Institut für Hydrologie der
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.

Michael Stölzle

Veränderungen von Wetterlagenhäufigkeiten und der Isotopenzusammensetzung des Niederschlags in Deutschland

Diplomarbeit unter der Leitung von

Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Freiburg i.Br., August 2008

Institut für Hydrologie der
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.

Michael Stölzle

Veränderungen von Wetterlagenhäufigkeiten und der Isotopenzusammensetzung des Niederschlags in Deutschland

Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Koreferent: Dr. Ch. Külls

Diplomarbeit unter der Leitung von

Prof. Dr. Ch. Leibundgut
Freiburg i.Br., August 2008

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis iii

Tabellenverzeichnis v

Symbolverzeichnis vii

Abkürzungsverzeichnis ix

Zusammenfassung xi

Summary xiii

1 Einleitung 1
1.1 Problemstellung . . . 1
1.2 Zielsetzung . . . 1
1.3 Vorgehensweise . . . 2

2 Wetterlagen: Geschichte und Stand der Forschung 3
2.1 Geschichte der Wetterlagenklassifikation . . . 3
2.2 Angewandte Wetterlagenklassifikationen . . . 6

3 Wetterlagenklassifikation 17
3.1 Objektive Klassifikationsmethodik . . . 18
3.1.1 Klassifikationsgebiet . . . 20
3.1.2 Anströmrichtung . . . 20
3.1.3 Zyklonalität und Zirkulationsformen . . . 22
3.1.4 Feuchte . . . 31
3.2 Fallbeispiele zu Wetterlagen und Niederschlag . . . 33

4 Zeitreihe der Isotope 41
4.1 Überblick zur Isotopenhydrologie . . . 42
4.1.1 Delta-Notation . . . 42
4.1.2 Isotopenfraktionierung im hydrologischen Kreislauf . . . 42
4.2 Datenmaterial der Isotopenzeitreihe . . . 44

5 Angewandte Methodik 47
5.1 Test auf Trends . . . 47
5.1.1 Der Trendtest nach Mann-Kendall . . . 47
5.1.2 Trendschätzung nach Sen . . . 50

5.1.3 Autokorrelationskoeffizient 51
5.1.4 Pre-whitening 52
5.2 Vorgehensweise 53

6 Wetterlagenstatistik 55
6.1 Sichtung des Datenmaterials 55
6.2 Wetterlagenrechner 56
6.3 Häufigkeitsverteilungen und Verweilzeiten 59
6.4 Anströmrichtungen der Wetterlagen 67
6.5 Zyklonalität der Wetterlagen 72
6.6 Feuchte der Wetterlagen 74
6.7 Fazit 79

7 Ergebnisse der Trendtests 81
7.1 Wetterlagen 81
7.2 Anströmrichtung und Feuchte 84
7.3 Isotopenzeitreihen im Niederschlag 92

8 Synthese und Diskussion der Ergebnisse 95
8.1 Einflusszonen als Erklärungsansatz 95
8.2 Verknüpfung der Trendanalysen 99

9 Fazit und Ausblick 103

A Tabellen 105

Literaturverzeichnis 127

Abbildungsverzeichnis

1 Häufigkeitsverteilung der Wettertypen nach der LAMB-Klassifikation 8

2 Klassifikationsgebiet zur Wetterlagenbestimmung des DWD 21
3 Beispiel zur Festlegung der Anströmrichtung für die Wetterlagenklassifikation 22
4 Schema der Luftmassenverwirbelung durch Konvergenz und Divergenz 24
5 Schematische Zirkulation von Luftmassen bei Hoch- und Tiefdruckgebiet innerhalb eines synoptischen Systems 25
6 Modell für die Entstehung und Verlagerung von Bodendruckgebilden 26
7 Die Luftmassen Europas und ihre Eigenschaften wie Zugrichtungen und Niederschlagsdargebot 30
8 Niederschlagskartierung Deutschlands für verschiedene Wetterlagen, Teil 1 von 4 34
9 Niederschlagskartierung Deutschlands für verschiedene Wetterlagen, Teil 2 von 4 35
10 Niederschlagskartierung Deutschlands für die Wetterlage NWAAT und für alle Jahreszeiten, Teil 3 von 4 36
11 Niederschlagskartierung Deutschlands für die Wetterlage SWZZF und für alle Jahreszeiten, Teil 4 von 4 37

12 Geographische Lage der GNIP-Stationen innerhalb Deutschlands . . 45

13 Methodisches Vorgehen bei der Trendanalyse nach Mann-Kendall . 54

14 Häufigkeiten aller Wetterlagen 1980–2007 60
15 Relative Häufigkeiten der Anströmrichtungen aller Wetterlagen (1980–2007) 69
16 Relative Häufigkeiten (1980–2007) der West- und Ostlagen unter jeweiliger Berücksichtigung ihrer Anteile an feuchten und trockenen Wetterlagen 71
17 Absolute Häufigkeiten der Anströmrichtungen nach Jahreszeiten, für jedes Jahr der Zeitreihe 1980–2007 und jeweils dazugehörig das gleitende 5-jährige Mittel für die Zeitreihe 1982–2005 73
18 Relative Häufigkeiten trockener und feuchter Wetterlagen im Jahresverlauf (1980–2007) 74
19 Differenz der relativen Monatshäufigkeiten aller trockenen zu allen feuchten Wetterlagen (1980–2007) 75
20 Relative Häufigkeiten trockener und feuchter Wetterlagen im Jahresverlauf (2001-2007) ohne Bezugsmittelwert 76

21 Häufigkeiten und Trends aller Wetterlagen (1980–2007) 82
22 Muster für Zu- und Abnahme trockener und feuchter Wetterlagen in verschiedenen Jahreszeiten (1980–2007) 90

23 GNIP-Isotopenstationen und Wetterlageneinflusszonen 96

Tabellenverzeichnis

1 Generierung der fünfstelligen Abkürzungen für die 40 möglichen objektiven Wetterlagenklassen des DWD 18
2 Liste der 40 Wetterlagen 19
3 Statistischer Überblick zu den Wetterlagen aus den Fallbeispielen . 33
4 Liste der GNIP-Stationen zur Untersuchung von Isotopenzeitreihen 45
5 Signifikanzniveaus zur Beurteilung von Trends nach dem ausgegeben p-value des Trendtest von Mann-Kendall 50
6 Zuweisung der Monate zu Jahreszeiten für statistische Gruppierungen 56
7 Einstellungsmöglichkeiten des Wetterlagenrechners in Microsoft Excel© 58
8 Absolute und relative Häufigkeiten der Wetterlagen im Zeitraum 1980–2007 64
9 Absolute Häufigkeiten der Verweilzeiten einzelner Wetterlagen . . . 65
10 Relative Häufigkeiten der Verweilzeiten einzelner Wetterlagen . . . 66
11 Relative Häufigkeiten der Wetterlagenverweilzeit differenziert nach Anströmrichtung 67
12 Absolute und relative Häufigkeiten der Wetterlagen gemäß ihren Anströmrichtungen 68
13 Relative Häufigkeiten trockener und feuchter Wetterlagen und deren Jahresgänge 74
14 Relative Häufigkeiten trockener und feuchter Wetterlagen und deren Jahresgänge 76
15 Häufigkeitsränge der Wetterlagen nach Anströmrichtung und Feuchte 78
16 Ergebnisse der Trendtests für den Klassifikationsparameter Anströmrichtung 86
17 Ergebnisse der Trendtests für den Klassifikationsparameter Feuchte 88
18 Ergebnisse der Trendtests für Wetterlagen innerhalb einzelner Jahreszeiten 91
19 Stationen und Trends der Isotopenzeitreihen 94

Symbolverzeichnis

%	Prozent	%
A	antizyklonal, Antizyklonalität	(–)
α	Signifikanz	(–)
AR	Anströmrichtung einer Wetterlage	NO, SO, SW, NW, XX
b	Steigung	
δ	delta-Wert	(‰)
d_{WL}	durchschnittliche Verweilzeit einer Wetterlage	Tag(e)
$E(x)$	Erwartungswert von x	
f	Feuchteparameter der Wetterlage	T/F
F	als feucht klassifizierte Wetterlage	(–)
^2H	Isotop Deuterium	(–)
H_0	Nullhypothese	(–)
H_1	Alternativhypothese	(–)
hPa	Luftdruck in Hektopascal	hPa
i,j,k	i-, j-, k-ter Wert der Zeitreihe	
n	Anzahl	
^{18}O	Isotop Sauerstoff-18	(–)
P	Niederschlag	mm
$p, p-value$	Wahrscheinlichkeit für Annahme der Nullhypothese	(%)
Q	Quartil der Verteilung	
r_k	Autokorrelationskoeffizient k-ten Grades	(–)
R_{WL}	Häufigkeitsrang einer Wetterlage WL	1...40
S	Teststatistik des Mann-Kendall Trendtests	(–)
sgn	Vorzeichenfunktion	
$\sigma^2 s$	Varianz der Mann-Kendall Teststatistik	
T	als trocken klassifizierte Wetterlage	
U	standardiesierte Teststatistik des Mann-Kendall-Trendtests	
$v(W)$	Schiefe der Wetterlagenhäufigkeitsverteilung	(–)
W_t, X_t, Y_t	Zeitreihe	
WL_x	Wetterlage x	1...40
Z	zyklonal, Zyklonalität	

Abkürzungsverzeichnis

DWD	Deutscher Wetterdienst
EM	European Model
GME	Operational Global Model
GMWL	Global Meteoric Water Line
GNIP	Global Network of Isotopes in Precipitation
H	Hochdruckgebiet
LAI	Länderausschuß für Immissionsschutz
MK	Trendtest nach Mann-Kendall
MOFRBC	Multi-objective fuzzy rule-based classification
Nr.	Nummer
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PM	Particulate Matter
T	Tiefdruckgebiet
TSA	Theil-Sen-Approach
V-SMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water
Z-Index	Palmer Moisture Anomaly Index
Jan	Januar
Feb	Februar
Mrz	März
Apr	April
Mai	Mai
Jun	Juni
Jul	Juli
Aug	August
Sep	September
Okt	Oktober
Nov	November
Dez	Dezember
F	Frühjahr
S	Sommer
H	Herbst
W	Winter

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen neuen Erklärungsansatz für die Veränderungen der Isotopenzeitreihen in Deutschland zu finden. Hierfür werden Veränderungen der Häufigkeiten von Wetterlagen herangezogen und durch beschreibende Statistik, sowie einen nicht-parametrischen Trendtest nach Mann-Kendall näher untersucht. Als Datenmaterial dienen Wetterlagen des Zeitraums 1980–2007, erhoben nach der objektiven Klassifikationsmethode des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und Isotopenzeitreihen von 1978–2006 und deren Trends.

Die Literaturrecherche zeigt, dass Wetterlagen in naturwissenschaftlichen Disziplinen eingesetzt werden, um Veränderungen im hydrologischen System zu erklären. Veränderungen der Wetterlagen können in dieser Arbeit bereits durch beschreibende Statistik aufgezeigt werden. Die Feuchte der Wetterlagen nimmt demnach im Sommerhalbjahr zu, dies bei mehrheitlich westliche Anströmungen. Im Frühjahr nehmen feuchte Wetterlagen aus Süden hingegen ab. Die Analyse der Zyklonalität konnte nur helfen günstige und ungünstige Situationen für den Luftmassentransport zu differenzieren. Die Wetterlagenstatistik mehrt insgesamt das Verständnis über die Herkunftsgebiete von Luftfeuchte und die Veränderung trajektorienbezogener Fraktionierungsprozesse.

Weiterhin wurde ein Wetterlagenrechner entwickelt, um frei konfigurierbare Wetterlagenverteilungen auszugeben. Über eine erstmals berechnete Verweilzeitverteilung der objektiv-klassifizierten Wetterlagen kann konsekutives Andauern zur Analyse von Wetterlagenwirksamkeit mit einfließen. Durch eine Verknüpfung mit Niederschlagskartierungen ist die Niederschlagsgenese einzelner Wetterlagen besser nachzuvollziehen.

Die Veränderungen der Isotopenzeitreihen hin zu mehrheitlich schwerer werdenden Werten für $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ konnten durch Wetterlagengruppierungen und die Ausweisung von Einflusszonen (*zones of influence*) teilweise erklärt werden. Drei Einflusszonen weisen durchgängig Trends zu schweren Isotopenwerten auf. Dies lässt sich durch die Zunahme feuchter Wetterlagen und die jeweils für die Einflusszonen wirksamen Wetterlagenmuster erklären. Am Alpennordrand erscheint der Rückgang von Föhnwetterlagen plausibel. Die vierte Einflusszone Südwest wird im Frühherbst weniger stark von südwestlichen Wetterlagen beeinflusst, weist passend dazu leichter werdende Isotopenwerte auf. Die vorgeschlagenen Wetterlagengruppierungen und Einflusszonen erscheinen plausibel. Die Wirksamkeit der Wetterlagen in den Zonen selbst und deren quantitativer Einfluss auf Isotopensammelproben sollten jedoch fortführend erforscht werden.

Schlüsselwörter: Wetterlagen, Isotopenzeitreihen, Trendtest, Mann-Kendall, Verweilzeiten, Wetterlagenrechner, Wetterlageneinflusszonen

Summary

As a basis for this paper the relationship between shifts in isotopes and the atmospheric circulation in Germany was analyzed for a period covering the last 28 years. The data needed for this project was taken from the objective weather type classification for the years 1980 to 2007 distributed by the German national weather service. The question of interest was whether shifts in circulation patterns can explain shifts in isotopes or not.

Circulation patterns were used in a variety of natural sciences in order to explain shifts in the hydrology system. The variation of circulation patterns was shown by simple descriptive statistics. For example, it was proved that the humidity of all circulation patterns rise during summer time. During the same season westerly airflows were identified as the major weather condition. The analysis of the cyclonic character of the weather in Germany revealed that the transportation of air mass can be divided in favorable and unfavorable situations. Statistical research helped to identify the origin of air moisture and to explain the shift in isotopic fractionation.

Different distributions of circulation patterns were identified by a newly developed calculator. The mean retention time for all 40 ranked atmospheric conditions were described in order to dissect the potency of them. Linking specific circulation patterns with precipitation maps and its spatial distribution improved the understanding of precipitation depending on a single atmospheric situation. The observed slopes in the values of oxygen-18 and deuterium were explained for the most part by creating logical groups of circulation patterns and defined geographical zones of influence. Three of those four zones show an increased value of oxygen-18 and deuterium, only zone four, the south-west of Germany, has a tendency towards lower values.

This anomaly is founded in the humidity slope and the well-fitting assignment between zones of influence and the direction of air mass flow. Therefore, the decrease of foehn situations at the northern side of the alps is evident. The last zone of influence in the southwest shows a reduced potency of south-west orientated circulation patterns. Consequently, more negative isotope values were estimated.

The conclusion drawn from those observations is that a critical evaluation of the used method is required to be able to classify the effectiveness of correlating patterns and isotopes.

Keywords: circulation patterns, isotopes, trendtest, Verweilzeiten, circulation patterns calculator, zones of influence.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Isotopenzeitreihen im Niederschlag Deutschlands weisen in den letzten Jahren verschiedenartige Veränderungen auf. Mehrheitlich konnten Trends hin zu schwerer werdenden Isotopenwerten festgestellt werden. Die einzelnen Ursachen für diese Veränderungen sind bisher nicht im Detail geklärt, jedoch in einem Atemzug mit dem vielerorts prognostizierten Klimawandel zu nennen. Dieser basiert auf einer Temperaturerhöhung, welche mit einem Mehrangebot an troposphärischer Feuchte einhergehen kann. Die Prozesse, welche die Zunahme latenter Energie im Wasserkreislauf forcieren, sind auch Untersuchungsgegenstand der Hydrologie.

Die Untersuchung von Wetterlagenhäufigkeiten könnte aufzeigen, ob sich Herkunftsgebiete der Luftfeuchte und die trajektorienbezogenen Fraktionierungsprozesse in den letzten Jahrzehnten nachweislich verändert haben.

Mögliche Erklärungsansätze müssen jedoch daraufhin untersucht werden, in welchem Maße sie Veränderungen verifizierbar abbilden können. Hierfür müssen die Häufigkeit, die Wirksamkeit auf Isotopenzeitreihen und die Verweilzeit von Wetterlagen oder Wetterlagengruppen betrachtet werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, einen neuen Erklärungsansatz für die beobachteten Veränderungen in den Isotopenzeitreihen Deutschlands zu erarbeiten. Wetterlagen erscheinen hierfür als probates Werkzeug, da sie täglich das Wetter anhand dessen Herkunft, der Luftdruckverteilung und der gemessenen Feuchte klassifizieren.

Dabei wäre es wünschenswert mit Hilfe der Wetterlagenstatistik einen meteorologischen Prozess identifizieren zu können, welcher als maßgeblich für die Veränderungen der Isotopenzeitreihen angesehen werden kann. Dieser Steuerungsprozess kann seinen Ausdruck jedoch nur in einer Veränderungen der Wetterlagenverteilung selbst finden. Folglich wird es nötig sein, den Datensatz der Wetterlagen statistisch

zu untersuchen und für den Mann-Kendall-Trendtest adäquate Wetterlagengruppen zu synthetisieren. Weisen die Stationen der Isotopenzeitreihen gegenläufige Trends auf, so muss die Wetterlagenstatistik daraufhin untersucht werden, ob sie Aufschluss über die Richtung der Trends geben kann.

Da bisher wenig Wissen über Wetterlagen in Verbindung mit hydrologischen Fragestellungen besteht, soll zunächst der Stand der Forschung der Wetterlagenklassifikationen ausführlich beleuchtet werden. Über eine ausführliche statistische Untersuchtung soll die Wirksamkeit von Wetterlagen auf Isotopenzeitreihen herausgearbeitet werden. Überdies sind die angewandten Methoden bei der Wetterlagenklassifikation, des Trendtestings nach Mann-Kendall und die der Isotopenhydrologie darzustellen.

1.3 Vorgehensweise

Zunächst wird die Entwicklung der Wetterlagenklassifikation näher beleuchtet. Hierbei sollen verschiedene Klassifikationsmethoden vorgestellt werden, um die innerhalb dieser Arbeit angewandte objektive Klassifikationsmethode des Deutschen Wetterdienstes (DWD) besser einordnen zu können. In einem weiteren Schritt werden weitere hydrologische Anwendungen verschiedener Wetterlagenklassifikationen genannt.

Die Erklärung der wesentlichen Prozesse der Isotopenfraktionierung, die Erläuterung des Trendtestings sowie die Darstellung der Methoden zur Verbesserung der Testergebnisse, sollen im Verlauf der Arbeit helfen, Untersuchungsergebnisse besser einordnen und interpretieren zu können.

Die Wetterlagenanalyse basiert zunächst auf beschreibender Statistik, da es möglich erscheint, auch mit dieser Herangehensweise Erkenntnisse im Sinne der Fragestellung zu erlangen. Zusätzlich sollen mittels eines im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Wetterlagenrechners Möglichkeiten aufgezeigt werden, nach welchen Kriterien Wetterlagen gruppiert werden können. Daneben wird für die angewandte objektive Klassifikationsmethode von Wetterlagen eine neue Verweilzeitstatistik beschrieben.

In einem letzten Schritt werden die Untersuchungen zu Wetterlagen und Isotopenzeitreihen synthetisiert und im Ergebnisteil diskutiert. Dabei werden auch die jeweiligen Ergebnisse der Trendtests nach Mann-Kendall eingebunden. Gemäß der Fragestellung ist dann zu erörtern, welchen Erklärungsanteil Wetterlagen bei der Betrachtung von Veränderungen der Isotopenzeitreihen einnehmen können.

2 Wetterlagen: Geschichte und Stand der Forschung

Im folgenden Kapitel wird aufgezeigt, dass sich die Wetterlagenforschung in den letzten 80 Jahren stark weiterentwickelt hat. Wetterlagen werden schon lange verwendet, um Wettervorhersagen auszudehnen und Witterungsphänomene im Jahresverlauf zu erklären. Da diese meteorologische Unterdisziplin für hydrologische Fragestellungen weniger oft herangezogen wurde, liegt der Schwerpunkt dieses Kapitels auf der Entwicklung der Wetterlagenforschung, die Isotopenhydrologie wird hingegen im Methodenteil dieser Arbeit angerissen. Bei der Literaturrecherche wurde deutlich, dass sich die Wetterlagenforschung in in zwei Bereiche differenziert. Zum einen wurden die Methoden der Wetterlagenklassifikation verändert und verbessert bzw. umstrukturiert und als neue Klassifikationsmethode veröffentlicht, zum anderen tritt Wetterlagenstatistik in zahlreichen Publikationen als Anwendung zum Vorschein.

2.1 Geschichte der Wetterlagenklassifikation

Die Wetterlagenklassifikation kann zwischen der synoptischen Meteorologie und Klimatologie als Teilgebiet der Meteorologie verstanden werden. Die heutige Wetterlagenklassifikation beruht auf langjähriger Forschung und begründet sich einerseits in der Besonderheit der deutschen Sprache, Wetter und Klima durch den Begriff der Witterung zu ergänzen, andererseits durch die Absicht, die zeitliche Diskrepanz zwischen Synoptik und Klimatologie zu überbrücken. Wetterlagenklassifikationen können hier als Bindeglied verstanden werden.

Witterung ist als regionale Auswirkung von Wetter und Klima zu verstehen. Die räumliche Abgrenzung und zeitliche Ausprägung von einigen Tagen war Grund dafür, Witterungsregelfälle zu erarbeiten, um längerfristige Wettervorhersagen als noch vor 100 Jahren tätigen zu können. Wie Baur (1963) erläutert, war es damals notwendig wissenschaftlich fundiertere Wettervorhersagen zu verfassen. Da

sich Wetter aus der zeitlichen und räumlichen Dynamik des Witterungsgeschehens ableiten lässt, wurde durch die Großwetterkunde eine neue analytische Methode geschaffen, um Wetterprognosen auf mehrere Tage ausweiten zu können.

Dabei wird eine Wetterlage durch die räumliche Verteilung atmosphärischer Größen über einen bestimmten Zeitraum charakterisiert. Dieser Charakteristik folgend, entstand durch Baur et al. (1944) einer der ersten Wetterkataloge Europas. Damals gebräuchlich war der Begriff der Großwetterlage, welche nach Baur (1963) als "die mittlere Luftdruckverteilung eines Großraumes, mindestens von der Größe Europas, während eines mehrtägigen Zeitraumes, in welchem gewisse Züge aufeinanderfolgender Wetterlagen [...] gleichbleiben" definiert ist. Maßgebend hierfür war die begriffliche Trennung von Wetter und Witterung bedingt durch deren zeitliche Divergenz bei der Zustandsbeschreibungen. So kann nach Baur et al. (1944) ein Großwetter zwar aus verschiedenen Witterungen an verschiedenen Orten bestehen, die pysikalische Verbundenheit dieser Witterungen findet ihren Ausdruck jedoch in einer einzigen definierbaren Großwetterlage.

In den Folgejahren wurden nicht nur die Methoden und Systematiken der Kataloge weiterentwickelt, überprüft und verbessert, sondern auch zahlreiche neue Klassifizierungssyteme geschaffen. Hierdurch begründet sich auch die begriffliche Vielfalt für die meteorologische Disziplin der Wetterlagenklassifikation. Nachdem für die Katalogisierung zunächst Begriffe wie Großwetter (Baur et al., 1944), Witterungsregelfall (Flohn & Hess, 1949), Großwettertyp (Lamb, 1950) und Witterungslage (Schüepp, 1959) Gebrauch fanden, wurde in Publikationen nach 1952 nahezu ausschließlich der Begriff der Großwetterlage (Hess & Brezowsky, 1952) verwendet; begründet durch den weit verbreiteten *Katalog der Großwetterlagen nach Hess und Brezowsky.*

All diese Kataloge stützen sich auf eine subjektive oder auch manuelle Methode (Tveito & Ustrnul, 2003), da die tägliche Ausweisung von Großwetterlagen durch einen Meteorologen vorgenommen wurde, in Deutschland durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) in Offenbach. Da für diese Arbeit Datenreihen aus der computergestützten, objektiven Klassifikationsmethode des DWD Verwendung fanden, wird im Folgenden wie vom DWD vorgeschlagen der Begriff Wetterlage benutzt, sofern die Autoren nicht explizit eine andere Begrifflichkeit aufführen. Die objektive Klassifizierungmethode des DWD wird ausführlich in Kapitel 3, ab Seite 17 vorgestellt.

Der verbreiteste Katalog von Großwetterlagen nach einer subjektiven Methode wurde von Hess & Brezowsky (1952) in Deutschland entwickelt und ist

seither in einigen Versionen überarbeitet worden (Hess & Brezowsky, 1969, 1977; Gerstengarbe et al., 1993, 1999). Der von Baur et al. (1944) geforderte mehrtägige Klassifikationszeitraum wurde dabei auf 3 Tage festgelegt. Die aktuellste Auflage wurde im Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) von Gerstengarbe & Werner (2004) veröffentlicht, welcher auch die zugrundeliegende Methodik und alle Modifikationen am Katalog selbst beschreibt. Darüberhinaus haben die Autoren hier weitere beschreibende Statistik zu Großwetterlagen dargestellt, Verweilzeiten der einzelnen Großwetterlagen tabellarisch aufgeführt und ausführliche Erklärungen zu allen Großwetterlagen zusammengestellt.

Für Isola (2003) sind die zahlreichen Überarbeitungen des Katalogs nach Hess und Brezowsky Grund genug, dieser Klassifikationsmethode systematische Fehler abzusprechen. Zahlreichen Anwendungen der letzten Jahren stützten dabei die Plausibilität der Klassifizierungsmethodik (Kap. 2.2, S. 6).

Weitere Klassifizierungsmethoden, Wetterlagenkataloge und weiterführende Anmerkungen zur Systematik und Weiterentwicklung der Wetterlagenkataloge finden sich bei Baur et al. (1944), Baur (1963), Flohn & Hess (1949), Flohn (1963), Lamb (1950), Lamb (1995), Bürger (1958), Schüepp (1959), Grabau (1985), Kerschner (1989), Klaas (1992), Yarnal (1993), Weingärtner (1996), Barry & Carleton (2001) sowie Isola (2003).

Im Gegensatz zur Vielzahl der subjektiven Methoden wurde die objektive Wetterlagenklassifikation des DWD erst in den letzten Jahren entwickelt und weist einen kleineren Anwendungspool auf. Die Entwicklung der Methode und die einfließenden Parameter sind ausführlich in Kapitel 3.1, auf Seite 18 beschrieben, das Verfahren zur eigentlichen Objektivierung der Wetterlagenklassifikation in Kapitel 3, ab Seite 17. An dieser Stelle soll eine Auswahl bisheriger Publikationen zur objektiven Klassifikationsmethode vorgestellt werden.

Verschiedene Autoren veröffentlichten im Rahmen der Klimastatusberichte des DWD statistische Auswertungen der objektiven Wetterlagenklassifikation. Trendtests wurden dabei nicht oder ohne Signifikanzanalyse durchgeführt (Dittmann, 1997; Bissolli & Dittmann, 2002; Bissolli & Müller-Westermeier, 2005a). Die Studien berichten im wesentlichen von Häufigkeitsverteilungen und Vergleichen zwischen einzelner Jahren mit längeren Zeitreihen.

Bissolli & Dittmann (2001) geben einen Überblick über Anwendungsmöglichkeiten der objektiven Wetterlagenklassifikation und nennen Einsatzbereiche wie Klimaüberwachung, regionale Analysen von Klimaveränderung und deren Folgen,

Hochwasservorhersagemodelle, Bioklimatologie oder Untersuchungen zur Luftqualität. Eine unter hydrologischen Gesichtspunkten relevante Studie zur räumlichen Niederschlagsverteilung in Deutschland stellen Bissolli & Müller-Westermeier (2005b) vor, welche in Kapitel 3.2, ab Seite 33 ausführlich diskutiert wird. Hierbei wird die Niederschlagsverteilung mit verschiedenen Wetterlagen verknüpft.

Einhergehend mit der Weiterentwicklung der Wetterlagenkataloge, ist auch die synoptische Meteorologie verbessert worden. Synoptik bündelt als Zusammenschau mit einem System von Beobachtungsstationen die Untersuchung des Wetters und dessen Darstellung. Die Untersuchung erfolgt mit Hilfe meteorologischer, und daher auch physikalisch-begründeter Parameter. Auch die Wetterlagenklassifikation findet ihre physikalische Begründung in der Meteorologie – diese disziplinäre Verankerung hat nach wie vor Gültigkeit. Wetter und Witterung sind dabei als Phänologie des Zusammenwirkens unterschiedlichster meteorologischer Parameter – wie Temperatur, Druck oder Wasserdampfgehalt in der Luft – zu verstehen.

Zwischen den meteorologischen Inputparametern und dem eigentlichen Output, eine eindeutig definierte Wetterlage durch eine bestimmte Klassifikationsmethodik, ist die Klimatologie und Synoptik anzusiedeln.

All diese Disziplinen helfen gemessene Daten darzustellen, zu interpretieren, im weiteren Wettergeschehen und Witterung zu veranschaulichen und zu parameterisieren sowie Anwendbarkeit für zukünftige Fragestellungen zu schaffen. Grundlegende Arbeiten zur synoptischen Klimatologie und deren Anwendbarkeit sowie Informationen zur statistischen Auswertung von meteorologischen Daten sind bei Barry & Perry (1973), Yarnal (1993), Storch, H. von (1995) sowie Barry & Carleton (2001) zu finden.

Eine umfangreiche Diskussion des damaligen Forschungsstandes der synoptischen Klimatologie ist von Kerschner (1989) veröffentlicht worden. Barry & Carleton (2001) fassen in ihrem Werk Studien des Klimasystems zusammen und diskutieren umfassend Prozesse der dynamischen Klimatologie, u.a. werden großskalige Zirkulationssysteme und Zirkulationsmodelle vorgestellt. Die Autoren berichten weiterhin über bisherige subjektive und objektive Methoden zur synoptischen Klimatologie mit Augenmerk auf deren physikalische Inputparameter.

2.2 Angewandte Wetterlagenklassifikationen

Die verschiedenen Wetterlagenkataloge und ihre Klassifizierungsmethoden wurde nicht nur stetig weiterentwickelt, sondern kamen auch zahlreich in verschiedenen

naturwissenschaftlichen Bereichen zur Anwendung. Im Folgenden eine chronologische Aufführung einiger Anwendungsbeispiele sowie Arbeiten zur Methodikverbesserung.

Neben zahlreicher Forschung im deutschensprachigen Raum, wurde auch eine bekannte Klassifikation für die britischen Inseln geschaffen: Lamb (1950) klassifizierte zur Charakterisierung von Wettertypen und deren Dauer eine Zeitreihe von 1898 bis 1947. Dabei wurden nahezu alle Tage der Zeitreihe einer der sieben Klassen zugeordnet, welche sich damals schon durch ihre Zyklonalität (antizyklonaler und zyklonaler Typ) oder ihre vorherrschende Anströmrichtung (West, Nordwest, Nord, Ost und Süd) differenzieren ließen (siehe auch Kap. 3.1.2 und Kap. 3.1.3; S. 20-22). Die Typengenerierung basierte auf der Verteilung von Hoch- und Tiefdruckgebieten über Europa, deren Zugbahnen und der vorherrschenden Windrichtung. Für die Verweilzeit der sieben Wettertypen ergab sich im Untersuchungszeitraum ein Häufigkeitsmaximum im Bereich von 29 bis 45 Tagen. Mit diesem Ergebnis ordnete der Autor den einzelnen Jahresabschnitten maßgebliche Wettertypen zu. Die jährlichen Häufigkeitsverteilungen der Wettertypen wurden mit den natürlichen Jahreszeiten verknüpft, um saisonale Effekte innerhalb der Klassifikation herauszuarbeiten. Wie in Abbildung 1 auf Seite 8 zu sehen ist, zeigen die Lamb'schen Wettertypen bestimmte Saisonalitäten für die verschiedenen Wetterlagen und Anströmrichtungen. Die daraus abgeleiteten Saisons (Frühjahr, Sommer, Herbst, Frühwinter sowie Spätwinter) wurden auf die mittlere Verweilzeit ihrer prägenden Wettertypen untersucht. Hier sind Ähnlichkeiten zur Singularitätenforschung von Flohn & Hess (1949) zu erkennen. 1972 wurde diese Wetterlagenklassifikation überarbeitet und die höhere Differenzierbarkeit einzelner Wetterlagen eingearbeitet (Briffa, 1995; Lamb, 1995).

Als grundlegende Arbeit mit einer Anwendung des Großwetterlagenkatalogs nach Hess und Brezowsky darf der so genannte witterungsklimatologische Beitrag von Bürger (1958) gezählt werden. Dabei wurden anhand einzelner Stationen (Berlin, Bremen, Karlsruhe, München) Zusammenhänge zwischen den meteorologischen Parametern wie Tagestemperatur, Niederschlagsmengen sowie Bewölkung und den Großwetterlagen gefunden. 1963 untersuchte Flohn Klimaschwankungen unter Berücksichtigung großräumiger Klimabeeinflussung. Dabei wurde die Dynamik der atmosphärischen Zirkulation als Ursache für die Veränderung von Zugbahnen großer Zyklonen und Antizyklonen genannt.

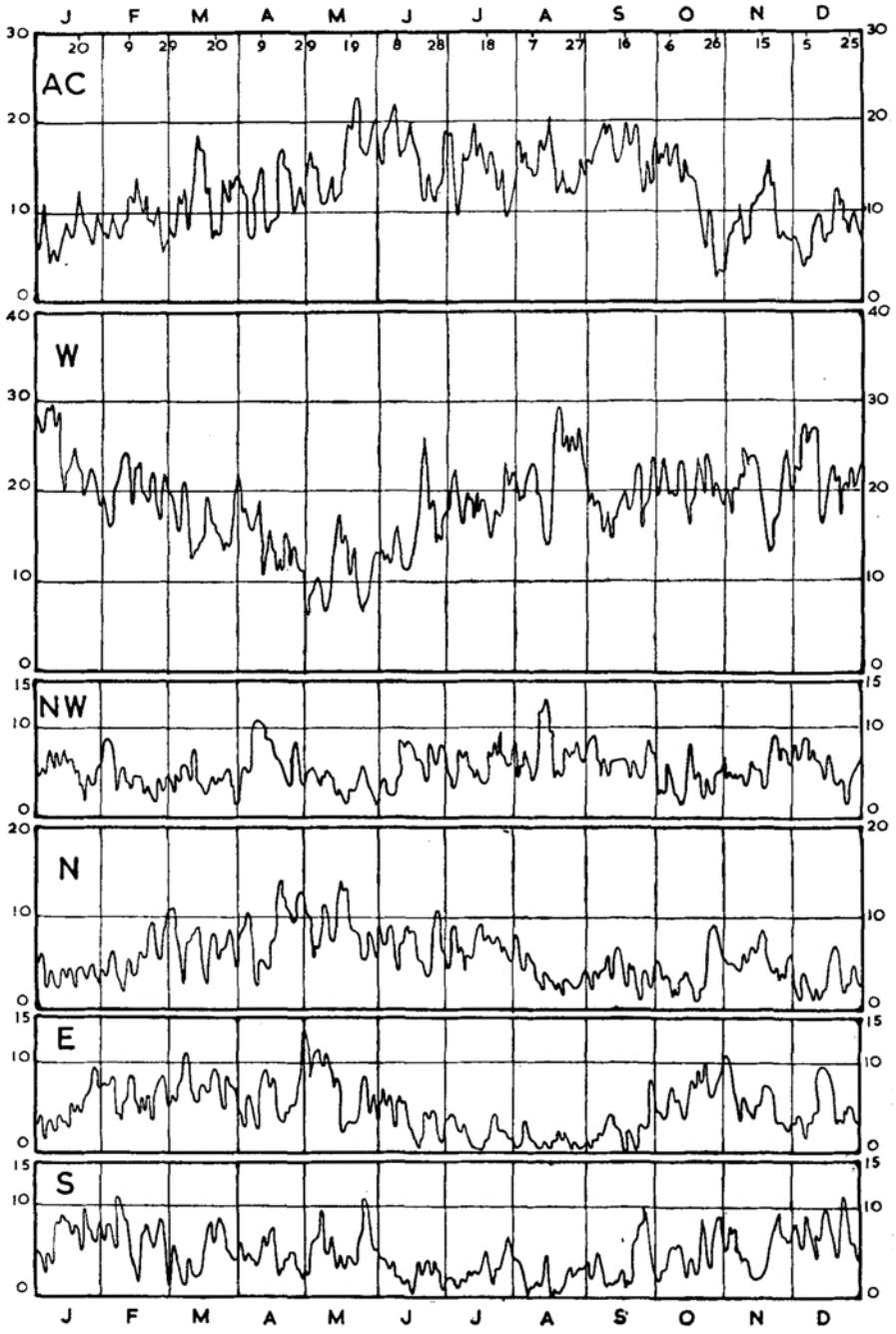

Abbildung 1: Absolute Häufigkeiten der sieben Wettertypen im Jahresverlauf nach der Klassifikation von Lamb (1950), Klassifikationsgebiet: Großbritannien, Zeitreihe 1898–1947, Wettertypen: Westlagen (W), Nordwestlagen (NW), Nordlagen (N), Ostlagen (E), Südlagen(S); nicht dargestellt: antizyklonale (AC) und zyklonale (C) Wettertypen.

Für Grabau (1985) waren Veränderungen klimatischer Größen wie Temperatur und Niederschlagsverteilungen Veranlassung, eine Studie für den mitteleuropäischen Raum zu veröffentlichen. Im Mittelpunkt der Untersuchung stand die Frage, ob die festgestellten Klimaschwankungen durch die Veränderungen der allgemeinen Zirkulation erklärbar seien. Als Datenmaterial wurden der Großwetterlagenkatalog nach Hess & Brezowsky (1977) und Zeitreihen der meteorologischen Paramater Temperatur und Niederschlag zahlreicher europäischer Stationen herangezogen. In der abwechselnden Periodizität der zonalen und meridionalen Zirkulationen über Europa sah der Autor die Ursache für Klimaschwankungen, wie sie lange Zeitreihen (1881–1982) verschiedener meteorologischer Daten wie Niederschlag und Temperatur aufzeigen. Haupttendenzen im säkulären Temperatur- und Niederschlagsverlauf könnten mit Häufigkeitsschwankungen bestimmter Großwettertypen in Verbindung gebracht werden. Folglich sah der Autor die Ursache für Klimaschwankungen in veränderten Zirkulationsverhältnissen über Europa.

Klaus (1986) wies statistische Zusammenhänge zwischen Ernteerträgen und Großwetterlagen in Europa nach. Der Autor stellte dabei wie Bürger (1958) fest, dass die wechselnden Häufigkeiten von Großwetterlagen Einfluss auf Bewölkung, Niederschläge und Temperatur haben. Die angewandte Methode beruht auf Korrelationskoeffizienten nach Pearson und einer Hauptkomponentenanalyse, um den Erklärungsanteil verschiedener Großwetterlagengruppen für die Veränderungen in den Ernteerträgen zu erklären. Die herangezogene Großwetterlagenstatistik basierte auf dem Katalog von Hess & Brezowsky (1977). Die Erntebilanzen wurden nationalen statistischen Jahrbüchern europäischer Staaten entnommen. Klaus (1986) begründete seine Untersuchungsergebnisse zum einen durch wechselnde Anströmrichtungen (vgl. Kap. 3.1.2, S. 20) der Wetterlagen und die damit verbundenen Schwankungen der Ernteerträge, sowie in einen Erklärungsanteil, welcher sich auf die Unterschiede der Zirkulationsformen (vgl. Kap. 3.1.3, S. 22) beruft. So sind Westlagen (westliche Anströmung) in Küstennähe mit Ertragssteigerungen verbunden, hingegen zeigen nordwestliche Lagen im gesamten europäischen Raum Ertragsrückgang bei Getreide. Hochdruckgebiete über Osteuropa bedingen erhöhte Erträge in Westeuropa, nicht aber in Griechenland, Spanien oder Finnland. Wird die Zirkulationsform als Erklärungsansatz herangezogen, so verursachen zonale Großwetterlagen Ertragssteigerungen in Nord- und Mitteleuropa, aber Einbußen in Südeuropa. Bei meridonalen Großwetterlagen zeigen sich erhöhte Erträge in Süd- und Mitteleuropa und Minderung in Nordeuropa. Die Hauptkomponentenanalyse liefert nach Klaus (1986) weniger erklärende Ergebnisse. Der Autor verweist drauf, dass die

Gruppierung von Großwetterlagen nach bestimmten Witterungscharakteristika je nach Fragestellung nützlich sein kann.

Fragestellungen wie mesoskalige Klimaveränderung und Gletschermassenschwankungen gaben für Kerschner (1989) den Ausschlag eine synoptisch-klimatologische Studie für die Ostalpen in Österreich zu veröffentlichen. Die klimatologische Struktur der Alpen und ihre Besonderheiten in Hinblick auf Zirkulationsmuster und auftretende Wetterlagen war Anlass genug, einen Wetterlagenkalander mit spezifischer Anpassung an das Gebiet zu entwickeln. Die daraus resultierende Alpenwetterstatsitik wurde anhand einer Auswahl meteorologischer Stationen getestet, um einen Überblick der räumlichen Strukturen innerhalb der Alpen zu gewinnen. Der Autor legt einen umfangreichen regionalen Überblick für alle Jahreszeiten und Wetterlagen in Bezug auf Niederschlagsdargebot und Temperatur dar.

Klaas (1992) stellt in seiner Dissertation umfangreiche statistische Auswertungen von Witterungsregelfällen in Deutschland vor und bezieht sich bei der Untersuchung seiner Datenzeitreihe auf die von Flohn & Hess (1949) vorgestellte Methodik zur Singularitätenforschung, welche fünf zyklonale und neun antizyklonale Witterungsregelfälle mit dem ersten Katalog der Großwetterlagen von Hess und Brezowsky in Verbindung brachten. Der Autor gibt in seiner Arbeit einen ausführlichen Einblick in die Geschichte, Tradierung und die internationale Forschung um die meteorologischen Singularitäten, welche als regelmäßig auftretende Witterungsfälle im Jahresverlauf zu verstehen sind. Singularitäten eignen sich jedoch nicht für Langfristprognosen und können auch die Methodik der Wetterlagenklassifikation zur Analyse von Wettergeschehen nicht ersetzen. Sie dienen ursprünglich vielmehr dazu, mittels mündlicher Überlieferung eine qualitative Beschreibung von nicht parameterisierbaren Wiederholungen im jährlichen Witterungsablauf vorzunehmen.

Nach Weingärtner (1996) war eine kompaktere Klassifikation synoptischer Strukturen in Mitteleuropa nötig. Weniger Witterungstypen sollten eine erhöhte Anwendbarkeit dieser Disziplin im Bereich der Klimatologie fördern. Diese Klassifikation sollte unmittelbar aus den Großwetterlagen nach Hess & Brezowsky (1977) ableitbar sein. Die Anzahl der Witterungstypen wurde hierfür auf zehn Typen reduziert, indem verschiedene Wetterlagen mit ähnlichen synoptischen Strukturen zusammengefasst wurden. Kriterien hierfür waren die Luftmasse (gemischt, maritim, autochton oder kontinental) sowie die Dynamik der Wetterlagen (regressiv, advektiv oder stationär). Darübehinaus wurde eine qualitative Klassifikation

der Großwettertypen nach Temperatur (kalt oder warm) und Niederschlag (naß oder trocken) jeweils für Sommer und Winter vorgenommen. Der Autor kam zu dem Ergebnis, dass die Vereinfachung auf 10 neue Witterungstypen je nach Fragestellung Sinn machen könne und stellte qualitative Aussagen über den Zusammenhang der Witterungstypen mit Windgeschwindigkeiten, Sicht und Nebel, Wolken und Flächenniederschlag sowie Konvektion auf.

In neuerer Zeit publizierten Bárdossy & Caspary (1990), Bárdossy et al. (1995), Bárdossy (1997), Özelkan et al. (1998) und Bárdossy et al. (2002) weiterführende Anwendungsmöglichkeiten von Zirkulationsmustern und Wetterlagen, sowie neuere Methoden, um Wetterlagen und Zirkulationsmuster mit hydrologischen und meteorologischen Fragestellungen zu verknüpfen.

Für Bárdossy & Caspary (1990) erschien Wetterlagenstatistik als probates Mittel, mögliche Klimaänderungen zu erklären. Hierfür wurde eine 109-jährige Zeitreihe (1881–1989) der Wetterlagenstatstistik nach Hess und Brezowsky auf Veränderung der einzelnen Wetterlagenhäufigkeiten hin untersucht. Dabei fanden die Autoren Trends bei zahlreichen Wetterlagen, teils im Jahresablauf, aber auch innerhalb der Jahreszeiten und einzelnen Monaten. Seit 1973 stieg die Anzahl zonaler, west-östlich strömender Wetterlagen im Dezember und Januar an, verringerte sich aber im Frühsommer. Im Gegensatz dazu ist eine verminderte Häufigkeit der östlichen Wetterlagen in den Wintern seit 1980 zu verzeichnen. Dies könne, wenn auch nicht als Beweis, doch als eine Art Indikator für wärmere und feuchtere Winter in Mitteleuropa herangezogen werden. Mildere Winter wurden Ende der 80er Jahre flächenweit in Deutschland registriert und können den Autoren zufolge aufgrund der Veränderung innerhalb der Wetterlagenstatistik nicht länger als Ausreißer betrachtet werden (Huxol, 2007). Vielmehr weisen sie auf klimatische Veränderungen hin. Es zeigte sich, dass die Wetterlagenstatistik und die Veränderung von Häufigkeiten offensichtlich gut mit hydrologischen Parametern wie Niederschlag und Temperatur verknüpfbar ist.

Methodisch schlugen Bárdossy et al. (1995) vor, die subjektive, manuelle Klassifikationsmethode von Hess & Brezowsky (1977) durch definierte Fuzzyregeln stärker zu objektivieren. Fuzzymethoden dienen dazu, unscharfe (teils qualitative) Aussagen in pysikal-mathematische Parameter zu übersetzen. Die Unschärfe der Wetterlagenklassifikation äußert sich dabei in der Generalisierung verschiedener Parameter, beispielsweise durch die Festlegung von genau vier oder fünf Anströmrichtungen bei einem 360-Grad-Windfeld (vgl. Kap. 3.1.2, S. 20). In der erwähnten

Studie basiert die computergestütze Methode auf den geographischen Lagen der Hoch- und Tiefdruckgebiete. Die auftretenden Anomalien innerhalb der europäischen Luftdruckkarte wurden über Zugehörigkeitsfunktionen parameterisiert. Dabei wurden den Gitterpunkten aus dem Wetterlagenkatalog (Hess & Brezowsky, 1977) die Anzahl an Luftdruckanomalien zugeordnet. Luftdruckanomalien waren dabei Abweichungen vone inem durchschnittlichen Luftdruck für das zu untersuchende Gebiet. Nun konnte über Fuzzyregeln der Grad der Zugehörigkeit zwischen der Wetterlage und der Luftdruckverteilung eines Tages bestimmt werden. Durch die Klassifizierung wurde eine Methode geschaffen, um über Wetterlagen lokalen Niderschlag zu modellieren.

In diesem Zusammenhang sei auf die Studie von Briffa (1995) hingewiesen, welcher die subjektive Wettertypenklassifikation von Lamb (1950) durch ein computergestützes Regelset *objektivieren* ließ. Hierfür wurden bestimmte Hoch- und Tiefdruckmustern über den Britischen Inseln mit der jeweils vorherschenden Windrichtung verknüpft, um automatisch eine aus 6 Wetterlagen zu bestimmen.

Bei weiteren Untersuchungen musste Bárdossy (1997) jedoch feststellen, dass durch globale Zirkulationsmodelle Niederschlag nur sehr ungenau abgebildet werden kann. Jedoch wurde ein enger Zusammenhang zwischen Tagesniederschlägen und Wetterlagenkatalogen mit 24-Stunden-Auflösung gefunden. Für deutsche Einzugsgebiete der Mesoskala konnten über ein stochastisches Niederschlagsmodell in Verbindung mit einem Zirkulationsmodell auf Wetterlagen basierend realistische Niederschlagsszenarien abgebildet werden. Die Anwendbarkeit von Fuzzyregeln für die Analyse von Zirkulationsmustern führten Özelkan et al. (1998) fort, welche eine multi-objective fuzzy rule-based classification (MOFRBC) vorschlugen, um die Erklärbarkeit des Niederschlagsdargebots durch Wetterlagen zu verbessern. Dabei fiel auf, dass die Erweiterung des Zeitraums für Wetterlagenausweisungen von einem auf zwei oder drei Tage den Erklärungsanteil des Niederschlagdargebots durch Zirkulationssysteme erhöhen konnte.

Bárdossy et al. veröffentlichten in 2002 weiterhin eine verbesserte Methode, um durch Fuzzyregeln eine automatisierte und objektivere Wetterlagenklassifiktion zu schaffen. Dabei sollte Zirkulationsmuster als einfache Inputparameter dienen, um Modellen die Simulation von Niederschlägen und Temperaturen zu erleichtern. Die Fuzzyregeln basierten auf der Lage von Hoch- und Tiefdruckgebieten, den Zirkulationsmustern wurden ähnlich wie bei Weingärtner (1996) verschiedene Parameter zugeordnet: Zur Modellierung der Niederschläge wurden feuchte und trockene Zirkulationsmuster ausgewiesen, für die Temperatur kalte und warme Muster. Es

konnten Zusammenhänge zwischen Zirkulation, Niederschlägen und Temperatur aufgrund meteorologischer Datenreihen verschiedener Stationen für zwei Untersuchungebiete (Deutschland und Griechenland) gefunden werden.

Auswirkungen der atmosphärischen Zirkulation auf die oberflächennahe Umwelt untersuchte Yarnal (1993). Der Autor analysiert synoptische Daten in Zusammenhang mit städtischer Luftqualität oder dem Vorkommen von saurem Regen. In diesen Kontext gliedern sich auch Untersuchungen zur Luftgüte im deutschsprachigen Raum ein (Krammer, 1970; Draheim, 2005; LAI, 1994).

Zunächst sei auf eine ältere, aber ausführliche Arbeit von Krammer (1970) hingewiesen, welcher im Raum Basel Trübungsbestimmungen der Luft durchführte (Meßzeitraum 1963-1965) und diese in Zusammenhang mit Witterungslagen stellte, welche bei Schüepp (1959) ausführlich beschrieben sind. Der Autor fand heraus, dass maritime Luftmassen durchwegs geringere Trübung als kontinentale aufweisen. Föhn und Hochdrucklagen sorgten ebenfalls für weniger Trübungen im Stadtgebiet. Innerhalb der Studie konnten Boden- und Höhenwindsysteme mit spezifischen Transportmechanismen differenziert werden; Bodenwinde weisen bei Trübung häufig auf lokale Witterungslagen mit geringerer Transportstrecke hin, Höhenwinde hingegen sind für großräumigen Trübungstransport verantwortlich.

Die bodennahen Ozonkonzentrationen wurde vom Länderausschuß für Immissionsschutz (LAI) mit den absoluten Häufigkeiten der Anströmrichtungen der Wetterlagen verglichen. Zusätzlich wurde überprüft, ob die Sommer 1991 und 1992 mehr oder weniger Hoch- und Tiefdruckgebiete aufwiesen als die des Referenzzeitraums 1951–1980. Da der Witterungscharakter einzelner Wetterlagen als begünstigend für erhöhte Ozonkonzentratiopnen einzustufen war, konnten für die Sommermonate Juni bis September Aussagen über die Bildungsbedingungen für Ozon in Deutschland getroffen werden. So zeigten Monate mit überdurchschnittlicher Anzahl antizyklonaler Lagen oder mitteleuropäischen Hochdrucksituationen meteorologisch günstig Bedingungen für erhöhte Ozonkonzentrationen.

Der Großwetterlagenkatalog nach Hess und Brezowsky (Gerstengarbe et al., 1999) diente als Grundlage für die Studie von Draheim (2005), welcher die räumliche und zeitliche Variabilität der PM10-Feinstaubkonzentration (particulate matter $< 10\ \mu m$) in Berlin unter Berücksichtigung von Großwetterlagen untersucht. Dabei sind Wetterlagen mit stabilen Schichtungen für verringertes atmosphärisches Austauschvermögen verantwortlich und fördern somit, gerade in urbanen Gebieten, erhöhte PM10-Konzentrationen. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass

die witterungsbedingte zeitliche Variabilität gegenüber der räumlichen Variabilität bei PM10-Immissionen in Berlin überwiegt.

Caspary (2001) bezog sich in seiner Studie auf die von Bárdossy & Caspary (1990) aufgezeigten winterlichen Zunahmen der Wetterlagen mit zonaler Zirkulation. Der Autor untersuchte mittels des Kataloges von Hess und Brezowsky die *Westlage zyklonal*, um mit Hilfe einer Extremwertanalyse zu überprüfen, ob die Häufigkeitsänderungen dieser Wetterlage Einfluss auf die Zunahme der Extremhochwasser haben könnte. Dabei stellte sich heraus, dass die Schwankung der Wetterlagenhäufigkeit mit den Extremhochwässern in den Monaten Januar 1990, Dezember 1993, Januar 1995 und Februar 1997 im Raum Südwestdeutschland in einen Zusammenhang gestellt werden kann. Dieser Ansatz kann die beobachteten Abflussänderungen jedoch nicht gänzlich erklären, vielmehr wird innerhalb der Studie von einer Überlagerung natürlicher Klimavariabilität mit einem anthroprogen verursachten Anteil zur Begründung herangezogen. Im gleichen Atemzug sind die Ergebnisse von Gerstengarbe & Werner (2004) in Bezug auf die Andauer von Großwetterlagen zu nennen. Dabei waren Zunahmen der Andauer bei allen Zirkulationsformen, aber auch bei Großwetterlagen selbst zu verzeichnen. Die Häufigkeiten der längsten Andauern lagen dabei in den letzten 25 Jahren bis zu 50% über dem langjährigen Mittel (vgl. Kap. 6.3 , ab S. 59).

Auch in den letzen Jahren fanden Wetterlagen in der Hydrologie Anwendung. Isola (2003) fand Beziehungen zwischen den Häufigkeitsschwankungen einzelner Wetterlagen und den Schwankungen im Massenhaushalt der Ötztäler Gletscher in den Alpen. Hierfür wurden gletschergünstige und -ungüstige Wetterlagen in Bezug auf die Massenbilanz differenziert. Wetterlagen konnten folglich in die Massenbilanzkategorien nährend und zehrend eingeteilt werden. Zusätzlich bietet der Autor eine umfangreiche beschreibende Statistik zur Häufigkeit der Großwetterlagen (1881–2002) nach Hess & Brezowsky.

Ebenfalls hydrologischer Natur war die Untersuchung von Steinbrich et al. (2003), welche Zusammenhänge zwischen Großwetterlagen und Starkniederschlägen für das Bundesland Baden-Württemberg herausarbeiteten. Als Zielsetzung sollte die regionale und saisonale Verteilung von Starkniederschlägen mit dem Auftreten von Großwetterlagen in Verbindung gesetzt werden. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass sechs der 29 Großwetterlagen mehrheitlich mit Starkniederschlägen korreliert sind. Innerhalb des Bundeslandes konnten raum-zeitliche Muster gefunden werden, welche helfen Starkniederschläge in Abhängigkeit der Großwetterlage

zu differenzieren. Weiterhin zeigten die Autoren, dass sich Änderungen in der Häufigkeitsverteilung von Großwetterlagen auch auf ein räumlich vergleichsweise kleines Gebiet wie Baden-Württemberg auswirken können.

Wie bereits erwähnt, kamen objektive im Vergleich zu subjektiven Wetterlagenklassifikationen erst in den letzten Jahren zum Einsatz. Eine ausführliche Studie legten Zehe et al. (2006) vor, die objektiv-klassifizierte Wetterlagen nutzten, um einen Erklärungsansatz für die räumliche und zeitliche Auflösung des Monsun in Nordwestindien zu finden. Dabei bezogen sich die Autoren auf die von Bárdossy et al. (2002) entwickelte Methode, welche sich auf Fuzzyregeln begründet (siehe oben). Zunächst konnte dabei festgestellt werden, dass die auf 500 hPa-Niveau ausgewiesenen Wetterlagen einen höheren Erklärungsanteil für das Niederschlagsdargebot einnehmen als Wetterlagen auf 700 hPa-Niveau (bodennähere Wetterlagen). Weiterhin zeigten die monatlichen Häufigkeiten der feuchtesten Wetterlagen eine signifikante positive Korrelation mit der monatlichen Variabilität der Regentagenanzahl. Die trockensten Wetterlagen wiesen dementsprechend eine negative Korrelation auf, was die Ergebnisinterpretation stützte.

Im Gegensatz dazu untersuchten Trnka et al. (2008) den Einfluss der Großwetterlagen auf Bodenfeuchte bzw. Dürreperioden in Tschechien. Hierfür wurde der Großwetterlagenkatalog nach Hess und Brezowsky von Gerstengarbe et al. (1999) herangezogen. Ziel der Untersuchung war es, die Beziehung zwischen Großwetterlagen und Dürreperioden vor allem während der Vegetationsperiode (April bis September) genauer zu untersuchen. Dafür wurden Dürreperioden nach dem PDSI (Palmer Drought Severity Index) und Z-Index (Palmer Moisture Anomaly Index) für den Zeitraum 1881–2005 untersucht. Diese wurden unter Berücksichtigung bestimmter Jahresabschnitte (wie beispielsweise Vegetationsperioden) mit den relativen Häufigkeiten der Großwetterlagen verknüpft.

Während Dürrephasen im Frühjahr nach Trnka et al. (2008) mit östlich-, südöstlich- oder südlich orientierten Großwetterlagen zusammenhängen, sind im Sommer und während der Vegetationsperiode zentraleuropäische Hochdrucksysteme und östliche, vor allem antizyklonale Anströmungen bei gleichzeitigen Hochdruckgebieten über Skandinavien für Dürre verantwortlich. Die relativen Häufigkeiten derjenigen Großwetterlagen, welche Dürrephasen begünstigten, lag bis 1940 bei etwa 30%, danach mehrheitlich steigend bei bis zu 55%. Für die Autoren sind die Trends in den Dürreindizes durch ansteigende Temperaturen im Untersuchungszeitraum begründet, wohingegen die Niederschlagsverteilung keine signifikanten Veränderungen zeigte.

3 Wetterlagenklassifikation

Im folgenden Kapitel wird die Systematik der Wetterlagenklassifikation erläutert. Durch die Kenntnisse über die Klassifikationsmethode können später Häufigkeitsveränderungen oder Trends einzelner oder auch gruppierter Wetterlagen besser interpretiert werden.

Bissolli & Dittmann (2001) schlagen zunächst vor, die objektive Wetterlagenklassifkation nicht weiter mit dem Terminus *Großwetterlage* zu besetzen, da dieser der planetarischen Skala zuzuordnen ist und der synoptischen Analyse für ein Gebiet wie Deutschland nicht gerecht wird. Nicht zuletzt unterscheiden sich die Klassifikationsmethode für Großwetterlagen nach Hess und Brezowski und die des DWD auch deutlich in ihrer räumlichen Untersuchungsskala, wie es auch bei einem Vergleich der Verweilzeiten von Großwetter- und Wetterlagen zu sehen ist (vgl. Kap. 6.3, ab S. 59). Da im Rahmen dieser Arbeit die objektive Klassifikationsmethode des DWD Anwendung findet, wird im Folgenden der Begriff Wetterlage benutzt. Der Ausdruck Großwetterlage bündelt vielmehr die geschichtliche Entwicklung der Klassifikation von Wettergeschehen (vgl. Kap. 2.1, ab S. 3).

Im Gegensatz zu älteren, subjektiven Verfahren zur Klassifikation von Wetterlagen in Europa, wie etwa bei Lamb (1950), Hess & Brezowsky (1952), Yarnal (1993), beruht das objektive Verfahren des Deutschen Wetterdienstes (DWD) auf einer jederzeit nachvollziehbaren Methode mit stets gleichem Ergebnis ohne unbestimmte Fälle. Tveito & Ustrnul (2003) verweisen jedoch darauf, dass auch eine computergestützte Methode nicht als vollständig objektiv angesehen werden kann. Daher eigne sich zur Differenzierung der Methoden der Begriff *manuelle Klassifikation* besser für alle subjektiven Verfahren. Bissolli & Dittmann (2001) sehen die Objektivität der Methode darin begründet, dass die Klassifikation einer Wetterlage künftig nicht mehr durch Personen und deren subjektive Gewichtung der meteorologischen Parameter vorgenommen wird, sondern auf reproduzierbare Numerik zurückzuführen ist.

In dieser Arbeit, insbesondere in diesem Kapitel, werden zwar die Parameter der Klassifikationsmethode erörtert, grundlegende meteorologische Größen werden dagegen nicht explizit oder ohne Anspruch auf Vollständigkeit dargestellt. Für eine

umfassendere Betrachtung der Synoptik und Meteorologie sei auf die Standardwerke von Barry & Perry (1973), Barry & Carleton (2001) sowie Häckel (2005) verwiesen.

3.1 Objektive Klassifikationsmethodik

Der DWD zieht zur Klassifikation der Wetterlagen objektive Kriterien heran, welche auf jede meteorologische Situation über Mitteleuropa angewandt werden können. Die Klassifizierung wird um 12 UTC vorgenommen und gilt als Wetterlage für den jeweiligen Tag (Dittmann, 1997).

Tabelle 1: Generierung der fünfstelligen Abkürzungen für die 40 möglichen objektiven Wetterlagenklassen des DWD (nach: Bissolli & Dittmann, 2002).

Parameter	Erläuterung	Ausprägungen	
AR	Anströmrichtung auf 700 hPa	XX	undefiniert
		NO	Nordost
		SO	Südost
		SW	Südwest
		NW	Nordwest
Z_{950}, Z_{500}	Zyklonalität auf 950 hPa bzw. 500 hPa	Z	zyklonal
		A	antizyklonal
f	Feuchte	F	feucht
		T	trocken

Die Klasseneinteilung erfolgt über vier verschiedene Parameter, aus deren Kombination sich 40 mögliche Wetterlagen ergeben (vgl. Tab. 1). Neben der Anströmrichtung (fünf Ausprägungen), welche sich aus der vorherrschenden Windrichtung des 700-hPa-Niveaus ableitet, fließen Zyklonalität (vier Ausprägungen) und die Feuchte bzw. das niederschlagsfähige Wasser der Troposphäre (zwei Ausprägungen) in die Generierung der Wetterlagenklasse ein. Daraus ergeben sich durch die möglichen Kombinationen der Parameter

$$WL_x = AR, Z_{950}, Z_{500}, f$$

genau 40 eindeutig zuweisbare Wetterlagenklassen WL mit $x = \{1, 2, 3...40\}$, welche in Tabelle 2 aufgeführt sind.

Tabelle 2: Liste der 40 Wetterlagen (nach: Bissolli & Dittmann, 2002).

WL_x	Kennung	Anströmrichtung,	Zyklonalität	Zyklonalität	Feuchte
1	XXAAT	nicht definiert			
2	NOAAT	Nordost			
3	SOAAT	Südost	antizyklonal	antizyklonal	trocken
4	SWAAT	Südwest			
5	NWAAT	Nordwest			
6	XXAAF	nicht definiert			
7	NOAAF	Nordost			
8	SOAAF	Südost	antizyklonal	antizyklonal	feucht
9	SWAAF	Südwest			
10	NWAAF	Nordwest			
11	XXAZT	nicht definiert			
12	NOAZT	Nordost			
13	SOAZT	Südost	antizyklonal	zyklonal	trocken
14	SWAZT	Südwest			
15	NWAZT	Nordwest			
16	XXAZF	nicht definiert			
17	NOAZF	Nordost			
18	SOAZF	Südost	antizyklonal	zyklonal	feucht
19	SWAZF	Südwest			
20	NWAZF	Nordwest			
21	XXZAT	nicht definiert			
22	NOZAT	Nordost			
23	SOZAT	Südost	zyklonal	antizyklonal	trocken
24	SWZAT	Südwest			
25	NWZAT	Nordwest			
26	XXZAF	nicht definiert			
27	NOZAF	Nordost			
28	SOZAF	Südost	zyklonal	antizyklonal	feucht
29	SWZAF	Südwest			
30	NWZAF	Nordwest			
31	XXZZT	nicht definiert			
32	NOZZT	Nordost			
33	SOZZT	Südost	zyklonal	zyklonal	trocken
34	SWZZT	Südwest			
35	NWZZT	Nordwest			
36	XXZZF	nicht definiert			
37	NOZZF	Nordost			
38	SOZZF	Südost	zyklonal	zyklonal	feucht
39	SWZZF	Südwest			
40	NWZZF	Nordwest			

3.1.1 Klassifikationsgebiet

Das Klassifikationsgebiet für die Wetterlagen ist Deutschland. Der Deutsche Wetterdienst nutzt seit 1979 unterschiedlichen Modelle (u.a. European Model, EM) mit verschiedenen räumlichen Auflösungen, seit 1999 das Operational Global Model (GME). Neben der Verbesserung der räumlichen Auflösung durch Erhöung der gridpoint-Anzahl wurde das Gitterraster des GME's in drei Zonen eingeteilt. Dies geschah um einer möglicher Überbewertung der äußeren Gitterpunkte innerhalb des Modells entgegenzuwirken. Die Gewichtung der Gitterpunktdaten im GME (vgl. Abb. 2) erfolgt für den Kern mit Faktor 3, für den mittleren Bereich mit Faktor 2. Der Randbereich des Gebietes wird einfach gewichtet.

Bissolli & Dittmann (2001) weisen darauf hin, dass die Klassifkationsmethodik an die synoptische Skala gebunden sein muss. Ist das Klassifikationsgebiet zu groß, werden verschiedene Luftmassensysteme vermischt und können nicht mehr ausreichend differenziert werden. In zu kleinen Gebieten werden eventuell nicht alle für die Klassifikation relevanten Luftmassensysteme erfasst; es bedarf demnach einer adäquaten Anpassung zwischen synoptischer Skala und dem Untersuchungsgebiet.

3.1.2 Anströmrichtung

Für die Wetterlagenklassifikation werden fünf Anströmrichtungen unterschieden. Diese definieren sich durch die Hauptwindrichtung in 700-hPa-Niveau und gliedern sich in Nordost (NO), Südost (SO), Südwest (SW) sowie Nordwest (NW) auf. Hinzu kommt der unbestimmte Fall (XX), bei dem keine vorherrschende Windrichtung definiert werden kann. Für die Anströmrichtung wird die horizontale Windkomponente für jeden Gitterpunkt innerhalb des Modells errechnet. Dabei werden die Windkomponenten gemäß der Zonen des Klassifikationsgebietes gewichtet (vgl. Kap. 3.1.1).

Es werden 36 Sektoren mit einem Anströmbereich von 90 Grad, jeweils um 10 Grad versetzt ([0°, 90°]; [10°, 100°];[20°, 110°] ... [350°, 80°]), festgelegt. Die Windrichtungen aller Gitterpunkte werden in die betreffenden Sektoren eingeordnet und für jeden dieser Sektoren aufsummiert. Der Sektor mit dem Maximum an zugeordneten Gitterpunkten gilt als Hauptwindrichtung, sofern er mindestens 66,6% aller Gitterpunkt enthält. Liegen beispielsweise die meisten zugeordneten Gitterpunkte im Bereich zwischen 40 und 13° Grad, so bestimmt der Mittelwert dieses Sektors (85 Grad) die Anströmrichtung – in diesem Fall Nordost (NO) mit dem Sektor 0 bis

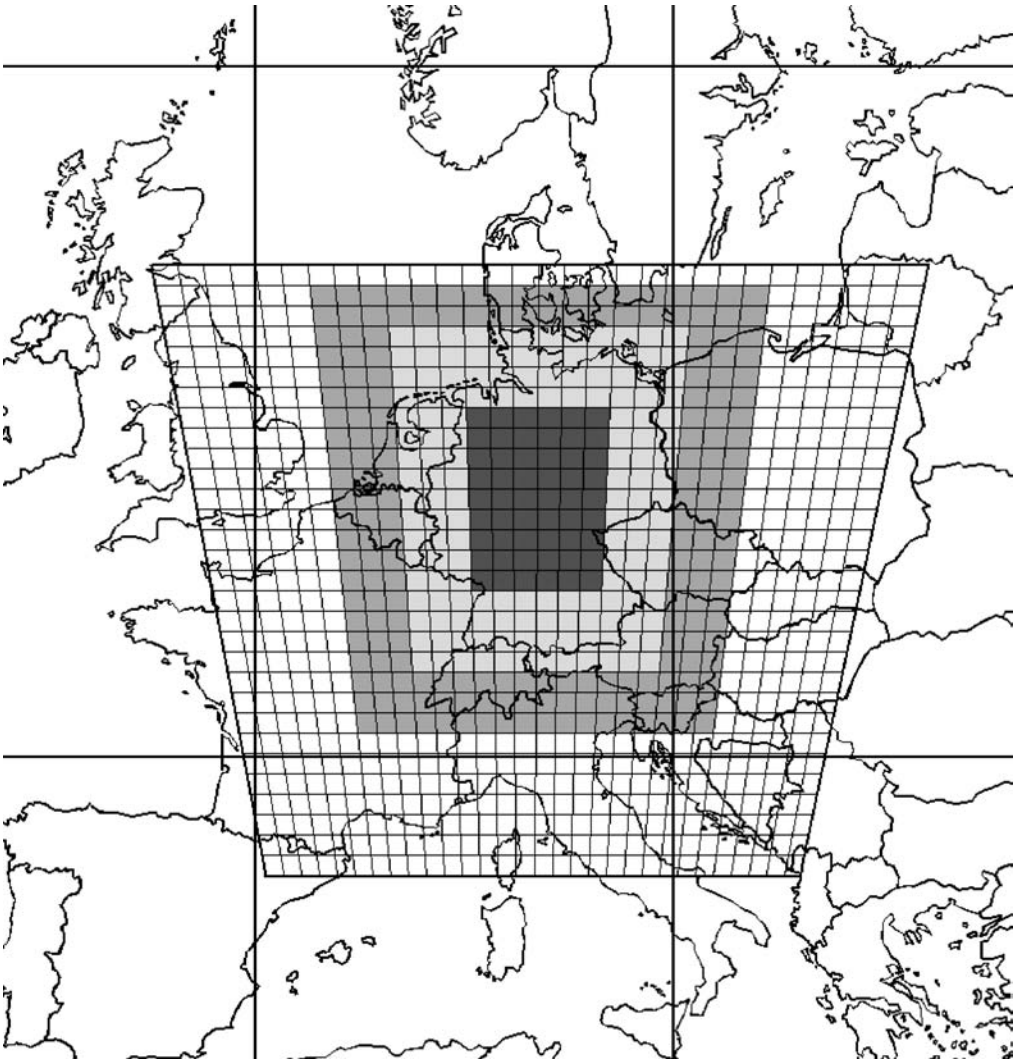

Abbildung 2: Klassifikationsgebiet des EM (vergleichbar mit GME) des DWD zur objektiven Wetterlagenbestimmung in Deutschland. Erhobene Gitterpunktdaten werden gemäß ihren Zonen gewichtet, Erklärung siehe Text (nach: Bissolli & Dittmann, 2001).

90 Grad (Abb. 3). Enthält keiner der 36 Sektoren mindestens zwei Drittel der über die Windkomponente zugeordnenten Gitterpunkte, so wird die Anströmrichtung als unbestimmt (XX) definiert (Bissolli & Dittmann, 2001).

Die versetzten Hauptanströmrichtungen (beispielsweise Nordost statt Nord oder Ost) zwischen den vier Haupthimmelsrichtungen berücksichtigen die Hauptzugrichtungen der Luftmassen über Europa besser und haben sich auch für synoptische Untersuchungen und Wetterprognosen bewährt (z.B. SW/Azorenhoch, NW/Islandtief, NO/kontinentales Wetter bei Hochdruckgebieten in Nordeuropa).

3.1.3 Zyklonalität und Zirkulationsformen

Neben der Anströmrichtung und dem Feuchtegehalt, welche als Paramter später vorgestellt werden sollen (Kap. 3.1.4, ab S. 31) fließt auch die Zyklonalität in die Wetterlagenklassifikation ein. Der Feuchtegehalt kann als Parameter für das niederschlagsfähige Wasserangebot (precipitable water) in der Troposphäre gedeutet werden (Bissolli & Müller-Westermeier, 2005b). Hierdurch werden also feuchte und trockene Wetterlagen differenziert. Die fünf Anströmrichtungen helfen zu verstehen, welche Zugrichtungen und Genesis über Deutschland strömende Luftmassen haben und welchem Ursprungsgebiet sie zuzuordnen sind.

Zur Interpretation des dritten Parameters zu Wetterlagenklassifikation, der Zyklonalität von Wetterlagen, sind Kenntnisse im Bereich der Meteorologie und Synoptik nötig. Da die zyklonale und antizyklonale Rotation (siehe unten) für die Luftmassenbewegungen um Gebiete hohen oder niedrigen Luftdrucks verantwortlich ist, kann sie als weiterer, wichtiger Parameter für die Wetterlagenklassifikation Auskunft über lokale Niederschlagsgenese, Niederschlagstyp, Niederschlagsdauer und die Intensität von Niederschlägen geben. Die Berücksichtigung der Zyklonalität als Parameter innerhalb der Klassifikation ist auch Ausdruck dessen, dass Niederschlag zwar einerseits durch die Heranführung von Luftmassen auftreten kann, also herbeigeführt wird, andererseits aber auch lokal entstehen kann. Um

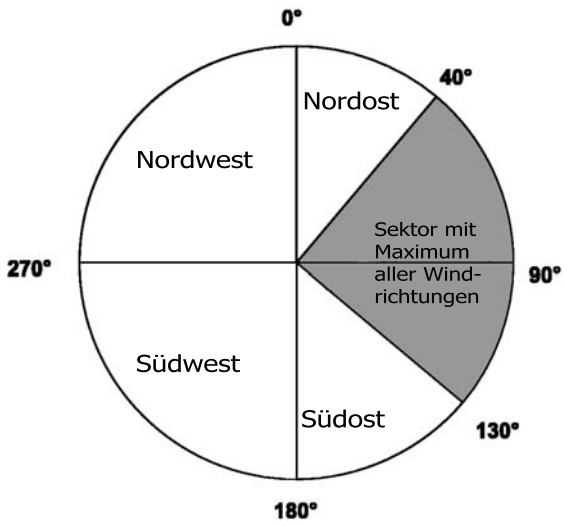

Abbildung 3: Beispiel zur Festlegung der Anströmrichtung Nordost (NO) zur Wetterlagenklassifikation, Erklärung siehe Text (verändert nach: Bissolli & Dittmann, 2001)

den Niederschlagstypus aufgrund von Wetterlagen identifizieren zu können, muss die Zyklonalität und ihre Ausprägung näher betrachtet werden.

Die objektive Wetterlagenklassifikation des Deutschen Wetterdienstes unterscheidet, wie in Tabelle 1 einzusehen ist, zwischen Zyklonalität auf 950-hPa-Niveau (entspricht dem Bodenniveau) und in der Höhe des 500-hPa-Niveaus (Dittmann, 1997). Die Ausbildung der Zyklonalität beruht auf dem Rotationssinn, welchen Luftmassen aufgrund der Corioliskraft erfahren. Diese Kraft wirkt senkrecht zur Bewegungsrichtung der Luftmassen und lenkt diese auf der nördlichen Hemisphäre nach rechts, auf der südlichen Hemisphäre nach links ab. Verknüpft mit der schwankenden Luftdruckverteilung über den Ozeanen und dem Festland ergeben sich typische Rotationsmuster von Luftmassen, welche entweder zusammenströmen (Konvergenz bei Tiefdruck) oder auseinanderströmen können (Divergenz bei Hochdruck). Diese Prozesse sind in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt.

Die Rotation wird dabei als antizyklonal (Abkürzung A in der Wetterlagenklassifikation) oder zyklonal (Z) ausgewiesen, je nach dem, ob die Luftmassenströmung im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn erfolgt. Zum Druckfeld eines Tiefs gehört somit ein zyklonaler Wirbel, zum Druckfeld eines Hochs ein antizyklonaler Wirbel im Windfeld. Daher werden Hochdruckgebiete auch Antizyklone genannt, Tiefdruckgebiete hingegen Zyklone (DWD, 1987).

Wie in Abbildung 5 schematisch aufgezeigt wird, bilden sich um das Hochdruckgebiet antizyklonale Strömungen, um das Tiefdruckgebiet werden anströmende Luftmassen gegen den Uhrzeigersinn, also zyklonal abgelenkt. Herangeführte Luftmassen auf der nördlichen Hemisphäre erfahren durch Hoch- und Tiefdruckgebiete folglich unterschiedliche Ablenkungen. Situiert sich ein Hochdruckgebiet beispielsweise über dem europäischen Festland, wird kalte polar einfließende Luft ostseitig, warme subtropische westseitig um das Hochdruckgebiet geführt. Dabei können Hoch- und Tiefdruckgebiete zwar im Sinne der Klassifikation für einen Tag als gegeben und ortsgebunden betrachtet werden, nichtsdestotrotz verbirgt sich hinter jeder synoptische Darstellung eine nicht-stationäre Luftmassendynamik innerhalb der Troposhäre.

Mit dem Verständnis der Zyklonalität und der Tatsache, dass Luftmassen von Hochdruckgebieten entlang des Druckgradienten zu Tiefdruckgebieten hinströmen, lassen sich antizyklonale Muster in Gebieten hohen und höheren Luftdrucks und zyklonale Muster um Tiefdruckgebiete erkennen. Auf der südlichen Hemisphäre erfahren Konvergenz und Divergenz entgegengesetzte Ablenkung. Die Parameter A

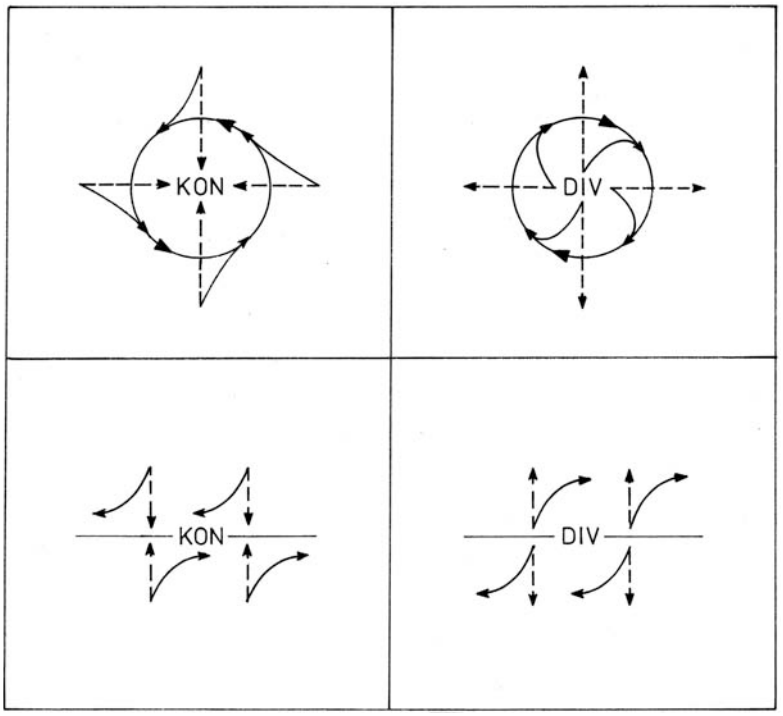

Abbildung 4: Schema der Luftmassenverwirbelung (*vorticity*) durch Konvergenz (KON) und Divergenz (DIV). Luftmassen strömen entlang des Druckgradienten und erfahren auf der nördlichen Hemisphäre durch die Corioliskraft eine Ablenkung nach rechts (DWD, 1987).

und Z der Klassifikation können somit auch mit der Krümmung der Isohypsen auf synoptischen Karten in Verbindung gebracht werden.

Die Zuordnung der Zyklonalitätsausprägungen in Hoch- und Tiefdruckgebiete hilft in Hinblick auf die Interpretation der lokale Niederschlagsgenese. Lokal bedeutet in diesem Fall für Niederschlag, welcher nicht primär durch heranströmende, herangeführte Luftmassen und deren Feuchtegehalt verursacht wurde, sondern durch Wetter und Witterung innerhalb Deutschlands entstehen kann (beispielsweise bei Hitzegewittern im Sommer durch Hebung von Luftmassen). Dabei ist zu beachten, dass mit lokal nicht nur die kleinere Mesoskala, sondern auch großflächige Niederschläge über großen Teilen Deutschlands gemeint sein können. Für die Interpretation der Zyklonalität muss folglich das Zusammenspiel aus Anströmrichtung und den lokalen meteorologischen Zuständen analysiert werden.

Durch die Zusammensetzung der Zyklonalität mit den beiden Druckniveaus ergeben sich für die Wetterlagenklassifikation die vier verschiedene Variablenkombinationen z_{950}, z_{500}: AA, AZ, ZA und ZZ, wobei AZ beispielsweise für zyklonales

Zusammenströmen in der Höhe und antizyklonales Auseinanderströmen in Bodennähe (Bodenhoch) steht.

Nach Bissolli (2008) handelt es sich bei AA um eine hochreichende antizyklonale Lage, welche mit Druckbergen, also Hochdruck sowohl auf Bodenniveau als auch in 500-hPa-Höhe verbunden ist. Diese Lage ist mehrheitlich mit geringen Niederschlägen verbunden. Hier strömt Luft vom Hochdruckgebiet entlang des Druckgradienten nach außen und verhindert das Einströmen feuchter Luftmassen. Im Vergleich dazu zeigen die gleichen Wetterlagen mit zyklonalen statt antizyklonalen Parametern (also ZZ) höhere Niederschlagsmengen, welche nach Bissolli & Müller-Westermeier (2005b) durch das vermehrte Zuströmen feuchter Luftmassen begründet sein können. Demzufolge ist bei ZZ-Klassifikationen vielmehr die Anströmungsituation als das Tiefdruckgebiet selbst für das Niederschlagsdargebot der Wetterlage verantwortlich. Werden Luftmassen aus Südwest herangeführt, sind diese durch die Land-Meer-Verteilung über Europa als feuchter zu klassifizieren als Anströmungen aus dem kontinentalen Nordosten. Im Winter können ZZ-Lagen durchaus mit kalter und trockener, teils polare Luft aus

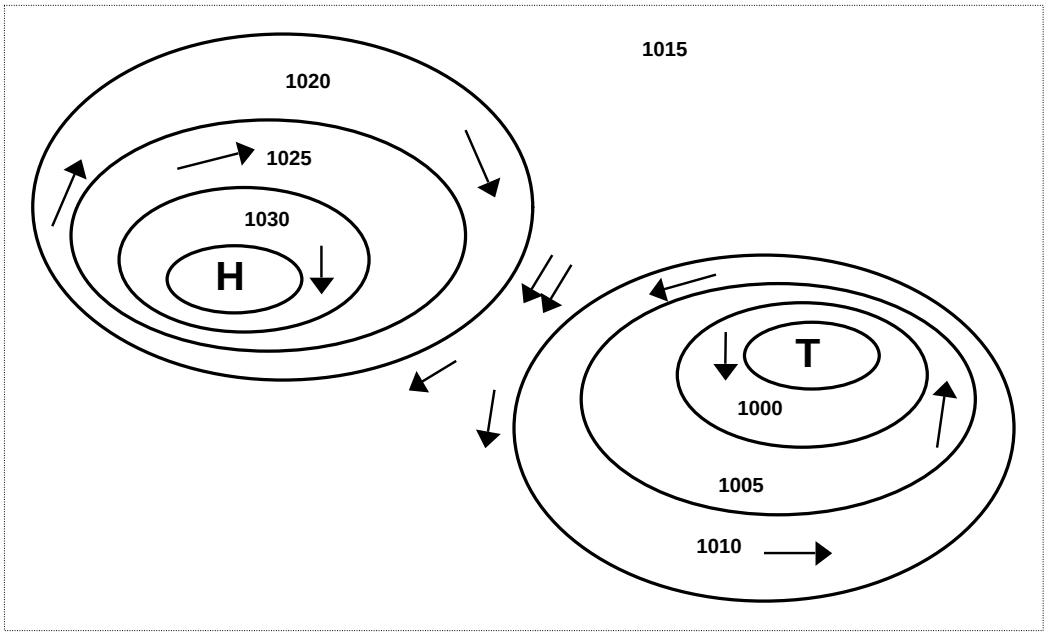

Abbildung 5: Schematische Zirkulation von Luftmassen bei Hoch- und Tiefdruckgebiet innerhalb eines synoptischen Systems auf der nördlichen Hemisphäre. Zahlen als Richtwerte (in hPa) auf Bodenniveau. Erläuterungen siehe Text.

dem Nordosten ohne Niederschläge auftreten. Abbildung 7 gibt einen Überblick über Anströmrichtungen und Zugbahnen der Luftmassenbewegungen über Europa und klassifiziert qualitativ deren Niederschlagsdargebot.

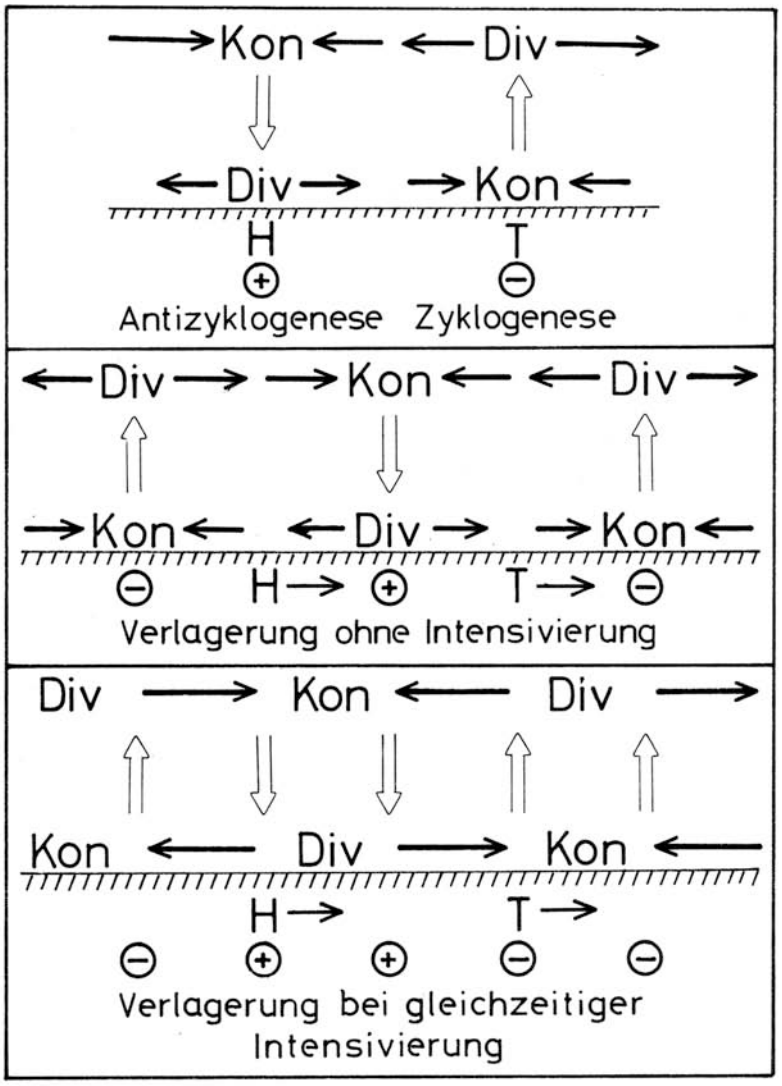

Abbildung 6: Modell für die Entstehung und Verlagerung von Bodendruckgebilden. Pfeile zeigen Luftmassenbewegungen an, die Länge der Pfeile deren Betrag. Neben Divergenzen (DIV) und Konvergenzen (KON) sind VerlagerungsProzesse von Hoch- (H) und Tiefdruckgebieten (T) und deren Intensivierung aufgezeigt. Die Intensivierung ist im unteren Abschnitt zu erkennen, dort verstärkt bodennahe Divergenz benachbarte Bereiche, in denen Konvergenz vorherrscht. (DWD, 1987).

Ist die Zyklonalität über den beiden Druckniveaus nicht einheitlich ausgeprägt, liegen lokale vertikale Luftmassenbewegungen vor. Dadurch ist die Niederschlagsfähigkeit der mit ZA und AZ klassifizierten Wetterlagen schwieriger zu interpretieren.

Ausgehend von der Verwirbelung und Luftmassenbewegungen, wie in Abbildung 4 schematisch aufgezeigt, ist in Abbildung 6 ein Modell zur Analyse von Antizyklogenese und Zyklogenese dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung ist links eine AZ-Zyklonalität mit dazugehörigem Bodenhoch gezeigt, rechts der umgekehrte Fall (ZA und Bodentief). Es ist zu erkennen, wie sich Bodendruckgebilde entwickeln und welchen Einfluss diese auf den vertikalen Transport von Luftmassen haben. Auslöser für die Ausbildung tiefen und hohen Drucks, also Zyklogenese und Antizyklogenese, sind immer hohe Vergenzen, welche betragsmäßig größer sein müssen als die bodennahen. Je nach vertikaler Lage der Divergenz und Konvergenz steigen Luftmassen auf oder sinken ab. Bei genügender Feuchte – im Sinne der verwendeten Wetterlagenklassifikation bei genügend niederschlagsfähigem Wasser – bilden sich bei aufsteigenden Luftbewegungen Wolken und Niederschlag kann ausgelöst werden (DWD, 1987).

Dieser Prozess ist bei ZA-klassifizierten Wetterlagen anzunehmen, da sich die aufsteigende Luftmasse durch die Abnahme des aufliegende Luftdrucks mit der Höhe ausweiten, somit abkühlen wird. Durch die Temperaturabnahme kondensiert vorhandener Wasserdampf und die Niederschlagswahrscheinlichkeit steigt. Ein Beispiel hierfür sind sommerliche Hitzegewitter, also konvektive Eregnisse, bei welchen im Tagesverlauf durch Sonneneinstrahlung immer mehr warme Luft aufsteigt und die Genese von Gewittern typischerweise nachmittags oder abends in Schauer mündet (Bissolli, 2008).

Im Gegensatz dazu führt ein Absinken von Luftmassen häufig zum Austrocknen dieser und somit zur Wolkenauflösung (DWD, 1987). Hierdurch ist auch ersichtlich, dass AZ-Zyklonalitäten mit weniger Niederschlag als ZA-Wetterlagen verbunden sind. Nichtsdestotrotz sei darauf hingewiesen, dass durch die meteorologische Situation bei AZ Niederschläge durchaus üblich sind. Sonderfälle treten durch Föhnlagen, wie etwa in Alpenähe auf, bei welchen die Einströmung trockener und warme Luft trotz ZA-Zyklonalität Niederschläge verhindern kann.

Die Verbindung zwischen Niederschlagsdargebot und Zyklonalität der Wetterlagen kann somit unter Berücksichtigung des Modells für Divergenzen und Konvergenzen (vgl. Abb. 6) wie folgt zusammengefasst werden:

- AA-Wetterlagen bieten ein hochreichendes Hochdruckgebiet, häufig verbunden mit warmer oder erwärmter Luft, stets mit divergierenden Luftmassen und daher wenigen bis keinen Niederschlägen. Durch antizyklonale Luftmassenströmungen um das Hochdruckgebiet herum, kann jedoch feuchte Luft herangeführt werden. Wie auch bei ZZ-Wetterlagen ist Niederschlag durch herangeführte Luftmassen und deren Eigenschaften bedingt.

- ZZ-Wetterlagen führen hochreichende Tiefdruckgebiete mit sich. Aus diesem Grund ist von flächenartigen, länger andauernden Niederschlägen auszugehen. Faktoren wie vorherrschende Jahreszeit, Zugrichtung und Herkunft des Tiefdruckgebietes können diese Niederschläge jedoch vermindern.

- AZ- und ZA- Wetterlagen sind vielmehr durch regionale, kleinskaligere Prozesse geprägt und können daher mit konvektiven Ereignissen in Zusammenhang gebracht werden. Im Vergleich der vertikale Luftmassenbewegungen zeigen ZA-Wetterlagen höhere Niederschlagsfähigkeit als AZ-klassifizierte.

- Niederschlag wird entweder durch herangeführte Luftmassen und deren Feuchtegehalt oder durch lokale, meteorologisch nachweisbare Prozesse generiert. Dieser Ansatz aus der Meteorologie lässt sich auf die Wetterlagenklassifikationen übertragen. Die Klassifizierung der Zyklonalität gibt offensichtlich Informationen über die Art und Weise der Niederschlagsbildung und den Niederschlagstypus. Diese Information hat qualitativen Charakter und ist durch die Klassifizierungsmethode des DWD nur teilweise regional diffenzierbar.

Fallbeispiele von Wetterlagen kombiniert mit Niederschlagskartierungen, und damit auch mit der räumlich-zeitlichen Verteilung des Niederschlags, werden im Kapitel 3.2 ab Seite 33 diskutiert.

Neben dem Parameter der Zyklonalität können auch Zirkulationsformen zur Analyse des Wettergeschehens herangezogen werden. Gerstengarbe et al. (1999) unterscheiden hierfür in zonale, gemischte und meridonale Zirkulationsmuster. Für die objektive Wetterlagenklassifikation werden diese Parameter nicht berücksichtigt, da sie nach Hess & Brezowsky (1977) zur Katalogisierung von Großwetterlagen benutzt wurden. Zonal und meridional stehen hierbei für die unterschiedlichen

Strömungsanteile, also für verschiedene Richtungsvektoren innerhalb des Windfeldes, zonal für west-östliche, meridional für nord-südliche Strömungen. Bei zonaler Zirkulation ergibt sich über Europa eine relativ glatte West-Ost-Strömung mit durchziehenden Frontensystemen. Ursache hierfür ist eine glatte Westströmung, welche sich zwischen einem hochreichenden subtropischen Hochdruckgürtel und einem ebenfalls hochreichenden System tiefen Luftdrucks im subpolaren Raum einstellt (Isola, 2003).

Charakteristisch für meridionale Zirkulationsformen gelten stationäre, blockierende Hochdruckgebiete im Bereich von 50 und 65 Grad nördlicher Breite. Dabei entstehen nach Mitteleuropa gerichtete Strömungen, häufig auch blockierende Hochdruckgebiete in Nord- oder Osteuropa. Generell sind bei meridionaler Zirkulation Nord-, Ost- oder Südlagen in Europa zu beobachten (Isola, 2003). Die gemischte Zirkulation beinhaltet sowohl zonale als auch meridionale Komponenten in etwa gleich großen Anteilen (Gerstengarbe et al., 1999).

Bárdossy & Caspary (1990) zeigen zwei Beispiele für zonale und meridionale Muster über Europa auf. Die Westlage mit ihrem Azorenhoch und Islandtief weist zonale, west-östliche Strömungen auf, damit auch eine Zugbahn für Hoch- und Tiefdruckgebiete ostwärts über Europa. Dagegen ist bei einem blockierenden Hochdruckgebiet über Skandinavien mit benachbartem Tief über Osteuropa mit antizyklonalen-meridionalen Strömungen über dem europäischen Festland zu rechnen. Zwischen den beiden Druckanomalien ist mit einfließender Polarluft, westlich des Hochdruckgebiets mit zuströmenden südlichen Luftmassen zu rechnen. Ein schematischer Überblick der Luftmassenströmungen und -zugrichtungen über Deutschland und Europa ist in Abbildung 7 zu finden.

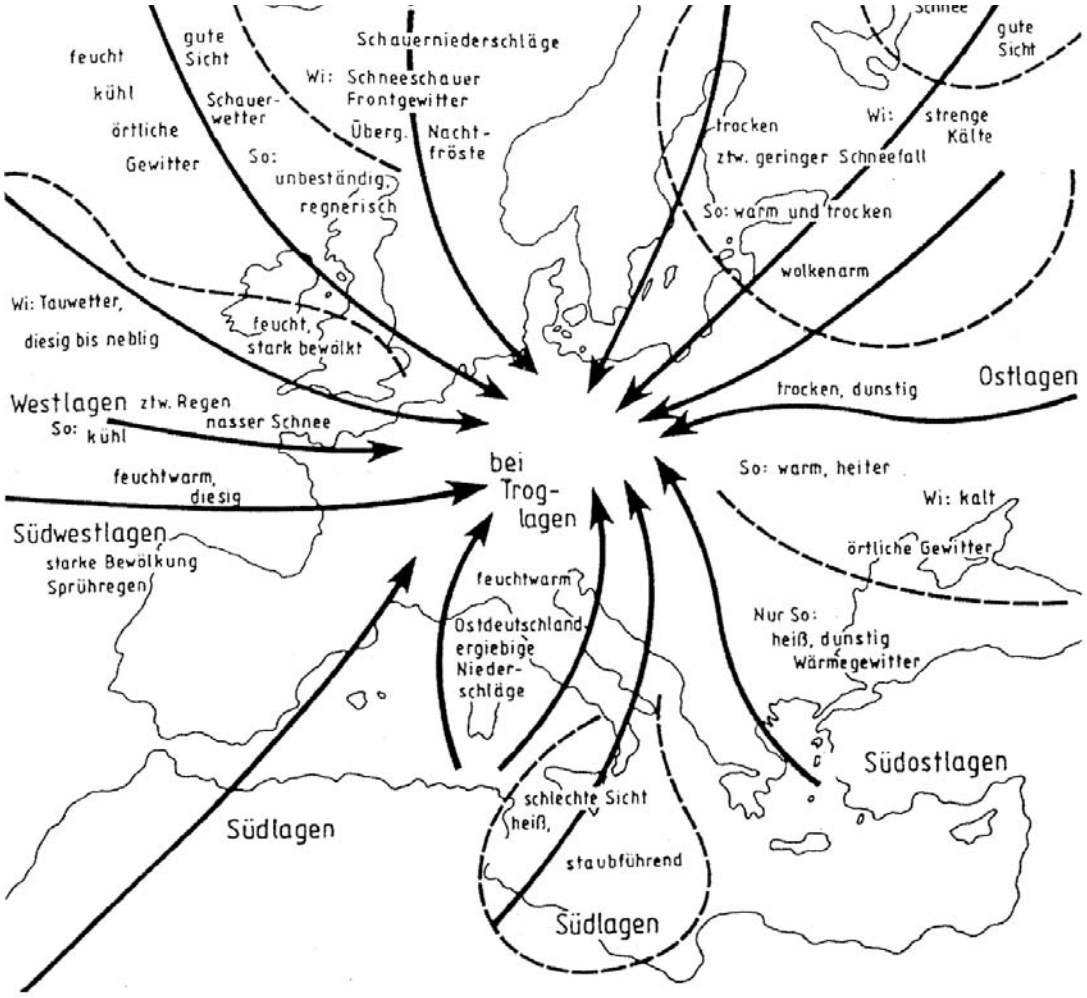

Abbildung 7: Die Luftmassen Europas und ihre Eigenschaften wie Zugrichtungen und Niederschlagsdargebot (qualitativ) unter Berücksichtigung des Wettergeschehens in Deutschland (verändert nach: DRAHEIM, 2005)

3.1.4 Feuchte

Der Parameter Feuchte mit den beiden Ausprägungen T (trocken) und F (feucht) wird über das gewichtete Gebietsmittel des niederschlagsfähigen Wassers (precipitable water) in verschieden Höhen innerhalb der Troposphäre ermittelt. Hierfür werden Temperatur und relative Feuchte auf 950-, 850-, 700-, 500- und 300-hPa-Niveau für jeden Gitterpunkt sondiert.

In einer standardisierten Luftsäule entspricht das niederschlagsfähige Wasser nach Reitan (1963) genau der Wassersäulenhöhe, welche durch vollständige Kondensation allen Wasserdampfs innerhalb des Bezugsraums, also der Luftsäule, entstehen würde. Baumgartner & Liebscher (1996) übernahmen diesen Ansatz für den Wassergehalt einer stationären Luftsäule zwischen einem bestimmten oberen und unteren Druckniveau (p_0 und p). Der Wassergehalt der dazwischenliegenden Luftsäule könnte bei ausreichender Hebung und wirksamen Niederschlagsprozessen theoretisch vollständig als Niederschlag ausfallen. Ein Gleichsetzung von niederschlagsfähigem Wasser mit tatsächlich gemessenem Niederschlag darf jedoch nach Bissolli & Müller-Westermeier (2005a) nicht vorgenommen werden (siehe unten).

Zur Festlegung des Parameters für die Wetterlagenklassifikation wird aus der ermittelten Temperatur und der relativen Feuchte eines jeden Gitterpunktes der gebietsgewichtete Wert des niederschlagsfähigen Wassers durch Integration über die Druckniveaus errechnet. Dieser Wert wird mit seinem langjährigen Mittel der Periode 1981–2000 basierend auf Monatswerten, verglichen. Ist die Menge des niederschlagsfähigen Wassers in der Troposphäre gleich oder größer als der Monatswert aus dem langjährige Mittel ergeben sich feuchte Wetterlagen für die Klassifikation. Unterschreitet der Wert das langjährige Mittel, werden trockene Wetterlagen ausgewiesen (Bissolli & Dittmann, 2001, 2002). In Abbildung 7 ist das Niederschlagsdargebot verschiedener Luftmassenströmungen und Wetterlagen qualitativ aufgezeigt.

Im späteren Verlauf der Arbeit stellte sich heraus, dass sich die Klassifikation der Feuchte noch komplexer zeigte als zu Beginn angenommen. Um folgende Abbildungen und Auswertungen des Parameters Feuchter innerhalb der Wetterlagen nicht falsch zu verstehen, wird die Systematik der Methode – und nicht die schlussendliche Vorgehensweise des DWD – an dieser Stelle nochmals ausführlich dargestellt:

Das Kriterium zur Klassifikation der Feuchte sind langjährige Mittelwerte des niederschlagsfähigen Wassers in der Atmosphäre. Innerhalb dieser Arbeit wurde ein Wetterlagendatensatz verwendet, welcher wie erwähnt das langjährige Mittel des Zeitraums 1981–2000 des niederschlagsfähigen Wassers heranzieht, um Wetterlagen als trocken oder feucht zu klassifizieren. Dieser Mittelwert wird für jeden Monat separat berechnet. Es ist zu erkennen, dass damit nahezu die ganze Zeitreihe für den gesuchten Bezugswert verwendet wird. Nur das Jahr 1980 und der Zeitraum 2001–2007 fließen nicht in die jeweiligen monatlichen Mittelwert mit ein. Seitens des DWD wurden also rückwirkend Wetterlagen aufgrund meteorologischer Parameter klassifiziert. Dabei wurde für jeden Tag das niederschlagsfähige Wasser in der Troposphäre berechnet. Aus den Berechnungen wurden für den Zeitraum 1981–2000 Mittelwerte auf Monatsbasis generiert. Darauf folgend wurde der Wert des niederschlagsfähigen Wassers eines jeden Tages mit dem entsprechenden Monatsmittel verglichen, um trockene von feuchten Wetterlagen wie oben beschrieben zu unterscheiden.

Wird nun die Feuchte von Wetterlagen innerhalb des Datensatzes untersucht, so beziehen sich die Ergebnisse der Untersuchung stets auf einen Mittelwert des niederschlagsfähigen Wassers, welcher aus dem gleichen Datensatz generiert wurde. Allein die Zeitreihe 2001–2007 stellt einen unbeeinflussten Vergleich zum Bezugswert dar. Nichtsdestotrotz sind diese Untersuchungen sinnvoll und interpretationsfähig, denn Veränderungen der Feuchte innerhalb einer beliebigen Zeitspanne können abgebildet werden. Auch Trenduntersuchungen der Feuchte ergeben Sinn, stehen aber immer in Bezug zu dem oben erläuterten langjährigen Mittelwert.

Anzumerken bleibt, wie bei Bissolli & Müller-Westermeier (2005a) aufgezeigt, dass der Feuchtegehalt der Luftmasse weitgehend die vorherschenden Temperaturverhältnisse, und nicht etwa das Niederschlagsdargebot, widerspiegelt, da warme Luft einen höheren Sättigungsdampfdruck besitzt, also mehr Wasserdampf aufnehmen kann, als eine kalte Luftmasse. Diese physikalische Gegebenheit kann bei der Interpretation des Jahresgangs des Parameters Feuchte hilfreich sein.

3.2 Fallbeispiele zu Wetterlagen und Niederschlag

In diesem Abschnitt der Arbeit werden zur Veranschaulichung Niederschlagskarten von Deutschland mit den dazugehörigen Wetterlagen verknüpft und die Ergebnisse dargestellt. Diese Fallbeispiel greifen zwar nur einige wenige der insgesamt 40 Wetterlagen auf, geben jedoch wichtige Informationen zur Niederschlagsverteilung in Abhängigkeit der einwirkenden Wetterlage. Ausführliche Erläuterungen finden sich bei Bissolli & Müller-Westermeier (2005b). Für die Kartierung wurden Tagessummen des Niederschlags für Deutschland aus der Zeitreihe 1980 bis 2004 des DWD herangezogen und bei entsprechend klassifizierter Wetterlage WL_x aufsummiert. Tabelle 3 fasst die Häufigkeitsverteilungen und durchschnittlichen Verweilzeiten ($\overline{d}_{WL}$) derjenigen Wetterlagen zusammen, welche im Folgenden in Zusammenhang mit Niederschlagskarten diskutiert werden. Die vollständige Wetterlagenstatistik wird in Kapitel 6, ab Seite 55 beschrieben.

In Abbildung 8 bis 11 (S. 34–37) sind die mittleren täglichen Niederschlagshöhen P (0,5 mm $<$ P $<$ 16 mm) für Deutschland in Abhängigkeit derjenigen Wetterlage kartiert, welche am Tag des Niederschlagsereignisses klassifiziert worden ist. Abbildung 8 zeigt zunächst Niederschlagskarten für die Wetterlagen NOAAT, SWAAT, SWAAF und SWZZF. Dabei handelt es sich ausschließlich um Wetterlagen mit einheitlicher Zyklonalität (AA und ZZ).

Tabelle 3: Statistischer Überblick zu den Wetterlagen aus den Fallbeispielen. R_{WL} gibt den Häufigkeitsrang (1...40) der Wetterlage WL_x für den Zeitraum 1980–2007 an, $\overline{d}_{WL}$ die durchschnittliche Verweilzeit. Die letzte Spalte zeigt die Verwendung der Wetterlagen innerhalb der jeweiligen Niederschlagskartierungen (Abb. 8–11).

WL_x	R_{WL}	relative Häufigkeit in %					$\overline{d}_{WL}$	Abb.
		Jahr	Mrz–Mai	Jun–Aug	Sep–Nov	Dez–Feb		
NWAAT	3	8,58	7,53	8,79	9,21	8,82	1,43	9,10
SWZZF	6	5,48	5,93	5,33	5,94	4,73	1,19	8,11
SWAAF	1	9,40	7,03	11,04	11,13	8,38	1,47	8
SWAAT	8	4,38	3,51	4,90	5,31	3,77	1,18	8
NOAAT	10	3,77	4,33	2,10	3,54	5,13	1,46	8
SWAZF	11	3,20	2,58	4,74	2,68	2,78	1,16	9
SWZAF	5	6,89	7,18	7,54	8,26	4,53	1,25	9
NWAAF	4	7,99	7,03	6,42	7,20	11,36	1,50	9

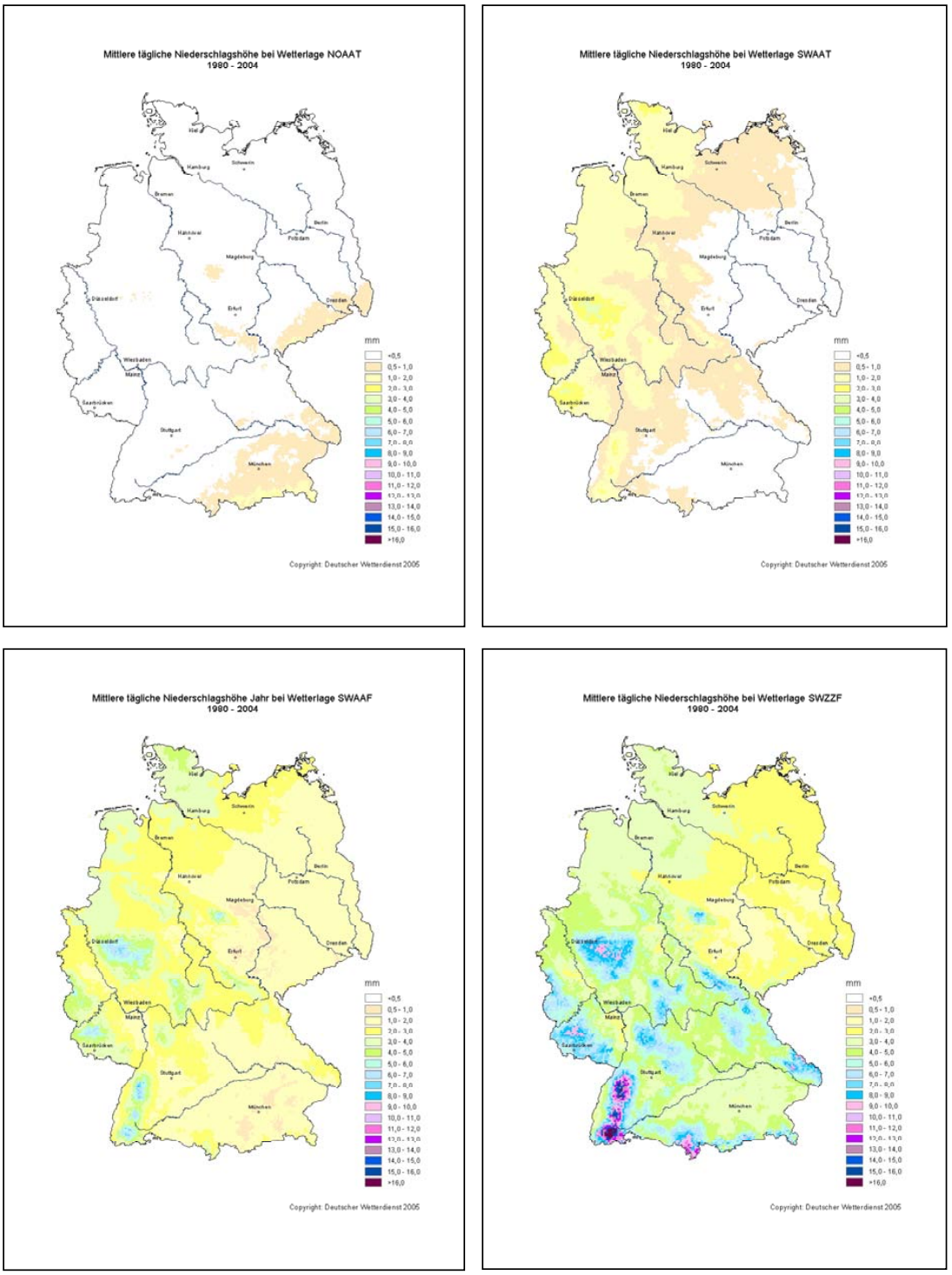

Abbildung 8: Niederschlagskartierung Deutschlands für Wetterlagen mit unterschiedlicher Anströmrichtung, Zyklonalität und Feuchte, Teil 1 von 4, Erklärung siehe Text (Bissolli & Müller-Westermeier, 2005b).

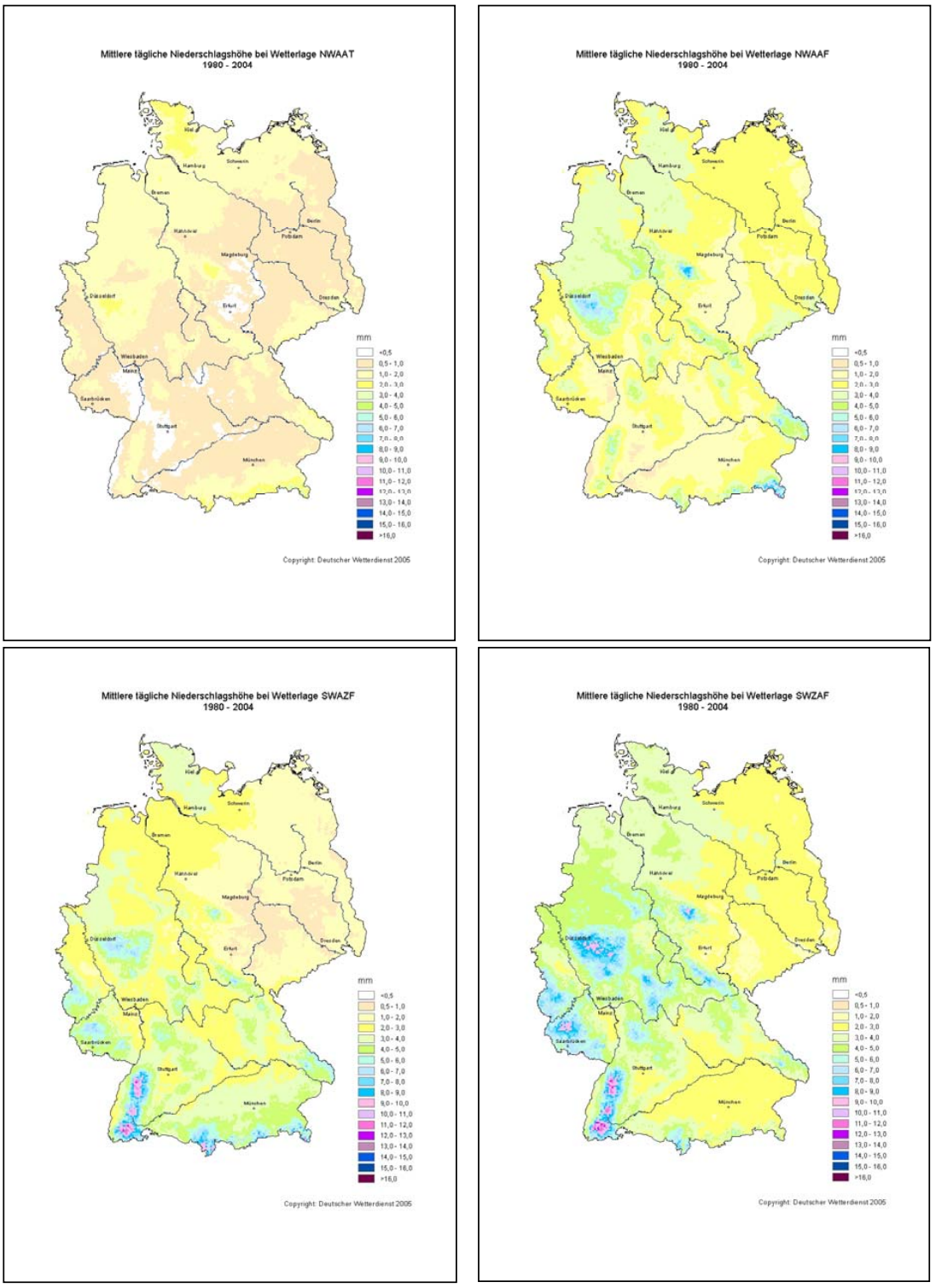

Abbildung 9: Niederschlagskartierung Deutschlands für Wetterlagen mit unterschiedlicher Anströmrichtung, Zyklonalität und Feuchte, Teil 2 von 4, Erklärung siehe Text (Bissolli & Müller-Westermeier, 2005b).

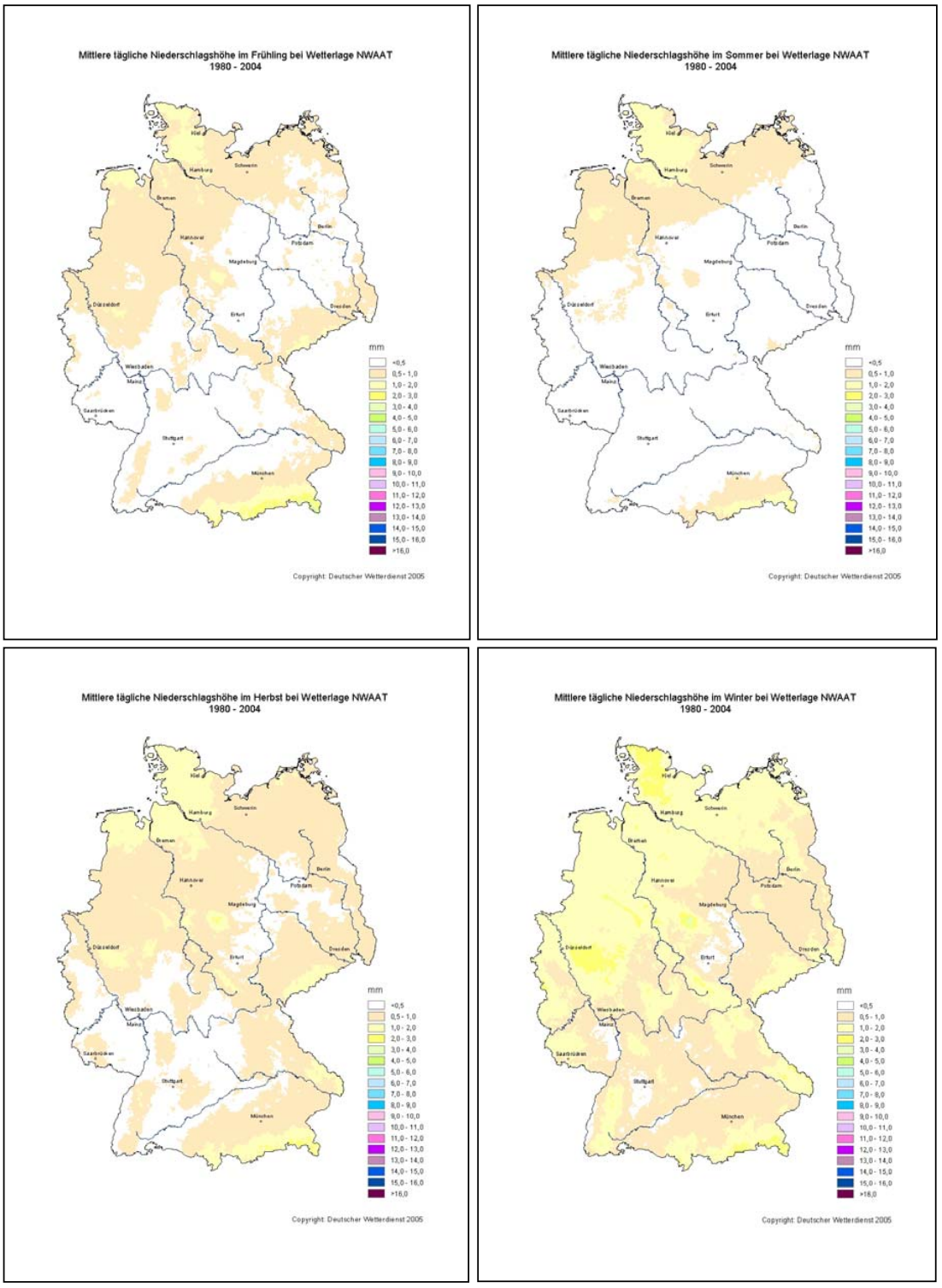

Abbildung 10: Niederschlagskartierung Deutschlands für die Wetterlage NWAAT und für alle Jahreszeiten, Teil 3 von 4, Erklärung siehe Text (Bissolli & Müller-Westermeier, 2005b).

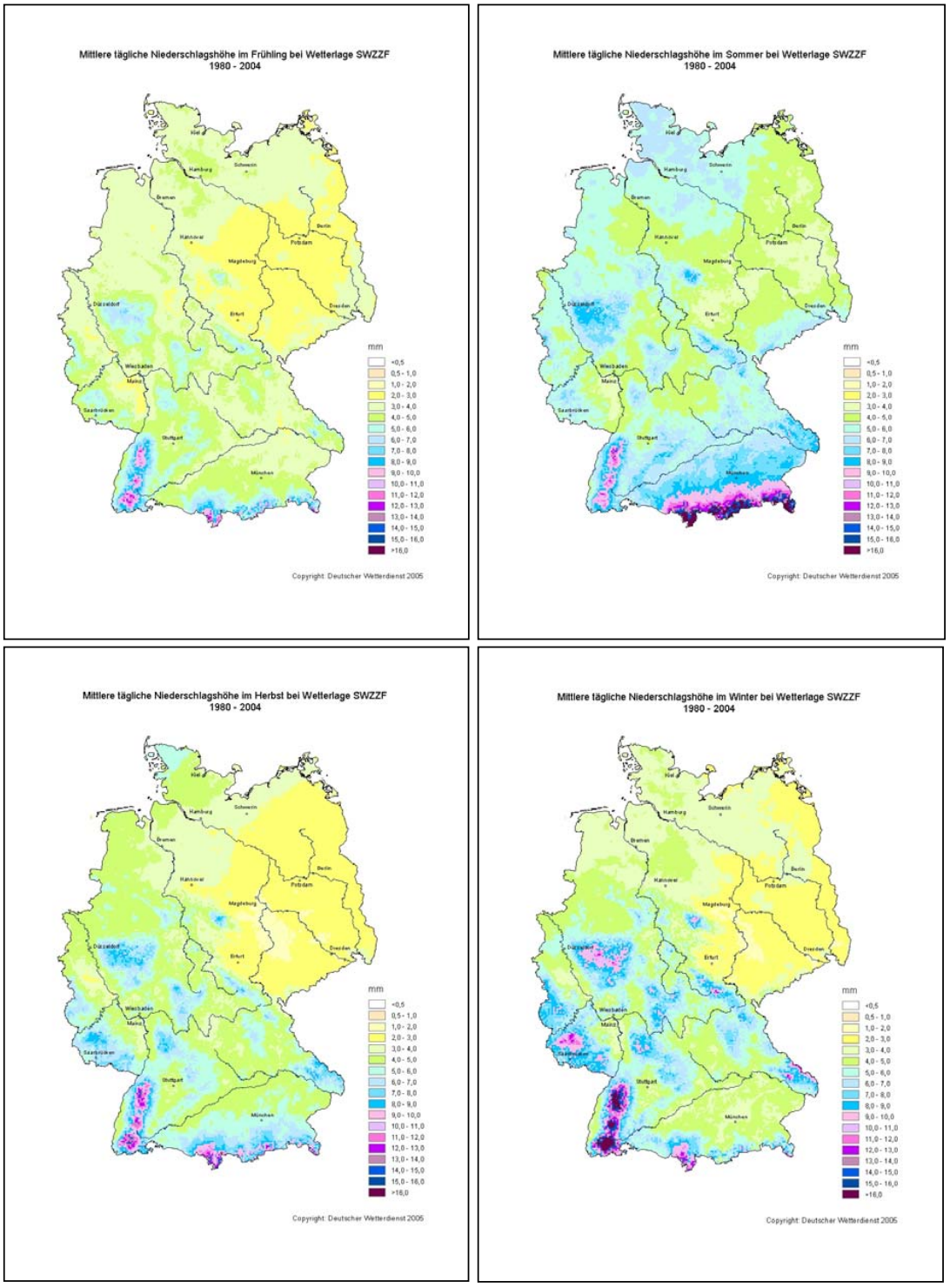

Abbildung 11: Niederschlagskartierung Deutschlands für die Wetterlage SWZZF und für alle Jahreszeiten, Teil 4 von 4, Erklärung siehe Text (Bissolli & Müller-Westermeier, 2005b).

Für die Nordostlage mit ausgeprägtem antizyklonalen Typ (NOAAT) zeigen sich sehr geringe Niederschläge (vgl. AA-Wetterlagen, Kap. 3.1.3, S. 22). Erwartungsgemäß sind Nordostlagen eher als trocken einzustufen, im Winter mit kalten Luftmassen, im Sommer häufig als trockene Hochdruckgebiete; Niederschläge sind nur im Bereich der Alpen und dem Erzgebirge zu erwarten.

Im Gegensatz dazu ist zwar bei der Wetterlage SWAAT die Zyklonalitäts- und Feuchteklassifizierung gleich, bei Anströmrichtung Südwesten kann jedoch generell mit feuchteren Luftmassen gerechnet werden. Dies ist in Abbildung 8 (oben rechts) an dem von West nach Ost abfallenden Niederschlagsgradienten zu erkennen. Bei SWAAF ist von einer niederschlagsfähigeren Wetterlage (*precipitable water*, vgl. Kap. 3.1.4, S. 31) mit höherem Niederschlagspotenzial auszugehen (Abb. 8, unten links). Können Luftmassen durch zyklonale Strömungsmuster zusätzlich aufsteigen, ist eine deutliche Niederschlagszunahme bei SWZZF vor allem im Luv der deutschen Mittelgebierge zu erkennen (rechts unten in Abb. 8).

In Abbildung 9 kann die Wirkung der Parameter Feuchte und Zyklonalität bei gleichbleibender Anströmung eingeschätzt werden. Im oberen Teil der Abbildung ist für die Wetterlagen NWAAT und NWAAF eine generell höhere Niederschlagsverteilung bei feuchter Wetterlage zu erkennen. Im unteren Teil der Abbildung ist links eine antizyklonale-zyklonale, rechts eine zyklonal-antizyklonale Lage dargestellt. Durch das Bodentief zeigt sich bei SWZAF im Vergleich zu SWAZF eine erhöhte Niederschlagsverteilung in der Kartierung, da die vertikale Aufwärtsbewegung der Luftmassen die Luft abkühlen lässt, Wasserdampf kondensiert und Wolkengenese (als Indikator für Zunahme des niederschlagsfähigen Wassers) gerade im Sommer in Verbindung mit der Entstehung von konvektiven Niederschlagsereignissen forciert wird. Ausnahme bilden hier die Alpenregionen, welche bei zyklonalen Verhältnissen in der Höhe durchschnittlich mehr Niederschläge aufweisen (also bei SWAZF statt SWZAF). Dieses Phänomen sehen Bissolli & Müller-Westermeier (2005b) durch auftretende Föhnwinde erklärt, welche bei ZA-Zyklonalität (Bodenhoch) durch abfallende, zwar warme, aber trockene Luftmassen Niederschlagsbildung in den Alpenregionen und im Alpenvorland entgegenwirken. Diese Föhnsituation tritt umgekehrt bei Bodentiefs nicht auf (vgl. Kap. 3.1.3, ab S. 22).

In den Abbildungen 10 und 11 sind Niederschlagsverteilungen in Abhängigkeit der Jahreszeiten kartiert worden. Abbildung 10 zeigt die Saisonalität für die Nordwestlage NWAAT. Die Kartierung zeigt für diese hochreichend antizyklonale (AA), trockene (T) Lage geringe bis keine Niederschläge mit geringer Variabilität in der Niederschlagshöhe über das ganze Jahr. Im Sommer sind nur in den Küstenre-

gionen (räumliche Nähe zum Wasser) und im Alpenvorland (Orographie) Niederschläge zu verzeichnen. Im Winter sind trotz antizyklonal-trockenen Bedinungen Niederschläge registrierbar, diese fallen jedoch gering aus, wie im Vergleich zu Abbildung 11 bei einer anderen Wetterlage für die Winterkartierung zu erkennen ist. Frühjahr und Herbst gliedern sich bei NWAAT Übergangsstadien in die Verteilung des Jahresniederschlages für diese Wetterlage ein. Deutlich sind die Auswirkungen der nordwestlichen Anströmrichtung im Jahresverlauf zu erkennen. Das rheinische Schiefergebirge mit Eifel, Westerwald und Taunus oder auch die Kölner Bucht weisen generell höhere Niederschläge als der Schwarzwald oder auch das Erzgebirge auf.

Im Gegensatz dazu ist die Wetterlage SWZZF (Abb. 11) von höherer Niederschlagsvariabilität geprägt. Durch die veränderten Parameter Anströmrichtung, Zyklonalität und Feuchte zeigen sich im Vergleich zur NW-Wetterlage aus Abbildung 10 in allen Jahresabschnitten durchschnittlich höhere Niederschlagssummen. Durch die Anströmrichtung Südwest lässt sich die räumliche Variabilität in der Niederschlagsverteilung erklären, der Osten Deutschlands weist für alle Jahreszeiten die geringsten Niederschläge auf. Jedoch bietet die südwestliche Anströmung im Vergleich zu nordwestlichen oder nordöstlichen Anströmungen mehr niederschlagsfähiges Wasser für Gesamtdeutschland, sichtbar durch weniger Gebiete mit keinem oder sehr geringem Niederschlag ($P < 0,5\ mm$). Das äußerst geringe Niederschlagsdargebot in Abbildung 10 ist jedoch nicht nur auf die Anströmrichtung, sondern auch auf die Feuchte (F) der Wetterlage und deren Zyklonalität (ZZ) zurückzuführen. Der Schwarzwald als südwestlichstes Mittelgebirge weist für die Wetterlage SWZZF die höchsten Niederschläge zu allen Jahreszeiten auf, die orographisch bedingten sommerlichen Konvektivereignisse im Alpenvorland außer Acht lassend.

Zusammenfassend lassen sich mittels der aufgeführten Fallbeispiele folgende qualitative Aussagen über die Verknüpfung von Wetterlagen und Niederschlagsdargebot festhalten (Bissolli & Müller-Westermeier, 2005b):

- Die Niederschlagskartierung – mit Hilfe mittlerer täglicher Niederschlagshöhen aus einer ausreichend langen Zeitreihe – zeigt sich als funktionales Werkzeug, um Wetterlagenklassifikationen besser zu verstehen und unterschiedliche Wetterlagen genauer interpretieren zu können.

- Die Visualisierung der Niederschläge auf einer Deutschlandkarte hilft vor allem, die Anströmverhältnisse der Wetterlagen einordnen zu können.

- Anströmrichtungen können mit der räumlichen Verteilung des Niederschlags in Deutschland in Verbindung gebracht werden (bei Südwestlagen beispielsweise geringere oder keine Niederschläge in Ostdeutschland).
- Feuchte Wetterlagen weisen allgemein ein höheres Niederschlagspotential im Vergleich zu trockenen Wetterlagen auf. Auch wenn dies trivial erscheint, sei darauf hingewiesen, dass sich der Parameter Feuchte der Wetterlagenklassifikation nicht nach deren tatsächlicher Niederschlagsmenge, sondern nach dem niederschlagsfähigen Wasser in der Troposphäre richtet (vgl. Kap. 3.1.4, S. 31).
- Ohne regionale Besonderheiten wie am Alpennordrand zu übergehen, tendieren Wetterlagen mit zyklonalen Strömungsmustern zu höheren Niederschlagssummen.

Durch den Vergleich von Wetterlagen-Niederschlagskartierungen, welche in den Parametern Anströmrichtung, Feuchte und Zyklonalität variiert werden, lässt sich die Niederschlagswirksamkeit der einzelnen Parameter isolieren und gegen andere Parameter der Klassifikation abwägen. Niederschlagskartierungen und statistische Häufigkeiten der einzelnen Wetterlagen können zusätzlich auch unter Berücksichtigung der verschiedenen Jahreszeiten miteinander verknüpft werden. Hieraus kann – im Hinblick auf die Veränderung der Isotopenwerte im deutschlandweiten Niederschlag – allen Wetterlagen ein qualitatives Niederschlagspotential in Abhängigkeit zur Jahreszeit zugeordnet werden.

Es bleibt zu erwähnen, dass die hydrologisch-meteorologische Wirksamkeit der unterschiedlichen Klassifikationsparameter in einigen Publikationen interpretiert wurde. Bárdossy & Caspary (1990), Caspary (2001), Draheim (2005) sowie Zehe et al. (2006) kommen in ihren Publikationen zu dem Schluss, dass im Vergleich zyklonaler zu antizyklonaler Wetterlagen von erhöhter Bodenfeuchte bzw. höherem Niederschlagsdargebot auszugehen ist. LAI (1994) und Trnka et al. (2008) kommen dagegen zu dem Ergebnis, dass niederschlagsfreie Perioden mit längeren Hochdrucksituationen über Europa, also mit antizyklonalen Wetterlagen korrelieren. Eine Diskussion der Zusammenhänge zwischen dem Wetterlagenklassifikationsparameter Feuchte und der Temperatur sowie dem Niederschlagsdargebot findet sich wie aufgezeigt bei Bissolli & Müller-Westermeier (2005b), aber auch bei Bissolli & Müller-Westermeier (2005a). Auswirkungen der Anströmrichtungen auf die räumliche Niederschlagsverteilung in Europa sind qualitativ von Klaus (1986) aufgezeigt worden.

4 Zeitreihe der Isotope

Innerhalb dieser Arbeit werden nicht nur Wetterlagen auf Trends hin getestet, sondern auch Veränderungen innerhalb der Isotopenwerte des Niederschlags in Deutschland aufgegriffen. Die Veränderungen der Isotopenwerte konnten ebenfalls mit Hilfe des Mann-Kendall-Trendtest herausgearbeitet werden; die entsprechende Methodik hierfür wird in Kapitel 5 geschildert.

Zur Interpretation der Isotopenwerte und deren Veränderungen und vor allem für die Verknüpfung von Wetterlagentrends und Trends der Isotopenwerte sind jedoch auch physikalische Grundlagen aus der Isotopenhydrologie nötig. Isotopenfraktionierung basiert auf physikalischen Vorgängen während des Feuchtetransportes. Die Fraktionierung basiert dabei auf verschiedenen Prozessen und kann quantitativ erfasst werden. Da sowohl die Quanität der Isotopenveränderungen wie auch deren Ursachen geklärt werden sollen, wird in diesem Kapitel die grundlegende Methodik der Isotopenhydrologie kompakt dargestellt. Die Methoden sind bei Craig (1961), Moser & Rauert (1980) und Schlotter (2007) beschrieben.

Die Zusammensetzung des Wassermoleküls beruht auf den Elementen Wasserstoff H und Sauerstoff O, welche als H- und O-Isotope in variablen Verhältnissen innerhalb des Moleküls H_2O vorkommen. Die Isotope unterscheiden sich durch ihre Masse, was dazu führt, dass sie sich auch thermo-dynamisch verschiedenartig verhalten. Die Isotope Sauerstoff –18 (^{18}O) und Deuterium –2 (^{2}H) im Niederschlag werden nicht als Absolutwerte gemessen, sondern als relative Differenz der Isotopenverhältnisse einer Probe zu denen eines Standards. Das Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW), welches der Isotopensignatur des Meerwassers entspricht, gilt hierbei international als Referenz, also als Vergleichswert für Isotopenproben.

4.1 Überblick zur Isotopenhydrologie

4.1.1 Delta-Notation

Die Differenz der Isotopenwerte der Probe zum Standard, entspricht dem δ-Wert. Proben sind meistens isotopisch leichter als die Referenz V-SMOW, daher ergeben sich mehrheitlich negative δ-Werte. Die delta-Notation δ ergibt sich aus

$$\delta_{Probe} = \left(\frac{R_{Probe} - R_{Standard}}{R_{Stanard}} \right) \cdot 1000, \tag{1}$$

wobei R das Verhältnis der Isotopen selbst beschreibt:

$$R = \frac{^{18}O}{^{16}O} \;\; bzw. \;\; R = \frac{^{2}H}{^{1}H}. \tag{2}$$

Sind die ^{18}O- und ^{2}H-Konzentrationen in der Probe – mit Bezug auf ^{16}O und ^{1}H – größer als die des V-SMOW, werden die Werte für δ positiv, üblicherweise sind diese jedoch geringer, womit negative Werte entstehen. Die Seperation Δ von Wässern kann folglich mittels Subtraktion vorgenommen werden:

$$\Delta = \delta_x - \delta_y. \tag{3}$$

4.1.2 Isotopenfraktionierung im hydrologischen Kreislauf

Die δ-Noatation ist als Maß zur qualitativen Beschreibung von Wässern oder Isotopenproben zu verstehen, da sie ein Verhältnis zu einem festgesetzten Standard darstellt. Mittels der Istotopenfraktionierung kann jedoch der Fraktionierungsfaktor α ermittelt werden, welcher als Instrument zur quantitativen Beschreibung einer Isotopenprobe dient. Der Fraktionierungsfaktor ist:

$$\alpha_{x-y} = \frac{R_x}{R_y} = \frac{1 + \frac{\delta_x}{1000}}{1 + \frac{\delta_y}{1000}} = \frac{1000 + \delta_x}{1000 + \delta_y}, \tag{4}$$

wobei α in $^0/_{00}$ angegeben wird. Zeigt also den Grad der Fraktionierung zwischen der Probe x und y an. Ausgehend von den Isotopen $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ des Wassermoleküls wird bei Phasenübergängen (z.B. Kondensation von Wasserdampf) temperaturabhängige Fraktionierung beobachtet. Das Sauerstoffisotop ^{18}O weist ein variables

Verhältnis von etwa 1:500 zum isotopisch leichteren Sauerstoff ^{16}O auf. Die Unterschiede der Massen führen bei Fraktionierung nun dazu, dass sich das schwerere ^{18}O in der energetisch ärmeren Phase anreichert und in der energetisch höheren Phase abgereichert wird. Der gleiche Prozess führt auch bei ^{2}H dazu, dass schwere Isotope bei der Kondensation zuerst in die flüssige Phase übergehen oder ein Wasser aus Schneeschmelze isotopisch leichter ist als der zurückbleibende Schnee. Im Gegensatz dazu verbleiben schwere Isotope bei Verdunstungsvorgängen im Wasser – der energetisch niedrigeren Phase – welches somit an schwereren Isotopen angereichert wird. Werden nun wie im Rahmen dieser Arbeit Niederschlagsproben betrachtet, so lassen sich nach Moser & Rauert (1980) folgende Effekte beschreiben:

- Temperatureffekt

  Die Isotopenfraktionierung ist temperaturabhängig. Nimmt die Kondensationstemperatur (mit der Höhe) ab, so reichern sich schwere Isotope in den Niederschläge ab. Bei höheren Kondensationstemperaturen ist mit vergleichsweise schwerem Niederschlag zu rechnen. Die Fraktionierung ist daher bei niedrigeren Temperaturen stärker.

- Kontinentaleffekt

  Mit zunehmendem Abstand von der Küste werden Niederschläge isotopisch leichter, da schwere Isotope bevorzugt ausgeregnet werden.

- Mengeneffekt

  Während eines Niederschlagereignisses regnen zunächst die schweren Isotope aus. Mit zunehmender Ereignismenge ist eine Abreicherung an schweren Isotopen im Niederschlag festzustellen.

- Höheneffekt

  Bei Ausregnen durch orographischen Aufstieg nimmt der Gehalt an schweren Isotopen im Niederschlag mit der Höhe ab, da die schwereren Isotope bervorzugt ausregnen.

- Breiten- und Jahreszeiteneffekt

  In beiden Effekten ist die temperaturabhängige Fraktionierung wiederzufinden: Niederschläge in niederen Breiten und in der warmen Jahreszeit sind isotopisch schwerer als solche in den hohen Breiten und während der kalten Jahreszeit.

Nach Craig (1961) korrelieren $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ des Niederschlags durch eine lineare Verbindung miteinander. Die Beziehung

$$\delta^{2}H = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \tag{5}$$

(in ‰ des VSMOW) ist als GMWL (Global Meteoric Water Line) bekannt und bezieht sich auf die globale Skala. Diese lineare Abhängigkeit wird später bei den Trendtests der Isotopenzeitreihen aufgegriffen.

Die Kenntnisse aus der Isotopenhydrologie helfen die Trends der Isotope (vgl. Kap. 7.3, ab S. 92) besser interpretieren zu können. Der angewandte Mann-Kendall-Trendtest für die Isotopenzeitreihe des Niederschlags innerhalb Deutschlands zeigt über den Sen-Slope die Veränderung der Werte $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$. Zeigt der Trendtest, dass die Werte $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ ansteigen, also positiver werden, bedeutet dies eine Zunahme schwererer Isotope im Niederschlag. Bei negativem Sen-Slope und entsprechender Signifikanz ist hingegen davon auszugehen, dass die Niederschläge isotopisch leichter geworden sind. Veränderungen dieser Art können über die gezeigten thermo-dynamischen Gesetzmäßigkeiten bei der Isotopenfraktionierung erklärt werden. Die Darstellung und Diskussion aller Trendtests folgt in Kapitel 7 ab Seite 81.

4.2 Datenmaterial der Isotopenzeitreihe

Die Originaldaten der Niederschlagsisotopen wurden von Willibald Stichler, Institut für Grundwasserökologie in Neuenherberg, bereitgestellt. Der Datensatz beinhaltet Monatsmittelwerte von $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ des Niederschlags in Deutschland, sowie die dazugehörigen Monatstemperaturen und Niederschlagsmengen (Schlotter, 2007). Die Trendtests für Isotope wurden am Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, durchgeführt. Deren Ergebnisse lagen für diese Arbeit vor, die angewandete Methode stimmte dabei wie erwähnt mit der Vorgehensweise überein, welche auch für Trendtests der Wetterlagen benutzt wurde. Die Isotopentrendtests basieren auf acht deutschen Stationen des GNIP-Netzwerks (Global Network of Isotopes in Precipitation). Dabei sind vier Stationen in Küstenähe der Nordsee situiert, je eine in Ostdeutschland und am Alpennordrand sowie zwei Stationen in Südwestdeutschland (vgl. Tab. 4). Die jeweilige geographische Lage der Station innerhalb Deutschlands ist in Abbildung 12 auf Seite 45 zu erkennen.

Tabelle 4: Liste der GNIP-Stationen zur Untersuchung von Isotopenzeitreihen.

Nr.	Stationsname
1	Emmerich
2	Cuxhaven
3	Bad Salzuflen
4	Braunschweig
5	Berlin
6	Garmisch-Partenkirchen
7	Stuttgart
8	Würzburg

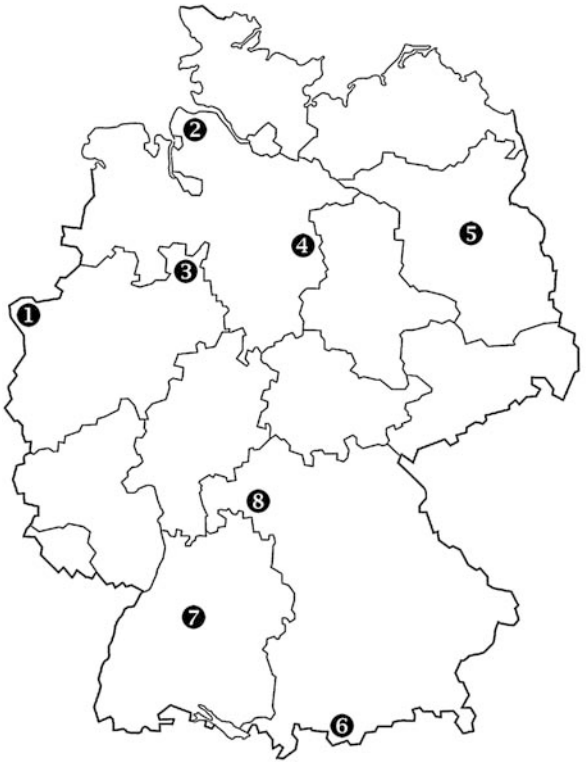

Abbildung 12: Geographische Lage der GNIP-Stationen innerhalb Deutschlands.

5 Angewandte Methodik

Um die Ergebnisse der Trends bei Wetterlagen einordnen zu können, werden im Folgenden die angewandten Methodik für den Trendtest nach Mann-Kendall beschrieben. Die Vorgehensweise stützt sich dabei auf die von Huxol (2007) vorgeschlagene Methode zur Trendanalyse (vgl. Abb. 13, S. 54).

Für die beschreibende Wetterlagenstatistik in Kapitel 6, ab Seite 55 wurden vor allem Häufigkeitstabellen verwendet. Dabei wurden die absoluten Häufigkeiten aus dem Gesamtdatensatz der Zeitreihe 1980–2007 entnommen (DWD, 2008), um relative und kummulierte Häufigkeiten zu berechnen. Darüber hinaus wurden grundlegende statistische Methoden zur Beschreibung von zentraler Tendenz und Homogenität der Daten angewendet – beispielsweise Maße wie Mittelwerte, der Median, Prozentbreiten und die Schiefe. Diese Methoden sind bei Hauser (1981) beschrieben. Die Vorgehensweise zur Auswertung des Wetterlagendatensatzes ist jedoch im Kapitel 6 “Wetterlagenstatistik“ erläutert.

5.1 Test auf Trends

5.1.1 Der Trendtest nach Mann-Kendall

Zur Untersuchung möglicher Trends in der Zeitreihe der Wetterlagen wird der nicht-parametrische Test nach Mann-Kendall angewandt (Mann, 1945; Kendall, 1975; Hamed & Rao, 1998; Yue et al., 2002; Schönwiese, 2006; Huxol, 2007).

Dieser auf Rängen basierende Trendtest wurde in der Vergangenheit schon häufig für hydrologische Fragestellungen herangezogen und hat sich Helsel & Hirsch (1992) zur Folge bewährt. Einen kompakten Überblick über bisherige Anwendungen geben Hamed & Rao (1998) sowie Yue et al. (2002).

Zwar sind parametrische Tests mächtiger als nicht-parametrische, jedoch fordern sie unabhängige und normalverteilte Daten. Hingegen ist der Trendtest von Mann-Kendall auch für nicht normalverteilte Daten anwendbar und gegenüber Ausreißern nicht anfällig (Helsel & Hirsch, 1992; Hamed & Rao, 1998). Diese Eigenschaften ließen sich gut mit einer meteorologischen Fragestellung, der Trendanalyse

von Wetterlagenstatistik verbinden. STORCH, H. VON (1995) und HAMED & RAO (1998) verweisen darauf, dass der Trendtest nach Mann-Kendall anfällig für Autokorrelation in der Zeitreihe sei; diese Problemstellung wird in Kapitel 5.1.3 auf Seite 51 diskutiert.

Die Nullhypothese H_0 des Mann-Kendalltrendtests besagt, dass eine Datenreihe, in diesem Fall die Zeitreihe der Wetterlagen mit W_t und $t = 1, 2, 3...n$ unabhängig und gleichverteilt ist, also kein Trend zu detektieren ist. Bei der Alternativhypothese H_1 liegt ein Trend in W_t vor:

$$H_0 : P\left(w_j > w_i\right) = 0,5; j > i \tag{6}$$

$$H_1 : P\left(w_j > w_i\right) \neq 0,5 \tag{7}$$

wobei bei H_1 ein zweiseitiger Test vorliegt und P für die Wahrscheinlichkeit von $w_j > w_k$ steht. Die Mann-Kendall-Teststatistik berechnet sich dann nach (YUE ET AL., 2002):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k-1}^{n} \operatorname{sgn}\left(w_j - w_k\right) \tag{8}$$

mit w_j und w_k, den Wetterlagen zum Zeitpunkt j und k, (wobei $j > k$) und sgn als Vorzeichenfunktion:

$$\operatorname{sgn}\left(w_j - w_k\right) = \begin{cases} 1 & \text{, wenn } w_j - w_k > 0 \\ 0 & \text{, wenn } w_k - w_k = 0 \\ -1 & \text{, wenn } w_j - w_k < 0 \end{cases} \tag{9}$$

Hierbei wird jeder Wert der Zeitreihe mit seinem Nachfolger, also dem entsprechend jüngeren Wert in der Zeitreihe verglichen. Eine Datenreihe der Länge n ergibt also genau $1/2\ n\ (n-1)$ Wertepaare, deren Vorzeichenfunktion in S aufsummiert wird. Der erste Wert wird folglich mit allen nachfolgenden Werten der Zeitreihe verglichen $(n-1)$, der zweite Wert mit allen Werten, außer seinem Vorfolger $(n-2)$ usw.

Gemäß der Nullhypothese kann die Verteilung von S bei ausreichendem Stichproben n, wie er bei der Wetterlagenstatistik gegeben ist, gut mit einer Normalver-

teilung approximiert werden. Der Erwartungswert μ_S und die Varianz σ_S^2 können demnach mit

$$E(S) = \mu_S = 0 \tag{10}$$

$$\sigma_S^2 = \frac{1}{18}\left[n\,(n-1)\,(2n+5) - \sum_{i=1}^{m} w_i\,(w_i-1)\,(2w_i+5)\right] \tag{11}$$

beschrieben werden, wobei in σ_S^2 die Summe eine Korrektur für das Auftreten von identischen Werten innerhalb der Zeitreihe darstellt, mit w_i für die Anzahl der identischen Werte (für jeden einzelnen Wert der Zeitreihe) vom Umfang i (Kendall, 1975; Yue et al., 2002). Die standardisierte Teststatistik U wird nun berechnet nach:

$$U = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_S} & \text{, wenn } S > 0 \\ 0 & \text{, wenn } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma_S} & \text{, wenn } S < 0 \end{cases} \tag{12}$$

Bei einem zweiseitigen Test wird die Nulhypothese mit der Signifikanz α abgelehnt, wenn $|U| > U_{\alpha/2}$. Dabei ist $U_{\alpha/2}$ der Wert der Standartnormalverteilung mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $\alpha/2$. Daneben werden übliche Merkmale der Normalverteilung erfüllt: Der Mittelwert der Verteilung ist 0, die Varianz 1 (Yue et al., 2002).

Der Mann-Kendall Trendtest wurde in dieser Arbeit mit Hilfe mehrerer Makros und mit den Modulen `detrend`, `autokorr`, `prewhitening` sowie `addTrend` (Erläuterungen finden sich in den folgenden Abschnitte des Kapitel sowie in Abb. 13, S. 54). Die Durchführung des Trendtest im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel© basiert auf Makros von Libiseller (2002); die Vorgehensweise hierfür ist in Kapitel 5.2, ab Seite 53 zusammengefasst.

Bei der Anwendung des Trendtests wird als Ergebnis ein sogennanter *p-value* ausgegeben. Liegt nun eine zweiseitige Fragestellung für den Test vor, so entspricht der p-Value der doppelten Wahrscheinlichkeit, ein gleich großes oder größeres U als das errechnete (sofern $U > 0$) oder ein kleines oder kleineres U (bei $U < 0$)

zu erhalten. Damit steigt bei höheren p-values die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese angenommen wird, was zur Folge hat, dass der Mann-Kendall-Test kein Trend aufzeigt (Huxol, 2007).

Für die Trenduntersuchungen der Wetterlagen mussten für den p-value Schwellenwerte definiert werden, um die Signifikanz von Trends messen zu können. Dabei kann bei p $<$ 0,2 von einer Tendenz (TE) gesprochen werden. Liegt ein Trend vor, so ist dieser zu 80% signifikant. Um vorkommende Trends jedoch besser beurteilen zu können, muss ein höheres Signifikanzniveaus gewählt werden (Tab. 5).

Tabelle 5: Signifikanzniveaus zur Beurteilung von Trends nach dem ausgegeben p-value des Trendtest von Mann-Kendall.

p-value	Wahrscheinlichkeit	Signifikanz
$<$ 0,20	(80%)	keine, nur Tendenz
$<$ 0,10	90%	signifikant
$<$ 0,05	95%	hoch signifikant
$<$ 0,01	99%	höchst signifikant

5.1.2 Trendschätzung nach Sen

Die Trendstärkeschätzung nach Sen (1968) wird in der Literatur auch als Theil-Sen-Approach (TSA) aufgeführt und implementiert folgende Methode:

Für die Schätzung der Trendstärke (folgend Sen-Slope) werden die Steigungen jeglicher Wertepaare berechnet (siehe F.9). Daraus ergeben sich bei einer Zeitreihe der Länge n genau $1/2\ n\ (n-1)$ Steigungen. Der Median, also der Wert, der genau 50% aller Werte unter-, aber auch überschreitet, ist dann nach Sen der Schätzer für die Trendstärke der gesamten Zeitreihe der Wetterlagen W_x:

$$b = \text{median}\left(\frac{w_j - w_k}{j - k}\right) \forall\ l < k;\ l = 1, 2, ...\,(n-1)\,;\ k = 2, 3, ...n \qquad (13)$$

wobei b die Steigung des Trends und w_y die y-te Beobachtung mit y aus $(j...k)$ in der Datenreihe darstellen.

In dieser Methode liegt auch die Ursache dafür, dass trotz Signifikanzanzeige des p-Values (vgl. Kap. 5.1.1) die dazugehörige Steigung des Trends 0 betragen kann. Hierfür müssen nach Formel (13) mindestens 50% der berechneten Steigungen zwischen allen Wertepaaren aus der Wetterlagenzeitreihe W_x genau 0 ergeben, damit auch der $Median = 0$ und damit auch die Steigung $b = 0$ wird (Yue et al., 2002).

Helsel & Hirsch (1992) weisen darauf hin, dass durch die Verwendung des Medians zur Sen-Slope-Berechnung die Berechnung der Trendstärke weniger anfällig für Ausreißer, welche in hydrologischen Zeitreihen häufig auftreten, ist. Im Gegensatz dazu ist die Methode der kleinsten Quadrate zwar auch ein erwartungstreues Verfahren (vgl. F10, S. 49), jedoch sensitiver gegenüber Ausreißern, wenn auch mit besseren Ergebnissen bei normalverteilten Daten. Die Berechnung des Sen-Slope ist in einem Makro für Microsoft Excel©-Programm (Libiseller, 2002) zur Berechnung der Trendsignifikanz nach Mann-Kendall implementiert (Huxol, 2007).

5.1.3 Autokorrelationskoeffizient

Der Autokorrelationskoeffizient misst den Zusammenhang zwischen beobachteten Werten zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb einer Zeitreihe. Dabei wird untersucht, wie stark sich Werte einer Datenreihe in Abhängigkeit der Zeit gegenseitig beeinflussen. Die Variable Zeit bezieht sich dabei auf den Zeitschritt zwischen einem Wert und beispielsweise seinem Vorgänger oder vorvorfolgenden Wert. Der Autokorrelationskoeffizient zeigt also an, inwieweit ein Wert einer Zeitreihe durch vorherige, also ältere Werte erklärt werden kann. Lag bezeichnet dabei den Zeitabstand zwischen zwei Werten: Bei der Untersuchung der Abhängigkeit bzw. des Erklärungsanteils eines Wertes mit seinem Vorgängerwert wird die Autokorrelation 1. Grades, auch Lag-1, analysiert. Diese Methodik ist bei Hamed & Rao (1998), Yue et al. (2002) sowie Yue & Wang (2002) beschrieben worden.

Die Trendanalyse durch den Trendtest nach Mann-Kendall kann, wie in Kapitel 5.1.1 durch Autokorrelation innerhalb der Datenreihe beeinflusst sein. Laut Yue et al. (2002) steigert das Auftreten von Autokorrelationen in einer Datenreihe die Wahrscheinlichkeit Trends auch dann zu detektieren, wenn in Wirklichkeit gar keine existieren, und umgekehrt. Folglich kann es zu Fehlinterpretationen der Ergebnisse aus dem Trendtest kommen.

Um Autokorrelation k-ten Grades r_k in den Zeitreihen der Wetterlagenstatistik zu detektieren, wurde Formel (14) verwendet, die sich an den Korrelationskoeffizienten nach Pearson anlehnt. Jedoch werden in dieser Arbeit nicht Werte zweier verschiedener Reihen, sondern die Werte einer Wetterlagenzeitreihe mit den folgenden Werten in der selben Zeitreihe (zum Lag k) miteinander verglichen:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (w_i - \bar{w})(w_i + k - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n} (w_i - \bar{w})^2}. \tag{14}$$

Hierbei ist w_i die Wetterlagenhäufigkeit zum Zeitpunkt i und $\bar{w}$ das arithmetische Mittel aller n Häufigkeiten einer Wetterlage. k stellt dabei den Zeitschritt der Autokorrelation dar (Huxol, 2007).

Das `pre-whitening` (vgl. Kap. 5.1.4) als weitere methodische Anwendung innerhalb dieser Arbeit entfernt aus der Zeitreihe nur Autokorrelation 1. Grades, daher wurde nach Formel (14) nur r_1, also mir $k = 1$, ermittelt und weiter verwendet. Huxol (2007) konnte bei klimatologisch-hydrologischen Zeitreihen durch Stichproben nachweisen, dass bei größeren Zeitabständen die Autokorrelation meist vernachlässigt werden kann.

Die Berechnung des Autokorrelationskoeffizienten 1. Grades erfolgt über das Makro `autokorr`, welches von Huxol (2007) für Microsoft Excel© in Virtual Basic for Applications© geschrieben und in das Microsoft Excel©-Program von Libiseller (2002) implementiert wurde.

5.1.4 Pre-whitening

Da die Ergebnisse des Mann-Kendall Trendtests, wie durch die bei Storch, H. von (1995) und Hamed & Rao (1998) aufgezeigt, teilweise durch Autokorrelation beeinflusst sind, wurde u.a. die Methode des `pre-whitening` eingeführt, um Datenreihen von auftretender Autokorrelation 1. Grades zu befreien. Die Methode und ihre Anwendung ist bei Yue & Wang (2002) beschrieben. Es bleibt anzumerken, dass diese Methode für Autokorrelation höherer Ordnungen nicht effizient ist. Zur Durchführung schlägt Storch, H. von (1995) vor, eine neue Datenreihe Y_t zu generieren. Dabei wird von jedem Wert W_t das Produkt des entsprechenden Autokorrelationskoeffizienten r_1 und dem Vorgängerwert W_{t-1} der Zeitreihe subtrahiert:

$$Y_t = W_t - r_1 W_{t-1}. \tag{15}$$

Die Durchführung des `pre-whitening` ist ebenfalls durch ein von Huxol (2007) in Visual Basic for Applications© geschriebenes Makro realisiert worden und für die Trendanaylse dieser Arbeit gut nutzbar.

5.2 Vorgehensweise

Das methodische Vorgehen für den Trendtest nach Mann-Kendall in Zusammenhang mit der Wetterlagenstatistik der Zeitreihe 1980–2007 ist in Abbildung 13 auf Seite 54 dargestellt. Die angewandten Module in Form verschiedener Microsoft Excel©-Makros sind in den vorherigen Abschnitten vorgestellt worden. Die Anwendung der Makros von LIBISELLER (2002) und HUXOL (2007) und deren Bedienung innerhalb des Programms Microsoft Excel© wird in der Diplomarbeit von HUXOL (2007) ausführlich beschrieben. Da innerhalb dieser Arbeit die selbe Methodik und Vorgehensweise eingesetzt wurde, werden die dazugehörigen Arbeitsschritte hier gänzlich aufgeführt, inhaltlich jedoch nur schematisch umrissen:

(1) Berechnung der Trendsteigung b nach Sen. Liegt diese nahe dem Wert 0, ist es nicht notwendig, die Trendanalyse fortzuführen. Ist die Steigung $b \neq 0$, wird der Trend $T_t = bt$ als linear angesehen und wie folgt von der ursprünglichen Zeitreihe W_t eliminiert (`detrend`):

$$W_t^{`} = W_t - T_t = W_t - bt, \tag{16}$$

wobei $W_t^{`}$ trendbereinigter Zeitreihen, T_t der Trendkomponente und t dem Index des Zeitschritts entspricht. Hierbei wurde als Schwellenwert 0,5 gewählt und mit dem p-value verglichen (vgl. ja/nein-Entscheidung in Abb. 13). Nach YUE ET AL. (2002) werden Trends in Form einer linearen Steigung aus der entsprechenden Zeitreihe entfernt, wenn diese eine Ablehnungswahrscheinlichkeit der Nullhypothese H_0 von über 50% ($\hat{=}$ 0,5) aufweisen.

(2) Danach wird der Autokorrelationskoeffizienten 1. Grades r_1 der trendbereinigten Zeitreihe $W_t^{`}$ ermittelt (`autokorr`),

(3) `pre-whitening` wird durchgeführt (vgl. F15, S. 52), wobei Zeitreihen mit Autokorrelationskoeffizienten größer als 0,1 bzw. kleiner als -0,1 – den Werteangaben von STORCH, H. VON (1995) folgend – *pre-whitened* werden.

(4) Hierauf werden die bearbeiteten Zeitreihen $Y_t^{`}$ und die des Trends $T_t$ aus Schritt (1) zusammengefügt (`addTrend`):

$$Y_t = Y_t^{`} + T_t \tag{17}$$

(5) Abschließend folgt die Durchführung des Trendtest nach Mann-Kendall wie in Kapitel 5.1.1, ab Seite 47 beschrieben.

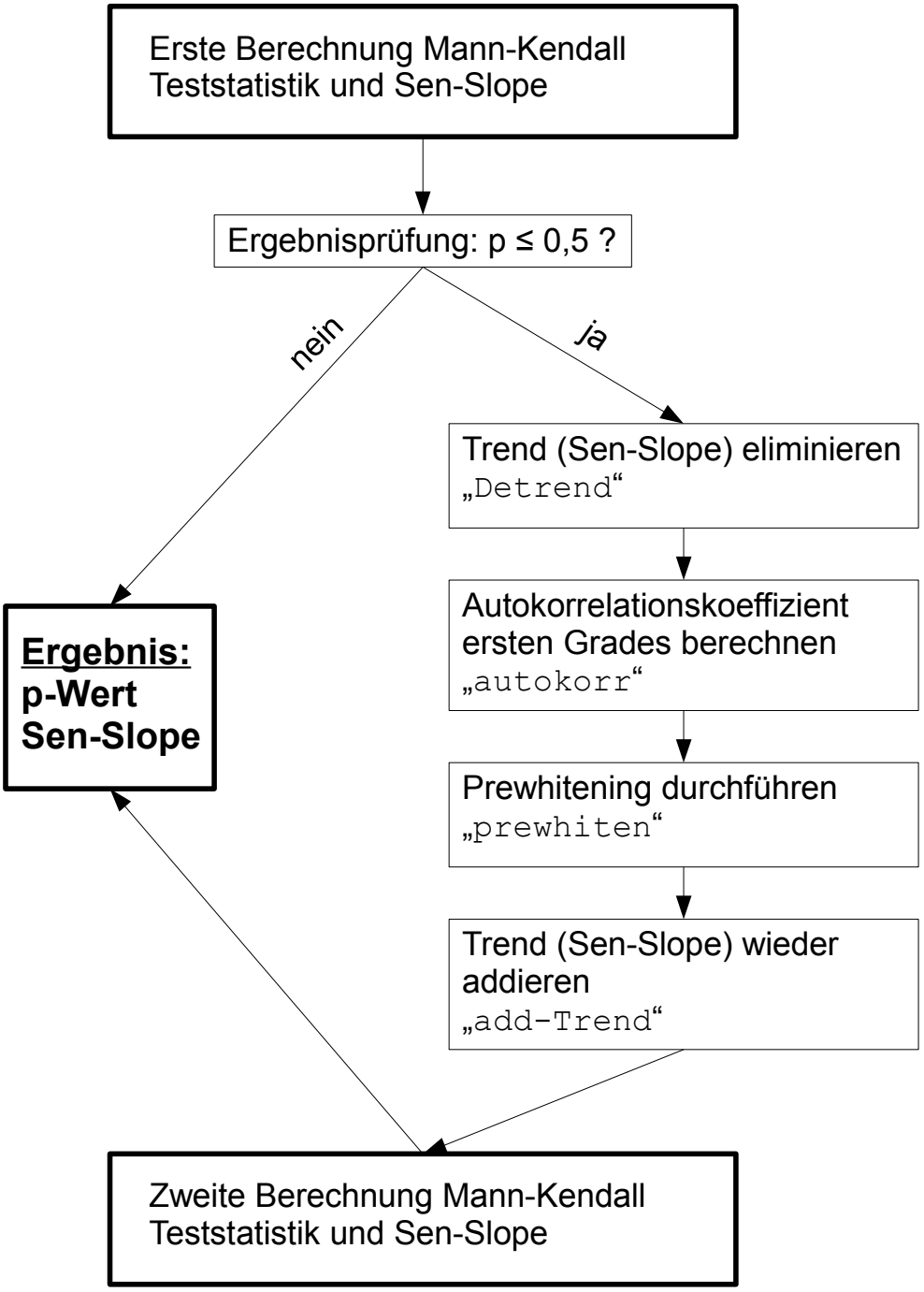

Abbildung 13: Methodisches Vorgehen bei der Trendanalyse nach Mann-Kendall (Huxol, 2007).

6 Wetterlagenstatistik

Die Analyse der Wetterlagenveränderungen zieht eine ausführlichen Betrachtung des Datenmaterials mit sich. Schon der Umfang der Klassifikationsmethodik zeigt, dass die Wetterlagenstatistik durch zahlreiche Einflussgrößen bestimmt wird. Neben den Tests auf Trend nach Mann-Kendall wurde eine statistische Aufarbeitung der Wetterlagenzeitreihe vorgenommen. Ziel dabei war es, die Komplexität des Datensatzes auzubrechen und durch verschiedene Methoden der beschreibenden Statistik wesentliche Muster des Wetterlagendatensatzes herauszuarbeiten. In einem zweiten Schritt sollen die gewonnen Erkenntnisse die Interpretation der Trendtests vereinfachen. Die Darstellung der Wetterlagenstatistik und deren Diskussion findet sich in diesem Kapitel.

6.1 Sichtung des Datenmaterials

Die Wetterlagenstatistik aus der objektiven Klassifizierungsmethode des DWD ist frei verfügbar (DWD, 2008). Die Daten enthalten für jeden Monat 31 Werte, wobei Wetterlagen für jeden Tag mit Werten zwischen 1 und 40 ausgezeichnet werden (vgl. Kap. 3.1, ab S. 18). Monate mit weniger als 31 Tagen werden mit Nullen aufgefüllt. Die untersuchte Zeitreihe in dieser Arbeit reicht vom 1. Januar 1980 bis zum 31. Dezember 2007. Für die Analyse der Saisonalitäten innerhalb der Wetterlagenzeitreihe wurden die Monate den Jahreszeiten, wie in Abbildung 6 dargestellt, zugeordnet.

Innerhalb des Datensatzes gab es 32 fehlende Werte, welche ebenfalls mit Nullen gekennzeichnet wurden. Gründe für Datenlücken sind laut Bissolli (2008) durch fehlende Inputdaten, so dass diese Wetterlagen im nach hinein nicht bestimmt werden konnten. Zwar gibt es innerhalb der Klassifizierung keine nicht eindeutigen Fälle, jedoch können Wetterlagen rückwirkend nicht ausgewiesen werden, wenn nicht alle Modelldaten vorliegen. Die größte Datenlücke ergab sich in der zweiten Hälfte des Monat Mai 1985, mit 11 Tagen ohne ausgewiesene Wetterlagen. Im November 1989 fehlen Daten an 4 Tage, im Januar 1993 sowie November 1999

jeweils an 2 Tage. Die restlichen Datenlücken sind einzelne Tage, ohne Muster über die Zeitreihe verteilt. Die unbestimmten Fälle werden als nicht maßgeblich für die Untersuchungen dieser Arbeit angesehen, da nur eine ausgeweitete Datenlücke von 11 Tagen besteht und 32 fehlende Wetterlagen bei einer Zeitreihe mit insgesamt 10193 Werten vernachlässigbar erscheinen.

Tabelle 6: Zuweisung der Monate zu Jahreszeiten, für saisonal-differenzierte statistische Gruppierungen.

	Februar		August
Frühjahr	März	Herbst	September
	April		Oktober
	Mai		November
Sommer	Juni	Winter	Dezember
	Juli		Januar

6.2 Wetterlagenrechner

Für die Handhabung der Wetterlagenzeitreihe wurde innerhalb dieser Arbeit ein so genannter Wetterlagenrechner in Microsoft Excel© erstellt. Verschiedene Schalter (vgl. Tab. 7) sorgen innerhalb eines Datenblattes dafür, dass eine bestimmte Auswahl an Wetterlagen selektiert werden kann. In einer Kreuztabelle werden die absoluten Häufigkeiten und deren Randverteilungen gemäß der Selektion ausgegeben. Dabei wurden zwei Typen von Schaltern in den Rechner integriert. Auf einem weiteren Datenblatt diente die komplette Zeitreihe des DWD (2008) als Inputdatensatz, welcher für jeden Tag eine Wetterlage klassifiziert.

Der erste Typ (Schalter A mit 0/1) ermöglicht die Selektion gewünschter Wetterlagen aus den 40 vorkommenden Wetterlagen. Hierfür können alle Parameter aus der objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD verwendet (1) oder nicht verwendet (0) werden. Es ist also beispielweise möglich nur feuchte oder nur trockene Wetterlagen unter Berücksichtigung bestimmter Anströmrichtungen auszuwählen. Auch die vier Parameterkombinationen der Zyklonalität lassen sich konfigurieren, um etwa nur durchgängig antizyklonale Wetterlagen zu berücksichtigen. Wie bei der Wetterlagenklassifikation selbst können also 40 verschiedenartige Selektionen durch Schaltertyp 1 gewählt werden.

Der zweite Typ (Schalter B für Jahre/Monate) steuert die Auswahl eines bestimmten Zeitraumes. Dieser Zeitraum kann zunächst aus den Jahren 1980–2007 frei gewählt werden, wobei es sich immer um einen zusammenhängenden Teilzeitraum der Zeitreihe handeln muss, also etwa 1997–2007. Neben dieser Auswahl ermöglicht der Wetterlagenrechner eine weitere selektive Auswahl aller Monate und damit auch die Auswahl von Jahreszeiten. Beispielweise lassen sich also die Häufigkeiten aller feuchten Wetterlagen mit der Anströmrichtung SW des Zeitraumes 1980–1989 nur für die Jahreszeit Sommer oder für die Monate November und Dezember ausgeben. Bei der Auswahl der Monate muss kein zusammenhängender Bereich gewählt werden, es können also auch nur April und September berücksichtigt werden.

Der Wetterlagenrechner erwies sich als funktionales Werkzeug, um sich die Wetterlagenhäufigkeiten bestimmter Fragestellungen ausgeben zu lassen. Besonders nützlich war dabei die Unabhängigkeit der Schalter A und B, aber auch deren Kombinierbarkeit. Im Folgenden basieren zahlreiche Tabellen und Abbildungen auf den Ergebnissen der selektiven Auswahl mittels des Rechners.

Tabelle 7: Einstellungsmöglichkeiten des Wetterlagenrechners in Microsoft Excel©, Erläuterung siehe Text.

Kriterium	Parameter	Schalter A & B
		A
Feuchte		
	trocken	0 / 1
	feucht	0 / 1
Zyklonalität		
	950 zyklonal	0 / 1
	950 antizyklonal	0 / 1
	500 zyklonal	0 / 1
	500 antizyklonal	0 / 1
Anströmrichtung		
	XX	0 / 1
	NO	0 / 1
	SO	0 / 1
	SW	0 / 1
	NW	0 / 1
		B
Zeitraum der Jahre (kontinuierlich)	Start	1980...2007
	Ende	1980...2007
Zeitraum der Monate		
	Start	1...12
	Ende	1...12

6.3 Häufigkeitsverteilungen und Verweilzeiten

In diesem Abschnitt wird zunächst ein Augenmerk auf die Häufigkeitsverteilungen und Verweilzeiten der Wetterlagen gelegt. Hierbei wurde der Wetterlagendatensatz des DWD der Jahre 1980 bis 2007 ausgwertet (DWD, 2008). Später sollen Kriterien wie Anströmrichtung, Feuchte und Zyklonalität sowie Jahresgänge der Wetterlagen betrachtet werden. In Tabelle 8 sind zunächst alle absoluten und relativen Häufigkeiten der 40 Wetterlagen dargestellt. Als Sortierungskriterium wurde die absolute Häufigkeit der Wetterlagen aus dem vollständigen Untersuchungszeitraum 1980–2007 gewählt. Weiterhin sind auch Häufigkeiten für alle Wetterlagen und alle Jahreszeiten Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter in die Tabelle eingetragen worden. Die Zuweisung der Monate zu entsprechenden Jahreszeiten ist in Tabelle 6, auf Seite 56 zu finden. Hieraus lässt sich erkennen, in welchen Jahreszeiten einzelne Wetterlagen seltener oder häufiger auftreten. Dennoch bietet diese Tabelle nur einen groben Überblick über die Verteilung der Wetterlagen. Es fällt jedoch auf, dass es sich um eine schiefe, nicht gleichmäßige Verteilung handelt; wenige Wetterlagen nehmen zusammen eine hohe relative Häufigkeit ein, zahlreiche Wetterlagen erscheinen dagegen nur selten in den Zeitreihe.

Um die Schiefe der Wetterlagenverteilung zu analysieren, sind in Abbildung 14 die relativen und kummulierten Häufigekeiten aller Wetterlagen dargestellt. Durch die Kummulation der relativen Häufigkeiten kann die Verteilung zur besseren Interpretation geviertelt werden. Unteres, mittleres (=Median) und oberes Quartil trennen dabei vier Abschnitte auf, welche je 25% aller Wetterlagen repräsentieren. Da die nominalskalierten Wetterlagen genau 40 eindeutigen Klassen zuzuordnen sind, ergibt eine Interpolation – zwischen den entsprechenden kummulierten Häufigkeitsstufen – zur Quartilsbestimmung keinen Sinn. Die Ergebnisse sollen vielmehr zur qualitativen Analyse eingesetzt werden. Die einzelnen Quartile $Q_{.25}$, $Q_{.5}$ und $Q_{.75}$ sind in Abbildung 14 an den farblichen Abstufungen von dunkelblau zu blau, blau zu hellblau und hellblau zu weiß zu erkennen.

Durch die Wetterlagen SWAAF, NWAZT, NWAAT, NWAAF, SWZAF und SWZZF sind die Hälfte aller Daten erklärt. Die westlichen Wetterlagen SWAAF und NWAZT nehmen mit 9,3 % bzw. 9,1 % den größten Häufigkeitsanteil aller Wetterlagen ein und besetzen alleine das $Q_{.25}$-Quartil. Auffällig erscheint, dass etwa die Hälfte aller Wetterlagen ($Q_{.5}$) westliche Anströmrichtungen aufweisen (dabei 3x SW und 3x NW). Unter den 10 häufigsten Wetterlagen erscheint nur eine mit nordöstlicher, keine mit südöstlicher und drei mit undefinierter Anströmrichtung.

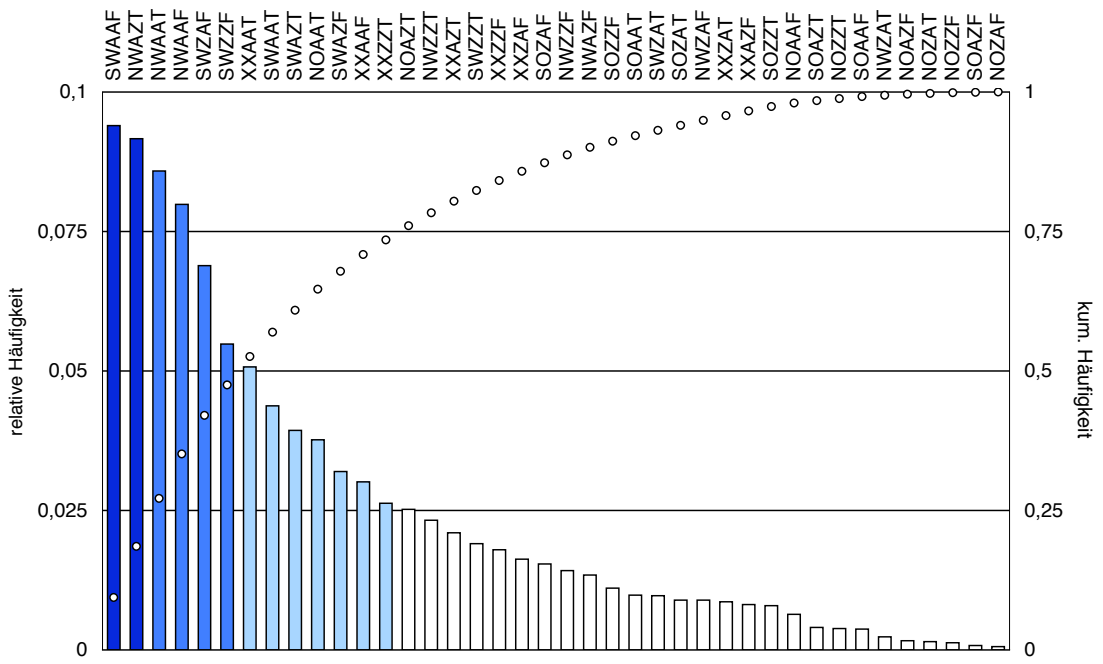

Abbildung 14: Relative und kummulierte Häufigkeiten aller Wetterlagen der Periode 1980–2007, Sortierung gemäß der relativen Häufigkeit einzelner Wetterlagen. Einfärbungen zeigen die Quartile der Verteilung: Unteres Quartil $Q_{.25}$ (dunkelblau zu blau), mittleres Quartil $Q_{.5}$ (blau zu hellblau) und oberes Quartil $Q_{.75}$ (hellblau zu weiß).

Bei der Betrachtung des oberen Quartils ($Q_{.75}$) der Verteilung ist zu erkennen, dass nur 13 der 40 Wetterlagen nahezu 75 % aller Daten erklären, darunter keine mit südöstlicher Anströmrichtung.

Die Standardabweichung der Wetterlagenhäufigkeitsverteilung weist einen größeren Wert als das arithmetische Mittel auf. Da hiernach jede Wetterlage durschschnittlich 255 Tage im Beobachtungszeitraum 1980–2007 hätte auftreten müssen, sind statistische Maße wie zentrale Tendenz und Streuung wenig aussagekräftig – allein 26 Wetterlagen weisen eine unterdurchschnittliche Häufigkeit auf.

Für Bahrenberg et al. (1990) sind Häufigekeitstabellen und -diagramme umso notwendiger, je schiefer eine Verteilung wird. Das Schiefemaß $v(W)$ beschreibt die Neigungsstärke einer statistischen Verteilung, wie sie in dieser Arbeit vorliegt:

$$v(W) = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{W_j - \overline{W}}{s} \right)^3 . \tag{18}$$

Hierbei steht n für die Anzahl der Wetterlagen, W_j für den Häufigkeitswert einer Wetterlage mit $j = 1, 2, 3...40$ und $\overline{W}$ für die durchschnittliche Häufigkeit aller Wetterlagen. Die Schiefe für die Verteilung aller Wetterlagen aus der gesamten Zeitreihe liegt nach Formel (18) bei $v(W) = 1{,}43$. Dies weist auf eine stark rechtsschiefe bzw. linkssteile Verteilung hin und deckt sich gänzlich mit den Auswertungen der Quartile und des Medians. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind in schematischer Darstellung in den Verweilzeittabellen der Wetterlagen zu finden (vgl. Tab. 9 und 10, S. 65-66).

Neben den üblichen statistischen Auswertungen wurden weitere Möglichkeiten Datenanalyse gesucht, um zusätzliche Aussagen über die Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen treffen zu können. Die Autoren Gerstengarbe & Werner (2004) gaben mit ihrer Verweilzeittabelle den Anstoß auch für die objektive Wetterlagenklassifikation die Verweilzeiten von Wetterlagen darzustellen. Laut Bissolli (2008) lagen diese Informationen beim DWD bisher noch nicht vor.

Unter der Verweilzeit einer Wetterlage ist der Zeitraum zu verstehen, indem eine einzelne Wetterlage ununterbrochen andauerte bzw. klassifiziert worden ist. Da es sich hierbei um einen unmittelbar nachfolgenden und zeitlichen Bezug handelt, kann auch von konsekutiver Wetterlage gesprochen werden. Die Verweilzeit beträgt einen Tag, wenn sich die Wetterlage von der folgenden unterscheidet und mehrere Tage, wenn die gleiche Wetterlage konsekutiv klassifiziert wurde.

Zur Erstellung dieser Verweilzeittabelle wurden der Wetterlagendatensatz (DWD, 2008) zunächst in Microsoft Excel© in genau eine Spalte konvertiert, um Werte mit ihren Nachbarwerten besser vergleichen zu können. Danach wurden die 0-Werte entfernt, da diese für fehlende Monatstage bis 31 sowie Datenlücken genutzt wurden. Die Datenlücken wurden daraufhin überprüft, ob vor und nach einer Datenlücke die gleiche Wetterlage ausgewiesen wurde, was die Verweilzeittabelle verfälscht hätte. Dies war jedoch nicht der Fall. Mit Hilfe von Zählern sowie Vorgänger- und Nachfolgerüberprüfungen, konnte ein zweidimensionaler Datensatz mit der Form [(WL),(d)] geschaffen werden, wobei WL für eine Wetterlage 1-40 steht und d für deren konsekutive Dauer in Tagen. Dieses Prinzip ist schematisch durch folgenden Auszug aus der Klassifikation der Wetterlagen im Monat Januar 1980 zu erkennen:

$$... - \overbrace{35}^{35{,}1} - \overbrace{15 - 15 - 15}^{15{,}3} - \overbrace{5}^{5{,}1} - \overbrace{1 - 1 - 1 - 1}^{1{,}4} - \overbrace{3 - 3}^{3{,}2} - ....$$

Dabei trat zunächst die Wetterlage 35 an einem Tag, darauf folgend Wetterlage 15 an drei Tagen, Wetterlage 5 an einem Tag, Wetterlage 1 an vier konsekutiven Tagen und Wetterlage 3 an zwei Tagen auf.

Über der eigentlichen Wetterlagenklassifikation finden sich mit W, d nun die Verweilzeiten für konsekutiven Wetterlagen. Diese Werte ließen sich als Kommazahlen interpretieren. Im eigentlichen Sinne handelt es sich hierbei um Tupel, welche die Wahrscheinlichkeit für bestimmte Muster der Wetterlagenabfolge bezogen auf eine bestimmte Länge anzeigen. So bedeutet das Tupel (15,15,15) oder eben (15,3) die dreimalige Aufeinanderfolge der Wetterlage 15 (Gerstengarbe & Werner, 2004). Die Tupelwahrscheinlichkeiten lassen sich dabei als Häufigkeiten für Verweilzeiten von Wetterlagen auffassen. Nun konnten über eine Kreuztabelle die Häufigkeiten aller Tupel gezählt werden; kam die 15,3 in 20 Fällen vor, so hieß dies, dass die Wetterlage 15 in 20 Fällen eine Verweilzeit von genau drei Tagen aufwies. Der neu erzeugte Datensatz ergab Häufigkeiten für alle auftretenden Verweilzeiten der Wetterlagen innerhalb eines zweidimensionalen Arrays $[(1,1);...;(40,9)]$.

Die Ergebnisse der Verweilzeitberechnung sind in Tabelle 9, 10 und 11, auf den Seiten 65-67 zu finden und geben einen besseren Überblick über die Verteilung der Wetterlagen als absolute, relative oder kummulierte Häufigekeiten. Innerhalb der Tabelle 9 sind zur Überprüfung die Gesamthäufigekeiten aller Wetterlagen als Produkt der Einzelhäufigkeiten sowie der dazugehörigen Verweilzeiten errechnet worden. Weiterhin wurde eine mittlere Verweilzeit für alle Wetterlagen berechnet, welche sich aus der Gesamthäufigkeit und den Einzelhäufigkeiten der Verweilzeitverteilung ergab. Diese liegt für alle Wetterlagen unter 1,55 Tagen und durchschnittlich bei 1,31 Tagen. Die längste konsekutive Verweilzeit wies die Wetterlage NWAAT mit neun Tagen auf (25.9.-3.10.1980), gefolgt von Wetterlage NWAZT mit acht Tagen (6.8.-13.8.2005). Längere Verweilzeiten sind jedoch die Ausnahme; etwa 78,2 % aller Wetterlagen treten nur an einem Tag. 15,8 % der Wetterlagen weisen zweitägige konsekutive Verweilzeiten auf, 4,2% verweilen 3 Tage und 1,2 % genau vier Tage. Hiermit sind 99,4% der Verweilzeiten aller Wetterlagen erklärbar. Fünf oder mehr Tage kontinuierliche Andauer einer Wetterlagen konnte nur in 47 Fällen beobachtet werden (vgl. Tab. 9).

Neben der Abnahme der Wetterlagenhäufigkeiten mit ansteigender Verweilzeit ist auch zu erkennen, dass sich die Verweilzeitverteilung nach den absoluten Häufigkeiten der Wetterlagen richtet. So treten die vier seltensten Wetterlagen NOZAF, SOAZF, NOZZF und NOZAT nur an 42 Tagen der 10193tägigen Datenreihe auf, und stets mit eintägiger Verweilzeit. Hingegen verweilen die drei häufigsten Wetterlagen SWAAF, NWAZT und NWAAT bis zu neun Tage. Lange Verweilzeiten sind zwar wie erwähnt selten, jedoch ist der Anteil drei- und viertägiger Verweilzeiten bei den sieben häufigsten Wetterlagen keinesfalls zu vernachlässigen.

Mit der Berechnung der mittleren Verweilzeit wurde versucht eine Art "Lebensdauer von Wetterlagen" zu bestimmen. Mit Verweilzeit ist dabei ein hydrologisch bekannter Terminus gewählt worden, Gerstengarbe & Werner (2004) sprechen in ihrer Studie hingegen von Andauern der Großwetterlagen. Die Autoren fanden dabei weitaus längere Andauerphasen von drei bis zu 33 Tagen, ein- oder zweitägige Ausweisungen von Großwetterlagen werden der Definition von Baur (1963) folgend nicht vorgenommen. Die längere durchschnittliche Andauer der Großwetterlagen bestätigt die Unterschiedlichkeit der Klassifikationsmethoden (vgl. Kap. 3, S. 17).

Eine spezifischere Betrachtung der Verweilzeiten wurde in Tabelle 11 auf Seite 67 vorgenommen. Es sollte untersucht werden, welche Verweilzeiten die Wetterlagen in Abhängigkeit der Anströmrichtung aufweisen. Hierfür wurden die relativen Häufigkeiten aller Anströmrichtungen in Verbindung mit deren jeweiliger Verweilzeit in Tagen d verknüpft. Über die durchschnittliche Verweilzeit ist zu erkennen, dass Wetterlagen länger kontinuierlich auftreten, wenn sie aus nördlicher Richtung anströmen. SO- und SW-Wetterlagen weisen hingegen geringere Verweilzeiten auf. Dies ist in Tabelle 11 deutlich durch die relativen Häufigkeiten der NO- und NW-Wetterlagen bei zwei- oder dreitägiger Verweilzeit ersichtlich. Hieraus kann vermutet werden, dass nördlich anströmende Wetterlagen als stabiler und langlebiger anzusehen sind. Nichtsdestotrotz erscheinen auch südliche Wetterlagen mit höheren Verweilzeiten, wie bei der Wetterlage SOZAF mit durchschnittlichem Andauern von 1,55 Tagen, und unbeständigere nördliche Wetterlagen, wie bei NWZZT mit nur 1,20 Tagen durchschnittlicher Verweilzeit zu erkennen ist. Wetterlagenandauern von fünf Tagen und mehr lassen sich aufgrund geringer Häufigkeiten schwer interpretieren. Zur Ergänzung der Verweilzeitenstatistik sind in diesem Fall auch die relativen Häufigkeiten der Wetterlagen mit unbestimmter Anströmrichtung (XX) dargestellt.

Durch die Verweilzeitstatistik der objketiv-klassifizierten Wetterlagen in dieser Arbeit, können Aussagen über das kontinuierliche Auftreten einzelner Wetterlagen getroffen werden. Infolgedessen kann dem Wetter einer Wetterlage ein Maß für dessen Beständigkeit zugeordnet werden. Diesem Ansatz folgend, differenzieren sich Wetterlagen in zeitlich stabilere und labilere meteorologische Situationen. Dabei handelt es sich jedoch um einen relativen Vergleichswert. Mit dieser Überlegung können nachfolgende Ergebnisse weiterführend analysiert werden – beispielsweise die Häufigkeitsverteilungen der Anströmrichtungen (vgl. Tab. 11, S. 67 sowie Tab. 12, S. 68).

Tabelle 8: Absolute und relative, gerundete Häufigkeiten der Wetterlagen (WL) im Zeitraum 1980–2007. **Fett gedruckt** sind Wetterlagen mit Trends innerhalb der Gesamtzeitreihe 1980–2007 (vgl. Abb. 21, S. 82).

WL	Gesamt		Frühjahr		Sommer		Herbst		Winter	
		%		%		%		%		%
SWAAF	958	9,4	180	7,0	284	11,0	283	11,1	211	8,4
NWAZT	934	9,2	205	8,0	304	11,8	210	8,3	215	8,5
NWAAT	875	8,6	193	7,5	226	8,8	234	9,2	222	8,8
NWAAF	814	8,0	180	7,0	165	6,4	183	7,2	286	11,4
SWZAF	702	6,9	184	7,2	194	7,5	210	8,3	114	4,5
SWZZF	559	5,5	152	5,9	137	5,3	151	5,9	119	4,7
XXAAT	517	5,1	135	5,3	93	3,6	134	5,3	155	6,2
SWAAT	446	4,4	90	3,5	126	4,9	135	5,3	95	3,8
SWAZT	401	3,9	99	3,9	158	6,1	102	4,0	42	1,7
NOAAT	384	3,8	111	4,3	54	2,1	90	3,5	129	5,1
SWAZF	326	3,2	66	2,6	122	4,7	68	2,7	70	2,8
XXAAF	307	3,0	78	3,0	98	3,8	73	2,9	58	2,3
XXZZT	268	2,6	92	3,6	32	1,2	54	2,1	90	3,6
NOAZT	257	2,5	72	2,8	32	1,2	60	2,4	93	3,7
NWZZT	237	2,3	42	1,6	30	1,2	64	2,5	101	4,0
XXAZT	214	2,1	73	2,8	40	1,6	48	1,9	53	2,1
SWZZT	194	1,9	52	2,0	47	1,8	56	2,2	39	1,5
XXZZF	183	1,8	57	2,2	72	2,8	35	1,4	19	0,8
XXZAF	166	1,6	52	2,0	60	2,3	32	1,3	22	0,9
SOZAF	157	1,5	78	3,0	34	1,3	31	1,2	14	0,6
NWZZF	145	1,4	33	1,3	15	0,6	37	1,5	60	2,4
NWAZF	137	1,3	24	0,9	57	2,2	18	0,7	38	1,5
SOZZF	113	1,1	54	2,1	27	1,0	24	0,9	8	0,3
SOAAT	100	1,0	20	0,8	14	0,5	29	1,1	37	1,5
SWZAT	99	1,0	29	1,1	19	0,7	29	1,1	22	0,9
SOZAT	91	0,9	32	1,2	5	0,2	26	1,0	28	1,1
NWZAF	91	0,9	19	0,7	13	0,5	18	0,7	41	1,6
XXZAT	88	0,9	34	1,3	15	0,6	20	0,8	19	0,8
XXAZF	83	0,8	21	0,8	39	1,5	18	0,7	5	0,2
SOZZT	81	0,8	27	1,1	4	0,2	14	0,6	36	1,4
NOAAF	65	0,6	8	0,3	22	0,9	7	0,3	28	1,1
SOAZT	41	0,4	14	0,5	2	0,1	13	0,5	12	0,5
NOZZT	39	0,4	11	0,4	2	0,1	11	0,4	15	0,6
SOAAF	38	0,4	17	0,7	6	0,2	7	0,3	8	0,3
NWZAT	24	0,2	10	0,4	4	0,2	6	0,2	4	0,2
NOAZF	17	0,2	2	0,1	10	0,4	5	0,2	0	0,0
NOZAT	15	0,1	6	0,2	0	0,0	2	0,1	7	0,3
NOZZF	13	0,1	6	0,2	5	0,2	2	0,1	0	0,0
SOAZF	8	0,1	2	0,1	3	0,1	2	0,1	1	0,0
NOZAF	6	0,1	2	0,1	2	0,1	1	0,0	1	0,0
Summe	10193	100,0	2562		2572		2542		2517	

Tabelle 9: Absolute Häufigkeiten der Wetterlagen (WL) nach ihrer Verweilzeit d, Gesamtauftreten der Wetterlagen sowie deren durchschnittliche Verweilzeit (alle Angaben in Tagen, Zeitraum 1980–2007).

WL	absolute WL–Häufigkeit nach konsekutiver Verweilzeit d									$\sum d$	$\overline{d}$
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**		
SWAAF	448	133	47	15	2	2	3			958	1,47
NWAZT	467	133	36	9	6	2	1	1		934	1,43
NWAAT	449	108	31	15	3	2	3		1	875	1,43
NWAAF	365	119	31	20	4	3				814	1,50
SWZAF	457	76	23	6						702	1,25
SWZZF	399	58	12	2						559	1,19
XXAAT	298	68	16	6	1	1				517	1,33
SWAAT	320	48	10							446	1,18
SWAZT	254	52	10	2	1					401	1,26
NOAAT	180	55	21	4	3					384	1,46
SWAZF	245	31	5	1						326	1,16
XXAAF	186	34	10	3	1	1				307	1,31
XXZZT	169	31	8	2	1					268	1,27
NOAZT	136	39	13	1						257	1,36
NWZZT	163	31	4							237	1,20
XXAZT	157	22	3	1						214	1,17
SWZZT	137	22	3	1						194	1,19
XXZZF	111	24	5	1	1					183	1,29
XXZAF	101	26	3	1						166	1,27
SOZAF	71	14	11	2	1	2				157	1,55
NWZZF	132	5	1							145	1,05
NWAZF	115	8	2							137	1,10
SOZZF	68	15	5							113	1,28
SOAAT	70	8	3		1					100	1,22
SWZAT	81	9								99	1,10
NWZAF	85	3								91	1,03
SOZAT	52	12	5							91	1,32
XXZAT	65	7	3							88	1,17
XXAZF	66	7	1							83	1,12
SOZZT	49	13	2							81	1,27
NOAAF	44	9	1							65	1,20
SOAZT	31	5								41	1,14
NOZZT	30	3	1							39	1,15
SOAAF	32	3								38	1,09
NWZAT	22	1								24	1,04
NOAZF	13	2								17	1,13
NOZAT	15									15	1,00
NOZZF	13									13	1,00
SOAZF	8									8	1,00
NOZAF	6									6	1,00

Tabelle 10: Relative Häufigkeiten der konsekutiven Verweilzeiten d (in Tagen) einzelner Wetterlagen (WL), Zeitraum 1980–2007, Differenz auf 100,00 % durch Rundungsfehler.

WL	rel. Häufigkeiten je nach Verweilzeit d in %								
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
SWAAF	68,9	20,5	7,2	2,3	0,3	0,3	0,5		
NWAZT	71,3	20,3	5,5	1,4	0,9	0,3	0,2	0,2	
NWAAT	73,4	17,6	5,1	2,5	0,5	0,3	0,5		0,2
NWAAF	67,3	22,0	5,7	3,7	0,7	0,6			
SWZAF	81,3	13,5	4,1	1,1					
SWZZF	84,7	12,3	2,5	0,4					
XXAAT	76,4	17,4	4,1	1,5	0,3	0,3			
SWAAT	84,7	12,7	2,6						
SWAZT	79,6	16,3	3,1	0,6	0,3				
NOAAT	68,4	20,9	8,0	1,5	1,1				
SWAZF	86,9	11,0	1,8	0,4					
XXAAF	79,1	14,5	4,3	1,3	0,4	0,4			
XXZZT	80,1	14,7	3,8	0,9	0,5				
NOAZT	72,0	20,6	6,9	0,5					
NWZZT	82,3	15,7	2,0						
XXAZT	85,8	12,0	1,6	0,5					
SWZZT	84,0	13,5	1,8	0,6					
XXZZF	78,2	16,9	3,5	0,7	0,7				
XXZAF	77,1	19,8	2,3	0,8					
SOZAF	70,3	13,9	10,9	2,0	1,0	2,0			
NWZZF	95,7	3,6	0,7						
NWAZF	92,0	6,4	1,6						
SOZZF	77,3	17,0	5,7						
SOAAT	85,4	9,8	3,7		1,2				
SWZAT	90,0	10,0							
NWZAF	96,6	3,4							
SOZAT	75,4	17,4	7,2						
XXZAT	86,7	9,3	4,0						
XXAZF	89,2	9,5	1,4						
SOZZT	76,6	20,3	3,1						
NOAAF	81,5	16,7	1,9						
SOAZT	86,1	13,9							
NOZZT	88,2	8,8	2,9						
SOAAF	91,4	8,6							
NWZAT	95,7	4,3							
NOAZF	86,7	13,3							
NOZAT	100,0								
NOZZF	100,0								
SOAZF	100,0								
NOZAF	100,0								

Tabelle 11: Relative Häufigkeiten der Verweilzeiten d (in Tagen) differenziert nach Anströmrichtungen (AR) der Wetterlagen, Zeitraum 1980–2007. Die letzte Spalte zeigt die durchschnittliche konsekutive Verweilzeit in Tagen für alle Wetterlagen einer bestimmten Anströmrichtung bzw. für alle Wetterlagen (letzte Zeile).

AR	rel. Häufigkeiten je nach Verweilzeit d in %									$\overline{d}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
NO	74,19	18,34	6,11	0,85	0,51					1,35
SO	78,88	14,49	5,38	0,41	0,41	0,41				1,30
SW	80,31	14,72	3,77	0,93	0,10	0,07	0,10			1,26
NW	75,51	17,14	4,41	1,85	0,55	0,29	0,17	0,04	0,04	1,37
XX	80,01	15,20	3,40	0,97	0,28	0,14				1,27
Summe	78,24	15,80	4,17	1,18	0,32	0,17	0,09	0,01	0,01	1,31

6.4 Anströmrichtungen der Wetterlagen

Neben der Darstellung der Wetterlagenstatistik mittels Häufigkeits- und Verweilzeitverteilungen, wurde auch Augenmerk auf die statistische Bearbeitung der Anströmrichtungen und der Feuchte von Wetterlagen gelegt (vgl. Kap. 6.6, ab S. 74). Dabei werden die Parameter Anströmrichtung und Feuchte zur Auswertung miteinander verknüpft; dieses und das folgende Kapitel hängen daher thematisch stark zusammen. Wie in Kapitel 3.1.3 ab Seite 22 dargestellt, erscheint die Interpretation der Zyklonalität von Wetterlagen schwierig, daher wurde dieser Klassifikationsparameter nicht gesondert statistisch aufgearbeitet.

In Tabelle 12 sind die Häufigkeiten aller Wetterlagen nach dem Kriterium der Anströmrichtung aufgeführt. Westlich-orientierte Wetterlagen nehmen dabei den Hauptteil ein. Auffällig erscheint auch, dass Wetterlagen häufiger mit unbestimmter Anströmrichtung (XX) als mit östlicher Anströmung klassifiziert werden. Die Häufigkeitsverteilung zeigt deutlich, dass Europa und damit auch Deutschland innerhalb der Westwindzone situiert sind. Entsprechende Wetterlagen werden häufig als thermisch gemäßigt und feucht aufgrund des Herkunftsgebietes Atlantik deklariert (Häckel, 2005).

Zur besseren Differenzierung der Anströmrichtungsverteilung der Wetterlagen wurde diese in Abbildung 15 für alle Monate einzeln berechnet. Das Übergewicht westlicher Anströmungen ist nach wie vor zu erkennen, jedoch sind auch verschie-

Tabelle 12: Absolute und relative Häufigkeiten der Wetterlagen gemäß ihren Anströmrichtungen, Zeitreihe 1980–2007.

Anströmrichtung der Wetterlage	absolute Häufigkeit	relative Häufigkeit in % (gerundet)
SW	3685	36,1
NW	3257	32,0
NO	796	7,8
SO	629	6,2
XX	1826	17,9
Summe	10193	100,0

dene saisonale Strukturen in der Vertweilung der Anströmrichtungen zu erkennen. In der Abbildung sind die Anteile der NW- und SW-Wetterlagen achsennah, die der östlich-orientierten Wetterlagen achsenfern aufgetragen, Wetterlagen mit nördlicher Anströmkomponente finden sich unten innerhalb des Balkendiagramms, diejenigen mit südlichen Komponenten sind darüber dargestellt.

Die SW-Wetterlagen zeigen einen nahezu sinusförmigen Jahresgang, mit dem geringsten Vorkommen im Februar und einem Anstieg bis in den August. Sie dominieren mit ihren Anteilen den Jahresgang der Wetterlagen, nur von Dezember bis März überwiegend im Vergleich die Nordwestlagen. Zwischen diesen beiden Verteilungen wiegt der weitaus geringere Anteil an SO- und NO-Wetterlagen als eine Art Auffüller innerhalb der Monate. Dabei wachsen die Anteile der SO-Wetterlagen mit denen der SW-Wetterlagen und umgekehrt (NO mit NW), demnach gibt es auch Monate mit überwiegend südlichen Wetterlagen – wie etwa im Monat Mai mit etwa 66% – und Monate mit mehrheitlich nördlichen Wetterlagen; beispielsweise der Wintermonat Februar mit etwa 61%.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass sich die relativen Häufigkeiten (auch ohne die Berücksichtigung der unbestimmten Anströmrichtung XX) auf 100% kummulieren, Häufigkeitszunahme und -abnahme einer einzelnen Anströmrichtung können sich jedoch auf die Verteilung der anderen drei Anströmrichtungen auswirken. Nimmt also beispielweise die Häufigkeit der SW-Wetterlagen von einem zum nächsten Monat ab, kann dies mit Häufigkeitsänderungen einer oder auch mehrere Anströmrichtungen einhergehen. Daher erscheint es auch sinnvoll, westliche mit östlichen oder nördliche mit südliche Wetterlagen zu gruppieren.

Wie in Abbildung 15 deutlich zu erkennen ist, weisen östliche Wetterlagen ebenfalls einen Jahresgang auf, jedoch mit geringeren Anteilen in den Monaten selbst.

Im Sommer und Frühherbst ist ihr monatlicher Anteil klein, teilweise weniger als durchschnittlich eine Wetterlage im Monat August. Im Verlauf steigen die Anteile über den Winter an und erreichen ihr Maximum im Februar mit 3,6 Tagen im Monatsdurchschnitt bei den NO-Wetterlagen bzw. im Mai mit 3,8 Tagen bei den SO-Wetterlagen. Hingegen werden westlich-anströmende Wetterlagen durchschnittlich bis zu 14,2 Tage (SW im Oktober) bzw. 12,3 Tage (NW im Dezember) pro Monat ausgewiesen.

Abbildung 16 setzt die bisherige Untersuchung der Anströmrichtungen fort, verknüpft diese jedoch zusätzlich noch mit dem Parameter Feuchte. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden West- und Ostlagen gruppiert. In der Abbildung differenzieren sich folglich feuchte (blaue Farbtöne) und trockene (orangene Farbtöne) Wetterlagen nach westlicher (oben) und östlicher (unten) Anströmung.

Liegen westliche Anströmungen vor, so sind diese generell als feucht klassifiziert, nur im September überwiegen trockene Westlagen. Der durchschnittliche Monatsanteil aller westlichen Wetterlagen liegt dabei zwischen 17 bis 23 Tagen. Wohin-

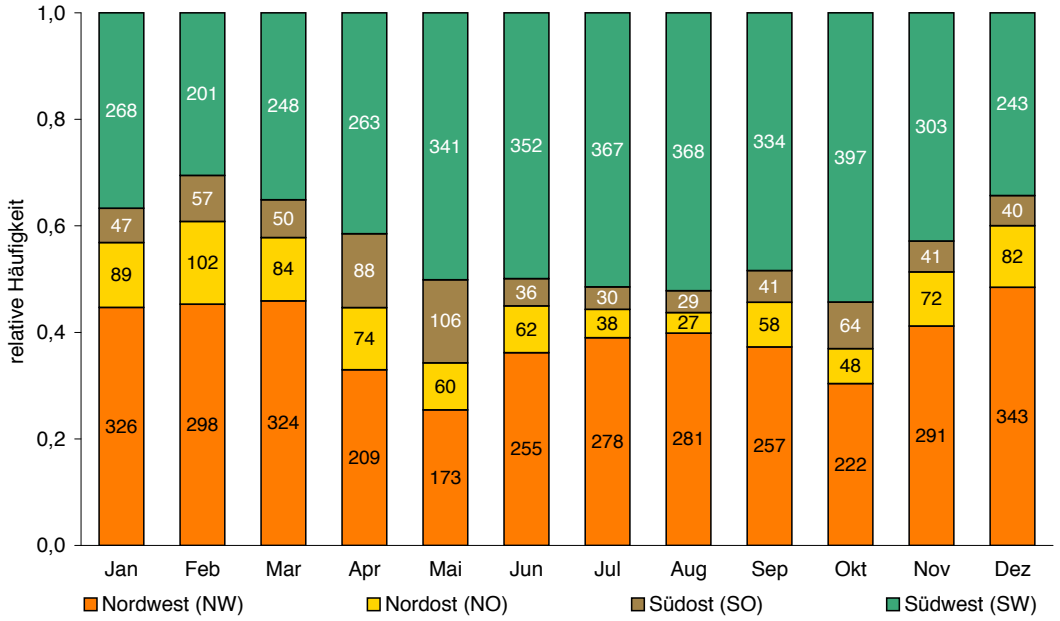

Abbildung 15: Relative Häufigkeiten der jährlichen Anströmrichtungen aller Wetterlagen (1980–2007) ohne den unbestimmten Fall (XX). Zum Vergleich sind die absoluten Häufigkeiten der Wetterlagen für jeden Monat aus der Zeitreihe 1980–2007 dargestellt (in weißer Schrift südliche, in schwarzer Schrift nördliche Wetterlagen).

gegen trockene Ostlagen durchschnittlich maximal fünf Tage (Februar) pro Monat klassifiziert werden, feuchte Ostlagen höchstens drei Tage (April).

Hieraus kann eine Verknüpfung von Anströmrichtung und Feuchteparameter abgeleitet werden. Als feucht klassifizierte Wetterlagen strömen in der Regel aus westlichen Richtungen an, Ostlagen weisen mehrheitlich Wetterlagen auf, die als trocken ausgewiesen werden. Dies deckt sich mit dem in Deutschland beobachteten Wettergeschehen und verifiziert den methodischen Ansatz der objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD. Werden die feuchten Ostlagen betrachtet, so ist eine Abnahme dieser von April bis August zu verzeichnen. Da in diesem Zeitraum feuchte Wetterlagen jedoch zunehmen, müssen westliche Wetterlagen im Jahresverlauf häufiger als feucht klassifiziert werden.

Wiederum liefert die Betrachtung des Jahresgangs und die monatliche Verteilung der Wetterlagen in Abbildung 16 weiterführende Ergebnisse. Die Monate Dezember und Januar bis April sind mehrheitlich durch trockene Wetterlagen bestimmt (vgl. Abb. 19, S. 75). Dabei werden von Januar bis August kontinuierlich immer mehr feuchte Wetterlagen ausgewiesen. Im Februar, einer der trockensten Monate im Sinne der Wetterlagenklassifikation, zeigt sich (vgl. Abb. 16), dass bei den trockenen Wetterlagen westlich-anströmende abnehmen, östlich-anströmende jedoch zunehmen. Es ist also keine Veränderung in der Feuchteverteilung der Wetterlagen bemerkbar, jedoch weisen trockene Lagen eine andere Anströmverteilung auf.

Da im folgenden Jahresabschnitt bis Mai keine wesentliche Abnahme trockener Wetterlagen zu verzeichnen ist, liegt die Zunahme feuchter Wetterlagen bis Mai im anwachsenden Anteil derjenigen Wetterlagen begründet, welche eine unbestimmte Anströmrichtung (XX) aufweisen. XX-Wetterlagen werden pro Monat durchschnittlich an 4,5-5,8 Tagen ausgewiesen, zwischen März und Mai liegt ihr Anteil jedoch bei 5,7-7,4 Tagen monatlich. Dabei nehmen in diesem Zeitraum trockene Wetterlagen ab. Die Variabilität der XX-Wetterlagen im Jahresverlauf kann als Hinweis für unregelmäßigeres Wetter- oder Witterungsgeschehen im Frühjahr gewertet werden, da nach der Klassifikationsmethode des DWD keine eindeutig vorherrschende Windrichtung für Tage mit XX-Wetterlagen angenommen wird (vgl. Kap. 3.1.2 , ab S. 20). Vielmehr zeigt sie jedoch, dass der Anteil der Wetterlagen ohne klar definierbare Anströmrichtung sinkt und damit in diesem Zeitraum weniger klare Verknüpfungen zwischen Anströmrichtung und meteorologischen Daten wie Niederschlag möglich sind.

Darüber hinaus ist in Abbildung 16 auch eine sprunghafte Abnahme feuchter Wetterlagen zwischen August und September zu erkennen (vgl. Abb. 19, S. 75). Die

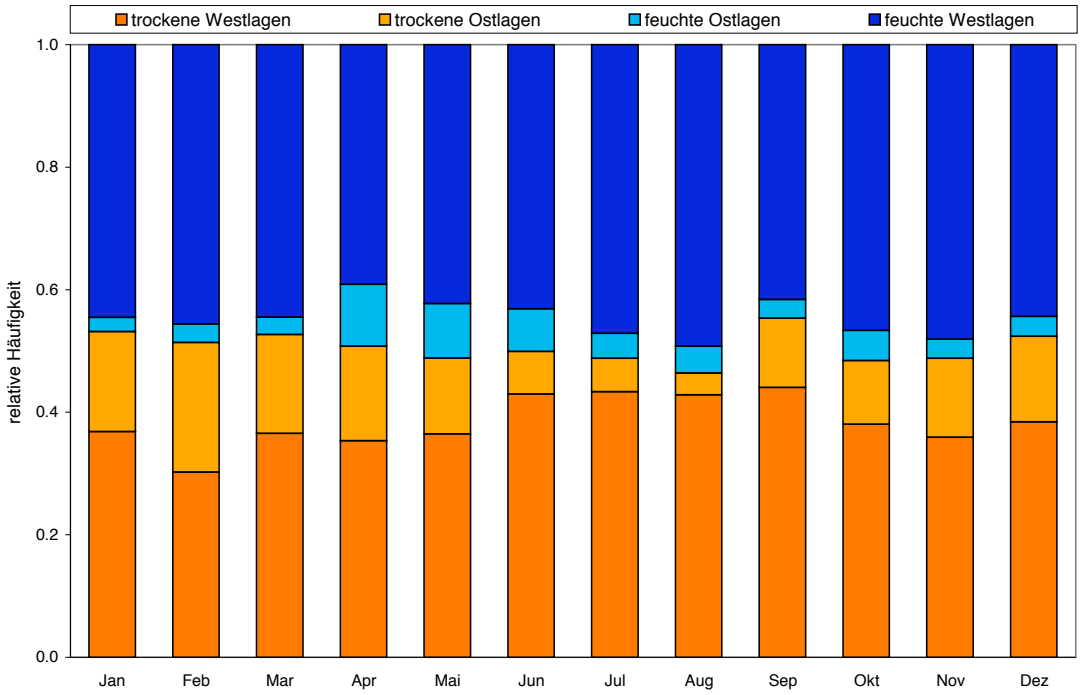

Abbildung 16: Relative Häufigkeiten (1980–2007) der West- und Ostlagen unter jeweiliger Berücksichtigung ihrer Anteile an feuchten und trockenen Wetterlagen. Blaue Farbtöne stehen für feuchte Wetterlagen, orangene Farbtöne für trockene Wetterlagen. Westlagen sind jeweils achsennah, Ostlagen mittig aufgetragen.

Zunahme trockener Wetterlagen im September ist durch vermehrt trockene Ostlagen, nicht durch einen Anstieg trockener Westlagen zu erklären. Diese nehmen sogar von Juni bis Februar, wenn auch nur geringfügig, ab. Durch die Darstellung trockener und feuchter Ostlagen in der Mitte der Abbildung ist deren Vorkommen innerhalb der monatlich klassifizierten Wetterlagen ersichtlich; im Sommer mit geringfügigem Anteil an allen Wetterlagen, im Winter und vor allem in den Monaten Februar bis Mai mit gewichtigerem Anteil.

Abbildung 17 bietet ergänzend eine Beziehung zwischen der Verteilung der Anströmrichtungen und der jeweiligen Jahreszeit. Hierbei wurden absolute Häufigkeiten verwendet, um die Größenordnungen zwischen den Anteilen verschiedener Anströmrichtungen besser darstellen zu können. Die Anzahl der Wetterlagen für jede Anströmrichtung und Jahreszeit ist dabei dem oberen Teil der Abbildung zu entnehmen, im unteren Teil wurden die Datensätze zur Verbesserung der Übersichtlichkeit zu einem 5jährigen gleitenden Mittel für den Zeitraum 1982–2005 verarbeitet. Die wesentlichen Ergebnisse dieses Kapitels sind auch innerhalb dieser

Abbildung zusammenfassend dargestellt. Augenscheinliche Trends in den Häufigkeitsverteilungen sind mit Vorsicht zu genießen, da Schwankungen und Zu- und Abnahmen auch auf globalen Zyklen und deren stärker und schwächer ausgeprägte Effekte zurückgeführt werden können. Zumal Wetterlagen einer bestimmten Anströmrichtung in bestimmten Jahresabschnitten sehr geringe absolute Häufigkeiten aufweisen und auftretende Schwankungen nicht eindeutig interpretiert werden können.

6.5 Zyklonalität der Wetterlagen

Mit Fokus auf die Zyklonalität der Wetterlagenhäufigkeitsverteilung kann festgestellt werden, dass ZA-Wetterlagen im Vergleich am seltensten vorkommen (14,1%); unter den zehn häufigsten Wetterlagen ist nur eine, unter den 16 seltensten sind es sieben Wetterlagen mit zyklonal-antizyklonalem Strömungsmuster. ZZ- und AZ-Wetterlagen (also zyklonale Strömungen in der Höhe) erscheinen zusammen bei 41,7% aller Wetterlagen, hochreichende antizyklonale Lagen (AA) jedoch bei 44,2%.

Somit ist davon auszugehen, dass – wie im Kapitel 3.1.3, ab Seite 22 innerhalb der Zusammenfassung erläutert – die Wetterlagenstatistik Aufschluss über die Niederschlagsgenese in Deutschland geben kann. AA- und ZZ-Wetterlagen stellen für kleinskaligere Betrachtungen stabile Wetterlagen dar, deren Niederschläge auf herantransportierte Feuchte zurückzuführen sind. Dieser Zustand ist bei 62,2% aller klassifizierten Wetterlagen gegeben. Bei gemischter Zyklonalität (37,8%) ist dagegen vielmehr von lokaler Niederschlagsbildung, wie etwa bei sommerlichen Hitzegewittern, auszugehen.

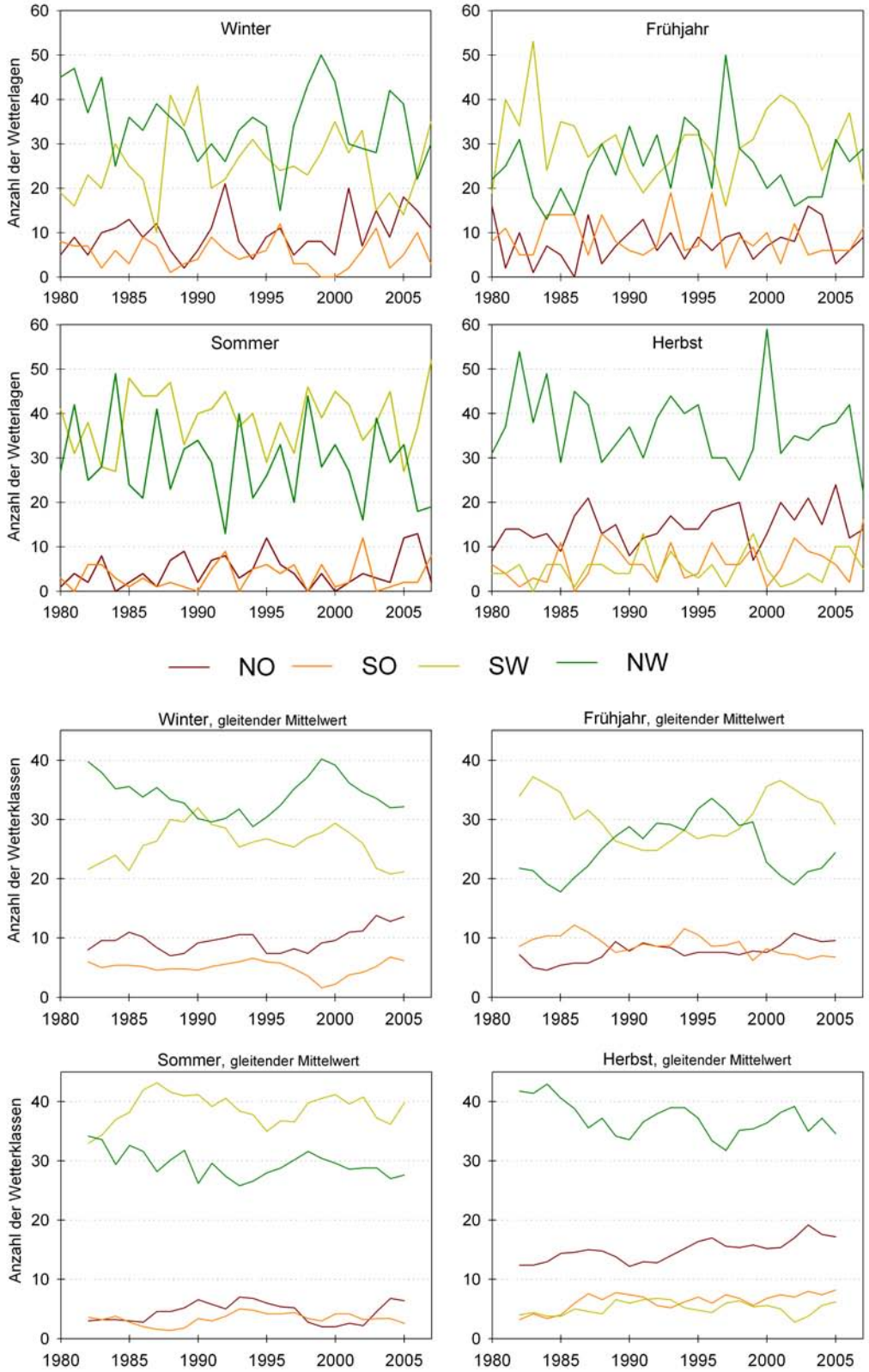

Abbildung 17: Absolute Häufigkeiten der Anströmrichtungen nach Jahreszeiten, für jedes Jahr der Zeitreihe 1980–2007 (oberer Teil) und jeweils dazugehörig das gleitende 5-jährige Mittel für die Zeitreihe 1982–2005 (unterer Teil). Dabei Anströmrichtung XX unberücksichtigt.

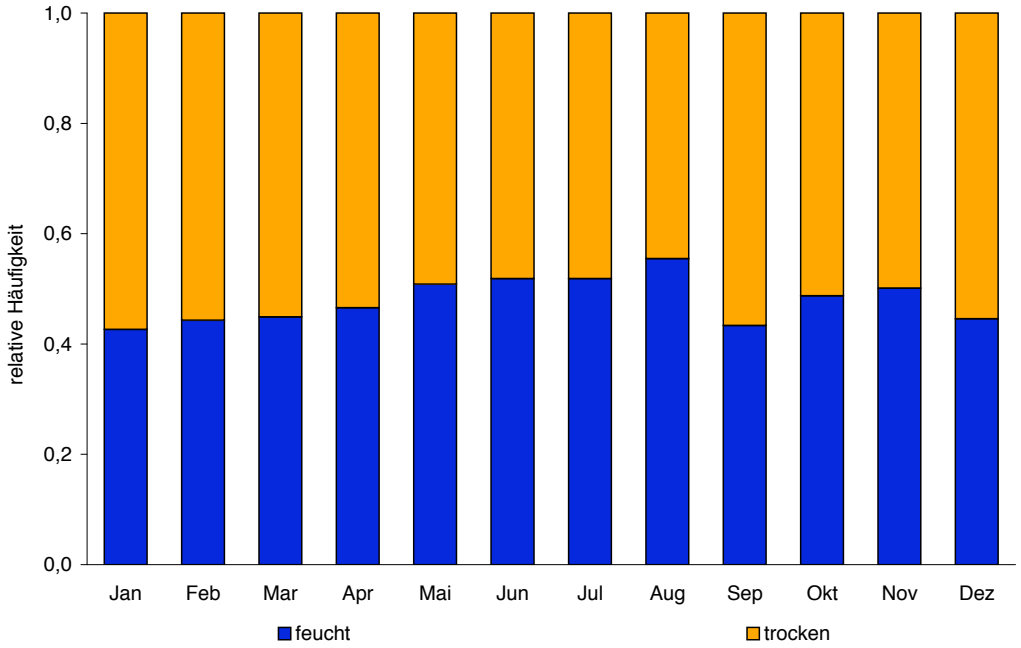

Abbildung 18: Relative Häufigkeiten trockener und feuchter Wetterlagen im Jahresverlauf (Zeitreihe: 1980–2007).

6.6 Feuchte der Wetterlagen

Nach statistischer Betrachtung der Anströmrichtungen und Zyklonalität soll nun auf den Parameter Feuchte genauer eingegangen werden. In der Periode 1980 bis 2007 traten insgesamt 5305 trockene (52 %) und 4888 feuchte Wetterlagen (48 %) auf (vgl. Tab. 13 sowie auch Tab. 15, S. 78). Das Verhältnis trockener zu feuchter Wetterlagen erscheint dabei nahezu ausgeglichen. Der Jahresverlaufs des Parameters Feuchte lässt, wie auch bei den Anströmrichtungen, Saisonalitäten erkennen.

In Abbildung 18 und 19 sind, wie in Tabelle 13, die relativen Häufigkeiten der als trocken und feucht klassifizierten Wetterlagen im Jahresverlauf aufgetragen. Abbil-

Tabelle 13: Relative Häufigkeiten trockener (T) und feuchter (F) Wetterlagen und deren Jahresgänge, Zeitreihe 1980–2007.

in %	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
T	57,4	55,7	55,1	53,5	49,2	48,2	48,2	44,5	56,7	51,3	49,9	55,4
F	42,6	44,3	44,9	46,5	50,8	51,8	51,8	55,5	43,3	48,7	50,1	44,6

dung 18 zeigt, dass im Jahresverlauf zunächst trockene Wetterlagen überwiegen. Frühsommer und Sommer sind dahingegen von mehrheitlich feuchten Wetterlagen geprägt, wohingegen die Monate September und Dezember wieder mehrheitlich trockenere Wettterlagen aufweisen. Oktober und November sind in etwa ein ausgeglichen in Bezug auf die Feuchte der Wetterlagen.

Deutlicher wird dieser Jahresgang in Abbildung 19, in welcher die Differenzen zwischen den relativen Häufigkeiten trockener und feuchter Wetterlagen für alle Monate aufgetragen sind. Trockene Wetterlagen nehmen von Januar bis August nahezu linear ab. Herbst und Frühwinter geben ein durchmischtes Bild ab. Deutlich zu erkennen ist jedoch der Anstieg trockener Wetterlagenhäufigkeiten zwischen August (44,5%) und September (56,7%). An dieser Stelle sei jedoch erneut erwähnt, dass für die Differenzierung trockener und feuchter Wetterlagen ein Bezugsmittelwert aus dem Wetterlagendatensatz 1981–2000 errechnet wird (ausführlich erläutert in Kap. 3.1.4, ab S. 31).

Der damit einhergehende Effekt wird durch eine relative Häufigkeitsverteilung der Feuchte für die Jahre 2001–2007 sichtbar. Dieser Teil der Wetterlagenzeitreihe wird nicht zur Ermittlung des Bezugsmittelwertes genutzt und kann daher als statistisch unabhängig betrachtet werden. Abbildung 20 (S. 76) zeigt die bisherige

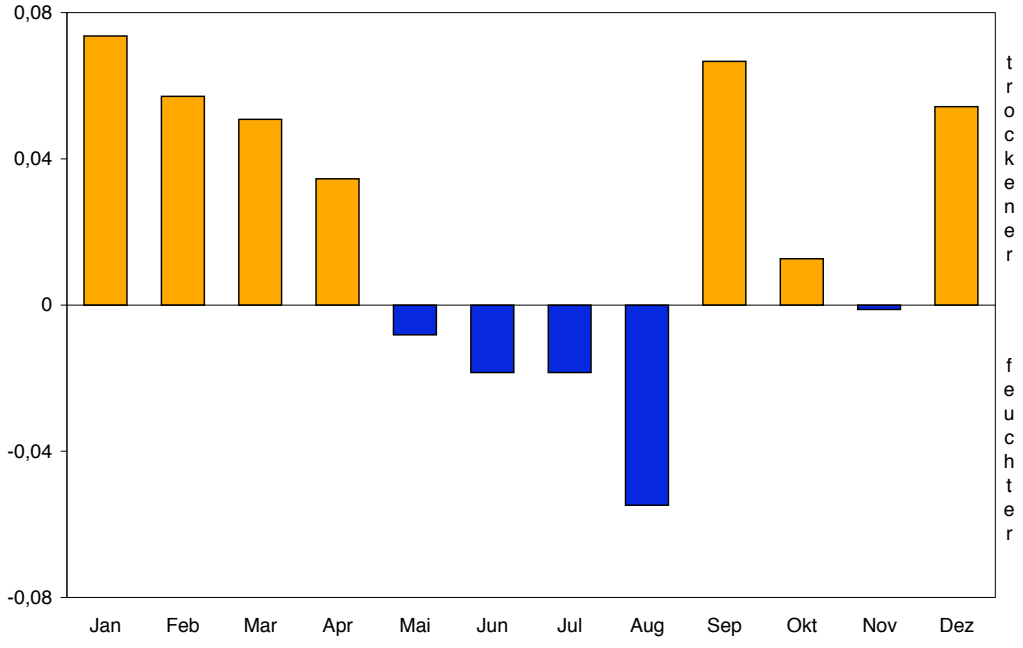

Abbildung 19: Differenz der relativen Monatshäufigkeiten aller trockenen (orange) zu allen feuchten (blau) Wetterlagen (Zeitreihe: 1980–2007).

Tabelle 14: Relative Häufigkeiten trockener (T) und feuchter (F) Wetterlagen und deren Jahresgänge, Zeitreihe 2001–2007.

in %	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
T	58,1	58,4	58,5	54,3	43,8	40,5	39,2	31,8	62,4	47,0	42,9	55,3
F	41,9	41,6	41,5	45,7	56,2	59,5	60,8	68,2	37,6	53,0	57,1	44,7

Verteilung trockener und feuchter Wetterlagen dieses Jahrzehnts auf. Die aus Abbildung 19 ersichtlichen Saisonalitäten setzen sich auch für die kürzere Zeitreihe fort, erscheinen aber wesentlich ausgeprägter. Im Jahresverlauf sind trockene und feuchte Monate klarer zu differenzieren.

Als Zeiträume mit mehrheitlich trockenen Wetterlagen wurden 2001–2007 Dezember sowie Januar bis April ausgewiesen, mehrheitlich feucht sind die Monate Mai bis August. Im Vergleich zur gesamten Zeitreihe ist der Sommer wesentlich feuchter klassifiziert worden, d.h. die Differenz zwischen sommerlich feuchten und trockenen Wetterlagenhäufigkeiten ist weitaus größer als im Zeitraum 1980–2007.

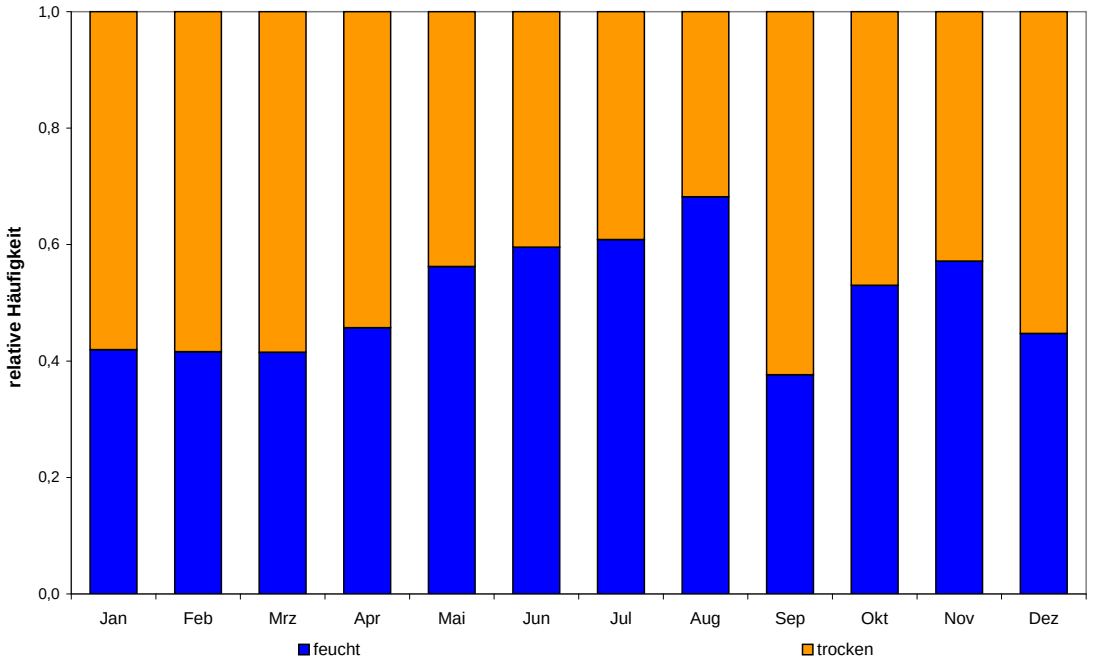

Abbildung 20: Relative Häufigkeiten trockener und feuchter Wetterlagen im Jahresverlauf (Zeitreihe: 2001–2007). Diese Zeitreihe beinhaltet keinerlei Wetterlagen, welche auch zur Berechnung des Bezugsmittelwertes (1981–2000) des Parameter Feuchte genutzt werden.

Wiederum deutlich erkennbar ist die Häufigkeitszunahme trockener Wetterlagen zwischen August (31,8%) und September (62,4%).

Um die Feuchte der Wetterlagen mit den Anströmrichtungen zu verknüpfen wurden in Tabelle 15 die relativen Häufigkeiten der Wetterlagen in ein Rängesystem eingetragen. Über die Ränge 1 bis 4 sind die relativen Häufigkeiten der Wetterlagen nach dem Kriterium der Anströmrichtung für jeden Monat einzeln sortiert. Dabei ist zu beachten, dass hierfür alle relativen Häufigkeiten der trockenen und feuchten Wetterlagen innerhalb eines Monats verglichen wurden. Die Daten hierfür wurden der kompletten Zeitreihe 1980–2007 entnommen. Auch bei dieser Darstellung ist darauf hinzuweisen, dass der Bezugsmittelwert für die Klassifikation der Feuchte aus dem Teilzeitreihe 1981–2000 errechnet wird.

Es ist beispielsweise zu erkennen, dass die meisten Wetterlagen im Januar aus Nordwesten kamen, die wenigsten aus Südosten. Die unbestimmte Anströmrichtung XX findet in diesem Häufigkeitsrangsystem keine Beachtung, wohl aber bei der monatlichen Klassifizierung in feuchte und trockene Wetterlagen, wie in der letzten Spalte der Tabelle 15 zu sehen ist.

Darüber hinaus sind die Rangnummern farblich differenziert, wobei helle Kreise für mehrheitlich trockene Wetterlagen im jeweiligen Monat stehen, schwarze Kreise für ein Übergewicht an feuchten Wetterlagen. Zusätzlich wurden Randverteilungen berechnet, welche die Feuchte aller Wetterlagen nach Monaten aufzeigen, sowie die Feuchte aller Wetterlagen der kompletten Zeitreihe differenziert nach Anströmrichtung. Die letzte Zeile in Tabelle 15 zeigt somit, dass im Zeitraum 1980–2007 aus Nordosten und Nordwesten vornehmlich trockene, aus Südwesten überwiegend feuchte Wetterlagen angeströmt sind. Für den Südosten lässt sich keine Aussage treffen.

Auffällig erscheint die Anströmungsverteilung feuchter und trockener Wetterlagen im Jahresverlauf. Liegen südwestliche Wetterlagen vor, so erscheinen diese in allen Monaten mehrheitlich als feuchte Wetterlagen. Bei nördlich-orientierten Anströmungen (NW und NO) sind die Verhältnisse umgekehrt; alle Monate weisen eher trockene Wetterlagen auf. Hingegen folgen Wetterlagen aus dem Südosten mehrheitlich der Feuchteausweisung aller Wetterlagen (vgl. Tab. 15 und Abb. 19). SO-Wetterlagen zeigen sich in den einzelnen Monaten April bis August als überwiegend feuchte Wetterlagen.

Tabelle 15: Häufigkeitsränge der monatlichen Verteilung der Anströmrichtung der Wetterlagen (ohne XX), basierend auf ihren relativen Häufigkeiten und dem Wetterlagenklassifikationsparameter Feuchte (trockene oder feuchte Wetterlagen) Weitere Erläuterungen im Text.

Monat	NO	SO	SW	NW	alle (auch XX)
Jan	③	④	❷	①	○
Feb	③	④	❷	①	○
Mrz	③	④	❷	①	○
Apr	④	❸	❶	②	○
Mai	④	❸	❶	②	●
Jun	③	❹	❶	②	●
Jul	③	❹	❶	②	●
Aug	④	❸	❶	②	●
Sep	③	④	❶	②	○
Okt	④	❸	❶	②	○
Nov	③	④	❶	②	⭘
Dez	③	④	❷	①	○
1980 - 2007	○	⭘	●	○	○

○ / ●	trockene bzw. feuchte Wetterlagen überwiegen
⭘	trockene und feuchte Wetterlagen ausgeglichen
①...④	Häufigkeitsränge innerhalb des Monats

6.7 Fazit

Aus der beschreibenden Wetterlagenstatistik können quantitative, aber auch qualitative Erkenntnisse im Sinne der Fragestellung dieser Arbeit gewonnen werden. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Wetterlagendatensatz des DWD ist frei verfügbar und lässt sich damit fortlaufen aktualisieren. Daten können innerhalb eines Wetterlagenrechners kontinuierlich eingepflegt und weiter verarbeitet werden. Der Wetterlagenrechner hat sich als funktionales Werkzeug für die Fragestellungen dieser Arbeit herausgestellt und kann ebenfalls erweitert werden. Wünschenswert wären weitere Automatismen, um beispielsweise Häufigkeiten innerhalb der Jahreszeiten oder kombinierte Anfragen (wie Wetterlagen bestimmter Anströmrichtungen bestimmter Monate) schneller ausgeben zu können.

- Grundlegende statistische Bearbeitungen des Wetterlagendatensatzes zeigen eine stark schiefe Verteilung innerhalb der Häufigkeiten. Dies ist über Quartile innerhalb der Verteilung ersichtlich; so erklären sieben Wetterlagen über 50%, 20 Wetterlagen nahezu 90% der Verteilung. Die Verweilzeiten der Wetterlagen zeigen, dass häufigere Wetterlagen auch länger andauern. Zur Interpretation des Trendtests muss die Inhomogenität der Häufigkeitsverteilung berücksichtigt werden, um vorkommende Trends trotz Signifikanz bewerten zu können.

- Die Verweilzeiten einzelner Wetterlagen liegen zwischen 1,00-1,55 Tagen. Nördlich orientierte Wetterlagen dauern in der Regel länger an als südlich anströmende, bei westlich und östlich orientierten Wetterlagen kann dieser Vergleich jedoch nicht vorgenommen werden. Die Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen zeigt jedoch, dass im Zeitraum 1980–2007 westliche mit über 68% gegenüber östlichen Wetterlagen mit 14% relativer Häufigkeit stark überwiegen. Die Inhomogenität der Anströmrichtungsverteilung muss bei einer Interpretation von Trendtests ebenfalls berücksichtigt werden.

- Die Klassifikationsparameter Feuchte und Anströmrichtung zeigen spezifische Jahresgänge. Die Häufigkeitsverteilungen bei Kombination beider Parameter geben Informationen über vorherrschende Wetterlagentypen in den einzelnen Monaten. Durch die Kombination der Parameter lässt sich auch der Einfluss von Wetterlagen mit unbestimmter Anströmrichtung besser herausarbeiten.

Feuchte Wetterlagen sind vornehmlich im Sommer, trockene Wetterlagen häufiger im Winter zu beobachten. Die Darstellung der Wetterlagenfeuchte zwischen 2001–2007 kann aufgrund der Klassifikationsmethodik als qualitative Trendstatistik für einzelne Monate herangezogen werden.

- Die Zyklonalitätsverteilung der Wetterlagen ist nicht gleichförmig. AA-Wetterlagen treten deutlich am häufigsten auf. Die Anteile der einzelnen Strömungsmuster können helfen Trends bei Wetterlagen besser einzuordnen.

- Gleitende Mittelwerte dienen als Instrument, vorherrschende Anströmrichtungen innerhalb einzelner Jahreszeiten zu identifizieren.

7 Ergebnisse der Trendtests

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Trendanalysen vorgestellt werden. Diese basieren auf dem bereits angeführten Datensatz der Wetterlagen (DWD, 2008) und den Isotopenzeitreihen der GNIP-Stationen.

Die Ergebnisse basieren auf dem kompletten Wetterlagendatensatz (Kap. 7.1), aber auch auf der Analyse spezifischer Wetterlagenparameter wie Anströmrichtung und Feuchte (Kap. 7.2). Danach werden die Trendergebnisse der Isotopenzeitreihen vorgestellt (Kap. 7.3). Die abschließende Synthese der einzelnen Ergebnisse ist in Kapitel 8, ab Seite 95 dargestellt.

7.1 Wetterlagen

Die Abbildung 21 auf Seite 82 ergänzt als Einstieg in die Trendtestthematik die Darstellung der Häufigkeitsverteilung aller Wetterlagen (vgl. Kap. 6.3, ab S. 59) mit einer Aufführung aller Trends des Zeitraums 1980–2007. Diese Trendanalysen wurden mit Hilfe des Trendtests nach Mann-Kendall durchgeführt (Kap. 5, ab S. 47). Die Verteilung der Trends folgt der Verteilung der Häufigkeiten; dies zeigt die erwähnte Abbildung. Trends treten mehrheitlich bei häufigeren Wetterlagen auf und der Sen-slope der Trends sinkt bei Häufigkeitsrückgang der Wetterlagen. Zur Vervollständigung sind auch positive und negative Tendenzen (TE mit p-value $<$ 0,2) der Wetterlagen aufgetragen.

Die aussagekräftigsten Trends sind bei den zwölf häufigsten Wetterlagen zu erkennen. Daneben zeigen auch seltene Wetterlagen Trends, diese weisen jedoch aufgrund ihrer geringen absoluten Häufigkeit pro Jahr auch geringe Sen-slope-Werte auf. Die Häufung der Trends innerhalb einer geringen Anzahl von sehr häufig auftretenden Wetterlagen wird später als Erklärungsansatz aufgegriffen, um Veränderungen der Feuchte darzustellen. Unter den 28 seltensten Wetterlagen, in Bezug auf den Gesamtzeitraum 1980–2008, weist nur die Wetterlage NWAZF (1,3% relative Häufigkeit) einen erwähnenswerten Trend auf (Sen slope +0,18372). Die größte Häufigkeit dieser Wetterlage findet sich zwischen Juli und August.

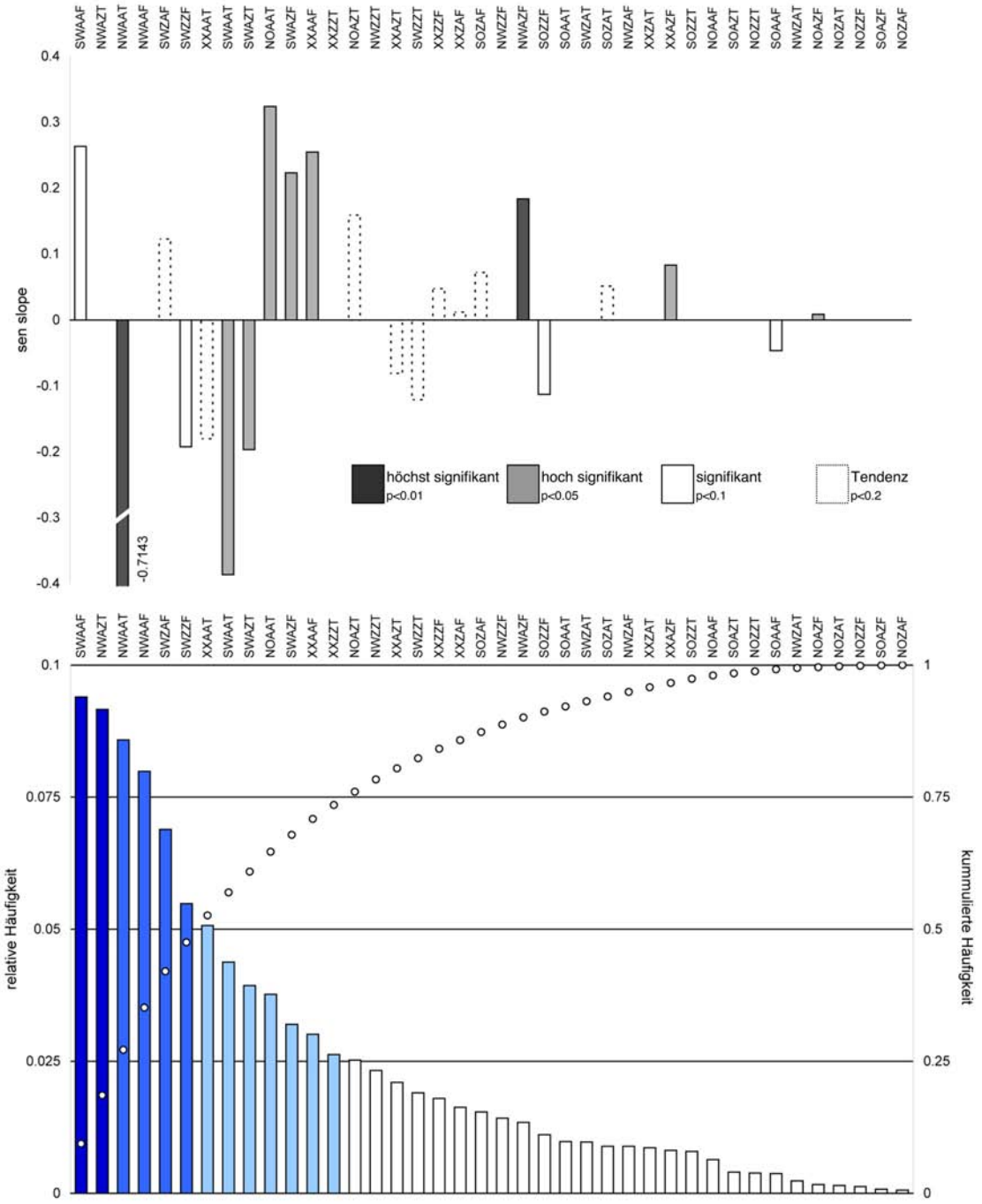

Abbildung 21: Unten: Relative und kummulierte Häufigkeiten aller Wetterlagen der Periode 1980–2007, Sortierung gemäß der relativen Häufigkeit einzelner Wetterlagen. Einfärbungen zeigen die Quartile der Verteilung: vgl. Abbildung 14 (S. 60). Oben: Trends der einzelnen Wetterlagen (1980–2007) mit Sen-Slope. Einfärbungen zeigen die Signifikanzstufe.

Bei der Betrachtung häufigerer Wetterlagen lassen sich mit Abbildung 21 (S. 82) und der Tabelle 8 der Wetterlagenhäufigkeiten (S. 64) drei Prozesse innerhalb des Wetterlagendatensatzes herausarbeiten:

- Unter den zwölf häufigsten Wetterlagen weisen fünf der sechs SW-Wetterlagen Trends auf. Die Zyklonalität dieser Wetterlagen weist auf den ersten Blick keinerlei Muster auf, ZA-Lagen sind nicht darunter. Bis auf eine Ausnahme zeigen diese Wetterlagen negative Trends, wenn sie als trocken klassifiziert wurden und positive Trends bei feuchten Wetterlagen. Die relative Häufigkeit dieser vier Wetterlagen liegt im Jahr bei 8,3 für die trockenen Wetterlagen SWAAT und SWAZT, sowie bei 12,6 % für die feuchten Wetterlagen SWAAF und SWAZF. Dabei fällt auf, dass beide Wetterlagenpaare AA- und AZ-Zyklonalität aufweisen und sich wie erwähnt nur durch ihre Feuchteklassifikation unterscheiden. Ihr häufigstes Auftreten ist für den Typ AA im Herbst, für AZ im Sommer zu beobachten.

  Im Sommer zeigt SWAZF begründet durch die Häufigkeitsverteilung der Wetterlage den stärksten positiven, SWAZT den stärksten negativen Trend, im Herbst SWAAF anteilig den stärksten positiven und SWAAT den stärksten negativen Trend. SWAAF ist zudem auch die am häufigsten klassifizierte Herbst-Wetterlage des gesamten Untersuchungszeitraums. Dem Trendergebnis folgend würde sie jedes Jahr einen um etwa 3% erhöhten Anteil an allen Wetterlagen im Zeitraum September bis November einnehmen.

- Der deutlichste Trend ist bei der Wetterlage NWAAT (8,6% relative Häufigkeit) zu erkennen, mit einem Sen-slope-Wert von $-0{,}71429$. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass bei trockenen, hochreichend antizyklonalen Nordwestlagen von einem durchschnittlichen Rückgang von etwa 2,5% pro Jahr zu rechnen ist. Damit würde diese Wetterlage bei Trendfortsetzung nicht mehr an durchschnittlich 2,62 Tagen, sondern nur an 1,86 Tagen im Monat klassifiziert werden.

- Zwei weitere Trends innerhalb der häufigen Wetterlagen weisen AA-Lagen auf. Die Trends für NOAAT und XXAAF (3,8 bzw. 3,0% relative Häufigkeit) sind beide positiv und hoch signifikant. Sie stehen damit im Kontrast zum negativen, höchst signifikanten Trend der ebenfalls hochreichend antizyklonalen Wetterlage NWAAT. Aus der Wetterlagenstatistik ist bekannt, dass etwas weniger als die Hälfte aller Klassifikationsfälle AA-Zyklonalität aufweisen. Daher wirken Trends bei Wetterlagen dieses Strömungstyps stärker auf

die monatliche und jährliche Wetterlagenhäufigkeitsverteilung als Veränderungen bei anderen Zyklonalitätsausprägungen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Aussagekraft der Trendanalysen einzelner Wetterlagen für den gesamten Untersuchungszeitraum fraglich erscheint. Eine verifizierbare Kausalität zwischen Trends der Wetterlagen und Trends innerhalb der Isotopenwerte ist schon durch die Divergenz der zeitliche Auflösung zwischen Monatsmittelwerten bei den Isotopen und Tageswerten bei der Wetterlagenklassifikation nicht gegeben. Zumal Wetterlagen signifikante Trends aufweisen, gleichzeitig aber auch mit geringer Häufigkeit klassifiziert werden können. Die Interpretation der jeweiligen Zyklonalität von Wetterlagen mit signifikanten Trends ist mit Vorsicht anzugehen. Als Folgerung aus diesem Ergebnisschritt sind daher Gruppierungen von Wetterlagen auf Trends hin getestet worden.

Der Trendtest nach Mann-Kendall hat sich als funktionales Werkzeug für diese Untersuchung herausgestellt, nicht zuletzt da auch die Isotopenzeitreihen mit dieser Methode auf Veränderungen überprüft wurden.

Es sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass einerseits Trenduntersuchungen einzelner Wetterlagen zwar gut durchführbar, aber wenig aussagekräftig sind, da sie alleine als eine aus 40 möglichen Wetterlage kaum verifizierbaren Einfluss auf Isotopenzeitreihen nehmen. Andererseits können durch die Bildung von bestimmten Wetterlagengruppen bessere Aussagen über deren Wirksamkeit auf die Isotopenzusammensetzung getroffen werden, in diesem Fall scheinen die Ergebnisse der Trendtests jedoch häufig widersprüchlich zu sein.

7.2 Anströmrichtung und Feuchte

Da keine der einzelnen Wetterlagen eine hohe mittlere Verweilzeit oder dominante relative Monatshäufigekeit aufweist, können die Trendtests aller einzelnen Wetterlagen kein stichhaltiges quantitatives Ergebnis liefern. Sie dienen vielmehr dazu, einen ersten Eindruck bei der Interpretation der Trendergebnisse zu gewinnen. Infolgedessen wurden nicht nur alle einzelnen Wetterlagen auf Trends getestet, sondern auch spezifische Kriterien der Wetterlagen, vormals Wetterlagengruppen genannt.

Die Parameter Feuchte und Anströmrichtung eignen sich, um Wetterlagen auf Monatsbasis zu gruppieren. Diese Methodik erhöht die Vergleichbarkeit der Trends von Wetterlagen und Isotopen und den Erklärungsanteil der Wetterlagen selbst. Trendtests für das Kriterium der Zyklonalität gesondert durchzuführen erschien

aufgrund der Komplexität dieses Klassifikationsparameters und nach einigen Probeläufen mit dem Mann-Kendall Trendtest wenig sinnvoll. Veränderungen der Feuchte und Anströmrichtung beziehen sich auf nur einen Parameter. Für die Klassifikation der Zyklonalität müssen jedoch vier Paramterausprägungen betrachtet werden. Dies hätte die Interpretation der Trendtests ad absurdum geführt.

Zunächst wurden Wetterlagen auf Monatsbasis gemäß ihrer Anströmrichtungen gruppiert und im Anschluss auf mögliche Trends getestet. In Tabelle 16, Seite 86, sind die vorkommende Trends aufgelistet. Dabei werden für jeden Monat nur die vier bestimmten Anströmrichtungen untersucht. Die unbestimmte Anströmrichtung (XX) bleibt unberücksichtigt, da sie keine Erkenntnisse über die räumlich zu differenzierende Veränderung der Luftmassenanströmungen liefern kann. Die p-values wurden in der Tabelle für alle Anströmrichtungen aufgetragen. Sen-Slope-Werte – als Maß für die Stärke des Trends – nur, wenn Signifikanz oder zumindest eine Tendenz (Te) vorlag. Weitere Trendanalysen folgen diesem Schema.

Um die Signifikanz eines Trends besser interpretieren zu können, ist die mittlere durchschnittliche Tagesanzahl bei den entsprechenden Anströmrichtungen ergänzt worden. So lässt sich erkennen, wie oft mit Wetterlagen einer bestimmten Anströmrichtung in einem Monat zu rechnen ist. Aus der Tabelle 16 ergeben sich Monate, die keine Trends bei den Anströmrichtungen aufweisen: Februar, Juni, August sowie Oktober und November. Diese Monate begrenzen folglich drei Zeitabschnitte, in denen Veränderungen der Anströmrichtungen erkennbar sind.

Einer dieser Zeitabschnitte liegt zwischen Dezember und Januar. Im Dezember nehmen NW-Lagen signifikant ab (Sen-Slope –0,215), nordöstliche Anströmungen zeigen jedoch eine Tendenz zur Zunahme. Im Folgemonat Januar tritt für diesen Lagen ein hoch signifikanter, positiver Trend (Sen-Slope 0,148) auf. NO-Lagen haben in beiden Monaten nur geringen Anteil an der Verteilung aller Anströmrichtungen, nordwestliche Anströmungen weisen hingegen im Dezember eine durchschnittliche Häufigkeit von 12,7 Tagen auf. Zur besseren Interpretation dieser Veränderungen wurden weitere Trendtests durchgeführt. Die Abnahme aller NW-Lagen im Dezember ist verbunden mit einer hochsignifikanten Abnahme (p-value 0,0269, Sen-Slope –0,215) der feuchten NW-Wetterlagen, wohingegen trockene NW-Wetterlagen keinen Trend aufweisen. Bei der Betrachtung nordöstlicher Anströmungen zwischen Dezember und Januar ist dagegen bei feuchten Wetterlagen kein, bei trockenen Wetterlagen ein höchst signifikanter Trend aufzufinden. Trockene NO-Lagen nehmen vom 1. Dezember bis 31. Januar deutlich zu (p-value 0,006, Sen-Slope 0,2).

Weitere Veränderungen der Anströmrichtungen sind im September zu verzeichnen. SW-Lagen erscheinen hier ebenfalls häufig (12,3 Tage), zeigen allerdings einen hoch signifikanten Trend zur Häufigkeitsabnahme (Sen-Slope –0,172). Hingegen zeigen östliche Anströmungen im September Zunahmen. Bei SO-Anströmungen ist dieser Trend hoch signifikant (Sen-Slope 0,043), bei NO-Lagen kann von einer po-

Tabelle 16: Ergebnisse der Trendtests für die Anströmrichtung (AR) ohne Anströmrichtung XX unter Berücksichtigung aller Wetterlagen eines jeden Monats aus der Zeitreihe 1980–2007. $\overline{d}_{WL}$ gibt bei signifikantem Trend das monatlich durchschnittliche Auftreten der Anströmrichtung in Tagen an, (Te) verweist auf eine Tendenz ohne Signifikanz.

Monat	AR	p-value	Sen-slope	$\overline{d}_{WL}$	Monat	AR	p-value	Sen-slope	$\overline{d}_{WL}$
Jan	NO	0,0297	0,14752	3,2	Jul	NO	0,9366		
	SO	0,4013				SO	0,1937	0,0	(Te)
	SW	0,6468				SW	0,1212	0,13188	(Te)
	NW	0,6754				NW	0,3232		
Feb	NO	0,7329			Aug	NO	0,6002		
	SO	0,2492				SO	0,6325		
	SW	0,3429				SW	0,5257		
	NW	0,3022				NW	0,8744		
Mrz	NO	0,0224	0,13333	3,0	Sep	NO	0,1438	0,04021	(Te)
	SO	0,3189				SO	0,0170	0,04257	1,5
	SW	0,0970	-0,22770	3,9		SW	0,0271	-0,17157	12,3
	NW	0,5925				NW	0,5665		
Apr	NO	0,9357			Okt	NO	0,2394		
	SO	0,1992	0,06250	(Te)		SO	0,9196		
	SW	0,7519				SW	0,3203		
	NW	0,1825	-0,12132	(Te)		NW	0,7820		
Mai	NO	0,9025			Nov	NO	0,9369		
	SO	0,2011				SO	0,2353		
	SW	0,4294				SW	0,7813		
	NW	0,0636	0,15587	6,3		NW	0,2860		
Jun	NO	0,8536			Dez	NO	0,1438	0,08301	(Te)
	SO	0,2591				SO	0,7392		
	SW	0,6354				SW	0,8271		
	NW	0,3114				NW	0,0691	-0,21534	12,7

sitiven Tendenz gesprochen werden. Eine weitere Trendanalyse der feuchten sowie trockenen SW-Lagen ergab keine signifikanten Trends.

Im Frühjahr zeigen zwei Anströmrichtungen im Monat März signifikante Trends. SW-Lagen nehmen ab (Sen-Slope –0,228), NO-Lagen nehmen hingegen hoch signifikant zu (Sen-Slope 0,133). Die durchschnittliche Häufigkeit der beiden Anströmrichtungen ist im März in etwa gleich. Somit erscheint es plausibel, dass die Abnahme südwestlicher durch die Zunahme nordöstliche Anströmung ausgeglichen wird. Die Abnahme der SW-Lagen kann dabei mit der hoch signifikanten Abnahme der feuchten SW-Lagen in Beziehung gesetzt werden (p-value 0,0362, Sen-Slope –0,155).

Dem Jahresverlauf folgend sind weitere einzelne Trends oder Tendenzen zu erkennen (Monate Mai und Juli), diese können jedoch weniger eindeutig zu zeitlichen Abschnitten zusammengefasst werden. Es sei jedoch drauf verwiesen, dass – wie in Tabelle 16 zu erkennen ist – die Zunahme der NW-Wetterlagen im Mai (Sen-Slope 0,156) mit dem signifikanten Trend feuchter NW-Lagen (p-value 0,0528, Sen-Slope 0,14) einhergeht, trockene NW-Anströmungen zeigen in diesem Monat keinen Trend.

Nach den Trendergebnissen der Anströmrichtungsuntersuchung, wurden auch Trendtests für nur trockene und nur feuchte Wetterlagen durchgeführt. Hieraus sollten Veränderungen der Feuchte innerhalb der Monate erkennbar werden. Tabelle 17 auf Seite 88 zeigt die p-values für alle Monate, jeweils bei trockenen und feuchten Wetterlagen. Sen-Slopes sind wiederum nur angegeben, wenn zumindest eine Tendenz innerhalb des Monats zu erkennen war. Man sieht, dass Veränderungen der Feuchte von Wetterlagen nur in den Monaten April und Juli festgestellt werden können. Da sich trockene und feuchte Wetterlagen zur absoluten Anzahl aller Wetterlagen eines Monats aufsummieren, erscheinen bei Veränderungen gegenläufige Trends, welche in etwa den gleichen Betrag bei den Sen-Slope-Werten aufweisen.

Im April ist eine tendenzielle Abnahme (p-value $< 0{,}2$) der trockenen Wetterlagen (Sen-Slope –0,175) und ein dazugehöriger, aber nicht signifikanter Anstieg feuchter Wetterlagen (Sen-Slope 0,186) ersichtlich. Den einzigen Trend weist der Monat Juli auf, hier nehmen trockene Wetterlagen signifikant ab (Sen-Slope –0,152) und feuchte hoch signifikant zu (Sen-Slope 0,196). Diese Trends lassen sich gut mit den relativen Monatshäufigkeiten trockener und feuchter Wetterlagen (vgl. Abb. 20, S. 76) verknüpfen; Darstellung der Zeitreihe 2001–2007 zeigt, dass feuchte Wetterlagen von April bis August statistisch gesehen zunehmen.

Tabelle 17: Ergebnisse des Trendtests für den Klassifikationsparameter Feuchte f unter Berücksichtigung aller Wetterlagen eines jeden Monats aus der Zeitreihe 1980–2007. **Fett gedruckt** sind Monate mit Trends oder Tendenzen. Die letzte Spalte WL(%) listet die relative, durchschnittliche Häufigkeit trockener bzw. feuchter Wetterlagen im entsprechenden Monat auf.

Monat	Feuchte f	p-value	Sen-slope	WL %
Jan	trocken	0,6927		
	feucht	0,6075		
Feb	trocken	0,5273		
	feucht	0,3043		
Mrz	trocken	0,8889		
	feucht	0,8732		
Apr	trocken	0,1606	-0,17539	53,5
	feucht	0,1492	0,18564	46,5
Mai	trocken	0,4758		
	feucht	0,6066		
Jun	trocken	0,4625		
	feucht	0,4748		
Jul	trocken	0,0579	-0,15168	48,2
	feucht	0,0362	0,19573	51,8
Aug	trocken	0,3804		
	feucht	0,4355		
Sep	trocken	0,7963		
	feucht	0,7963		
Okt	trocken	0,5650		
	feucht	0,5650		
Nov	trocken	0,3635		
	feucht	0,2359		
Dez	trocken	0,7496		
	feucht	0,7346		

Neben Veränderungen bei Anströmrichtung und Feuchte erscheint es auch hilfreich, Wetterlagen gemäß ihrer Saisonalitäten genauer zu untersuchen. Grundlage hierfür ist die Feststellung, dass bei Isotopenzeitreihen von möglichen Veränderungen innerhalb einzelner Jahreszeiten gesprochen wird. Ziel ist es daher, Jahreszeiten

auf Trends in den Wetterlagen zu untersuchen, und mögliche Trends wiederum differenziert nach Anströmung und Veränderung der Feuchte darzustellen.

Tabelle 17 auf Seite 88 zeigt die Trends einzelner Wetterlagen für alle Jahreszeiten. Die Wetterlagen sind dabei gemäß ihrer absoluten Häufigkeit absteigend sortiert. Die 17 seltensten Wetterlagen weisen keine Trends auf. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die zwölf häufigsten Wetterlagen abgetrennt dargestellt; diese nehmen innerhalb der Jahreszeiten einen Großteil der Wetterlagenverteilung ein und besitzen neun von 14 Saisontrends. Die Ergebnisse der Trendtests sind in der Tabelle mit Werten der p-values und Sen-Slopes, sowie den relativen Jahreszeitenhäufigkeiten der Wetterlage aufgeführt. Abbildung 22 auf Seite 90 bündelt die Ergebnisse der saisonalen Wetterlagentrends in einer Analyse der Feuchteveränderung unter Berücksichtigung der Jahreszeiten und Anströmrichtungen. Hiermit wird die schwache Aussagekraft der oben beschriebenen Trends einzelner Wetterlagen (Zeitreihe 1980–2007) durch die Erstellung spezieller Wetterlagenmuster verbessert.

In dieser Darstellung erscheinen die Jahreszeiten in den kleinen Kreisen, die vier Anströmsektoren sind jeweils in den großen Kreisen aufgetragen. Sommer (S), Herbst (H) und Winter (W) sind dabei als zusammenhängendes Muster zu verstehen. Dieses Muster zeigt für westliche Anströmungen Trends in den einzelnen Wetterlagen, welche eine Zunahme von Feuchte in der Troposphäre beschreiben. Dabei wurden nur Wetterlagen mit mindestens signifikantem Trend berücksichtigt. Im Sommer nehmen trockene Wetterlagen ab (–T) und feuchte zu (+F), hier zeigt sich also der stärkste Effekt. Auch im Herbst und Winter kann dieses Muster für westliche Lagen aufgezeigt werden. Hingegen zeigt das Frühjahr (F) durch mehrere signifikante Trends einzelner Wetterlagen ein Muster, welches auf Abnahme feuchter, südlicher Wetterlagen schließen lässt (durch –F in der Abbildung dargestellt).

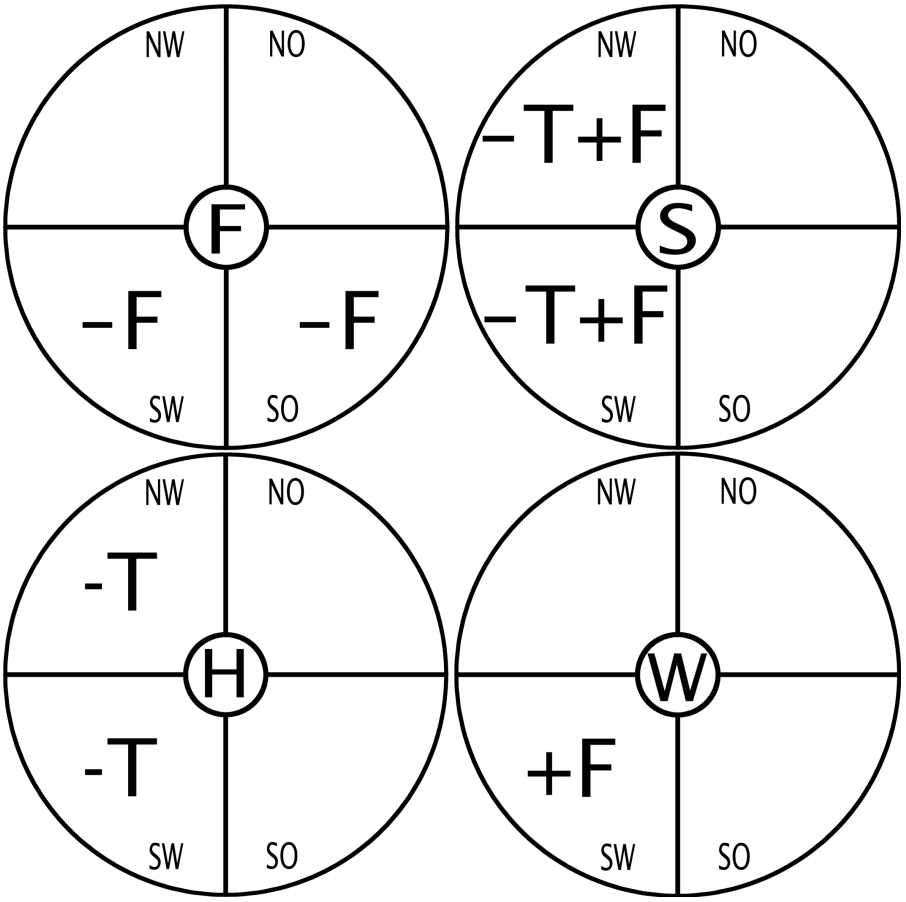

Abbildung 22: Muster für Zu- und Abnahme trockener und feuchter Wetterlagen in den Jahreszeiten Frühjahr (F), Sommer (S), Herbst (H) und Winter (W). ±F/T stehen für Zu- und Abnahme trockener bzw. feuchter Wetterlagen, sortiert nach Anströmrichtungen. Die gezeigten Strukturen basieren auf signifikanten Trends einzelner, aber gewichtiger Wetterlagen einer Jahreszeit. Genauere Erläuterungen im Text. Zeitraum: 1980–2007

Tabelle 18: Ergebnisse der Trendtests für Wetterlagen (WL) innerhalb einzelner Jahreszeiten, sowie deren Signifikanz, Sen-Slopes und relative Häufigkeiten. Wetterlagen sind gemäß ihrer absoluten Häufigkeiten absteigend sortiert.

WL	Frühjahr			Sommer			Herbst			Winter		
	p value	sen	%	p value	sen	%	p value	sen	%	p value	sen	%
SWAAF			7,0			11,0			11,1	0,0529	0,12241	8,4
NWAZT			8,0			11,8			8,3			8,5
NWAAT			7,5	0,0893	-0,20035	8,8	0,0243	-0,2175	9,2			8,8
NWAAF			7,0			6,4			7,2			11,4
SWZAF			7,2			7,5			8,3			4,5
SWZZF	0,0231	-0,17490	5,9	0,0579	0,13632	5,3			5,9			4,7
XXAAT			5,3			3,6			5,3			6,2
SWAAT			3,5	0,0683	-0,08514	4,9	0,0414	-0,11765	5,3			3,8
SWAZT			3,9			6,1	0,0213	-0,11438	4,0			1,7
NOAAT			4,3			2,1			3,5			5,1
SWAZF			2,6	0,0498	0,11438	4,7			2,7			2,8
XXAAF	0,0524	0,1	3,0			3,8			2,9			2,3
XXZZT			3,6			1,2	0,0468	0,04038	2,1			3,6
NOAZT			2,8			1,2			2,4			3,7
NWZZT			1,6	0,0081	-0,05455	1,2			2,5			4,0
XXAZT	0,0708	-0,05556	2,8			1,6			1,9			2,1
SWZZT			2,0			1,8			2,2			1,5
XXZZF			2,2			2,8			1,4			0,8
XXZAF			2,0			2,3			1,3			0,9
SOZAF			3,0			1,3			1,2			0,6
NWZZF			1,3			0,6			1,5			2,4
NWAZF			0,9	0,0001	0,12379	2,2			0,7			1,5
SOZZF	0,0633	-0,08262	2,1			1,0			0,9			0,3
17 weitere Wetterlagen ohne Trends												

7.3 Isotopenzeitreihen im Niederschlag

Die Datenbasis der Isotopenzeitreihen wurde bereits in Kapitel 4.2, ab Seite 44, vorgestellt. Die Isotopenzeitreihen $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ des Niederschlags weisen für alle acht GNIP-Messstationen signifikante Veränderungen in verschiedenen Monaten nach dem Trendtest von Mann-Kendall auf. Dabei stehen positive Trends für leichter werdende Isotopenwerte, da bei positivem Sen-Slope negative Werte für $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ erhöht, also positiver, werden. Zeigt der Sen-Slope hingegen negative Steigungen für den Trend der Isotopen ist davon auszugehen, dass diese im Bezugszeitraum schwerer, also negativer geworden sind. Diese Zu- und Abnahmen für $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ sind über die Sen-Slopes auch zukünftig anzunehmen. Die Trendsteigung bezieht sich dabei stets auf ein Jahr, da die Isotopenmittelwerte auf Monatsbasis vorliegen und Zeitreihen aller einzelnen Monate (1978–2006) ausgewertet wurden. In der Tabelle 19 (S. 94) sind die Trendtestergebnisse für die Isotopenzeitreihen aufgelistet. Diese wurden für eine noch folgende Analyse gruppiert und verschiedenen Einflusszonen zugewiesen (vgl. Kap. 8.1, ab S. 95).

Verschafft man sich zunächst einen ersten Überblick, fällt auf, dass die einzelnen Stationen eine unterschiedliche Monatsanzahl mit Trends aufweisen. Mehrheitlich kann von zwei bis drei Monaten mit signifikanten Trends pro Station ausgegangen werden. Trends sind dabei in zehn Monaten zu erkennen; ein Hinweis auf die zeitliche Variabilität der Veränderungen der Isotopenzeitreihen in Deutschland. Der Monat Juni weist im Vergleich am meisten Trends auf, weitere auffällige Zeitabschnitte mit Veränderungen können dem September und November zugeordnet werden. Die Monate August und Oktober lassen hingegen keinen Trend erkennen, im Mai sind nur in Garmisch-Partenkirchen signifikante Veränderungen bei $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ regstrierbar.

Einige Stationen besitzen einheitliche Trends über einige Monate hinweg, andere zeigen nur punktuelle Veränderungen. Nahezu in allen Fällen gehen Trends bei $\delta^{2}H$ mit Trends bei $\delta^{18}O$ einher. Die Gesamtanzahl der $\delta^{18}O$-Trends überwiegt, dennoch kann mehrheitlich davon ausgegangen werden, dass eine signifikante Veränderung eines Isotops von denen des anderen begleitet wird – dies liegt im Prozess der Isotopenfraktionierung begründet. Die Sen-Slope-Werte von $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ variieren stark, da $\delta^{2}H$ und $\delta^{18}O$-Werte über die Global Meteoric Water Line (GMWL) in Zusammenhang stehen. Bei $\delta^{18}O$ sind durch signifikante Trends Veränderungen im Bereich von –12,7% bis 17,9% pro Jahr, bei $\delta^{2}H$ Veränderungen von –99,8% bis 102,7% erkennbar.

Zur Komplementierung der Tabelle beinhaltet diese auch Datenlücken einzelner GNIP-Isotopenstationen. Nahezu alle Zeitreihen gingen mit dem kompletten oder nahezu vollständigen Datensatz der Zeitreihe 1978–2006 in die Auswertung ein, nur die Station Braunschweig zeigt eine größere, zweijährige Datenlücke. Detailliertere Trendtestsergebnisse folgen im nächsten Abschnitt der Arbeit, da diese unter dem Gesichtspunkt der Ausweisung von Einflusszonen dargestellt werden sollen.

Tabelle 19: Trends der Isotopenzeitreihen $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ nach Monaten für die Stationen (1)–(8), ergänzt durch Angabe der Datenlücken aller Isotopenzeitreihen und deren Zugehörigkeit zu Einflusszonen (vgl. Kap. 8.1, ab. S. 95).

Nr.	Station	Monat	$\delta^{18}O$		$\delta^{2}H$		Stations-Datenlücken 1978–2006	Einflusszone
			p-value	Sen-Slope	p-value	Sen-Slope		
1	Emmerich	Jun	0,00050	0,12950	0,00137	0,82342	–	
		Nov	0,07640	-0,06884				
		Dez	0,08358	-0,07795				
2	Cuxhaven	Jun	0,07174	0,04261			–	
		Jul	0,09137	0,02954	0,09880	0,21086		
3	Bad Salzuflen	Jan	0,06913	0,10892	0,08931	0,71258	2005	
		Feb	0,09688	0,09169				
		Jun	0,02306	0,06036				K Ü S T E
4	Braunschweig	Jan	0,04316	0,10462			2004–2006	
		Feb	0,05782	0,13445				
		Mrz	0,00085	0,16147	0,00671	1,00000		
		Mai			0,02910	0,89395		
		Jun	0,01096	0,10393	0,01034	0,75455		
		Nov			0,05253	-0,80997		
5	Berlin	Mrz	0,03248	0,08165				
		Apr	0,02002	0,08662			–	O S T
		Jun	0,00037	0,13376	0,00238	0,77543		
		Jul	0,06602	0,05402				
6	Garmisch	Mrz	0,09137	0,09661				
		Apr	0,00163	0,17904	0,02187	1,02727	$\delta^{18}O$: 2006,	A L P E N
		Mai	0,00152	0,12738	0,01280	0,95241	$\delta^{2}H$: 2005-06	
		Jun	0,01195	0,09504	0,01775	0,57093		
7	Stuttgart	Jun	0,02206	0,08014	0,02102	0,68553	–	
		Sep	0,00691	-0,11507	0,01810	-0,76507		
		Nov	0,02558	-0,12754	0,05099	-0,99846		S Ü D W E S T
8	Würzburg	Jun	0,00304	0,10882	0,01016	0,85955	Januar	
		Sep	0,04677	-0,07467	0,05108	-0,53310	und	
		Nov	0,00490	-0,09856	0,00864	-0,73964	Mai 1988	

8 Synthese und Diskussion der Ergebnisse

8.1 Einflusszonen als Erklärungsansatz

In den vorherigen Abschnitten wurden Trends der Wetterlagen und Isotopenzeitreihen beschrieben. Durch die zeitliche und räumliche Divergenz beider Datensätze war es nun nicht möglich, Veränderungen eines hydrologischen Parameters, nämlich die der Isotopenzeitreihen, zweifelsfrei mit Veränderungen einer meteorologischen Klassifikation, einer Wetterlagenverteilung, zu erklären. Die Datensätze weisen einen zeitlichen Versatz auf. So werden Wetterlagen täglich klassifiziert, die Zeitreihen der Isotopen liegen jedoch mit Monatsmittelwerten aus Sammelproben vor. Daher wurden die Trendtests der Wetterlagen verstärkt auf Monatsbasis – teilweise auch für Jahreszeiten – durchgeführt. Dadurch können nun in beiden Zeitreihen Veränderungen innerhalb eines einzelnen Monats oder eines Zeitabschnittes von etwa drei Monaten analysiert und in Bezug gesetzt werden.

Eine weitere Schwierigkeit stellte die räumliche Inhomogenität der beiden Datensätze dar. Die Zeitreihen der Isotopen basieren auf stationären Sammelproben, also nicht-flächendetallierten Messungen. Die Standorte des GNIP-Messnetzes repräsentieren aber dennoch ihre Umgebung; so sind beispielsweise küstennahe Stationen (Cuxhaven, Emmerich) wie auch eine küstenferne Station (Garmisch-Partenkirchen), welche Isotopenzeitreihen für den Alpenraum abbilden kann, vertreten. Durch die Anzahl und räumliche Verteilung der Stationen in Deuschland wurde im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass Veränderungen der Isotopenzeitreihen abgebildet werden können. Da jedoch Wetterlagen für Deutschland ohne weitere räumliche Differenzierung klassifiziert wurden, erschien eine Gruppierung von Isotopenstationen in verschiedene Zonen sinnvoll. Die Zuweisung der Stationen in eine Zone ist dabei an mindestens eines der folgenden Kriterien gebunden:

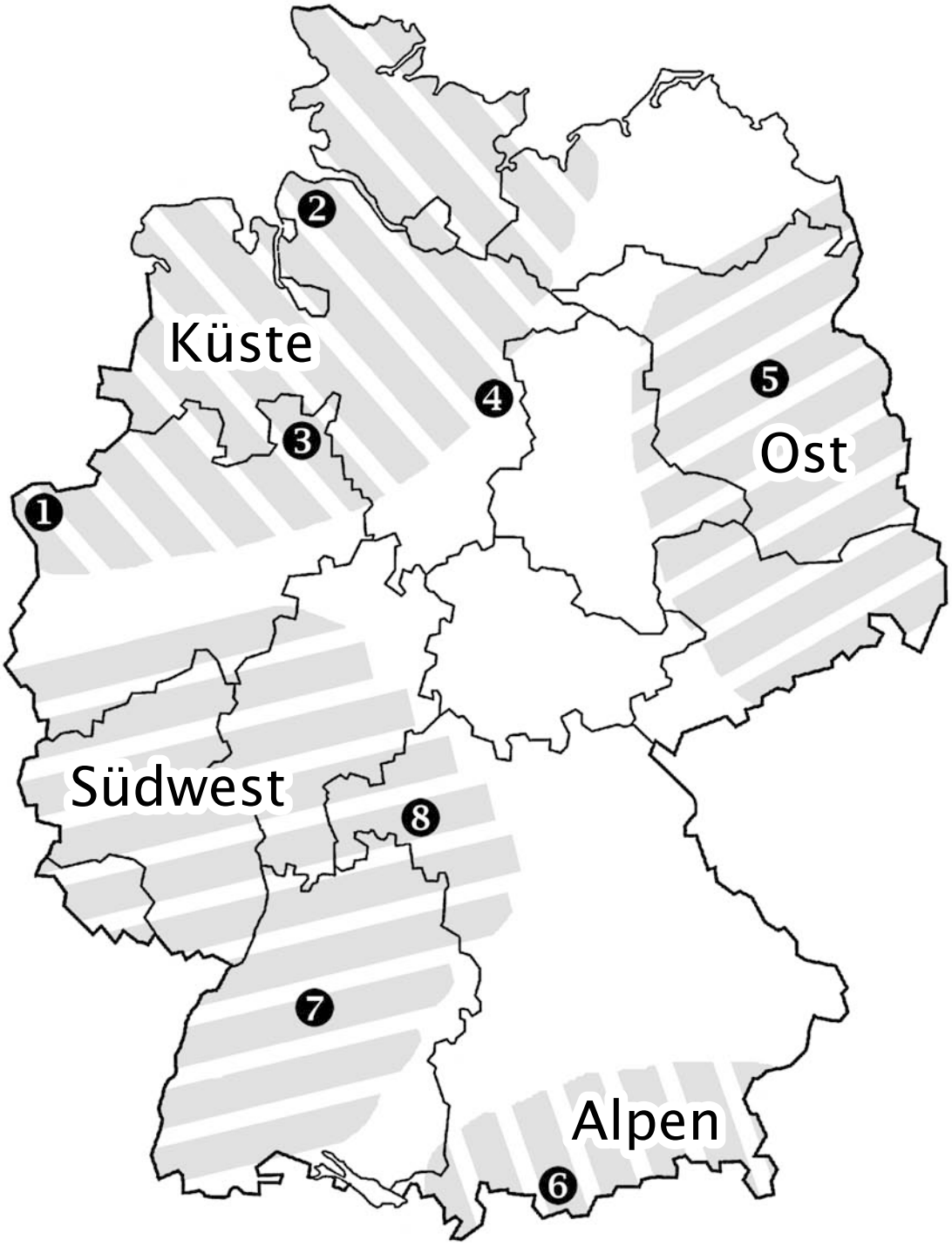

Abbildung 23: Isotopenstationen und Wetterlageneinflusszonen. Die Nummern (1)–(8) zeigen die Stationsstandorte des GNIP-Isotopenmessnetzes (vgl. Tab. 19, S. 94) innerhalb der vier Einflusszonen Küste, Ost, Alpen sowie Südwest.

- Die Stationen können innerhalb eines gleichartig gegliederten und geographisch zusammenhängendem Gebiet gruppiert werden.
- Veränderungsmuster der Isotopenzeitreihen der Station A können mit denen der Station B innerhalb einer Zone verknüpft werden.
- Die Wirksamkeit der Wetterlagen und die ihrer Parameter Anströmrichtung, Zyklonalität und/oder Feuchte kann für mehrere Stationen als gleichartig angesehen werden.

Die vier nach diesen Kriterien erstellten Einflusszonen sind in Abbildung 23 dargestellt, eine Übersicht gibt auch Tabelle 19 (S. 94).

Die Küstenzone in Nordwestdeutschland fasst die meisten Isotopenstationen (Nr. 1–4) zusammen. Emmerich, Cuxhaven, Bad Salzuflen und Braunschweig zeigen nach den Trendtests stets signifikante bis höchst signifikante positive Veränderungen im Monat Juni (Ausnahme: Cuxhaven und Bad Salzuflen bei δ^2H-Werte). In diesem Monat werden die Isotope dieser Stationen also nachweislich schwerer. Für die weiter im Landesinneren gelegenen Stationen Braunschweig und Bad Salzuflen tritt dieser Trend auch für die Monate Januar und Februar, also im Winter, auf. Negative Trends, also Veränderung hin zu leichteren Isotopenwerte im Niederschlag, sind für die beiden nördlichen Stationen Cuxhaven ($\delta^{18}O$) und Braunschweig (δ^2H) im November zu verzeichnen. Alle Stationen der Zone **Küste** befinden sich im homogen gegliederten norddeutschen Flachland und können zur Interpretation der Ergebnisse nordwestlichen Wetterlagenanströmungen zugeordnet werden. Nichtsdestotrotz stellt sich heraus, dass die Station Emmerich ganz im Westen der Zone Küste im November wie Dezember jeweils signifikante Trends hin zu leichteren $\delta^{18}O$-Werten zeigt. Etwa im gleichen Zeitraum (September und November) ist in der Zone Südwest (siehe unten) der gleiche Effekt bei $\delta^{18}O$ und δ^2H festzustellen. Dies könnte auf eine Überlappung der beiden Zonen im Spätherbst deuten.

Im Gegensatz zur Küstenregion werden die Einflusszonen **Ost** und **Alpen** jeweils nur durch eine Isotopenstation repräsentiert – Berlin (Nr. 5) bzw. Garmisch-Partenkirchen (Nr. 6). Dennoch ist die Ausweisung dieser Zonen notwendig, da sich die Stationen in geographisch interessanter Lage befinden. Die Station Garmisch-Partenkirchen repräsentiert den Alpennordrand mit zahlreichen Besonderheiten innerhalb der Wetterlagenstatistik (Föhnlagen, Niederschläge bei SO-Wetterlagen abhängig von Zyklonalität). Berlin als die östlichste Station in der Westwindzone kann NO-Anströmungen der Wetterlagen und den Kontinentaleffekt der Isotopenhydrologie abbilden. Hierbei zeigt sich, dass ein Grundgedanke der Ausweisung von

Einflusszonen war, möglichst flächendeckend für ganz Deutschland Zonen auszuweisen, aber auch den Erklärungsanteil der Stationen innerhalb einer Zone nicht zu weit zu reduzieren.

Die Stationen Berlin und Garmisch-Partenkirchen zeigen zwischen März und Juni kontinuierlich in allen Monaten Trends auf. Dabei verändern sich $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ immer mit positivem Sen-Slope, die Isotope im Niederschlag werden also im Frühjahr und Frühsommer schwerer. In Berlin gilt dies auch für den Monat Juli.

Die beiden letzten Isotopenstationen Stuttgart (Nr. 7) und Würzburg (Nr.8) werden zur Zone **Südwest** zusammengefasst (vgl. auch Tab. 19, S. 94). Beide Isotopenzeitreihen zeigen ausschließlich in den Monaten Juni, September und November Trends bei $\delta^{18}O$ sowie $\delta^{2}H$. Dabei stimmt die Trendrichtung jeweils überein: Im Juni findet man hoch bis höchst signifikante positive Trends, im September und November signifikante bis höchst signifikante negative Trends. Zudem liegen beide Stationen räumlich nahe zusammen und befinden sich bei (süd-)westlicher Wetterlagenanströmung gleichermaßen im Leeschatten der Mittelgebirge Schwarzwald und Vogesen.

Durch die Ausweisung der aufgeführten Einflusszonen kann dennoch nicht ganz Deutschland räumlich aufgelöst werden (vgl. Abb. 23). Große Teile Bayerns und Bereiche Mitteldeutschlands werden nicht erfasst. In diesen Gebieten liegen keine Werte aus Isotopenzeitreihen vor. Dennoch ist mit der beschriebenen Methodik ein Transfer von Wetterlagenwirksamkeit und Wetterlagentrends hin zu bekannten, signifikanten Veränderungen von $\delta^{18}O$- und $\delta^{2}H$-Werten möglich.

8.2 Verknüpfung der Trendanalysen

Wie bisher gezeigt wurde, weisen sowohl die Wetterlagen als auch die Isotopenzeitreihen signifikante, teils höchst signifikante Trends nach dem Trendtest von Mann-Kendall auf. Beide Untersuchungen können als voneinander unabhängige Trendanalysen angesehen werden. Eine Trendanalyse für einzelne Wetterlagen erschien dabei jedoch fragwürdig, da deren Wirksamkeit auf Einflusszonen bedingt durch geringe Häufigkeit der Wetterlage selbst nicht als maßgeblich erschien. Da gleichzeitig die zeitliche und räumliche Verschiedenartigkeit der zu analysierenden Zeitreihen überbrückt werden musste, erschien es sinnvoll die Trendtests der Wetterlagen auf deren Klassifikationsparameter zu reduzieren und auf Monate sowie Jahreszeiten auszuweiten. Diese Überlegung mündete in der Ausweisung von Einflusszonen (siehe oben), welche sowohl im Sinne der Wetterlagenklassifikation interpretiert, aber auch durch gleichartige Trendmuster innerhalb der Isotopenzeitreihen GNIP-Stationen in Gruppen zusammengefasst werden können.

Neben der Festlegung von Einflusszonen kann ein weiterer Aspekt bei der Synthese der Trendergebnisse helfen. Die Veränderungen der Isotopenzeitreihen äußern sich in den Trends hin zu leichteren oder schwereren $\delta^{18}O$- bzw. $\delta^{2}H$-Werten. Die Ursache für diese Veränderungen wird durch den Grad des Fraktionierungsprozesses bedingt, welchen Isotope durch verschiedene Effekte erfahren (vgl. Kap. 4.1.2, ab S. 42). Diese Effekte und vor allem deren Zu- und Abnahme können durch die Trends der Wetterlagen teilweise erklärt werden.

Die eindeutigste Verbindung zwischen beiden Trendergebnissen begründet sich in der verifizierten Zunahme der troposphärischen Feuchte. Die sommerliche Zunahme ist schon aus der Wetterlagenstatistik zu erkennen. Die Verteilung der relativen Häufigkeiten zeigt mehrheitlich feucht klassifizierte und ansteigende Anteile in den Monaten Mai bis August, und dies, obwohl die Ausweisung der Feuchte von Wetterlagen durch einen monatlichen Bezugsmittelwert aus den Wetterlagen selbst vorgenommen wird. Wetterlagen des Zeitraum 2001–2007 werden für diesen Mittelwert nicht herangezogen, deren Häufigkeitsverteilung zeigt sogar von April bis November (Ausnahme September) mehrheitlich feucht klassifizierte Wetterlagen, was als eine Art Trend für die letzten Jahre hin zu feuchteren Wetterlagen verstanden werden kann.

Die zusätzlich ins System eingeführte Feuchte beruht auf einer Temperaturerhöhung, welche auch in anderen Zusammenhängen häufig als Effekt des Klimawandels beschrieben wird. Gleichzeitig ist von mehr Energie innerhalb des atmosphärischen

Systems und damit auch mit erhöhter troposphärischer Dynamik auszugehen. Für Bissolli (2001) zeigt allein schon die statistische Auswertung von Wetterlagenzeitreihen, dass Wetterlagenklassifikationen eine große Hilfe sind, um bestimmte wetterlagenabhängige Vorgänge, die offenbar klimarelevant sind, von anderen Mechanismen trennen zu können.

Greift man nun die Fragestellung dieser Arbeit erneut auf, so können gezeigte Veränderungen in den Wetterlagen als Beweis für die Zufuhr von mehr Feuchte nach Deutschland, und damit als Einflussfaktor auf die Isotopenzeitreihen angesehen werden. Die Anströmrichtungen aller Wetterlagen sind überwiegend westlich orientiert, daher kann mittels dieses Instrumentes ein Transportweg der Feuchte nach Deutschland nachvollzogen werden. Die Zyklonalitätsverteilung zeigt, dass hochreichend antizyklonale und hochreichend zyklonale Wetterlagen im Jahresverlauf deutlich überwiegen. Die Wetterlagenklassifikationsmethode verknüpft dabei genau diejenigen Lagen mit herangeführten Niederschlägen, welche hochreichende Zyklonalität aufweisen.

Weitere Hinweise für die Zunahme von Feuchte in der Troposphäre liefert die Trendanalyse der Wetterlagen mit Augenmerk auf einzelne Parameter. Nahezu alle signifikanten Trends einzelner SW-Wetterlagen des Zeitraums 1981–2007 zeigen Zunahmen der gewichtigen, feuchten Wetterlagen. Bei häufig klassifizierten, trockenen Wetterlagen kann dagegen von mehrheitlich negativen Trends gesprochen werden. Erscheinen bisherige Ergebnisse als Indizien, so zeigen Trendtests gruppierter Wetterlagen weitere signifikantere Veränderungen, welche nun auch auf die Trendtest der Isotopenzeitreihen übertragen werden können.

Das deutlichste Trendmuster bei der Untersuchung der Anströmrichtung ist in den Monaten Dezember und Januar zu finden. In diesem Zeitraum nehmen vor allem feuchte NW-Lagen wie auch nordöstliche Wetterlagen signifikant zu. Im Bereich der südlichen Einflusszone *Küste* (Station Emmerich) sind im November und Dezember Trends zu leichteren Isotopen feststellbar. Die Veränderungen der Wetterlagen bietet hierbei Grund zur Annahme, dass weniger Feuchte in die südlichen Zonenbereiche geführt wird. Dies kann die stärkere Fraktionierung erklären. Die relative Häufigkeit für trockene Wetterlagen im Dezember lag 2001–2007 im Durchschnitt bei etwa 55%, also etwa 5% über dem Mittelwert der Zeitreihe 1981–2000.

Leichter werdende Isotopenwerte sind darüber hinaus nur noch in der Einflusszone *Südwest* verzeichnet. Im September nehmen SW-Lagen hoch signifikant ab, was für diese Einflusszone weniger Transfer von Feuchte aus Südwesten bedeutet kann. Zusätzlich beinhaltet die Wetterlagenstatistik die Information, dass Septem-

ber der Monat mit der häufigsten Ausweisung trockener Wetterlagen ist, 2001–2007 durchschnittlich mit über 62%. Jedoch werden die $\delta^{18}O$- und $\delta^{2}H$-Werte dieser Zone auch im November leichter, obwohl hier tendenziell eine Zunahme feuchter und eine Abnahme trockener SW-Lagen auftritt. Über die Veränderungen der durchschnittlichen Monatstemperatur für diese Zone im September und November, könnte ersichtlich werden, ob in der Atmosphäre mehr oder weniger niederschlagsfähiges Wasser in Form von Wasserdampf ohne Niederschlagsbildung auftritt.

Eine weitere Erklärung für leichter werdende Werte könnte im auftretenden Höheneffekt bei der Fraktionierung von anströmenden SW-Lagen liegen. Nehmen diese Wetterlagen ab, wie im Monat September, so verlieren auch die Anteile leichterer Isotope in der Einflusszone Südwest an Gewichtung in denjenigen Sammelproben, welche im Leeschatten von Mittelgebirgen aufgefangen werden. Insgesamt lassen sich die signifikanten Veränderungen hin zu leichteren Isotopenwerten in dieser Einflusszone nur schwer durch Wetterlagenveränderungen erklären.

Alle weiteren Trends in den Isotopenzeitreihen zeigen positive Sen-Slope-Werte, also eine Veränderung hin zu schwereren $\delta^{18}O$- und $\delta^{2}H$-Werten. Folglich liegt ein reduzierter Fraktionierungsprozess vor, der auf Zunahme von Feuchte im Sinne von niederschlagsfähigem Wasser in der Troposphäre zurückzuführen ist. Für die schwerer werdenden Isotopenwerte gibt es mehrere Erklärungsansätze aus der Wetterlagentrendstatistik.

Die Vielzahl positiver Isotopentrends erscheint im Monat Juni. In allen vier Einflusszonen sind dabei hoch signifikante Trends erkennbar, auch in den Zeitreihen aller acht Stationen selbst. Die Anströmrichtungen der Wetterlagen bieten zwar keinerlei signifikanter Veränderungen, aber alle Trends einzelner Wetterlagen im Sommer (Juni-August) zeigen anwachsende Häufigkeiten bei feuchten und einen Rückgang bei trockenen Wetterlagen. Die relative Gesamthäufigkeit der Sommerwetterlagen mit diesem Trendmuster beträgt etwa 27%, also etwa acht Tage je Monat. Die Veränderungen des Kontinentaleffekts sind bei der Isotopenzeitreihe der Station Berlin zu erkennen. Hier liegt ein höchst signifikanter Trend mit dem größten Sen-Slope (über +13% pro Jahr) des Monats Juni vor. Die Zunahme der Feuchte begründet die Reduzierung der Fraktionierung und trägt damit über den Kontinentaleffekt mehr schwere Isotope auf den Kontinent als zuvor.

Trends der Zeitreihen im Monat Juli treten in den Einflusszonen Küste und Ost auf und sind jeweils signifikante, aber geringfügige Veränderungen hin zu schwereren Isotopen. Im Juli ist auch eine hochsignifikante Zunahme feuchter, und eine signifikante Abnahme trockener Wetterlagen für Deutschland errechnet worden,

dies kann ein Erklärungsansatz sein. Im gleichen Monat häufen sich tendenziell südlich anströmende Wetterlagen, dieser Effekt ist jedoch nicht signifikant. Gleichzeitig stellt sich bei feuchten Ostlagen im Juli eine hoch signifikante Abnahme ein. Dies führt zur Annahme, dass der Rückgang feuchter Ostlagen durch andere Feuchte herantragende Wetterlagen kompensiert wird oder die Wirksamkeit von Ostlagen im Juli auf die Isotopenstation Berlin abnimmt, denn sonst wären hier keine schwerer werdenden $\delta^{18}O$- und $\delta^{2}H$-Werte zu erwarten.

Zusammenfassend spiegelt sich die Zunahme der Feuchte im mittleren Jahresabschnitt in allen Isotopenzeitreihen wieder.

Die Einflusszone Alpen zeigt diesen Prozess stellvertretend für andere Zonen in den Monaten März bis Juni. Hier liegen mehrheitlich höchst signifikante Veränderungen vor, welche schwerere Isotopewerte aufzeigen. Werden für diese Zone Trends der Wetterlagen als Erklärungsansatz herangezogen, weisen einzelne feuchte SO-Lagen signifikante, aber wenig gewichtige negative Trends auf. Die Isotopenwerte müssten demnach leichter werden. Auf der anderen Seite erscheint es nicht abwegig, die Abnahme dieser SO-Lagen mit der Abnahme von Föhnsituationen am Alpennordrand in Verbindung zu bringen. Dies könnte bedeuten, dass in dieser Zone weniger warme, trockene Luft eingeführt wird. Demzufolge erhöht sich die Wirksamkeit andere Wetterlagengruppen auf diese Zone, und damit auch die Möglichkeit für mehr Feuchtetransport an den Alpennordrand. Ein Trend hin zu schwereren Isotopenwerte erscheint so plausibel.

9 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es Veränderungen der Isotopenzeitreihen mit Hilfe von Wetterlagen-Trendtests nach Mann-Kendall zu begründen. Es zeigte sich, dass hierfür eine Ursache-Wirkungsbeziehung aufgestellt werden kann. Der Erklärungsanteil dieser Beziehung bleibt ungesichert, jedoch kann nach Bissolli (2001) davon ausgegangen werden, dass bestimmte wetterlagenabhängige Vorgänge als klimabestimmend anzusehen sind, und diese folglich Veränderungen der Isotopenwerte im Niederschlag Deutschlands begründen können.

Bei der Untersuchung war es hilfreich, dass Berechnungen der Trends für die Zeitreihen der $\delta^{18}O$- und $\delta^{2}H$-Werte bereits vorlagen und ebenfalls mit dem Mann-Kendall-Trendtest untersucht worden sind. Zudem stimmten die Länge und Zeiträume der Datensätze in etwa überein. Die Verschiedenheit der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Datensätze konnte durch die Anpassung der Wetterlagenanalyse auf Monatsbasis und der Ausweisung von Einflusszonen (*zones of influence)* überbrückt werden.

Die Analyse der Isotopenzeitreihen ergaben für drei Einflusszonen mehrheitlich Trends zu schwerer werdenden Isotopen, nur die Zone Südwest wies im Herbst leichter werdende Isotopenwerte für $\delta^{18}O$ und $\delta^{2}H$ auf. Es konnte gezeigt werden, dass Wetterlagenstatistik als probates Mittel anzusehen ist, um die Veränderungen der Isotopenzeitreihen in den verschiedenen Einflusszonen zu analysieren.

Es stellte sich heraus, dass Wetterlagestatistik bisher kaum als Werkzeug zur Analyse der Isotopenzeitreihen in Deutschland genutzt wurde. Daher erschien es im Rahmen dieser Arbeit sehr sinnvoll, sich zunächst einen ausführlicheren Überblick zum Stand der Forschung (Kap. 2), der Klassifikationsmethodik für Wetterlagen in Deutschland (Kap. 3) und im Besonderen zur beschreibenden Wetterlagenstatistik (Kap. 6) zu verschaffen.

Neben den eigentlichen Wetterlagentrendtests, fanden sich schon in der beschreibenden Wetterlagenstatistik Ursachen für die Trends hin zu schweren Isotopen, wie sie bei fünf der acht Stationen gänzlich festgestellt worden sind. Im Sommer ist von einer deutlichen Zunahme feuchter Wetterlagen auszugehen. Die Statistik zeigt

überdies, dass westlich anströmende Wetterlagen genau wie hochreichende Lagen im Jahresverlauf deutlich überwiegen. Durch diese Häufigkeitsverteilung sind Vorraussetzungen für verstärkten Feuchtetransport im Sinne von niederschlagsfähigem Wasser nach Deutschland gegeben.

Die Trenduntersuchungen nach Mann-Kendall waren vor allem für Wetterlagengruppen aussagekräftig, Interpretationen der Trends einzelner Wetterlagen erschienen weniger sinnvoll. Darüber hinaus erbrachten genauere Trenduntersuchungen der Klassifikationsparameter Anströmrichtung und Feuchte weiterführende Ergebnisse mit sich, die Zyklonalität von Wetterlagen konnte hingegen wenig zum Verständnis der Veränderungen von Isotopenzeitreihen beitragen. Alle Einflusszonen konnten für bestimmte Monate und Jahresabschnitte mit den betreffenden Anströmrichtungen in Verbindung gesetzt werden. Die Zunahme der Feuchte zeigte sich sowohl in der Wetterlagenstatistik wie auch innerhalb der Trendtests und kam auch in zugehörigen Isotopenzeitreihen zum Ausdruck.

Um weitere Arbeiten auf diesem Gebiet voranzutreiben, erscheint es sinnvoll den vorgestellten Wetterlagenrechner zu automatisieren und diesen stetig mit dem weiterhin frei verfügbaren Datensatz des DWD zu aktualisieren.

Eine Vertiefung der Interpretation von Niederschlagskartierungen und Wetterlagen wäre wünschenswert und auf alle 40 Wetterlagenklassen ausweitbar. Hierfür liegen sowohl Daten der Wetterlagen als auch der Niederschlagshöhen in Deutschland in genügender langer Zeitreihe vor. Insgesamt ist ein besseres Verständnis von Wetterlagen und deren Niederschlagsgenese in Deutschland nötig. Die Zyklonalität von Wetterlagen sollte vor allem in Hinblick auf ihr tatsächliches Niederschalgsdargebot in Deutschland näher untersucht werden. Die aufgezeigten Ergebnisse könnten durch weitere statistische Methoden wie eine Korrelationsanalyse zwischen Isotopen- und Wetterlagenzeitreihen überprüft und gesichert werden.

Der Parameter *niederschlagsfähiges Wasser* – als meteorologische Größe für die Feuchteklassifikation – scheint für hydrologische Fragestellungen und auch im Sinne der Untersuchungen der Klimaveränderung eine wichtige Steuergröße zu sein. Die Zunahme der troposphärischen Feuchte, also die Veränderung des niederschlagsfähigen Wassers, lässt sich über Wetterlagenstatistik qualitativ gut abschätzen und auch in Zukunft weiter beobachten.

A Tabellen

DWD-Datensatz Wetterlagen

Im Folgenden ist der genutzte Datensatz des DWD aufgeführt. In der Tabelle sind für alle Monate zwischen Januar 1980 und Dezember 2007 die täglichen Wetterlagen 1–40 aufgetragen. 0 steht für fehlende Daten oder fehlende Monatstage bei Monaten mit weniger als 31 Tagen.

Tag Monat	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	26	27	28	29	30	31
Jan 80	35	15	15	5	35	31	31	11	11	31	12	12	1	4	1	1	1	3	3	24	4	39	39	40	15	15	15	5	5	29	29
Feb 80	35	29	14	20	39	39	39	10	29	29	20	10	10	10	10	40	5	1	3	3	3	13	33	23	21	1	2	5	5	0	0
Mrz 80	5	5	15	5	5	39	39	38	15	5	35	5	39	33	33	23	21	21	31	31	31	24	21	23	21	14	39	29	39	15	20
Apr 80	29	39	35	12	12	12	1	35	15	15	5	1	1	4	23	21	21	20	35	31	12	12	12	32	31	31	31	31	31	23	0
Mai 80	22	1	11	31	12	33	39	34	1	1	1	2	1	2	12	12	12	22	2	1	25	5	1	15	5	4	24	29	39	14	14
Jun 80	15	15	10	10	7	10	26	38	28	38	36	9	9	29	19	10	39	19	9	14	14	14	14	14	34	14	15	15	35	35	0
Jul 80	34	31	15	1	34	14	34	39	36	31	15	14	14	34	39	15	15	14	9	39	35	5	1	5	1	26	26	6	36	36	11
Aug 80	4	29	29	9	9	4	9	39	4	5	9	39	15	6	26	26	6	6	10	10	20	15	15	15	5	4	26	9	9	39	35
Sep 80	15	2	5	5	29	15	1	24	14	15	35	10	14	14	5	5	29	4	29	29	29	29	6	9	5	5	5	5	5	5	0
Okt 80	5	5	5	25	15	19	39	14	14	14	31	31	11	11	34	29	38	31	14	15	5	29	39	40	15	5	10	10	15	5	5
Nov 80	12	12	12	13	13	33	31	4	5	5	15	35	5	5	9	9	9	40	5	10	9	10	9	9	29	35	4	31	32	12	0
Dez 80	2	5	35	35	15	35	15	5	5	10	10	5	9	10	20	15	5	34	14	39	31	5	10	10	9	15	12	1	5	10	10
Jan 81	15	10	40	35	15	35	15	2	6	31	1	4	15	10	15	15	34	15	35	12	15	2	1	1	5	15	5	2	1	1	10
Feb 81	5	5	9	40	15	10	10	9	9	36	15	15	2	5	5	5	12	12	22	31	11	13	33	33	3	23	23	33	0	0	0
Mrz 81	39	39	39	5	14	29	9	9	10	10	29	30	9	39	35	34	34	11	5	4	9	29	9	10	10	39	4	24	38	38	28
Apr 81	28	26	26	40	16	11	9	10	10	6	26	29	6	1	5	5	12	12	31	11	5	5	15	14	24	24	31	15	5	10	0
Mai 81	15	15	15	34	15	5	1	29	28	28	38	38	28	28	28	29	19	14	29	9	29	9	9	39	39	39	36	14	20	9	29
Jun 81	29	29	29	19	10	9	5	9	29	14	9	10	5	10	10	15	15	15	15	15	31	12	2	16	36	29	29	29	36	14	0
Jul 81	5	4	39	15	4	9	10	6	26	26	29	19	19	15	15	10	35	11	12	15	10	4	39	34	34	15	35	5	10	15	5
Aug 81	29	9	9	6	26	26	29	29	29	36	16	7	6	6	10	40	15	5	15	39	15	15	15	5	5	5	5	5	5	5	35
Sep 81	11	15	12	1	1	1	1	30	19	6	6	26	39	15	5	30	5	26	19	29	29	29	19	4	39	29	38	18	16	6	0
Okt 81	8	28	39	34	19	29	14	9	9	14	14	14	15	14	39	4	9	40	10	29	34	14	11	15	34	34	1	14	29	39	30
Nov 81	10	10	10	10	5	15	15	15	12	2	10	5	5	15	12	1	4	10	9	9	9	10	9	15	15	5	30	15	15	40	0
Dez 81	15	15	7	30	15	35	35	35	15	15	39	15	15	34	15	15	15	34	15	15	34	34	34	31	15	15	4	34	39	39	39
Jan 82	9	10	30	39	9	15	15	11	35	5	30	5	5	1	4	8	4	4	9	6	10	5	15	15	10	30	40	5	20	10	5
Feb 82	5	1	1	1	5	10	10	39	10	6	9	9	9	29	38	31	26	21	12	2	2	13	31	11	11	2	1	10	0	0	0
Mrz 82	10	5	10	40	15	2	3	23	14	39	15	4	15	5	4	34	39	34	11	31	11	11	11	2	2	1	4	39	40	36	2
Apr 82	3	29	19	5	24	29	19	40	15	15	15	15	15	1	1	1	2	12	2	5	5	5	1	12	2	2	5	5	35	15	0
Mai 82	5	14	24	24	39	14	34	34	14	14	15	5	5	5	1	29	29	29	9	9	10	9	39	15	4	4	29	9	5	3	23
Jun 82	29	28	28	28	26	9	10	10	30	5	29	39	35	15	5	15	5	25	14	14	4	9	39	14	9	39	19	10	15	14	0
Jul 82	5	9	29	14	14	19	5	5	1	1	1	26	26	26	29	9	19	16	16	26	29	10	6	26	6	20	12	12	1	6	26
Aug 82	6	28	38	36	36	38	36	6	10	10	4	29	10	14	9	9	19	9	14	14	14	5	5	15	5	29	19	14	5	24	34
Sep 82	5	5	4	5	9	39	10	9	5	1	5	4	5	1	1	1	4	29	9	9	9	9	14	4	29	29	4	4	4	29	0
Okt 82	6	8	21	3	38	38	36	39	31	34	39	39	39	39	35	5	9	29	9	9	9	29	29	16	4	10	9	1	1	4	4
Nov 82	10	9	9	10	1	3	23	29	39	9	9	9	39	14	11	4	15	10	5	5	4	9	9	29	9	29	29	9	1	2	0
Dez 82	3	28	3	3	4	30	10	29	39	39	35	35	11	5	30	19	39	14	4	39	34	14	11	1	10	6	10	15	5	2	5
Jan 83	10	5	10	39	10	10	14	15	5	5	10	4	29	15	40	10	10	14	15	5	10	5	5	1	10	10	10	10	10	29	5
Feb 83	40	15	35	5	34	31	31	31	33	11	12	12	1	32	2	2	2	1	5	5	15	2	1	1	4	29	39	39	0	0	0
Mrz 83	31	11	2	1	10	10	10	10	10	10	5	5	1	9	39	6	9	10	40	10	9	35	4	39	14	35	14	34	11	34	19
Apr 83	38	36	31	14	14	39	34	39	19	9	39	31	15	15	5	5	29	29	29	14	28	9	29	19	29	29	39	39	39	19	0
Mai 83	39	11	34	34	15	1	29	39	16	4	39	39	9	19	29	38	39	14	14	4	39	14	8	38	36	36	31	14	34	14	4
Jun 83	29	9	9	9	20	5	1	24	10	9	10	4	6	6	15	15	15	12	2	7	28	26	21	24	9	9	39	15	5	34	0

Jul 83	14	5	4	9	6	28	28	6	7	2	7	10	10	5	5	5	9	29	9	15	5	5	6	26	6	29	29	9	10	5	4
Aug 83	29	14	15	15	40	31	17	3	16	16	1	10	15	5	4	29	10	1	6	28	29	26	29	26	27	6	1	25	1	1	3
Sep 83	39	9	39	15	5	5	15	4	39	29	39	31	14	29	29	39	14	9	9	14	9	14	5	10	5	1	1	1	21	25	0
Okt 83	5	10	10	9	9	15	9	14	15	9	14	5	4	9	19	39	14	10	10	5	15	1	1	5	5	10	9	25	11	4	5
Nov 83	10	6	29	9	9	6	4	9	6	6	5	2	15	12	15	5	2	5	5	5	15	5	5	4	9	39	40	20	15	15	0
Dez 83	2	2	2	1	5	15	15	1	29	35	15	1	5	4	3	31	29	39	39	9	39	9	40	10	29	40	10	10	10	10	10
Jan 84	10	4	19	35	5	5	30	35	35	5	10	39	9	29	14	5	40	15	34	35	11	31	34	31	15	4	39	39	19	39	39
Feb 84	14	39	39	20	10	40	40	40	12	2	2	2	2	2	12	12	1	12	33	34	24	34	31	12	38	38	36	11	1	0	0
Mrz 84	6	39	31	2	5	5	5	15	12	31	11	13	33	23	21	21	21	1	1	31	31	21	4	24	39	39	34	39	39	11	15
Apr 84	34	36	36	18	36	33	16	16	11	13	6	15	1	4	24	14	11	1	1	5	5	30	5	2	2	5	2	12	13	33	0
Mai 84	31	39	39	19	29	29	19	15	5	11	13	33	2	38	38	38	39	14	29	38	36	39	36	36	36	29	39	31	36	31	31
Jun 84	19	9	28	38	36	36	36	35	5	5	5	5	10	40	15	5	5	5	5	9	29	9	15	15	15	5	4	35	15	15	0
Jul 84	4	34	15	15	15	5	5	1	24	9	29	19	19	19	39	15	15	15	15	15	5	15	15	15	5	15	15	10	10	4	29
Aug 84	19	9	29	9	39	14	14	38	26	36	36	6	1	5	5	5	5	5	5	5	1	21	29	36	36	10	5	4	4	10	10
Sep 84	10	10	29	29	34	11	31	31	39	35	15	15	5	29	36	37	6	26	9	9	29	14	34	35	35	35	15	5	29	29	0
Okt 84	29	39	14	14	39	36	5	10	9	9	9	5	10	5	5	2	4	9	9	14	14	9	29	4	29	39	14	5	10	6	4
Nov 84	4	4	24	14	9	29	29	29	26	6	6	23	23	23	38	38	38	36	39	20	39	29	19	19	9	40	1	4	9	4	0
Dez 84	28	28	8	9	9	9	5	4	15	10	10	6	1	26	21	34	34	39	19	9	40	5	6	26	11	24	31	11	11	12	1
Jan 85	31	32	15	35	12	12	31	11	11	15	2	35	12	32	33	23	23	31	5	4	29	39	19	14	39	39	15	4	9	10	10
Feb 85	10	20	5	5	30	30	5	10	40	11	12	2	1	35	15	2	2	2	2	5	15	5	10	10	6	29	26	29	0	0	0
Mrz 85	29	39	9	29	29	39	19	16	15	5	32	1	1	15	14	34	31	12	33	33	38	38	39	39	14	39	40	15	5	29	39
Apr 85	9	20	10	29	29	39	9	39	39	40	9	31	39	34	15	10	1	2	1	24	24	21	31	15	15	15	35	31	15	15	0
Mai 85	35	35	15	24	4	28	38	36	36	39	38	38	28	38	8	6	6	26	28	26	26	39	19	4	9	8	28	29	6	2	2
Jun 85	12	2	1	29	29	29	29	14	14	34	15	34	35	34	15	15	15	15	24	36	11	39	11	16	15	14	15	15	4	4	0
Jul 85	20	15	5	1	6	1	5	15	5	15	5	9	9	29	19	9	4	4	19	39	15	4	5	5	5	6	19	9	39	19	19
Aug 85	14	10	4	14	39	14	11	5	1	29	4	4	9	28	9	9	14	11	9	4	5	9	4	29	19	11	1	1	1	1	4
Sep 85	39	4	39	15	29	15	15	15	15	5	5	5	24	9	19	4	10	10	29	9	10	9	10	9	10	5	10	5	5	5	0
Okt 85	9	9	9	9	9	9	9	39	14	10	10	5	5	7	2	2	2	5	2	1	1	2	2	2	3	3	5	5	1	1	4
Nov 85	15	35	4	4	29	15	35	9	29	40	15	15	12	12	1	11	12	13	33	33	38	31	31	1	15	15	34	34	15	10	0
Dez 85	10	9	10	9	29	40	29	29	29	16	12	11	9	10	10	10	10	30	15	10	10	4	4	19	29	39	35	34	34	1	1
Jan 86	11	39	39	15	24	31	15	1	5	6	9	15	40	19	35	35	15	30	9	5	9	14	39	35	35	15	5	34	23	23	38
Feb 86	38	38	33	31	31	1	12	32	11	2	2	12	12	33	33	33	31	31	31	11	15	15	11	12	12	12	1	1	0	0	0
Mrz 86	21	11	11	5	10	9	19	13	19	3	33	33	36	16	11	34	21	1	23	1	15	1	29	29	14	14	10	29	19	14	40
Apr 86	15	4	39	11	31	33	28	26	26	31	15	15	15	14	24	29	39	39	15	15	9	19	19	29	19	39	38	6	6	6	0
Mai 86	6	8	28	28	28	28	28	19	15	10	9	10	9	9	39	4	4	9	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jun 86	11	11	20	34	31	31	31	15	4	3	19	16	7	7	8	28	29	9	6	6	10	10	26	1	1	5	5	5	5	2	0
Jul 86	7	6	26	9	9	39	15	15	15	15	15	15	15	5	1	6	26	1	11	11	4	24	39	14	5	14	4	9	29	4	29
Aug 86	19	9	9	29	4	4	9	14	4	9	29	39	1	4	9	4	14	19	39	15	4	30	39	34	14	29	39	34	14	35	15
Sep 86	5	15	39	15	5	4	15	15	15	4	4	39	19	29	9	19	29	11	1	5	5	5	10	5	1	1	5	1	1	1	0
Okt 86	1	4	5	5	1	10	10	5	5	4	4	3	24	29	29	6	1	4	39	39	15	29	14	5	24	31	1	9	9	4	4
Nov 86	29	15	1	5	10	5	5	4	5	9	9	4	4	29	29	9	9	4	29	39	14	29	19	19	9	9	15	1	1	1	0
Dez 86	4	10	5	9	9	4	4	9	29	14	1	1	4	14	9	35	15	40	35	15	35	35	35	15	5	35	35	10	10	10	39
Jan 87	10	31	2	5	35	35	12	5	5	31	12	12	31	3	33	12	13	13	8	2	1	7	7	2	5	15	5	15	15	1	1
Feb 87	5	1	6	10	9	10	20	10	10	29	9	29	19	19	6	6	1	31	11	8	36	1	5	5	1	1	30	30	0	0	0

Mrz 87	10	26	15	15	15	12	12	1	2	2	12	1	31	2	31	35	5	39	35	14	14	34	4	29	29	9	9	39	15	15	2
Apr 87	13	8	38	38	36	20	9	9	29	6	11	31	11	5	7	5	5	5	10	19	15	2	1	1	10	10	2	1	29	9	0
Mai 87	9	9	39	36	6	12	2	2	1	35	4	39	14	14	34	11	14	19	11	11	31	13	2	11	11	5	34	15	15	5	30
Jun 87	5	15	9	39	15	9	19	39	14	14	24	9	39	19	39	15	15	15	4	36	11	14	15	20	5	39	10	10	6	9	0
Jul 87	9	9	9	10	2	1	29	9	15	5	9	40	15	5	29	29	39	19	19	39	36	39	19	19	15	15	35	15	4	39	15
Aug 87	15	15	15	15	15	14	14	14	39	15	15	15	5	29	15	10	10	9	10	10	10	29	29	29	38	39	39	10	10	5	5
Sep 87	24	9	6	6	9	14	9	14	4	9	10	29	9	9	4	9	29	9	9	10	9	29	29	19	14	40	15	15	12	2	0
Okt 87	1	1	31	23	29	29	4	39	4	28	9	36	14	14	29	29	9	1	1	26	26	19	39	34	19	1	6	28	28	26	6
Nov 87	40	20	2	2	5	5	5	5	30	6	9	39	39	14	14	39	20	10	10	15	15	30	38	36	36	38	16	11	11	1	0
Dez 87	12	12	3	24	26	26	15	12	11	5	5	5	11	5	5	30	40	30	20	10	10	10	5	1	9	9	10	10	10	10	9
Jan 88	19	9	19	39	9	29	39	15	6	9	39	4	4	29	29	29	39	9	9	9	19	39	15	29	39	39	39	29	39	36	20
Feb 88	29	19	19	9	19	39	19	39	9	34	34	39	15	6	1	24	40	10	15	12	5	5	35	31	32	32	7	35	35	0	0
Mrz 88	35	15	4	34	14	15	35	15	2	5	15	15	15	15	9	40	15	15	6	30	26	20	39	10	39	14	35	5	9	29	38
Apr 88	16	11	1	16	17	8	28	30	15	5	4	29	15	1	1	9	29	9	29	29	10	5	15	5	5	15	24	23	38	9	0
Mai 88	29	29	19	19	19	5	6	28	28	26	28	23	38	38	27	26	29	9	9	11	15	11	1	9	6	28	28	38	39	19	14
Jun 88	15	10	9	39	11	17	38	38	36	16	36	1	1	5	5	2	12	1	15	15	15	20	12	17	17	37	36	39	9	9	0
Jul 88	39	14	19	19	39	19	19	14	14	10	9	14	9	39	31	31	15	14	15	10	10	29	9	9	4	9	14	4	19	4	4
Aug 88	4	14	15	5	5	1	1	5	10	9	9	9	4	9	9	9	5	5	29	19	14	11	15	4	34	15	10	29	9	14	4
Sep 88	9	19	14	14	9	15	2	2	1	5	9	4	35	31	12	12	2	7	5	1	1	4	19	15	5	10	9	9	14	14	0
Okt 88	1	3	23	3	39	19	14	15	9	14	9	28	39	29	6	16	39	26	26	28	8	6	9	10	5	4	29	9	15	15	12
Nov 88	5	35	12	2	5	5	5	1	6	9	10	9	40	10	7	5	1	40	15	35	15	12	2	2	10	5	5	9	40	30	0
Dez 88	36	28	16	39	20	35	15	10	5	10	10	15	10	2	5	2	5	10	40	5	10	10	9	20	10	10	10	10	5	5	5
Jan 89	5	1	1	4	15	30	10	10	10	9	5	9	5	10	10	10	4	5	1	4	9	5	1	1	3	4	1	4	5	5	6
Feb 89	9	4	4	4	10	10	10	6	3	23	4	10	5	15	10	15	5	29	10	9	9	9	9	9	39	36	39	19	0	0	0
Mrz 89	39	20	39	10	10	6	29	26	10	10	10	10	29	5	39	29	40	14	9	9	19	10	15	10	5	5	1	29	10	9	9
Apr 89	16	11	31	38	38	39	39	39	4	29	9	29	28	28	6	26	37	15	31	34	39	36	5	24	29	38	14	11	11	12	0
Mai 89	1	7	2	2	5	15	5	5	4	9	9	39	14	15	1	1	1	1	6	2	2	3	3	3	21	21	21	1	5	29	14
Jun 89	14	4	34	31	11	14	14	14	14	4	1	2	2	2	5	5	2	7	2	5	26	36	6	6	5	9	29	14	9	14	0
Jul 89	39	36	12	8	7	6	29	39	39	19	16	5	15	15	5	15	5	35	5	5	5	6	30	36	36	6	6	5	4	29	15
Aug 89	15	15	15	5	4	9	29	20	10	9	9	10	4	9	9	29	9	4	1	9	9	10	5	5	15	20	36	35	15	2	5
Sep 89	1	15	12	12	5	2	2	23	23	21	26	1	29	19	19	10	9	9	29	9	9	29	9	6	16	15	11	1	12	2	0
Okt 89	5	5	2	2	5	4	35	32	15	15	5	10	9	35	15	10	1	4	9	29	9	9	9	10	9	9	9	29	39	40	10
Nov 89	9	9	29	19	39	16	11	9	14	4	4	1	0	0	0	0	3	3	24	21	10	35	15	35	15	15	5	2	1	1	0
Dez 89	1	1	1	1	5	5	5	5	2	5	15	4	29	29	40	29	19	9	39	29	9	39	4	10	4	1	21	22	11	31	31
Jan 90	14	5	1	0	15	1	4	4	5	4	10	9	5	4	10	10	9	5	5	10	10	9	9	19	29	19	14	39	9	9	9
Feb 90	9	19	9	5	4	4	9	39	5	4	19	39	20	40	40	14	10	9	9	9	9	6	4	9	9	39	0	20	0	0	0
Mrz 90	15	15	5	5	5	10	10	4	20	10	10	10	5	10	1	1	1	4	9	10	10	10	10	9	15	12	12	1	7	6	1
Apr 90	4	9	29	14	14	1	26	12	11	5	15	1	9	9	39	14	14	13	13	38	37	38	37	36	11	5	15	5	10	7	0
Mai 90	2	2	3	2	1	1	26	8	29	29	39	36	36	19	9	9	20	5	5	21	24	4	4	9	15	5	5	15	15	5	5
Jun 90	10	39	19	39	19	19	9	36	31	35	10	16	11	11	15	15	5	9	29	29	19	39	14	15	10	9	29	9	9	9	0
Jul 90	19	14	14	14	39	14	15	10	10	15	5	1	5	5	5	5	20	15	5	5	5	5	15	15	12	11	1	29	9	9	6
Aug 90	6	1	2	1	29	15	11	15	5	10	10	4	29	9	9	9	14	14	4	40	35	10	10	1	29	6	6	9	29	29	29
Sep 90	19	20	10	30	15	5	35	15	15	15	15	5	5	5	5	5	24	15	10	4	34	40	39	34	34	15	15	10	10	29	0
Okt 90	10	6	9	19	10	9	39	15	5	4	4	9	39	9	29	9	29	39	39	6	2	1	23	23	23	29	39	39	39	14	39

Nov 90	40	34	34	31	12	12	2	2	1	9	40	10	10	39	40	10	10	40	14	39	34	11	31	34	33	39	31	2	10	15	0
Dez 90	2	10	6	15	15	2	1	21	23	36	31	35	32	2	12	2	13	33	31	5	35	10	9	28	9	19	14	4	10	9	9
Jan 91	15	9	9	9	4	19	29	9	9	29	9	15	15	3	3	3	3	3	4	1	35	13	1	2	1	5	2	1	1	1	1
Feb 91	1	22	31	2	32	33	33	31	31	34	31	31	15	15	15	35	5	5	9	9	9	19	10	9	9	5	1	26	0	0	0
Mrz 91	29	39	9	9	29	29	28	29	29	9	6	6	6	9	10	6	28	6	10	10	29	19	19	16	8	7	12	12	12	1	10
Apr 91	10	10	9	9	9	4	19	15	5	1	1	3	31	32	1	5	12	11	12	15	15	34	11	11	31	31	31	31	11	36	0
Mai 91	36	11	31	11	31	31	11	11	11	33	6	15	10	5	15	15	12	12	5	10	10	5	15	15	5	15	12	2	2	2	25
Jun 91	35	4	34	14	14	34	39	15	9	19	14	9	19	14	9	20	14	14	14	14	4	9	9	19	9	9	39	35	15	5	0
Jul 91	4	26	8	7	7	6	8	9	9	4	9	9	10	19	10	5	14	5	40	19	15	5	4	29	36	15	2	2	3	33	38
Aug 91	36	6	6	6	6	9	29	29	10	10	9	10	5	5	5	5	20	15	15	10	1	1	9	19	5	15	5	15	12	2	2
Sep 91	3	23	2	1	5	5	5	5	5	4	10	5	5	1	9	10	20	10	10	19	4	29	15	9	29	29	14	14	39	39	0
Okt 91	4	15	5	4	24	39	3	28	38	6	28	28	39	39	9	9	19	35	35	15	15	2	5	2	2	1	3	1	3	21	3
Nov 91	4	9	29	19	35	15	30	10	15	15	9	4	29	14	35	11	11	20	39	36	2	7	6	8	8	6	10	10	6	3	0
Dez 91	1	21	1	5	15	2	2	2	2	2	3	1	5	5	4	4	10	40	10	15	20	10	10	15	5	30	15	7	10	5	1
Jan 92	10	10	4	10	10	10	4	9	29	22	1	5	2	7	7	10	2	7	40	32	13	33	33	23	1	11	12	7	6	7	7
Feb 92	1	5	20	20	10	10	10	1	4	19	10	9	9	15	29	35	12	2	2	2	5	5	10	1	6	9	9	10	4	0	0
Mrz 92	4	39	10	10	6	36	1	21	4	4	15	10	40	15	15	5	10	1	10	10	30	40	35	32	31	34	35	35	5	4	24
Apr 92	36	14	34	14	11	5	1	2	2	2	1	5	15	5	39	31	15	10	5	5	5	30	39	9	9	9	9	29	14	11	0
Mai 92	29	39	11	1	1	5	10	10	4	4	34	5	5	1	21	1	2	2	3	23	3	23	33	23	21	31	21	1	26	1	28
Jun 92	28	28	38	36	38	38	33	38	36	32	31	36	7	5	6	6	2	31	33	28	6	6	29	26	7	2	2	1	1	24	0
Jul 92	29	6	9	39	37	36	12	1	4	29	19	39	4	10	5	20	10	20	10	9	29	9	4	21	11	9	30	5	4	24	9
Aug 92	9	10	9	14	4	4	4	29	29	39	14	4	14	39	15	4	9	4	9	29	39	9	19	10	10	9	9	9	29	9	29
Sep 92	15	4	29	35	15	15	5	14	4	4	29	4	4	39	10	5	5	1	31	34	24	29	29	9	9	24	1	26	26	6	0
Okt 92	5	21	38	33	38	36	7	1	25	11	1	2	1	5	34	15	14	14	4	4	34	15	34	34	34	35	34	39	34	15	15
Nov 92	4	9	14	10	10	10	10	5	4	39	29	15	35	15	29	39	31	15	15	15	5	30	10	9	19	40	5	30	5	9	0
Dez 92	9	9	19	39	14	15	29	36	7	2	6	15	5	10	4	9	4	3	9	30	36	36	31	1	3	22	2	2	2	1	0
Jan 93	2	2	12	33	4	10	10	10	10	9	29	29	9	14	9	10	4	4	40	0	0	9	5	9	0	5	15	10	35	1	1
Feb 93	3	4	1	4	10	10	6	6	7	8	8	1	1	1	1	20	30	10	35	5	0	12	12	2	2	5	24	31	0	0	0
Mrz 93	23	23	32	12	2	10	2	2	1	4	5	10	1	4	10	10	0	10	5	5	0	9	14	5	15	12	12	12	12	15	10
Apr 93	26	26	13	34	4	39	20	15	1	21	21	21	31	34	32	5	10	10	10	10	29	9	9	29	28	28	28	28	28	28	0
Mai 93	38	29	9	1	11	38	28	28	38	28	0	38	29	9	9	4	4	28	29	28	38	11	1	1	10	29	39	39	14	9	14
Jun 93	9	29	16	7	6	9	10	5	21	29	9	16	31	5	15	10	15	10	29	15	15	9	40	15	15	15	15	15	1	1	0
Jul 93	1	1	9	9	29	0	5	5	24	24	11	15	15	15	20	30	9	19	39	34	14	15	5	5	34	15	15	19	9	29	19
Aug 93	4	24	9	9	39	15	5	14	9	34	5	4	4	24	29	9	5	5	5	5	4	29	15	15	15	15	31	12	2	25	15
Sep 93	15	15	35	15	15	5	4	29	29	39	19	11	29	39	34	35	15	15	4	9	29	29	29	29	39	31	34	13	3	24	0
Okt 93	24	39	36	4	29	39	14	29	14	14	29	29	9	39	34	4	11	11	14	4	31	12	38	32	2	2	2	3	23	23	23
Nov 93	31	29	26	26	26	37	36	36	15	4	39	14	4	39	32	2	2	12	12	33	31	34	34	14	4	21	21	11	13	1	0
Dez 93	0	10	10	10	5	4	4	19	40	9	15	15	29	35	34	34	15	10	29	10	35	14	14	31	35	31	31	14	4	20	39
Jan 94	15	39	9	19	9	29	29	14	19	28	26	9	19	19	5	21	15	5	10	15	6	10	30	10	30	35	10	15	5	10	5
Feb 94	10	19	6	29	28	39	9	6	5	35	12	12	33	33	23	21	31	11	15	31	31	39	30	39	10	30	29	0	0	0	0
Mrz 94	39	19	10	15	4	10	10	10	10	10	4	9	40	10	10	15	15	15	40	15	25	10	10	9	29	15	5	5	10	9	19
Apr 94	39	14	15	29	15	11	14	14	34	31	32	37	36	31	34	8	26	2	4	24	9	4	8	29	28	10	10	10	6	10	0
Mai 94	15	2	1	29	15	10	6	24	21	1	13	31	38	38	39	9	29	26	26	36	9	39	39	29	39	39	15	15	15	15	5
Jun 94	5	29	4	14	15	15	10	4	15	34	12	2	7	2	5	15	15	4	9	10	10	10	5	5	29	9	6	6	6	0	0

Jul 94	0	21	24	26	9	4	31	11	15	2	3	3	26	36	16	9	10	36	36	8	1	1	21	23	29	9	6	26	9	9	28
Aug 94	29	9	9	6	29	9	9	39	4	29	39	39	15	15	5	4	39	35	10	4	9	9	29	9	16	10	9	14	14	4	29
Sep 94	39	39	11	10	40	4	19	29	14	34	14	29	4	38	34	34	35	35	11	13	11	1	6	29	9	9	9	4	9	9	0
Okt 94	10	9	40	15	15	5	2	11	15	5	5	5	1	1	4	5	5	1	24	23	23	29	19	19	19	34	14	14	14	29	9
Nov 94	14	4	9	29	28	29	36	6	9	26	27	6	10	10	19	15	15	20	10	10	10	10	19	10	10	10	6	10	5	2	0
Dez 94	1	24	9	9	19	14	4	9	15	10	10	10	10	15	5	5	5	9	9	14	15	12	2	1	1	10	30	10	9	19	14
Jan 95	15	35	12	2	13	21	12	1	10	15	15	35	2	2	10	4	4	29	14	29	14	39	19	15	39	29	15	39	29	40	5
Feb 95	10	15	5	10	10	10	10	10	5	9	19	20	9	19	29	20	19	20	10	10	29	4	19	39	40	31	15	10	0	0	0
Mrz 95	9	14	39	11	4	34	14	24	14	1	21	22	12	31	34	14	29	19	19	15	15	2	10	5	15	10	35	15	35	12	10
Apr 95	10	10	10	5	10	10	10	15	5	10	10	15	2	12	31	15	10	39	29	14	23	28	28	28	38	36	26	5	4	29	0
Mai 95	2	2	1	5	5	5	10	29	35	15	4	28	27	5	4	4	39	39	15	11	1	1	4	24	29	29	39	9	9	9	28
Jun 95	26	16	14	39	39	16	19	34	34	34	34	31	31	31	34	34	14	10	5	9	30	15	12	17	7	2	2	2	5	5	0
Jul 95	5	29	39	4	5	6	6	4	29	29	28	26	9	29	19	39	19	20	10	4	9	30	15	5	5	21	29	16	18	3	21
Aug 95	2	2	5	15	1	24	26	1	2	1	1	1	10	20	15	12	12	8	28	36	37	28	29	19	20	15	15	35	35	15	15
Sep 95	32	31	39	34	4	14	29	36	40	9	39	9	38	19	14	34	31	24	36	36	12	5	1	4	4	10	30	15	15	15	0
Okt 95	5	4	9	9	29	9	9	6	6	6	29	9	9	9	9	9	9	10	10	5	5	1	4	4	4	9	9	10	29	10	10
Nov 95	20	15	35	12	2	5	5	10	10	29	29	26	26	10	9	39	35	15	35	15	1	24	10	9	9	9	9	28	6	3	0
Dez 95	11	31	31	12	33	33	33	24	26	10	7	12	12	33	11	23	26	10	5	30	4	29	40	40	39	11	11	11	11	21	29
Jan 96	26	30	15	2	31	31	29	19	29	29	9	9	9	8	26	6	6	6	21	31	31	33	23	23	31	34	16	13	23	3	2
Feb 96	23	29	35	12	2	1	23	31	1	24	39	29	36	12	5	10	35	29	34	32	32	15	11	1	9	24	24	1	5	0	0
Mrz 96	15	15	12	12	2	15	33	23	23	3	31	13	31	31	28	28	28	28	23	31	31	36	30	30	1	30	15	15	35	35	15
Apr 96	31	11	13	12	38	38	33	31	10	10	30	15	11	12	2	1	3	1	4	4	4	29	29	19	19	6	6	29	9	9	0
Mai 96	29	39	39	35	14	4	4	29	36	38	18	8	8	6	6	9	39	29	39	14	14	14	39	10	39	15	40	15	1	9	4
Jun 96	9	9	19	5	1	4	9	29	9	9	9	10	15	5	2	15	5	35	15	34	34	15	12	35	12	12	5	5	39	15	0
Jul 96	14	14	4	29	29	14	14	31	15	15	10	10	9	10	5	5	15	5	5	12	15	1	24	40	35	5	24	9	9	20	5
Aug 96	4	4	15	12	11	31	39	4	4	29	39	38	36	36	40	20	1	3	3	23	39	26	9	9	19	14	39	36	34	31	15
Sep 96	11	12	2	2	12	12	12	15	12	5	5	35	31	15	15	12	12	33	23	33	31	33	32	11	31	1	29	5	10	9	0
Okt 96	29	15	5	4	14	11	6	6	6	1	4	4	4	24	29	28	19	4	15	10	40	5	2	1	21	4	9	10	40	5	5
Nov 96	10	10	10	9	39	9	39	14	14	4	29	39	39	11	16	16	39	28	14	39	15	15	34	15	39	31	31	35	34	35	0
Dez 96	15	15	9	9	29	29	26	16	28	28	28	9	30	15	10	5	30	9	29	26	1	1	36	1	12	2	1	12	22	31	31
Jan 97	11	11	31	33	11	11	11	3	21	11	15	6	6	6	4	4	4	9	9	36	6	29	19	10	16	31	31	5	2	5	5
Feb 97	2	4	15	9	40	5	10	5	10	9	14	10	40	20	15	5	14	29	15	5	10	10	9	9	39	40	5	5	0	0	0
Mrz 97	5	10	10	10	6	6	1	1	2	1	1	4	10	10	10	10	5	30	40	15	35	5	25	25	40	10	10	15	15	2	6
Apr 97	1	1	10	15	30	15	2	5	5	5	15	15	5	10	15	12	2	5	35	12	1	15	5	5	25	36	36	29	40	20	0
Mai 97	7	1	5	9	29	29	14	11	34	14	9	9	9	29	9	28	28	29	29	29	40	35	35	11	15	15	15	15	5	2	12
Jun 97	33	31	11	14	23	26	1	26	14	1	26	9	19	39	14	14	15	15	4	14	39	19	34	15	4	39	38	18	28	39	0
Jul 97	14	4	9	19	35	15	2	2	12	11	1	5	1	30	20	20	29	36	32	31	36	1	39	19	39	20	30	5	15	5	39
Aug 97	20	20	19	10	6	6	11	36	11	1	3	1	1	20	20	6	16	36	36	36	36	9	9	9	26	29	9	29	16	6	10
Sep 97	6	29	9	9	9	19	20	10	5	5	4	9	14	15	1	4	4	5	5	5	5	1	1	2	1	2	5	5	5	10	0
Okt 97	10	15	5	5	10	4	29	9	29	39	15	35	35	15	15	5	10	6	9	5	5	5	5	5	5	5	12	12	1	11	11
Nov 97	1	5	5	24	29	39	39	19	19	19	19	39	14	11	10	17	2	1	3	24	36	21	11	1	29	6	9	26	39	36	0
Dez 97	11	31	32	2	15	10	6	9	19	29	29	40	5	35	12	33	31	29	39	26	36	36	10	10	9	40	20	15	35	9	9
Jan 98	9	39	9	4	14	15	9	9	10	10	4	9	9	29	9	30	15	9	40	35	12	12	7	31	2	2	1	5	5	5	5
Feb 98	1	15	15	1	5	10	24	5	10	10	9	10	10	10	10	10	2	6	20	9	9	29	6	10	6	10	10	20	0	0	0

Mrz 98	15	10	10	29	35	10	29	40	15	5	21	35	5	10	10	10	10	5	15	15	15	2	31	2	2	1	10	6	26	26	6
Apr 98	29	29	29	19	19	19	39	40	39	28	39	34	4	14	29	14	39	31	15	4	19	6	28	19	9	29	28	8	28	38	0
Mai 98	38	36	6	12	5	10	9	4	4	6	26	26	26	2	2	2	12	12	2	5	15	5	5	20	20	29	29	29	28	38	29
Jun 98	19	9	9	9	29	29	29	19	9	9	39	15	14	11	34	15	15	15	10	10	10	10	10	10	26	9	9	14	14	39	0
Jul 98	39	15	15	10	20	10	15	15	10	10	14	10	29	14	15	14	4	14	4	9	29	4	9	4	14	14	39	20	19	19	15
Aug 98	9	19	19	9	5	5	5	5	5	5	25	29	19	10	9	4	10	10	5	4	39	15	15	40	5	35	15	15	15	15	15
Sep 98	1	29	29	36	36	36	26	19	9	9	19	39	31	35	15	34	35	5	5	2	2	12	3	3	29	29	39	36	6	26	0
Okt 98	36	31	31	31	31	38	38	38	19	40	10	35	5	10	10	9	29	15	14	15	10	9	10	19	39	15	10	39	34	35	14
Nov 98	35	15	39	40	15	5	5	5	10	39	15	4	14	31	35	35	15	15	15	12	2	13	33	6	36	11	35	11	31	32	0
Dez 98	12	33	14	31	35	35	15	2	1	1	25	10	40	10	10	5	1	10	40	31	15	15	1	34	10	5	9	9	4	3	28
Jan 99	29	9	19	10	10	10	19	39	35	21	39	15	35	40	10	9	29	9	9	9	9	10	9	10	10	9	35	40	15	12	2
Feb 99	7	7	10	10	15	15	35	15	35	31	12	12	2	12	1	40	15	15	30	10	20	35	35	15	5	10	9	4	0	0	0
Mrz 99	30	10	9	39	36	39	14	31	39	39	5	6	26	29	5	12	2	1	11	15	10	36	40	10	29	29	28	6	6	6	6
Apr 99	3	1	6	40	10	10	20	17	6	6	20	39	39	34	14	14	31	15	15	14	29	19	9	8	6	38	37	16	1	10	0
Mai 99	9	5	5	21	26	26	29	29	10	29	19	39	19	40	15	15	1	23	33	38	26	9	5	5	5	4	4	9	9	29	40
Jun 99	10	29	9	19	29	39	14	19	14	14	36	19	14	16	16	16	10	15	11	9	15	15	15	15	15	34	29	19	9	19	0
Jul 99	19	10	9	9	29	19	20	17	12	28	38	36	39	20	15	5	5	4	29	9	9	15	15	6	6	1	11	2	2	3	13
Aug 99	13	3	21	21	29	9	39	39	19	39	15	15	15	29	34	20	14	39	14	15	15	5	15	0	6	29	10	20	6	10	20
Sep 99	20	17	3	33	33	39	19	6	6	6	3	29	28	26	28	9	9	19	28	29	39	9	9	9	9	39	9	39	9	39	0
Okt 99	15	29	19	15	15	15	5	10	10	10	4	5	5	5	5	2	12	12	33	33	28	29	39	29	39	20	10	10	5	29	14
Nov 99	4	29	15	3	9	39	16	20	17	32	13	13	16	25	2	24	35	35	32	32	12	15	5	5	10	6	0	0	4	10	0
Dez 99	10	15	9	14	15	10	10	4	29	14	29	39	15	35	35	15	9	30	35	15	5	1	4	9	39	39	15	15	15	5	15
Jan 00	10	1	10	9	5	10	9	9	29	11	1	0	24	24	5	2	7	5	5	5	5	35	35	2	2	2	4	5	29	10	10
Feb 00	9	10	5	10	10	9	10	9	15	5	5	4	40	5	10	34	35	29	40	15	5	15	15	10	20	5	5	29	19	0	0
Mrz 00	40	5	30	15	5	10	9	10	20	10	40	5	20	30	15	5	7	5	2	2	1	4	4	26	29	39	36	37	38	36	21
Apr 00	14	24	29	39	16	2	2	5	31	31	39	39	34	39	29	34	9	9	19	9	9	29	29	6	9	29	28	28	28	28	0
Mai 00	28	28	26	36	28	28	28	36	26	26	26	26	1	2	4	9	29	19	14	15	14	15	4	9	29	4	19	39	14	14	15
Jun 00	10	9	9	29	29	39	15	4	29	28	29	6	9	9	10	15	5	5	1	4	9	9	19	34	15	15	15	15	15	15	0
Jul 00	39	29	39	39	19	5	39	15	14	39	31	15	15	35	15	11	11	15	15	15	15	31	36	36	39	40	9	39	15	15	5
Aug 00	5	39	19	14	11	16	5	10	5	29	4	4	1	6	9	9	29	9	29	9	29	14	15	5	5	21	29	14	14	34	14
Sep 00	9	39	35	15	15	10	15	6	10	10	10	29	29	10	29	36	36	6	21	26	31	6	2	21	34	29	29	29	28	28	0
Okt 00	28	39	16	9	9	11	13	9	14	34	39	19	39	9	28	39	19	16	26	29	29	9	9	20	9	19	10	9	19	29	19
Nov 00	14	4	39	14	14	39	39	39	34	14	4	29	29	19	14	9	19	14	29	39	39	9	29	19	19	39	15	30	9	9	0
Dez 00	9	9	9	9	9	29	29	29	19	29	10	10	19	19	40	15	15	5	15	1	1	1	24	24	39	39	29	19	14	35	15
Jan 01	29	19	19	29	39	19	19	15	15	4	1	2	2	2	3	23	31	34	34	34	11	29	19	29	9	19	36	34	5	11	12
Feb 01	15	15	40	30	39	9	9	39	39	14	10	9	7	7	1	29	12	2	5	5	10	15	35	15	11	5	24	24	0	0	0
Mrz 01	34	34	39	39	15	11	29	29	19	39	9	9	19	15	39	29	29	29	31	15	40	40	29	39	36	11	11	24	39	16	5
Apr 01	10	4	9	29	15	39	19	11	15	36	16	15	15	15	35	35	15	34	34	31	12	12	31	14	29	14	14	39	9	29	0
Mai 01	29	8	29	29	26	8	7	8	22	2	2	2	1	29	39	39	9	14	5	5	1	2	1	1	2	5	10	10	5	5	40
Jun 01	15	40	35	15	5	20	4	14	14	39	15	15	4	4	29	39	39	15	12	1	15	35	15	5	5	1	26	9	10	9	0
Jul 01	15	2	1	23	26	28	39	39	19	9	14	14	14	29	9	19	14	14	39	11	5	10	6	6	6	1	1	6	20	10	30
Aug 01	5	29	39	19	14	9	19	19	19	14	15	10	10	6	29	29	9	29	9	19	16	6	6	6	9	6	20	5	1	29	39
Sep 01	16	10	9	39	15	15	20	35	15	25	15	15	39	31	14	35	31	31	34	34	31	34	31	36	11	14	30	4	29	39	0
Okt 01	9	9	9	14	14	9	9	9	19	4	10	5	6	6	9	9	8	29	29	29	36	40	26	16	20	9	29	10	10	10	29

Nov 01	5	7	6	10	5	40	40	39	15	11	6	10	5	12	1	2	1	1	2	2	5	40	15	10	10	30	14	35	10	6	0
Dez 01	6	26	26	39	20	35	2	2	2	7	7	2	12	2	2	2	2	2	5	15	25	35	15	5	35	35	5	40	40	15	15
Jan 02	5	5	2	2	1	5	12	6	4	4	14	15	1	1	4	1	4	14	10	10	10	9	9	39	5	10	40	10	4	9	20
Feb 02	9	9	24	4	29	39	19	10	9	20	10	9	30	1	1	3	34	9	35	39	15	10	15	15	10	39	19	14	0	0	0
Mrz 02	34	14	5	10	4	9	10	5	4	5	4	9	29	36	39	39	29	9	39	10	10	15	15	12	12	12	2	2	3	4	14
Apr 02	9	3	23	22	2	2	1	31	31	33	38	36	36	36	36	36	16	19	39	11	11	1	10	10	10	29	15	39	34	9	0
Mai 02	9	29	29	38	38	38	28	28	28	28	36	9	9	19	10	9	30	26	9	6	29	29	29	9	19	9	19	16	4	4	15
Jun 02	5	1	21	29	28	38	36	26	6	16	14	9	19	10	9	10	10	29	9	29	9	9	9	14	5	4	34	15	15	4	0
Jul 02	9	39	29	15	4	39	10	9	29	39	14	14	38	36	7	36	36	36	11	4	34	15	4	20	15	10	6	3	28	28	28
Aug 02	26	19	16	36	36	36	16	16	29	38	26	20	10	10	7	7	7	38	26	28	36	38	29	29	29	28	26	26	6	6	9
Sep 02	2	2	31	39	9	9	9	29	28	36	17	2	2	22	15	5	5	5	30	20	15	31	32	12	12	15	15	2	1	1	0
Okt 02	1	4	10	5	15	35	15	1	21	21	22	1	31	39	29	29	39	35	15	4	29	39	39	14	29	14	29	15	5	10	10
Nov 02	9	40	29	35	12	1	31	15	40	15	40	9	29	29	39	39	39	19	36	4	29	28	16	39	39	19	9	29	39	36	0
Dez 02	19	39	18	8	7	27	23	22	33	23	31	21	21	31	26	39	40	2	5	25	30	29	30	26	26	29	29	39	20	30	1
Jan 03	9	29	30	31	5	31	12	11	12	12	2	1	10	10	10	5	1	5	29	9	29	39	40	2	6	20	10	15	35	35	12
Feb 03	1	5	39	35	35	15	5	7	3	1	2	12	33	2	12	12	12	2	3	23	23	23	33	3	23	31	21	6	0	0	0
Mrz 03	9	39	16	5	6	26	1	15	10	10	10	40	2	2	2	2	12	2	2	5	2	2	1	5	10	36	39	6	29	10	2
Apr 03	4	15	15	2	2	15	12	11	31	34	14	1	11	23	23	22	2	12	33	28	28	6	1	1	29	29	20	9	9	29	0
Mai 03	14	9	14	4	29	29	9	29	9	9	9	9	19	14	15	4	29	19	29	14	15	10	9	29	29	6	6	6	6	6	30
Jun 03	6	29	29	29	9	9	9	29	4	9	9	9	9	10	10	5	24	20	10	15	5	10	29	10	10	36	16	26	39	29	0
Jul 03	19	39	20	20	20	15	5	5	15	5	10	5	5	2	21	36	19	20	4	29	9	19	19	29	9	9	29	14	11	6	16
Aug 03	6	10	10	10	10	2	5	1	6	30	5	10	30	20	5	4	9	39	10	9	9	9	10	5	2	5	10	29	39	39	15
Sep 03	35	15	2	5	1	29	29	38	36	19	35	15	12	2	1	5	1	5	4	24	4	29	14	5	1	24	4	39	11	1	0
Okt 03	29	10	39	14	15	15	34	15	10	10	5	5	1	2	2	2	2	21	21	31	31	11	11	15	5	35	12	4	29	34	29
Nov 03	39	9	39	5	1	2	13	38	29	28	26	31	11	26	39	29	15	10	10	9	29	29	29	29	9	9	39	6	6	29	0
Dez 03	28	28	26	26	6	5	2	1	1	31	9	5	30	20	15	5	10	1	39	9	39	15	5	1	10	9	19	29	14	1	1
Jan 04	1	12	2	35	5	30	20	6	39	20	29	19	39	15	15	39	40	12	30	15	15	5	2	21	15	34	31	15	35	5	9
Feb 04	40	19	10	10	10	9	19	35	15	5	10	10	10	10	7	7	10	15	12	23	23	29	15	15	35	34	11	31	12	0	0
Mrz 04	2	2	5	1	1	31	31	12	12	33	33	39	29	19	10	10	5	9	9	9	19	14	11	2	2	12	1	1	5	23	21
Apr 04	28	29	9	19	19	34	31	31	12	31	12	1	2	3	34	21	26	9	9	19	9	26	6	15	2	6	26	26	29	28	0
Mai 04	26	39	39	29	39	36	36	31	36	6	16	31	2	5	10	2	5	5	5	4	25	15	15	5	5	35	15	12	1	1	31
Jun 04	36	36	11	16	16	6	10	10	29	9	9	15	12	6	10	5	40	14	34	14	14	14	39	14	15	4	30	14	15	5	0
Jul 04	39	14	14	14	34	14	9	29	34	14	15	15	15	5	10	10	29	29	19	29	29	19	29	10	5	15	15	2	1	1	20
Aug 04	40	10	40	26	28	26	26	36	26	26	39	29	39	15	5	29	9	9	19	19	14	5	24	39	39	20	10	9	19	39	14
Sep 04	4	1	29	6	2	21	2	2	2	24	9	19	9	9	14	1	1	4	4	9	15	15	40	15	15	15	5	10	40	5	0
Okt 04	39	4	5	29	29	9	4	39	15	1	1	23	24	39	39	34	35	35	9	29	9	9	9	9	9	9	9	39	39	36	16
Nov 04	26	26	9	9	15	15	12	12	12	31	11	9	15	2	1	10	10	10	15	15	5	40	5	5	5	10	5	29	11	23	0
Dez 04	39	30	15	6	6	6	10	6	6	6	6	6	6	9	9	9	19	15	35	1	11	5	10	5	19	36	12	34	15	6	10
Jan 05	5	15	5	10	10	5	10	9	9	9	9	10	15	5	2	4	9	39	15	10	15	15	15	35	12	12	12	32	12	2	10
Feb 05	15	5	2	5	1	23	33	31	15	10	10	29	35	35	12	12	2	1	35	31	33	32	31	31	13	32	12	2	0	0	0
Mrz 05	25	24	31	11	31	15	15	5	15	5	25	35	15	4	10	9	10	10	10	10	5	29	9	6	16	39	26	6	26	26	12
Apr 05	3	3	3	24	4	9	29	39	11	15	6	6	9	9	28	28	38	6	26	2	12	5	34	26	36	6	39	5	10	10	0
Mai 05	9	29	9	20	10	15	35	15	15	35	15	1	1	39	31	4	14	1	5	9	9	9	9	4	10	6	9	9	9	9	15
Jun 05	5	10	9	19	15	15	15	12	12	5	15	14	34	29	4	10	10	7	2	2	6	10	6	29	29	10	5	10	10	6	0

Jul 05	20	10	6	29	11	31	31	31	18	17	17	2	1	10	29	20	10	29	19	15	20	20	15	19	39	19	9	29	29	19	19
Aug 05	4	16	6	15	5	15	15	15	15	15	15	15	15	39	12	2	1	1	29	38	27	37	16	9	29	14	4	6	6	1	1
Sep 05	26	9	11	1	23	23	29	9	29	26	36	6	6	10	10	40	15	12	3	1	1	1	4	21	29	19	9	19	34	15	0
Okt 05	30	11	6	28	28	28	38	8	6	1	23	3	21	1	1	1	2	1	24	9	29	9	19	9	9	10	6	29	29	9	29
Nov 05	9	9	9	29	19	9	9	9	29	10	9	9	9	6	29	35	15	15	12	5	12	12	2	1	34	34	31	34	34	5	0
Dez 05	4	24	39	39	39	11	15	31	2	2	7	1	1	15	5	40	15	15	25	5	5	15	10	5	15	31	33	31	31	11	39
Jan 06	39	12	12	12	33	38	28	33	21	1	9	1	3	3	23	13	39	40	10	29	35	2	2	1	31	31	31	1	1	6	2
Feb 06	6	10	10	2	2	10	10	40	35	35	12	15	5	6	39	39	39	39	29	36	31	12	31	3	38	15	5	34	0	0	0
Mrz 06	34	14	34	35	15	15	15	29	30	35	35	12	12	11	33	32	12	2	6	25	24	5	1	24	39	10	29	19	20	29	20
Apr 06	9	9	14	15	31	1	5	24	14	11	1	15	10	19	9	40	9	10	9	9	29	36	36	19	9	6	6	16	11	31	0
Mai 06	14	14	26	23	21	33	23	23	23	2	1	4	29	5	4	29	20	29	19	39	9	29	14	14	15	10	10	15	14	15	15
Jun 06	11	12	2	15	15	12	2	12	2	2	2	1	1	26	26	39	16	9	29	9	9	9	4	9	29	39	19	19	16	11	0
Jul 06	2	3	23	21	29	29	9	9	9	9	9	1	6	5	2	2	2	1	1	29	9	6	9	9	6	6	26	29	20	9	9
Aug 06	19	14	36	15	17	20	5	15	15	14	31	31	31	34	19	39	39	39	19	19	20	15	15	39	36	20	20	20	15	15	5
Sep 06	10	9	10	10	10	10	29	5	1	1	21	23	24	23	38	28	26	6	9	5	3	23	28	28	28	6	16	6	9	9	0
Okt 06	9	19	39	14	14	10	15	1	4	6	24	29	17	13	2	1	4	24	29	39	9	9	29	39	9	29	9	10	20	10	29
Nov 06	15	15	15	5	10	10	10	9	15	5	30	15	10	10	9	9	9	9	29	9	39	14	29	9	9	9	9	9	9	1	0
Dez 06	4	9	9	19	9	9	9	29	19	15	10	5	10	10	9	29	15	1	2	2	2	2	6	1	2	1	4	20	1	9	5
Jan 07	19	15	10	40	10	10	10	39	10	9	9	10	10	5	4	9	9	29	10	9	14	34	11	12	12	1	5	10	5	5	10
Feb 07	7	6	2	1	5	14	34	39	35	29	39	29	40	29	15	1	24	21	5	9	29	9	29	39	39	40	20	19	0	0	0
Mrz 07	39	15	40	5	9	9	39	16	5	5	1	1	4	5	5	5	10	9	15	12	31	32	32	32	13	23	33	33	31	31	33
Apr 07	33	11	31	2	5	5	5	5	5	10	6	6	23	23	2	1	5	5	5	5	5	5	10	10	6	28	23	21	2	2	0
Mai 07	2	1	31	21	31	1	10	20	20	9	39	19	29	9	14	34	35	5	4	29	29	9	6	9	29	29	29	38	36	1	11
Jun 07	38	17	28	26	37	28	28	28	26	36	6	9	9	29	29	19	39	19	9	29	39	19	19	9	29	34	14	14	4	15	0
Jul 07	9	39	19	14	15	14	15	4	14	15	15	5	9	9	9	29	9	9	9	29	9	19	9	39	5	9	14	19	39	15	15
Aug 07	5	39	15	5	1	21	26	38	38	16	16	9	9	9	9	19	14	4	19	39	36	36	38	19	10	5	5	5	15	15	5
Sep 07	5	5	15	15	12	2	2	10	15	35	15	5	1	5	5	9	29	15	5	5	4	4	4	29	14	31	38	36	34	14	0
Okt 07	9	10	9	29	16	2	2	5	1	1	1	5	2	1	24	4	29	15	12	12	12	3	12	13	18	31	11	6	29	11	2
Nov 07	6	7	10	2	5	15	10	10	15	35	35	15	15	35	12	2	2	3	29	29	29	29	39	1	15	15	5	10	9	10	0
Dez 07	9	19	35	15	9	20	39	15	39	36	12	2	2	2	3	2	3	12	2	1	3	4	14	11	1	15	6	9	4	15	15

Mann-Kendall Trendtest für alle Wetterlagen

Im Folgenden sind die Ergebnisse des Mann-Kendall Trendtests für alle Wetterlagen (1-40) für die Monate Januar bis Dezember dargestellt. Datengrundlage waren die Wetterlagen 1980-2007 der jeweiligen Monate. Der p-value kennzeichnet die Signifikanz von Trends ab Werten kleiner 0,1. Der Sen-Slope-Wert zeigt die Steigung b des Trends an. Dabei steht *modified* für vorgenommene Korrekturen bei der Durchführung des Trendtests, bei *(--)* konnte kein p-value errechnet werden.

Jan	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT	0,65423	0
	2	NOAAT, modified	0,03991	0,080802
	3	SOAAT	0,94011	0
	4	SWAAT, modified	0,14712	0
	5	NWAAT, modified	0,44055	-0,05668491
	6	XXAAF	0,71975	0
	7	NOAAF	0,92187	0
	8	SOAAF, modified	0,10137	0
	9	SWAAF, modified	0,12591	0,05718954
	10	NWAAF	0,53419	0
	11	XXAZT	0,52332	0
	12	NOAZT, modified	0,03519	0,04673913
	13	SOAZT	0,84534	0
	14	SWAZT	0,59962	0
	15	NWAZT, modified	0,02692	-0,09399501
	16	XXAZF	0,59249	0
	17	NOAZF	–	0
	18	SOAZF	–	0
	19	SWAZF	0,79622	0
	20	NWAZF, modified	0,45429	0
	21	XXZAT, modified	0,60263	0
	22	NOZAT	0,85268	0
	23	SOZAT	0,88969	0
	24	SWZAT, modified	0,31687	0
	25	NWZAT	–	0
	26	XXZAF	0,75511	0
	27	NOZAF	–	0
	28	SOZAF, modified	0,24618	0
	29	SWZAF, modified	0,30281	0,0192818
	30	NWZAF	0,75363	0
	31	XXZZT	0,66397	0
	32	NOZZT	0,97043	0
	33	SOZZT	0,85403	0
	34	SWZZT	0,83352	0
	35	NWZZT, modified	0,32109	-0,01940427
	36	XXZZF	0,68288	0
	37	NOZZF	–	0
	38	SOZZF	0,65558	0
	39	SWZZF	0,96697	0
	40	NWZZF	0,94571	0

Feb	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT, modified	0,24367	0
	2	NOAAT, modified	0,37107	-0,00705642
	3	SOAAT	0,93715	0
	4	SWAAT	0,81540	0
	5	NWAAT, modified	0,24949	-0,03155671
	6	XXAAF	0,84370	0
	7	NOAAF, modified	0,00216	0,00847101
	8	SOAAF	0,56242	0
	9	SWAAF	0,93538	0
	10	NWAAF	0,56152	0
	11	XXAZT, modified	0,05858	-0,00287829
	12	NOAZT	0,91759	0
	13	SOAZT, modified	0,16573	0
	14	SWAZT	0,73165	0
	15	NWAZT, modified	0,05065	0,06066176
	16	XXAZF	–	0
	17	NOAZF	–	0
	18	SOAZF	–	0
	19	SWAZF	0,56396	0
	20	NWAZF	0,77807	0
	21	XXZAT	0,92830	0
	22	NOZAT, modified	0,18087	0
	23	SOZAT	0,74516	0
	24	SWZAT, modified	0,17872	0
	25	NWZAT	–	0
	26	XXZAF, modified	0,01570	0
	27	NOZAF	–	0
	28	SOZAF	0,95064	0
	29	SWZAF	0,57061	0
	30	NWZAF	0,93727	0
	31	XXZZT	0,54265	0
	32	NOZZT	0,63690	0
	33	SOZZT, modified	0,06527	-0,01381779
	34	SWZZT, modified	0,14175	0
	35	NWZZT, modified	0,00679	0,06482262
	36	XXZZF, modified	0,14118	0
	37	NOZZF	–	0
	38	SOZZF, modified	0,13458	0
	39	SWZZF	0,63150	0
	40	NWZZF	0,94858	0

Mrz	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT	0,90169	0
	2	NOAAT, modified	0,53729	0,01562276
	3	SOAAT	0,59943	0
	4	SWAAT, modified	0,47341	-0,00725509
	5	NWAAT, modified	0,34177	0,02382031
	6	XXAAF, modified	0,91917	0
	7	NOAAF	0,97037	0
	8	SOAAF	0,75695	0
	9	SWAAF	0,74489	0
	10	NWAAF	0,76516	0
	11	XXAZT	0,63372	0
	12	NOAZT, modified	0,02282	0,06504762
	13	SOAZT	0,94765	0
	14	SWAZT, modified	0,06743	0
	15	NWAZT	0,85600	0
	16	XXAZF, modified	0,05882	0
	17	NOAZF	–	0
	18	SOAZF	–	0
	19	SWAZF	0,94424	0
	20	NWAZF	0,82405	0
	21	XXZAT, modified	0,19744	0
	22	NOZAT	0,85268	0
	23	SOZAT, modified	0,11037	0
	24	SWZAT	0,97985	0
	25	NWZAT, modified	0,06699	0
	26	XXZAF, modified	0,21821	0
	27	NOZAF	–	0
	28	SOZAF	0,67084	0
	29	SWZAF	0,79032	0
	30	NWZAF	0,52986	0
	31	XXZZT	1,00000	0
	32	NOZZT, modified	0,22874	0
	33	SOZZT	0,94021	0
	34	SWZZT, modified	0,07002	-0,01671855
	35	NWZZT	0,67397	0
	36	XXZZF, modified	0,52262	0
	37	NOZZF, modified	0,42100	0
	38	SOZZF, modified	0,03955	0
	39	SWZZF, modified	0,08931	-0,06784238
	40	NWZZF	0,88063	0

Apr	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT, modified	0,08375	-0,05263158
	2	NOAAT, modified	0,15745	0,04324441
	3	SOAAT, modified	0,14681	0
	4	SWAAT	0,94755	0
	5	NWAAT, modified	0,12665	-0,05409357
	6	XXAAF, modified	0,07498	0,03808435
	7	NOAAF, modified	0,37237	0
	8	SOAAF	0,92856	0
	9	SWAAF, modified	0,07539	0,05900309
	10	NWAAF, modified	0,45103	0,0391309
	11	XXAZT	0,89993	0
	12	NOAZT	0,53134	0
	13	SOAZT, modified	0,09015	0
	14	SWAZT	0,96623	0
	15	NWAZT, modified	0,16668	-0,05144119
	16	XXAZF	0,86517	0
	17	NOAZF	1,00000	0
	18	SOAZF, modified	0,23957	0
	19	SWAZF	0,51449	0
	20	NWAZF	0,65382	0
	21	XXZAT	1,00000	0
	22	NOZAT, modified	0,55336	0
	23	SOZAT, modified	0,36000	0
	24	SWZAT, modified	0,30234	0
	25	NWZAT	0,66480	0
	26	XXZAF	0,81015	0
	27	NOZAF	–	0
	28	SOZAF, modified	0,11026	0,03925318
	29	SWZAF	0,83797	0
	30	NWZAF	0,52880	0
	31	XXZZT	0,78823	0
	32	NOZZT, modified	0,83405	0
	33	SOZZT, modified	0,41900	0
	34	SWZZT, modified	0,37521	0
	35	NWZZT, modified	0,04354	0
	36	XXZZF	0,52707	0
	37	NOZZF	0,86997	0
	38	SOZZF	0,70382	0
	39	SWZZF	0,67661	0
	40	NWZZF	0,73020	0

Mai	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT	0,71212	0
	2	NOAAT	0,91786	0
	3	SOAAT, modified	0,18013	0
	4	SWAAT, modified	0,18818	0,02859477
	5	NWAAT	0,80788	0
	6	XXAAF, modified	0,34070	0
	7	NOAAF	0,62923	0
	8	SOAAF, modified	0,28927	0
	9	SWAAF, modified	0,15489	0,07310454
	10	NWAAF, modified	0,01079	0,01851852
	11	XXAZT, modified	0,16604	0
	12	NOAZT	0,71840	0
	13	SOAZT, modified	0,10137	0
	14	SWAZT	0,68018	0
	15	NWAZT, modified	0,41762	0
	16	XXAZF	0,52780	0
	17	NOAZF	–	0
	18	SOAZF	0,75695	0
	19	SWAZF	0,94846	0
	20	NWAZF, modified	0,14368	0
	21	XXZAT, modified	0,33083	0
	22	NOZAT	0,56242	0
	23	SOZAT	0,90506	0
	24	SWZAT, modified	0,04192	0
	25	NWZAT	0,68288	0
	26	XXZAF, modified	0,53265	0
	27	NOZAF	0,72123	0
	28	SOZAF, modified	0,28405	-0,0142984
	29	SWZAF, modified	0,03624	0,11812141
	30	NWZAF, modified	0,69849	0
	31	XXZZT	0,76157	0
	32	NOZZT	–	0
	33	SOZZT	0,61433	0
	34	SWZZT, modified	0,39007	0
	35	NWZZT, modified	0,16802	0
	36	XXZZF	0,59015	0
	37	NOZZF	–	0
	38	SOZZF, modified	0,34277	0
	39	SWZZF, modified	0,02976	-0,05961181
	40	NWZZF, modified	0,20167	0

Jun	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT	0,84419	0
	2	NOAAT	0,69005	0
	3	SOAAT, modified	0,35316	0
	4	SWAAT, modified	0,16140	0,01672545
	5	NWAAT, modified	0,40359	0
	6	XXAAF, modified	0,26752	0
	7	NOAAF, modified	0,19860	0
	8	SOAAF, modified	0,35316	0
	9	SWAAF, modified	0,19864	0,05594329
	10	NWAAF	0,91975	0
	11	XXAZT	0,87307	0
	12	NOAZT, modified	0,39922	0
	13	SOAZT	–	0
	14	SWAZT	0,69879	0
	15	NWAZT, modified	0,39121	-0,05441176
	16	XXAZF, modified	0,08058	0,03045704
	17	NOAZF	0,52856	0
	18	SOAZF	0,66480	0
	19	SWAZF	0,56164	0
	20	NWAZF, modified	0,41087	0
	21	XXZAT	0,85268	0
	22	NOZAT	–	0
	23	SOZAT	0,66480	0
	24	SWZAT, modified	0,08945	0
	25	NWZAT, modified	0,15454	0
	26	XXZAF, modified	0,30069	0
	27	NOZAF	–	0
	28	SOZAF, modified	0,15472	0
	29	SWZAF, modified	0,18618	0
	30	NWZAF	0,97037	0
	31	XXZZT, modified	0,08909	0
	32	NOZZT	0,85268	0
	33	SOZZT	0,89366	0
	34	SWZZT	0,63337	0
	35	NWZZT, modified	0,06728	0
	36	XXZZF, modified	0,32973	0
	37	NOZZF, modified	0,47545	0
	38	SOZZF	0,69421	0
	39	SWZZF	0,68137	0
	40	NWZZF	0,59943	0

Jul	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT	0,63385	0
	2	NOAAT, modified	0,00169	0,03455372
	3	SOAAT, modified	0,17209	0
	4	SWAAT, modified	0,15653	0
	5	NWAAT, modified	0,04184	-0,09090909
	6	XXAAF, modified	0,36113	-0,02541683
	7	NOAAF, modified	0,13132	0
	8	SOAAF	0,62986	0
	9	SWAAF	0,62842	0
	10	NWAAF	0,93488	0
	11	XXAZT	0,59286	0
	12	NOAZT, modified	0,51541	0
	13	SOAZT, modified	0,49595	0
	14	SWAZT	0,55006	0
	15	NWAZT	0,50973	0
	16	XXAZF	0,69764	0
	17	NOAZF, modified	0,11887	0
	18	SOAZF, modified	0,24618	0
	19	SWAZF	0,65396	0
	20	NWAZF, modified	0,00703	0,04545455
	21	XXZAT, modified	0,94263	0
	22	NOZAT	–	0
	23	SOZAT, modified	0,01827	0
	24	SWZAT, modified	0,87098	0
	25	NWZAT	–	0
	26	XXZAF, modified	0,45559	0
	27	NOZAF	–	0
	28	SOZAF, modified	0,45320	0
	29	SWZAF, modified	0,28327	0,0294876
	30	NWZAF	0,67594	0
	31	XXZZT	0,71388	0
	32	NOZZT	0,66480	0
	33	SOZZT	0,75695	0
	34	SWZZT, modified	0,49866	0
	35	NWZZT, modified	0,56517	0
	36	XXZZF	0,82091	0
	37	NOZZF	0,85268	0
	38	SOZZF, modified	0,17364	0
	39	SWZZF	0,96755	0
	40	NWZZF	1,00000	0

Aug	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT	0,64619	0
	2	NOAAT, modified	0,47915	0
	3	SOAAT	0,94784	0
	4	SWAAT, modified	0,07864	-0,05131579
	5	NWAAT	0,56100	0
	6	XXAAF	0,67420	0
	7	NOAAF	0,75511	0
	8	SOAAF	0,85268	0
	9	SWAAF, modified	0,30686	-0,05012531
	10	NWAAF, modified	0,24649	0
	11	XXAZT	0,71798	0
	12	NOAZT, modified	0,45499	0
	13	SOAZT, modified	0,49595	0
	14	SWAZT, modified	0,36944	0
	15	NWAZT	0,85729	0
	16	XXAZF, modified	0,04646	0,00795838
	17	NOAZF	0,85840	0
	18	SOAZF	–	0
	19	SWAZF, modified	0,03958	0
	20	NWAZF, modified	0,00368	0,05255388
	21	XXZAT, modified	0,36049	0
	22	NOZAT	–	0
	23	SOZAT	0,75695	0
	24	SWZAT	0,97388	0
	25	NWZAT	0,62923	0
	26	XXZAF	0,69237	0
	27	NOZAF	0,92892	0
	28	SOZAF	0,65656	0
	29	SWZAF, modified	0,13366	0
	30	NWZAF	0,82370	0
	31	XXZZT	0,67084	0
	32	NOZZT	–	0
	33	SOZZT	–	0
	34	SWZZT	0,97985	0
	35	NWZZT, modified	0,51541	0
	36	XXZZF, modified	0,49344	0
	37	NOZZF, modified	0,24618	0
	38	SOZZF	0,58204	0
	39	SWZZF, modified	0,14375	0,06393884
	40	NWZZF	0,71714	0

Sep	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT	0,82386	0
	2	NOAAT, modified	0,30340	0,00408975
	3	SOAAT, modified	0,62609	0
	4	SWAAT	0,74435	0
	5	NWAAT, modified	0,10917	-0,09761905
	6	XXAAF, modified	0,60131	0
	7	NOAAF, modified	0,49595	0
	8	SOAAF	–	0
	9	SWAAF	0,68773	0
	10	NWAAF	0,81679	0
	11	XXAZT	0,94362	0
	12	NOAZT, modified	0,36223	0
	13	SOAZT	1,00000	0
	14	SWAZT, modified	0,24587	0
	15	NWAZT	0,91971	0
	16	XXAZF	0,84386	0
	17	NOAZF, modified	0,21171	0
	18	SOAZF, modified	0,12175	0
	19	SWAZF	0,62727	0
	20	NWAZF, modified	0,92584	0
	21	XXZAT, modified	0,15525	0
	22	NOZAT, modified	0,29267	0
	23	SOZAT, modified	0,63180	0
	24	SWZAT	0,92486	0
	25	NWZAT	0,78900	0
	26	XXZAF	0,61257	0
	27	NOZAF	–	0
	28	SOZAF, modified	0,03104	0
	29	SWZAF, modified	0,04290	-0,07692308
	30	NWZAF	0,97616	0
	31	XXZZT, modified	0,65365	0
	32	NOZZT, modified	0,92877	0
	33	SOZZT	0,50389	0
	34	SWZZT, modified	0,29739	0
	35	NWZZT	0,56979	0
	36	XXZZF, modified	0,00390	0,00936298
	37	NOZZF, modified	0,23957	0
	38	SOZZF, modified	0,32450	0
	39	SWZZF, modified	0,33808	-0,01469531
	40	NWZZF, modified	0,78040	0

Okt	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT	0,71537	0
	2	NOAAT, modified	0,31199	0
	3	SOAAT	0,53124	0
	4	SWAAT, modified	0,26679	0
	5	NWAAT, modified	0,16045	-0,08333333
	6	XXAAF	0,59164	0
	7	NOAAF, modified	0,37237	0
	8	SOAAF	0,52880	0
	9	SWAAF	0,79439	0
	10	NWAAF	0,73194	0
	11	XXAZT	0,57688	0
	12	NOAZT, modified	0,03027	0
	13	SOAZT, modified	0,12441	0
	14	SWAZT, modified	0,04573	-0,06666667
	15	NWAZT	0,75925	0
	16	XXAZF, modified	0,25322	0
	17	NOAZF, modified	0,12175	0
	18	SOAZF, modified	0,09467	0
	19	SWAZF	1,00000	0
	20	NWAZF, modified	0,47107	0
	21	XXZAT, modified	0,79105	0
	22	NOZAT, modified	0,29267	0
	23	SOZAT	0,77311	0
	24	SWZAT, modified	0,16002	0
	25	NWZAT, modified	0,05821	0
	26	XXZAF	0,97392	0
	27	NOZAF	–	0
	28	SOZAF	0,98008	0
	29	SWZAF, modified	0,02570	0,06666667
	30	NWZAF	0,92892	0
	31	XXZZT	0,84689	0
	32	NOZZT	0,65558	0
	33	SOZZT	0,68840	0
	34	SWZZT, modified	0,46373	0
	35	NWZZT, modified	0,37134	0
	36	XXZZF	0,72185	0
	37	NOZZF	–	0
	38	SOZZF	0,51230	0
	39	SWZZF, modified	0,33210	-0,0413788
	40	NWZZF, modified	0,44720	0

Nov	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT	0,76788	0
	2	NOAAT	0,78380	0
	3	SOAAT	0,85350	0
	4	SWAAT, modified	0,00446	-0,07142857
	5	NWAAT, modified	0,46521	0
	6	XXAAF	0,59049	0
	7	NOAAF, modified	0,41607	0
	8	SOAAF	0,75695	0
	9	SWAAF, modified	0,55338	-0,04973083
	10	NWAAF	0,60117	0
	11	XXAZT	0,77517	0
	12	NOAZT	0,86567	0
	13	SOAZT	0,82405	0
	14	SWAZT	0,87960	0
	15	NWAZT	0,58535	0
	16	XXAZF	0,69815	0
	17	NOAZF, modified	0,42206	0
	18	SOAZF	–	0
	19	SWAZF	0,74459	0
	20	NWAZF, modified	0,23519	0
	21	XXZAT	0,91145	0
	22	NOZAT	–	0
	23	SOZAT, modified	0,43628	0
	24	SWZAT	0,88122	0
	25	NWZAT, modified	0,49595	0
	26	XXZAF, modified	0,70168	0
	27	NOZAF	0,95064	0
	28	SOZAF, modified	0,58255	0
	29	SWZAF, modified	0,15489	0,05298985
	30	NWZAF	0,84063	0
	31	XXZZT	0,75055	0
	32	NOZZT	0,86997	0
	33	SOZZT, modified	0,04799	0
	34	SWZZT	0,67735	0
	35	NWZZT	0,53399	0
	36	XXZZF	1,00000	0
	37	NOZZF	0,95064	0
	38	SOZZF, modified	0,28066	0
	39	SWZZF, modified	0,30804	0
	40	NWZZF, modified	0,17172	0

Dez	Nummer	Wetterlage	p-value	Sen-slope
	1	XXAAT, modified	0,09248	0,05502833
	2	NOAAT, modified	0,42659	0,02179871
	3	SOAAT, modified	0,47915	0
	4	SWAAT, modified	0,48343	0
	5	NWAAT, modified	0,46631	0
	6	XXAAF, modified	0,15046	0
	7	NOAAF, modified	0,47631	0
	8	SOAAF	0,92892	0
	9	SWAAF, modified	0,35265	0,05370435
	10	NWAAF, modified	0,02431	-0,13687823
	11	XXAZT	0,81589	0
	12	NOAZT	0,84280	0
	13	SOAZT	0,66480	0
	14	SWAZT	0,91141	0
	15	NWAZT, modified	0,23451	0,0465368
	16	XXAZF, modified	0,23248	0
	17	NOAZF	–	0
	18	SOAZF, modified	0,29267	0
	19	SWAZF, modified	0,01999	0,03987455
	20	NWAZF, modified	0,27421	0
	21	XXZAT	0,67594	0
	22	NOZAT	0,74271	0
	23	SOZAT	0,57817	0
	24	SWZAT	0,75919	0
	25	NWZAT, modified	0,75332	0
	26	XXZAF, modified	0,52249	0
	27	NOZAF, modified	0,29267	0
	28	SOZAF	0,54662	0
	29	SWZAF	0,75270	0
	30	NWZAF	0,82553	0
	31	XXZZT	0,83195	0
	32	NOZZT	1,00000	0
	33	SOZZT, modified	0,02993	0
	34	SWZZT, modified	0,16042	0
	35	NWZZT, modified	0,20376	0
	36	XXZZF, modified	0,31809	0
	37	NOZZF	–	0
	38	SOZZF	–	0
	39	SWZZF	0,93405	0
	40	NWZZF	0,78008	0

Literaturverzeichnis

Bahrenberg, G., Giese, E., Nipper, J. (1990): Statistische Methoden in der Geographie – Teil 1: Univariate und bivariate Statistik. Teubner Studienbücher der Geographie, Stuttgart.

Bárdossy, A. (1997): Downscaling from GCMs to Local Climate trough Stocastic Linkages. Journal of Environmental Management, Vol. 49, 7–17.

Bárdossy, A., Caspary, H.J. (1990): Detection of Climate Change in Europe by Analyzing European Atmospheric Circulation Patterns from 1881 to 1989. Theoretical and Applied Climatology, Vol. 42, 155–167.

Bárdossy, A., Duckstein, L., Bogardi, I. (1995): Fuzzy rule-based classification of atmospheric circulation patterns. International Journal of Climatology, Vol. 15, 1087–1097.

Bárdossy, A., Stehlík, J., Caspary, H. (2002): Automated objective classification of daily circulation patterns for precipitation and temperature downscaling based on optimized fuzzy rules. Climate Research, Vol. 23, 11–22.

Barry, R., Carleton, A. (2001): Synoptic and Dynamic Climatology. Routledge, London.

Barry, R., Perry, A. (1973): Synoptic Climatology – Methods and Applications. Methuen & Co. Ltd., London.

Baumgartner, A., Liebscher, H.J. (1996): Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie. 2. Aufl., Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart.

Baur, F. (1963): Großwetterkunde und langfristige Witterungsvorhersage. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main.

Baur, F., Hess, P., Nagel, H. (1944): Kalender der Großwetterlagen Europas 1881-1939. Bad Homburg.

Bissolli, P. (2001): Wetterlagen und Großwetterlagen im 20. Jahrhunderts. Klimastatusbericht des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 32–40.

Bissolli, P. (2008): persönliche Mitteilung.

Bissolli, P., Dittmann, E. (2001): The objective weather type classification of the German weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations. Meteorlogische Zeitschrift, Vol. 10 (4), 253–260.

Bissolli, P., Dittmann, E. (2002): Objektive Wetterlagenklassen. Klimastatusbericht des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 110–115.

Bissolli, P., Müller-Westermeier, G. (2005a): Objektive Wetterlagenklassen. Klimastatusbericht 2005, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 109–115.

Bissolli, P., Müller-Westermeier, G. (2005b): The spatial Distributation of Precipitation in Germany for different weather types. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.

Briffa, K. (1995): The Simulation of Weather Types in GCMs: A Regional Approach to Control-Run Validation. In: Storch, H. von, Navarra, A. (Hrsg.): Analysis of Climate Variability – Applications of Statistical Techniques, 121–138.

Bürger, K. (1958): Zur Klimatologie der Großwetterlagen – Ein witterungsklimatologischer Beitrag. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Vol. 45, 5–78.

Caspary, H. (2001): Zusammenhang zwischen der Verschärfung des Hochwasserrisikos in Südwestdeutschland seit der Mitte der siebziger Jahre und einem veränderten Winterklima. GAIA – Ecological Perspectives in Science, Vol. 10 (4), 286–293.

Craig, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. Science, Vol. 133, 1702–1703.

Dittmann, E. (1997): Objektive Wetterlagenlassifikation. Klimastatusbericht des Deutschen Wetterdienstes, 58–61.

Draheim, T. (2005): Die räumliche und zeitliche Variabilität der PM10-Schwebstaubkonzentration in Berlin unter Berücksichtigung der Großwettertypen, Vol. 103. Dissertation, Berliner Geographische Arbeiten, Geographisches Intstitut der Humboldt-Universität zu Berlin (Hrsg.).

DWD (1987): Allgemeine Meteorologie, 1. Leitfäden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst, 3., vollständig neu bearbeitete Auflage. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.

DWD (2008): Wetterlagenklassifikations-Daten, ASCII-Tabelle.
URL `http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU2/KU23/wetterlagenklassifikation/online\_\_wlkdaten,templateId=raw,property=publicationFile.txt/online\_wlkdaten.txt(4.7.2008)`

Flohn, H. (1963): Klimaschwankungen und großräumige Klimabeeinflussung, Vol. 115. Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfahlen. Natur-, Ingenieur und Gesellschaftswissenschaften. Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen.

Flohn, H., Hess, P. (1949): Großwetter-Singularitäten im jährlichen Witterungsablauf Mitteleuropas. Meteorologische Rundschau, Vol. 2, 258–263.

Gerstengarbe, F.W., Werner, P.C. (2004): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky, 100. Potsdam-Institut für Klimaforschung und Deutscher Wetterdienst, 6. verbesserte und ergänzte Aufl., PIK Report, Potsdam-Institut für Klimaforschung, Potsdam.

Gerstengarbe, F.W., Werner, P.C., Busold, W., Rüge, U., Wegener, K.O. (1993): Katalog der Großwetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky 1881–1992, Vol. 113. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 4. Aufl., Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.

Gerstengarbe, F.W., Werner, P.C., Rüge, U. (1999): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–1998) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky. Potsdam-Institut für Klimaforschung und Deutscher Wetterdienst, 5. Aufl., Potsdam und Offenbach am Main.

Grabau, J. (1985): Klimaschwankungen und Großwetterlagen in Mitteleuropa seit 1881, Vol. 1. Dissertation, Universiät – Gesamthochschule zu Paderborn.

Häckel, H. (2005): Meteorologie. 5., überarb. Aufl., UTB Verlag, Stuttgart.

Hamed, K., Rao, A. (1998): A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. Journal of Hydrology, Vol. 204, 182–196.

Hauser, S. (1981): Statistische Verfahren zur Datenbeschaffung und Datenanalyse. Rombach, Freiburg.

Helsel, D., Hirsch, R. (1992): Statistical Methods in Water Resources. Elsevier, Amsterdam.

Hess, P., Brezowsky, H. (1952): Katalog der Großwetterlagen Europas. Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone 33.

Hess, P., Brezowsky, H. (1969): Katalog der Großwetterlagen Europas, Vol. 113. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 2. Aufl., Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.

Hess, P., Brezowsky, H. (1977): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-1976), Vol. 113. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 3. verbesserte und ergänzte Aufl., Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.

Huxol, S. (2007): Trendanalyse von Zeitreihen der Komponenten des Wasserkreislaufes im Einzugsgebiet der Dreisam zur prozessorientierten Beurteilung hydrologischer Klimafolgen. Diplomarbeit, im Druck, Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg. i.Br.

Isola, G. (2003): Untersuchung von Zirkulationsänderungen im Europäisch-Nordatlantischen Raum mit besonderer Betrachtung der Auswirkung auf die Gletscher in den Ötztaler Alpen. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Leopold-Franzens-Universität, Innsbruck.

Kendall, M. (1975): Rank Correlation Methods. Charles Griffin, London.

Kerschner, H. (1989): Beiträge zur synoptischen Klimatologie der Alpen zwischen Innsbruck und dem Alpenostrand, Vol. 17. Innsbrucker Geographische Studien, A. Leidelmair (Hrsg.).

Klaas, U. (1992): Großwetter-Singularitäten in Mitteleuropa – Veränderungen im kollektiven Witterungsverlauf seit dem Ende des 19. Jahrhunderts, Vol. 35. Dissertation, Münstersche Geographische Arbeiten, Schöningh Verlag, Paderborn.

Klaus, D. (1986): Statistische Zusammenhänge zwischen Ernteertrag und Großwettergeschehen in Europa, 1. Akademie der Wissenschaften und der Literatur – Abhandlungen der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse, Mainz.

Krammer, M. (1970): Untersuchung der atmosphärischen Trübung in Basel und ihrer Abhängigkeit von den Wetterlagen. Theoretical and Applied Climatology, Vol. 18, 53–82.

LAI (1994): Die erhöhten Ozonkonzentrationen der Sommer 1991 und 1992 – Synoptische Darstellung der bodennahen Ozonkonzentration in der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe des LAI: Länderausschuss für Immissionsschutz. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

Lamb, H. (1950): Types and spells of weather around the year in the British Isles: Annual trends, seasonal structure of year, singularities. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 76, 393–438.

Lamb, H. (1995): Climate, History and the Modern World. ISBN 0-415-12734-3, Routledge Verlag, New York.

Libiseller, C. (2002): A Program for Computation of Multivariante and Partial Mann-Kendall Test. Universität Linköping, Schweden.
URL `http://www.mai.liu.se/\~cllib/welcome/PMKtest.html(27.11.2007)`

Mann, H. (1945): Non-parametric test against trend. Econometrica, Vol. 12, 245–249.

Moser, H., Rauert, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie – Lehrbuch der Hydrogeologie (8). Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart.

Özelkan, E., Galambosi, A., Duckstein, L., Bárdossy, A. (1998): A multi-objective fuzzy classification of large scale atmospheric circulation patterns for precipitation modelling. Applied Mathematics and Computation, Vol. 91, 127–142.

Reitan, C. (1963): Surface dew point and water vapor aloft. Journal of Applied Meteorology, Vol. 2, 776–779.

Schlotter, D. (2007): The spatio-temporal distribution of $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ of precipitation in Germany – an evaluation of regionalization methods. Unveröffentlicht, Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.

Schönwiese, C.D. (2006): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart.

Schüepp, M. (1959): Die Klassifikation der Witterungslagen. Pure and Applied Geophysics, Vol. 44, 242–248.

Sen, P. (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, Vol. 63, 1379–1389.

Steinbrich, A., Uhlenbrook, S., Leibundgut, C. (2003): Raum-zeitliche Zusammenhänge zwischen Großwetterlagen Und Starkniederschlägen in Baden-Württemberg. Tagungsband zum Tag der Hydrologie, 20.-21. März 2003. Kleeberg (Hrsg.): Klima – Wasser – Flussmanagment - im Lichte der Flut. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Vol. 2, 65–70.

Storch, H. von (1995): Misuses of Statistical Analysis in Clmate Research. In: Analysis of Climate Variability – Applications of Statistical Techniques. Storch, H. von und Navarra, A. (Hrsg.), 11–26.

Trnka, M., Kyselý, J., Možný, M., Dubrovský, M. (2008): Changes in Central-European soil-moisture availability and circulation patterns in 1881–2005. Unveröffentlicht, International Journal of Climatology.

Tveito, O., Ustrnul, Z. (2003): A review of the use of large-scale atmospheric circulation classification in spatial climatology. met.no Report, Norwegian Meteorological Institute, Vol. 10.

Weingärtner, H. (1996): Synoptische Klimatologie lokaler Wetterereignisse für Mitteleuropa. Fachliche Mitteilungen, Amt für Wehrgeophysik, Vol. 220.

Yarnal, B. (1993): Synoptic climatology in environmental analysis – A primer. Belhaven Press, London.

Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., Cavadias, G. (2002): The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. Hydrological Prosesses, Vol. 16, 1807–1829.

Yue, S., Wang, C. (2002): Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. Water Resources Research, Vol. 38 (6).

Zehe, E., Singh, A., Bárdossy, A. (2006): Modelling of monsoon rainfall for a mesoscale catchment in North-West India I: assessment of objective circulation patterns. Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 10, 797–806.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich einigen Personen meinen Dank aussprechen, ohne welche das Gelingen dieser Arbeit so nicht möglich gewesen wäre.

Prof. Dr. Christian Leibundgut danke ich für die Vergabe des Themas.

Dr. Christoph Külls gilt besonderer Dank für die sehr gute Betreuung der Diplomarbeit und für zahlreiche Hilfestellungen, konstruktive Diskussionen und weiterführende Ideen.

Ausdrücklich möchte ich meinem Freund und Kommilitonen Stephan Huxol für das bereitgestellte Material und die Einführung in die Teststatistik bedanken.

Weiterer Dank gilt Dr. Peter Bissolli vom Deutschen Wetterdienst Offenbach, für die stets rasche Beantwortung meiner Fragen zum Datenmaterial.

Meinen Kommilitonen danke ich für den Zuspruch und die zahlreichen kleinen Hilfestellungen bei der Erstellung meiner Arbeit. Meiner Schwester Alexandra Stölzle und meiner Freundin Maren Schülting für die fachmännische Korrektur dieser Arbeit und die moralische Unterstützung.

Meinem MacBook danke ich für die gute Teamarbeit.

Und nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern, Silvia und Ulrich Stölzle, und meinen Großeltern, Hildegard und Gerhard Bosch, für die Ermöglichung meines Studiums bedanken.

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Ort, Datum Unterschrift