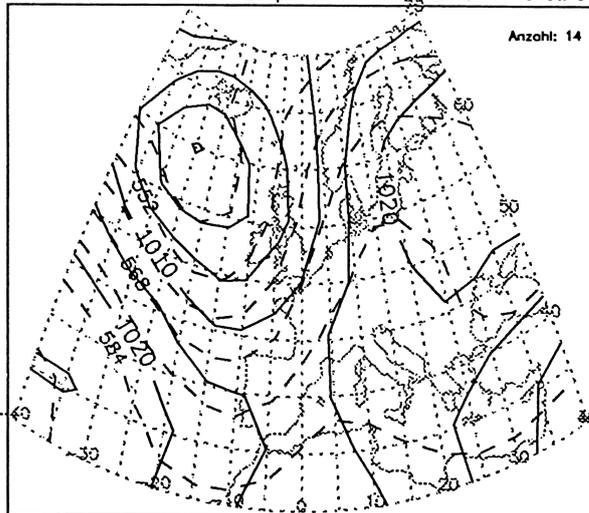
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 7



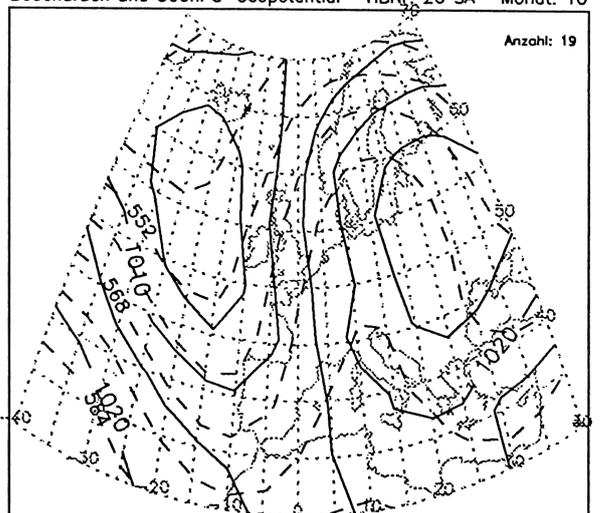
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 8



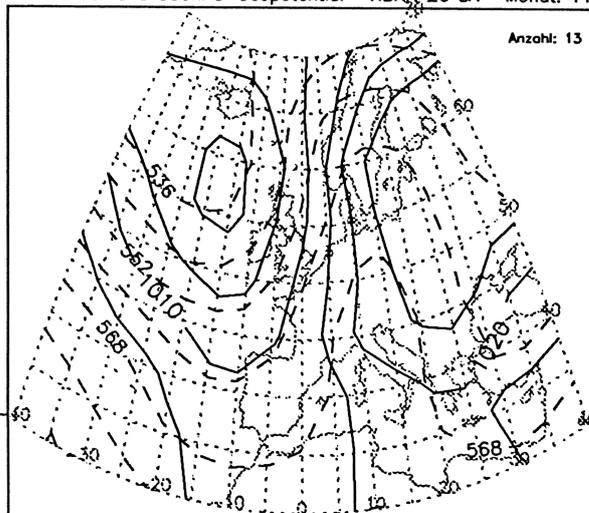
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 9



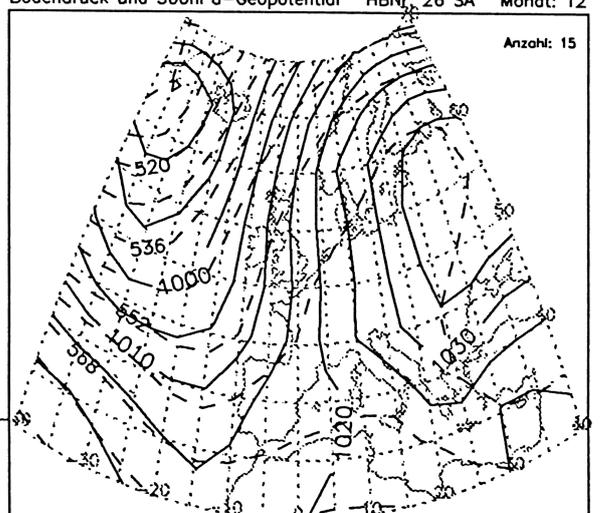
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 10



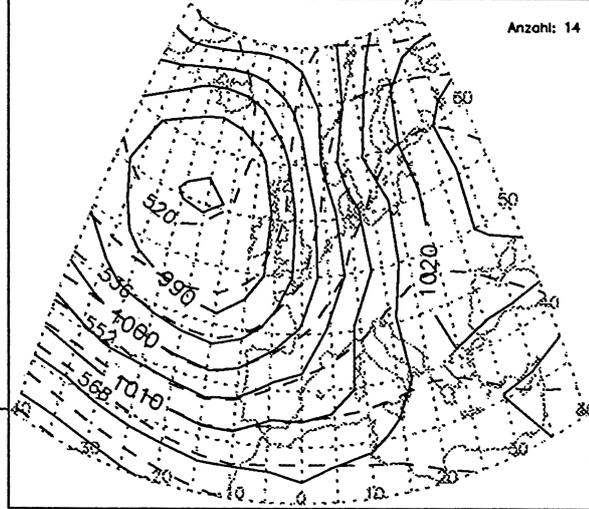
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 11



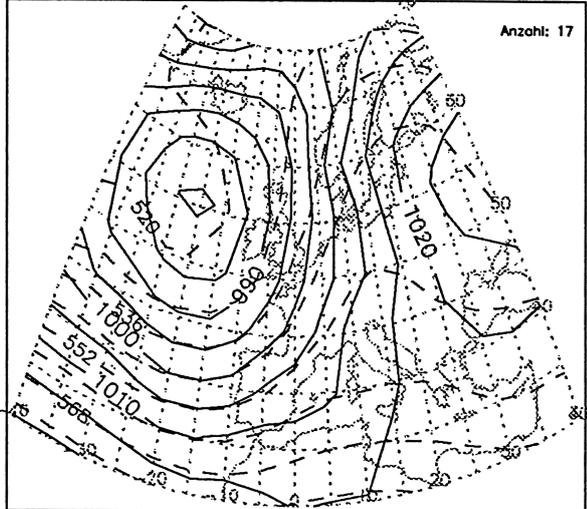
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 26 SA Monat: 12



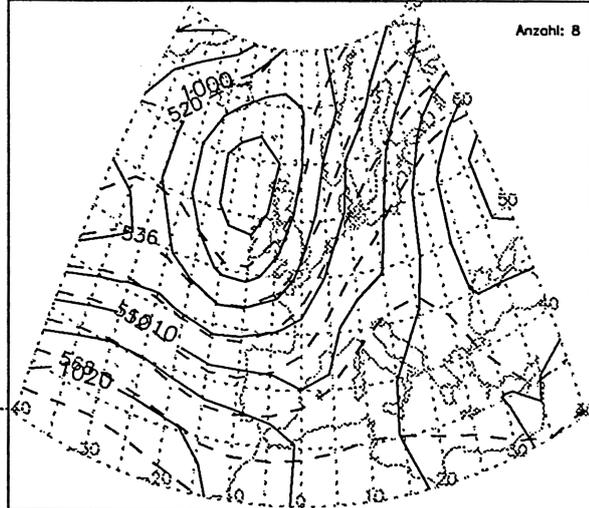
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 1



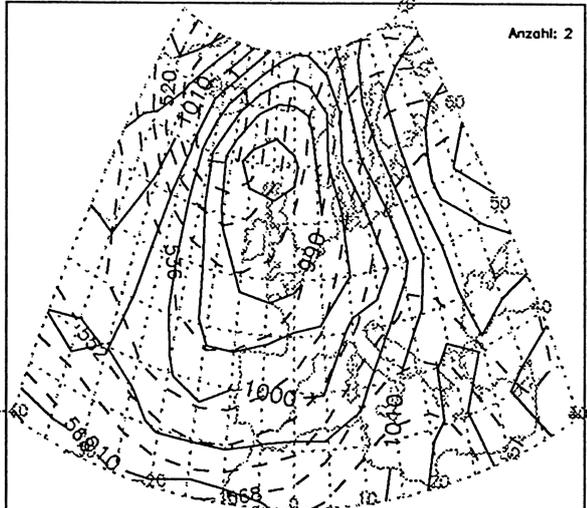
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 2



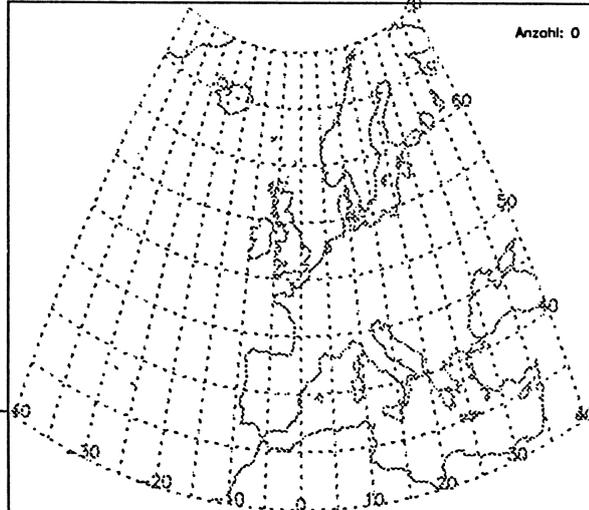
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 3



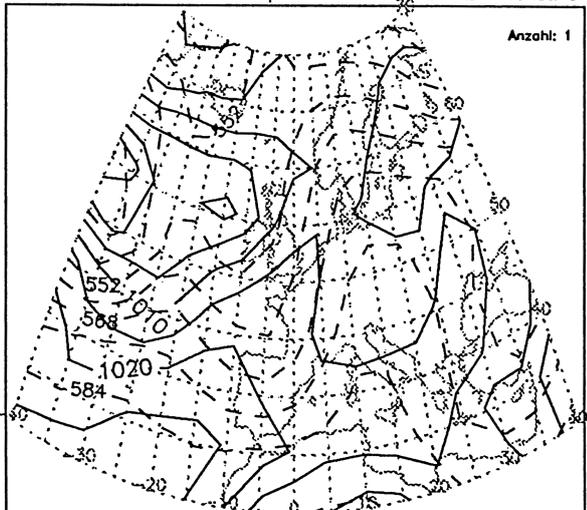
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 4



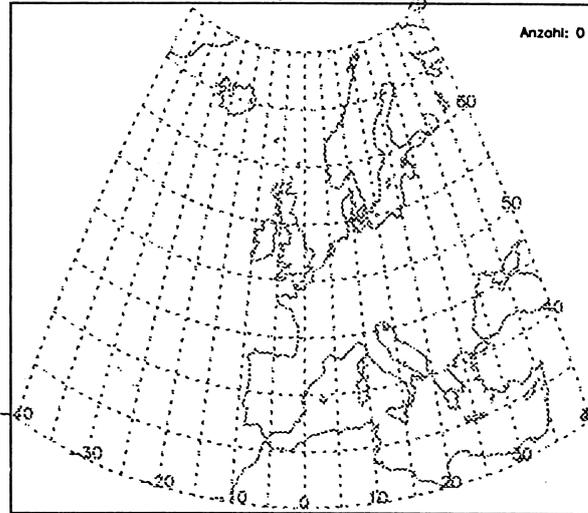
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 5



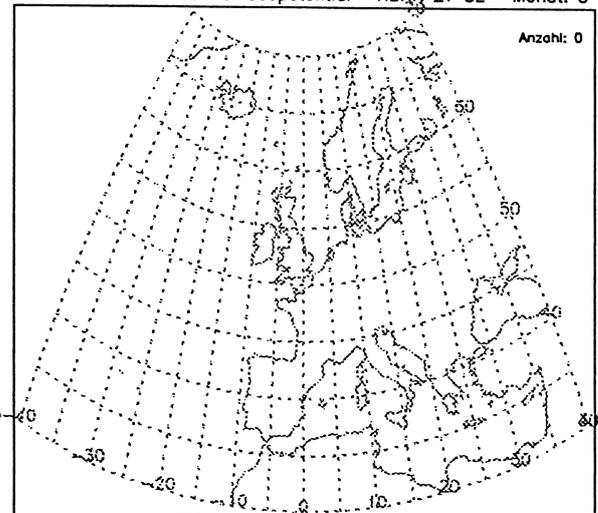
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 6



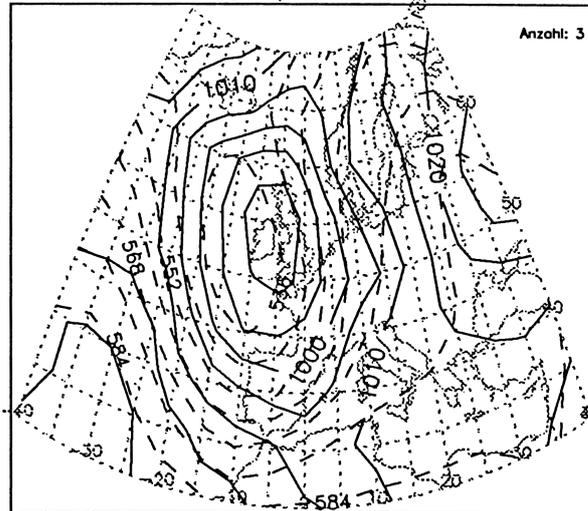
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 7



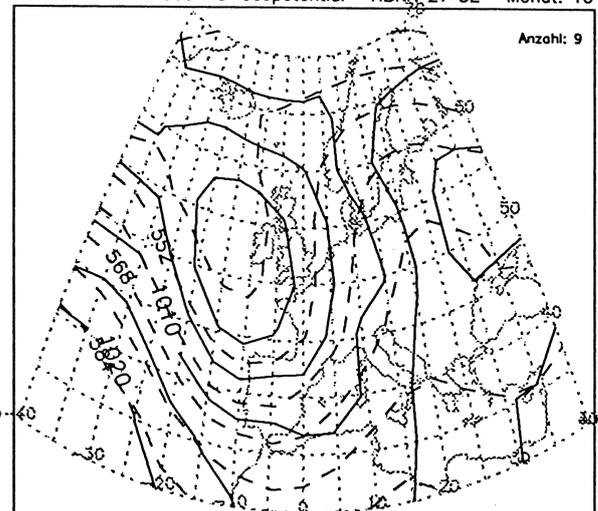
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 8



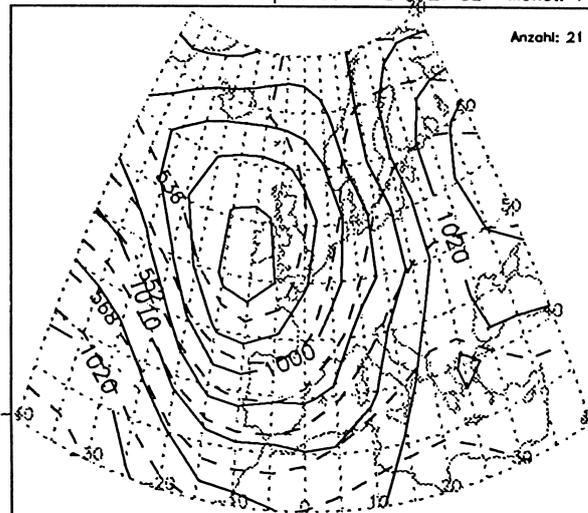
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 9



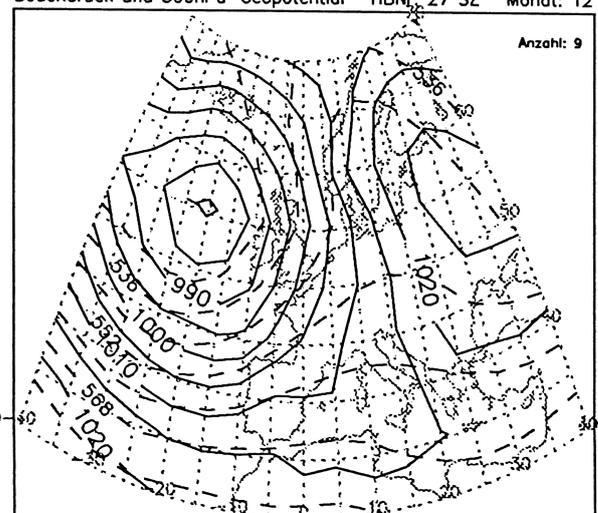
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 10



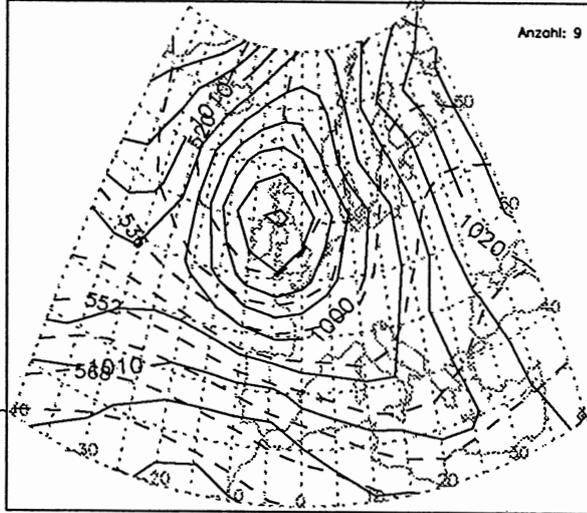
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 11



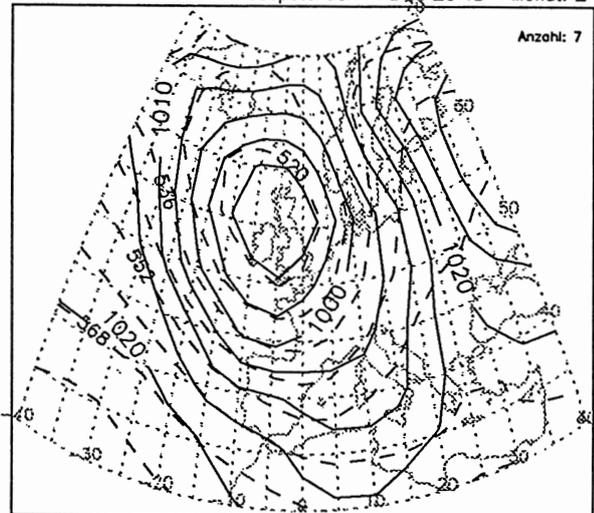
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 27 SZ Monat: 12



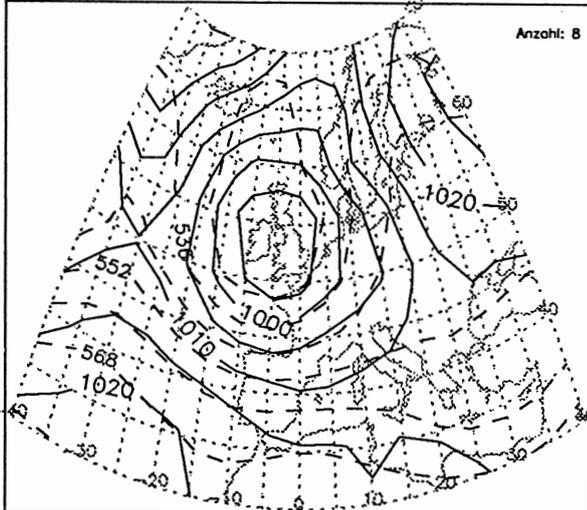
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 1



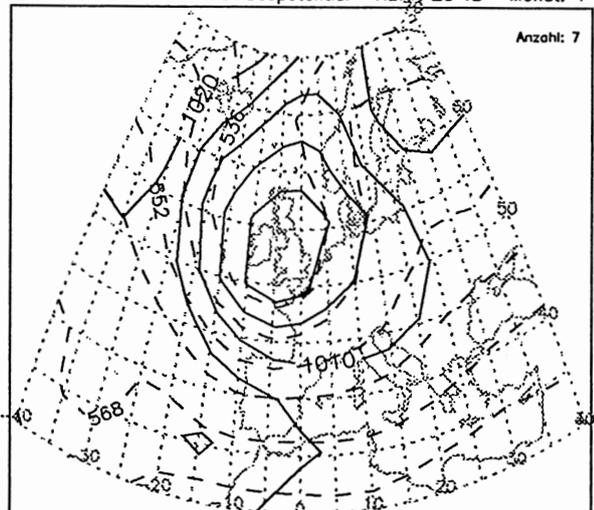
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 2



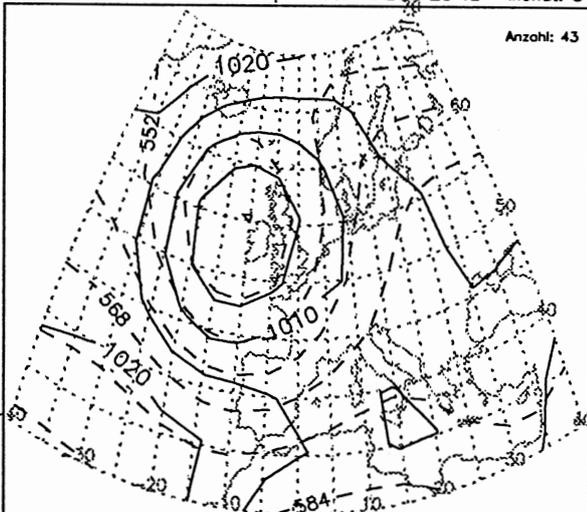
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 3



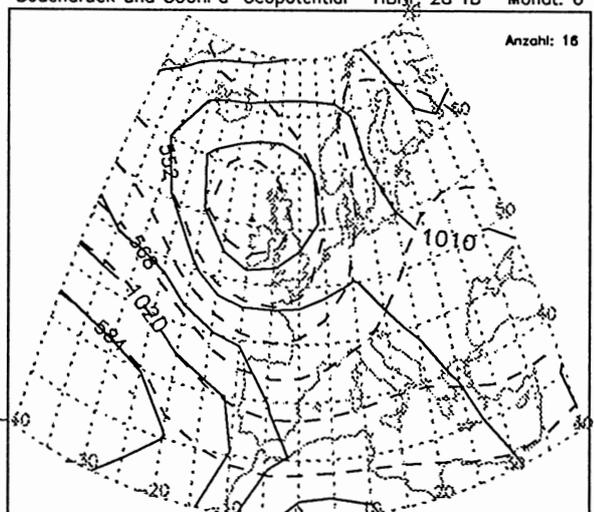
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 4



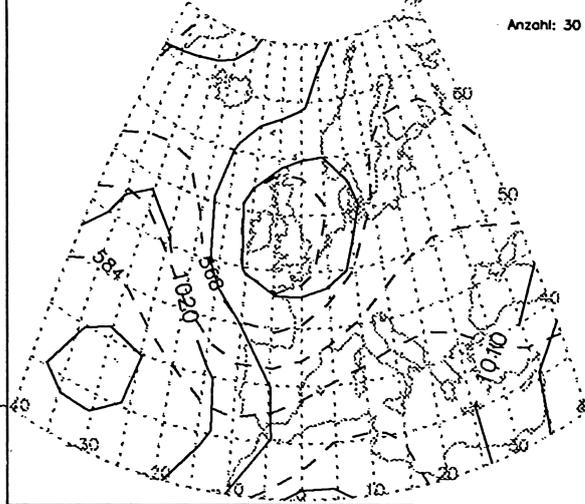
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 5



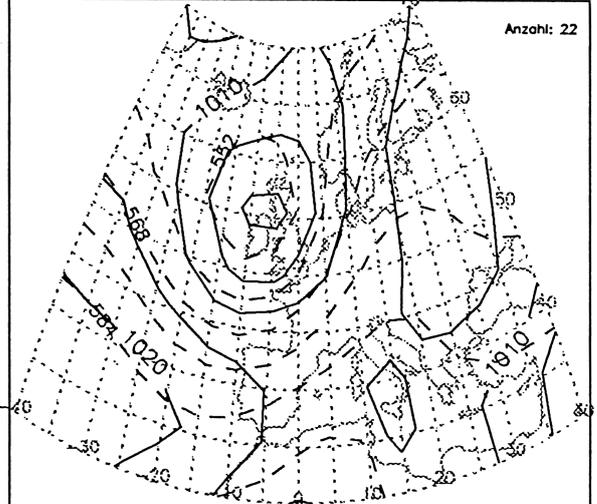
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 6



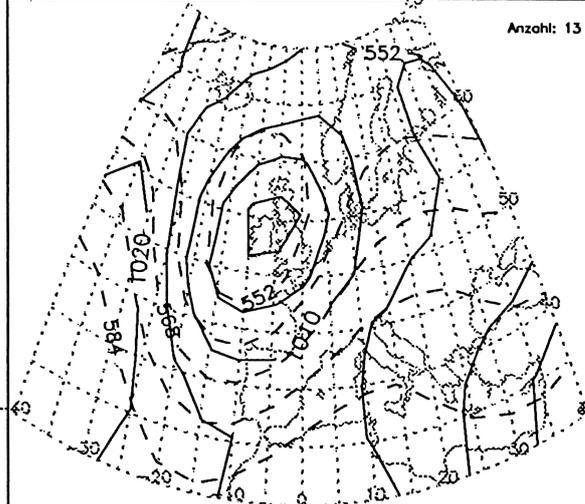
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 7



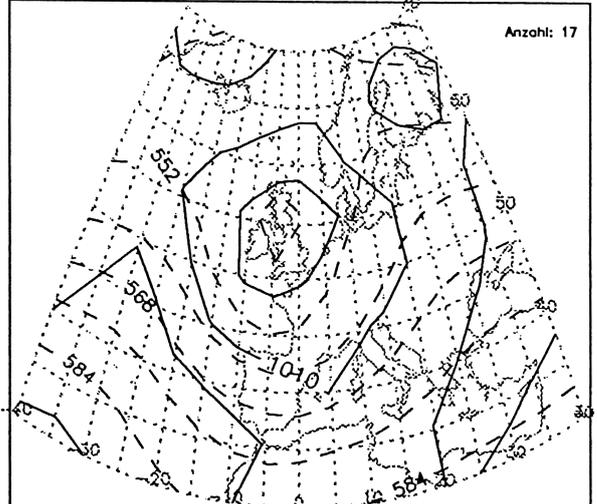
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 8



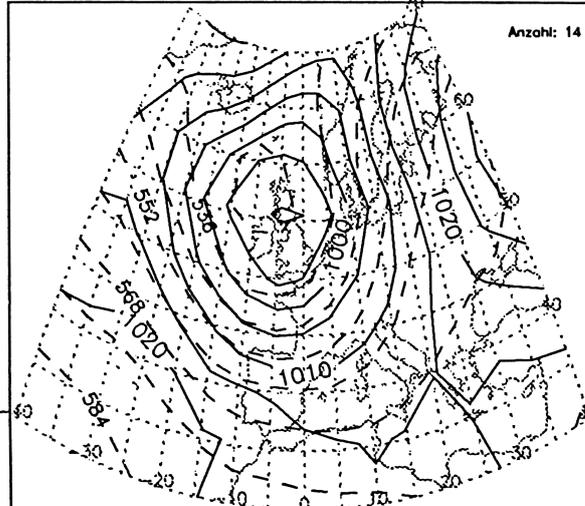
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 9



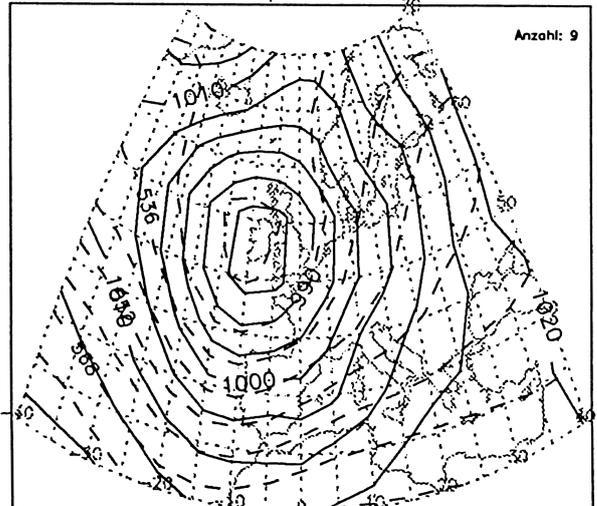
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 10



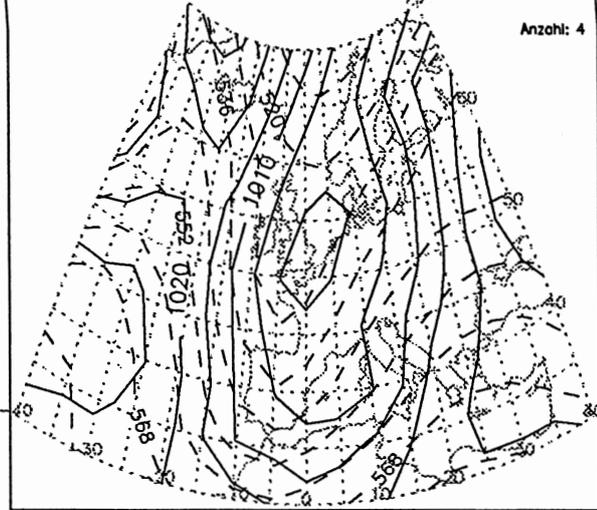
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 11



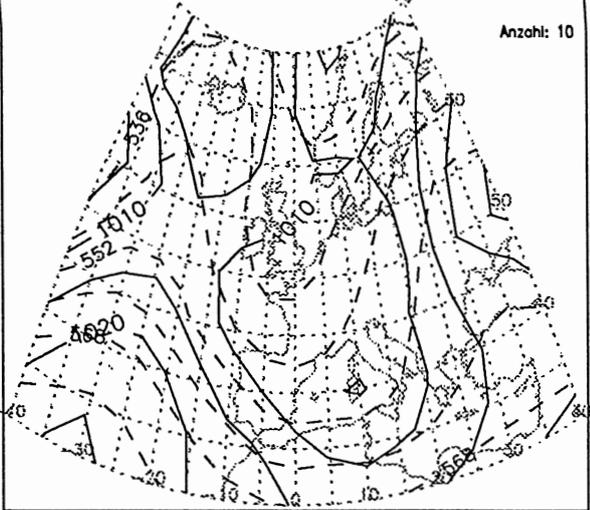
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 28 TB Monat: 12



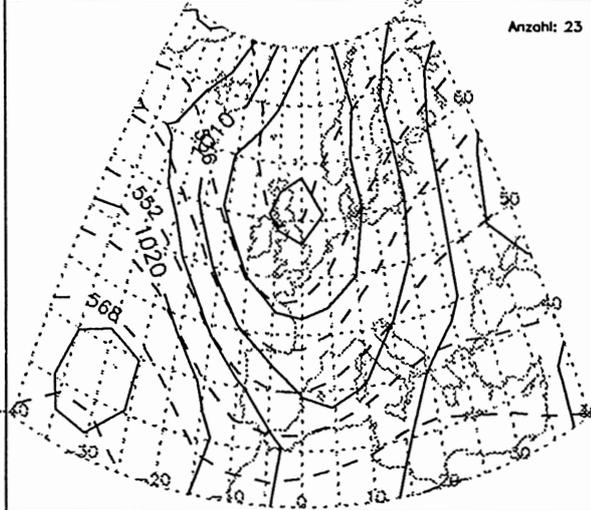
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 1



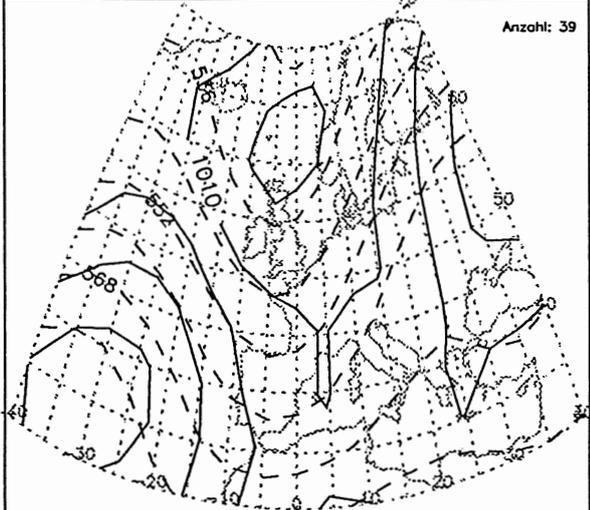
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 2



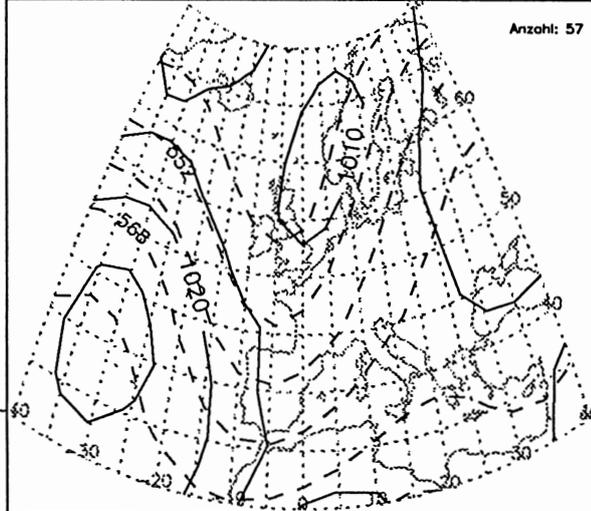
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 3



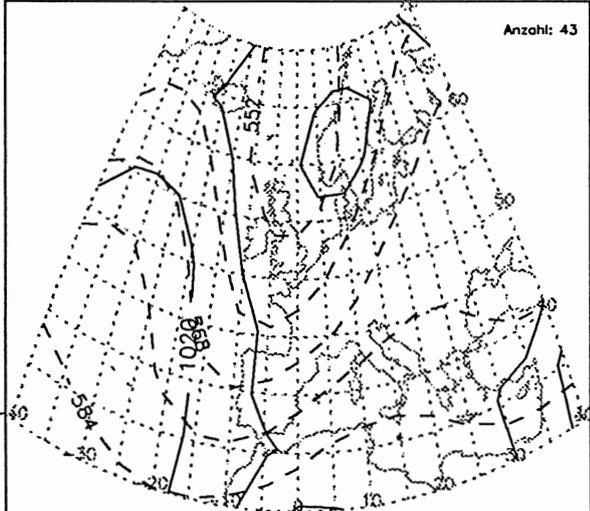
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 4



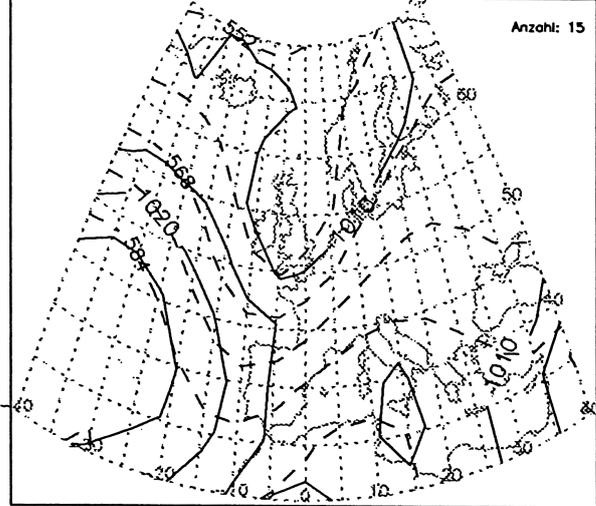
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 5



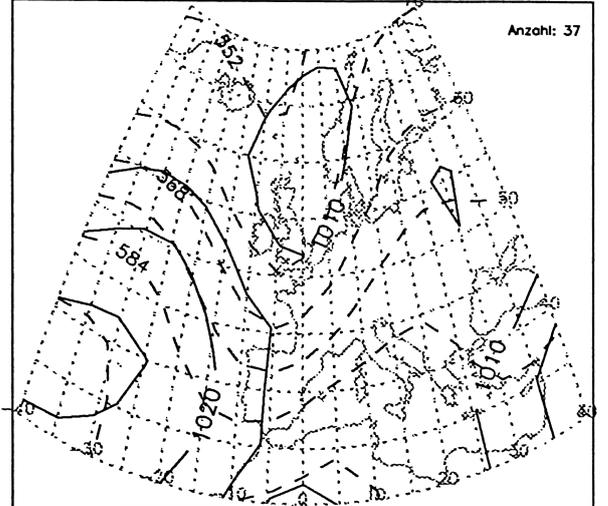
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 6



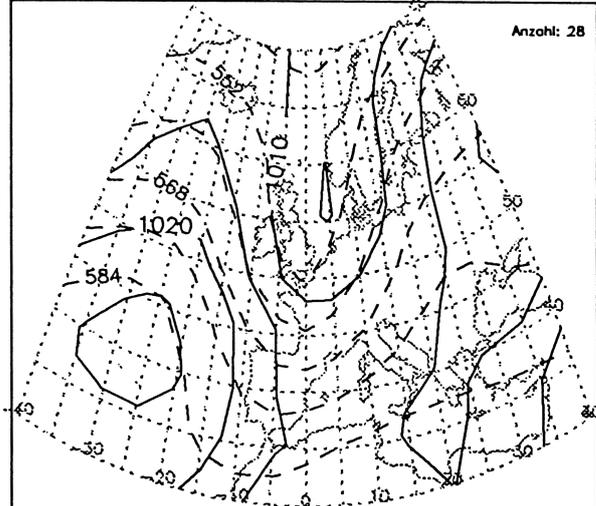
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 7



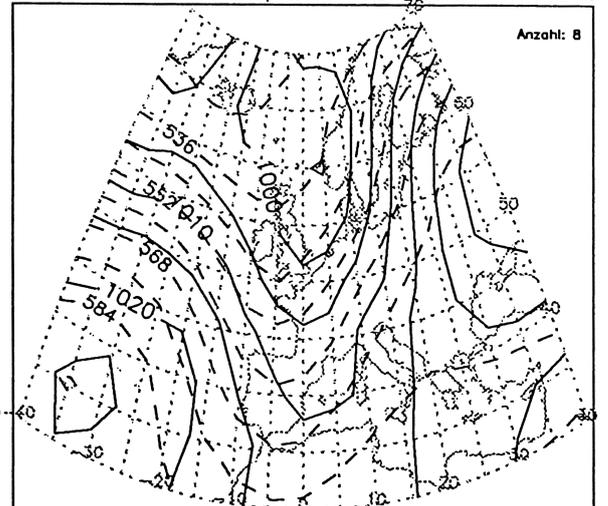
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 8



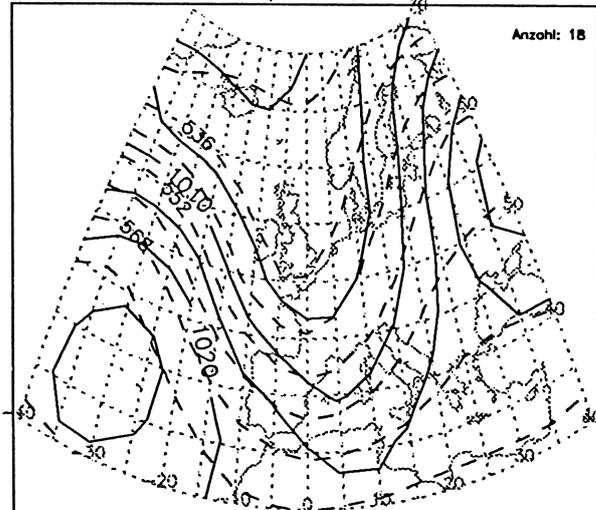
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 9



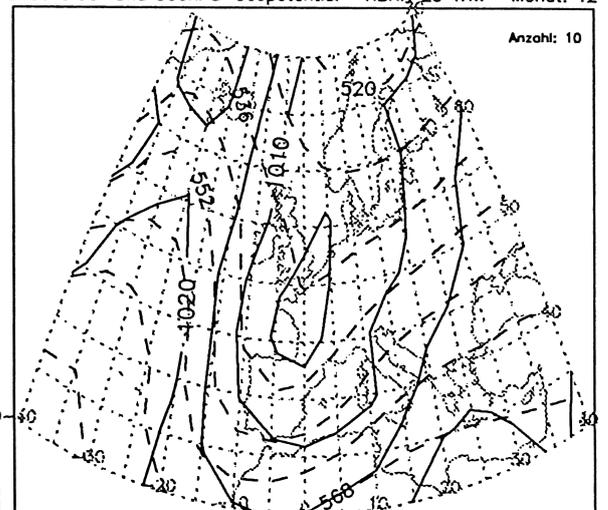
Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 10



Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 11



Bodendruck und 500hPa-Geopotential HBNr. 29 TRW Monat: 12



GEOGRAPHICA BERNENSIA

Hallerstrasse 12
CH - 3012 Bern

Tel. +41 31 631 88 16
Fax +41 31 631 85 11



A	AFRICAN STUDIES	Sfr.
A 1	Mount Kenya Area. Contributions to ecology and socio-economy. Ed by M. Winiger. 1986 ISBN 3-906290-14-X	20.--
A 2	SPECK Heinrich: Mount Kenya Area. Ecological and agricultural significance of the soils - with 2 soil maps. 1983 ISBN 3-906290-01-8	20.--
A 3	LEIBUNDGUT Christian: Hydrogeographical map of Mount Kenya Area. 1:50000. Map and explanatory text. 1986 ISBN 3-906290-22-0	28.--
A 4	WEIGEL Gerolf: The soils of the Maybar/Wello Area. Their potential and constraints for agricultural development. 1986 ISBN 3-906290-29-8	18.--
A 5	KOHLER Thomas: Land use in transition. Aspects and problems of small scale farming in a new environment: the example of Laikipia District, Kenya. 1987 ISBN 3-906290-23-9	28.--
A 6	FLURY Manuel: Rain-fed agriculture in Central Division (Laikipia District, Kenya). Suitability, constraints and potential for providing food. 1987 ISBN 3-906290-38-7	20.--
A 7	BERGER Peter: Rainfall and agroclimatology of the Laikipia Plateau, Kenya. 1989 ISBN 3-906290-46-8	25.--
A 8	Mount Kenya Area. Differentiation and dynamics of a tropical mountain ecosystem. Ed. by M. Winiger, U. Wiesmann, J.R. Rheker. 1990 ISBN 3-906290-64-6	25.--
A 9	TEGENE Belay: Erosion: its effects on properties and productivity of eutric nitosols in Gununo Area, Southern Ethiopia, and some techniques of its control. 1992 ISBN 3-906290-74-3	20.--
A 10	DECURTINS Silvio: Hydrogeographical investigations in the Mount Kenya subcatchment of the river Ewaso Ng'iro. 1992 ISBN 3-906290-78-6	25.--
A 11	VOGEL Horst: Conservation tillage in Zimbabwe. Evaluation of several techniques for the development of sustainable crop production systems in smallholder farming. 1993 ISBN 3-906290-91-3	25.--
A 12	MASELLI Daniel, GEELHAAR Michel: L'écosystème montagnard agro-sylvo-pastoral de Tagoundaft (Haut-Atlas, Maroc). 1994 ISBN 3-906290-89-1	48.--
A 13	ABATE Solomon: Land use dynamics, soil degradation and potential for sustainable use in Metu Area, Illubabor Region, Ethiopia. 1994 ISBN 3-906290-95-6	30.--
<hr/>		
B	BERICHTE UEBER EXKURSIONEN, STUDIENLAGER UND SEMINARVERANSTALTUNGEN	
B 9	Feldstudienlager Niederlande 1989. 1990 ISBN 3-906290-63-8	22.--
B 10	Tschechoslowakei im Wandel - Umbruch und Tradition. Bericht zur Exkursion in Böhmen 1992. 1993 ISBN 3-906290-67-0	30.--
B 11	Tschechien zwischen marktwirtschaftlicher Herausforderung und planwirtschaftlichem Erbe. 1994 ISBN 3-906290-93-X	35.--
B 12	Toronto, Calgary and Banff. Bericht der Grossen Kanada-Exkursion vom 30. Juli - 18. August 1995. 1996 ISBN 3-906151-13-1	35.--

E	BERICHTE ZU ENTWICKLUNG UND UMWELT	Sfr.
Nr. 12	LINIGER Hanspeter, 1995: Endangered water - a global overview of degradation, conflicts and approaches for improvements. ISBN 3-906290-96-4	25.--
Nr. 13	WIESMANN Urs, 1995: Nachhaltige Ressourcennutzung im regionalen Entwicklungskontext: Konzeptionelle Grundlagen zu deren Definition und Erfassung. ISBN 3-906151-01-8	10.--
Nr. 14	Natürliche Ressourcen - Nachhaltige Nutzung. Eine Orientierungshilfe für die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen in der Entwicklungszusammenarbeit. 1995 (auch in Franz. und Englisch) ISBN 3-906290-98-0	12.--
Nr. 15	WACHTER Daniel, 1996: Land tenure and sustainable management of agricultural soils. ISBN 3-906151-08-5	15.--
G	GRUNDLAGENFORSCHUNG	
G 17	KUENZLE Thomas, NEU Urs: Experimentelle Studien zur räumlichen Struktur und Dynamik des Sommersmogs über dem Schweizer Mittelland. 1994 ISBN 3-906290-92-1	36.--
G 21	WITMER Urs: Eine Methode zur flächendeckenden Kartierung von Schneehöhen unter Berücksichtigung von reliefbedingten Einflüssen. 1984 ISBN 3-906290-11-5	10.--
G 25	WITMER Urs u. Mitarbeiter: Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in der Schweiz. 1986 ISBN 3-906290-28-X	21.--
G 29	ATTINGER Robert: Tracerhydrologische Untersuchungen im Alpstein. Methodik des kombinierten Tracereinsatzes für die hydrologische Grundlagenerarbeitung in einem Karstgebiet. 1988 ISBN 3-906290-43-3	15.--
G 30	WERNLI Hans Rudolf: Zur Anwendung von Tracermethoden in einem quartärbedeckten Molassegebiet. 1988 ISBN 3-906290-48-4	15.--
G 32	RICKLI Ralph: Untersuchungen zum Ausbreitungsklima der Region Biel. 1988 ISBN 3-906290-49-2	15.--
G 33	GERBER Barbara: Waldflächenveränderungen und Hochwasserbedrohung im Einzugsgebiet der Emme. 1989 ISBN 3-906290-55-7	25.--
G 34	ZIMMERMANN Markus: Geschiebeaufkommen und Geschiebe-Bewirtschaftung. Grundlagen zur Abschätzung des Geschiebehaushaltes im Emmental. 1989 ISBN 3-906290-56-5	25.--
G 37	EUGSTER Werner: Mikrometeorologische Bestimmung des NO ₂ -Flusses an der Grenzfläche Boden/Luft. 1994 ISBN 3-906290-90-5	25.--
G 38	Himalayan Environment. Pressure-problems-processes. Twelve years of research B. Messerli, T. Hofer, S. Wymann (eds.). 1993 ISBN 3-906290-68-9	35.--
G 39	SGmG Jahrestagung. Geographische Informationssysteme in der Geomorphologie. 1992 ISBN 3-906290-72-7	15.--
G 40	SCHORER Michael: Extreme Trockensommer in der Schweiz und ihre Folgen für Natur und Wirtschaft. 1992 ISBN 3-906290-73-5	38.--
G 41	LEIBUNDGUT Christian: Wiesenbewässerungssysteme im Langetental. 1993 ISBN 3-906290-79-4	18.--
G 42	LEHMANN Christoph: Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen. 1993 ISBN 3-906290-82-4	35.--

G GRUNDLAGENFORSCHUNG

Sfr.

- G 43 NINCK Andreas: Wissensbasierter und objekt-orientierter Ansatz zur Simulation von Mensch-Umwelt-Systemen. 1994 ISBN 3-906290-94-8 27.--
- G 44 DUESTER Horst: Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. 1994 ISBN 3-906290-97-2 27.--
- G 45 VUILLE Mathias: Zur raumzeitlichen Dynamik von Schneefall und Ausaperung im Bereich des südlichen Altiplano, Südamerika. 1996 ISBN 3-906151-02-6 32.--
- G 46 AMMANN Caspar, JENNY Bettina, KAMMER Klaus: Climate Change in den trockenen Anden. Jungquartäre Vergletscherung - aktuelle Niederschlagsmuster. 1996 ISBN 3-906151-03-4 1996
- G 47 PEREGO Silvan: Ein Computermodell zur Simulation des Sommersmogs. 1996 ISBN 3-906151-05-0 30.--
- G 48 HOFER Thomas: Floods in Bangladesh: A highland-lowland interaction? 1996 ISBN 3-906151-09-3 1996
- G 49 Floods in Bangladesh: History, processes and impacts. T. Hofer, B. Messerli (Eds.). 1996 ISBN 3-906151-10-7 1996
- G 50 KLINGL Tom: GIS-gestützte Generierung synthetischer Bodenkarten und landschaftsökologische Bewertung der Risiken von Bodenwasser- und Bodenverlusten in Laikipia, Kenya. 1996 ISBN 3-906151-12-3 1996
- G 51 SALVISBERG Esther: Wetterlagenklimatologie - Möglichkeiten und Grenzen ihres Beitrages zur Klimawirkungsforschung im Alpenraum. 1996 ISBN 3-906151-14-X 1996

P GEOGRAPHIE FUER DIE PRAXIS

- P 13 GROSJEAN Georges: Aesthetische Bewertung ländlicher Räume. Am Beispiel von Grindelwald im Vergleich mit anderen schweizerischen Räumen und in zeitlicher Veränderung. 1986 ISBN 3-906290-12-3 15.--
- P 18 Photogrammetrie und Vermessung - Vielfalt und Praxis. Festschrift Max Zurbuchen. Von Grosjean M., Hofer T., Lauterburg A., Messerli B. 1989 ISBN 3-906290-51-4 9.--
- P 19 HOESLI T., LEHMANN Ch., WINIGER M.: Bodennutzungswandel im Kanton Bern 1951-1981. Studie am Beispiel von drei Testgebieten. 1990 ISBN 3-906290-54-9 20.--
- P 20 Zur Durchlüftung der Täler und Vorlandsenken der Schweiz. Resultate des Nationalen Forschungsprogrammes 14. Von Furger M., Wanner H., Engel J., Troxler F., Valsangiacomo A. 1989 ISBN 3-906290-57-3 25.--
- P 22 Die Alpen im Europa der neunziger Jahre. Ein ökologisch gefährdeter Raum im Zentrum Europas zwischen Eigenständigkeit und Abhängigkeit. Von Bätzing W., Messerli P., Broggi M. u.a. 1991 ISBN 3-906290-61-1 38.--
- P 23 Umbruch in der Region Bern. Aktuelle Analysen - neue Perspektiven - konkrete Handlungsvorschläge. Von Aerni K., Egli H. R., Berz B. 1991 ISBN 3-906290-66-2 12.--
- P 24 PORTMANN Jean-Pierre: Paysages de Suisse: le Jura. Introduction à la géomorphologie. 1994 ISBN 3-906290-69-7 25.--
- P 25 MEESSEN Heino: Anspruch und Wirklichkeit von Naturschutz und Landschaftspflege in der Sowjetunion. 1992 ISBN 3-906290-76-X 30.--

P GEOGRAPHIE FUER DIE PRAXIS		Sfr.
P 26	BAETZING Werner: Der sozio-ökonomische Strukturwandel des Alpenraumes im 20. Jahrhundert. Eine Analyse von "Entwicklungstypen" auf Gemeindeebene. 1993 ISBN 3-906290-80-8	40.--
P 27	WYSS Markus: Ökologische Aspekte der wirtschaftlichen Zusammenarbeit mit Entwicklungsländern. 1992 ISBN 3-906290-83-2	20.--
P 28	AERNI Klaus et al.: Fussgängerverkehr. Berner Innenstadt. Schlussbericht Fussgängerforschung Uni Bern. 1993 ISBN 3-906290-84-0	20.--
P 29	MARTINEC Jaroslav, RANGO Albert, ROBERTS Ralph: Snow Melt Runoff Model (SRM). User's Manuel. Ed. Baumgartner Michael F. 1994 ISBN 3-906290-85-9	20.--
P 30	BAETZING W., WANNER H. (Hrsg.): Nachhaltige Naturnutzung im Spannungsfeld zwischen komplexer Naturdynamik und gesellschaftlicher Komplexität. 1994 ISBN 3-906290-86-7	20.--
P 31	PFANDER Marc: Der Verkehr im Berner Fussgängerbereich. Situationsanalyse und Vorschläge zur Verringerung der Verkehrsbelastung. 1995 ISBN 3-906151-00-X	40.--
P 32	JEANNERET François: Internationale phänologische Bibliographie. 1996 ISBN 3-906151-04-2	1996
P 33	VON ROHR Gabriele: Auswirkungen des Rohrleitungsbaus auf bodenphysikalische Kenngrössen. 1996 ISBN 3-906151-06-9	27.--
S GEOGRAPHIE FUER DIE SCHULE		
S 6.1	AERNI K., ENZEN P., KAUFMANN U.: Landschaften der Schweiz. 1993 Teil I: Didaktische Grundlagen. ISBN 3-906290-24-7	20.--
S 6.1	AERNI K., ENZEN P., KAUFMANN U.: Paysages Suisses. 1993 Tome I: Réflexions didactiques. ISBN 3-906290-87-5	20.--
S 6.2	AERNI K., ENZEN P., KAUFMANN U.: Landschaften der Schweiz / Paysages Suisses. Teil II: 15 kommentierte Arbeitsblätter für die Geographie / Tome II: 15 fiches de géographie avec commentaires. 1993 ISBN 3-906290-88-3	60.--
S 14	DISLER, Severin (1989): Das Berggebiet - Umsetzung für die Mittelschule am Beispiel der Regionen Napf und Aletsch. ISBN 3-906290-50-6	15.--
U SKRIPTEN FUER DEN UNIVERSITAETSUNTERRICHT		
U 8	GROSJEAN, Georges (1996): Geschichte der Kartographie. 3. neubearb. Auflage. ISBN 3-906151-15-8	35.--
U 19	AERNI K., GURTNER A., MEIER B.: Geographische Arbeitsweisen - Grundlagen zum propädeutischen Praktikum I. 1989	20.--
U 20	AERNI K., GURTNER A., MEIER B.: Geographische Arbeitsweisen - Grundlagen zum propädeutischen Praktikum II. 1989 ISBN 3-906290-53-0	14.--
U 22	MAEDER, Charles (1996): Kartographie für Geographen. 2. neubearb. Auflage ISBN 3-906151-16-6	30.--

ISBN 3-906151-14-X