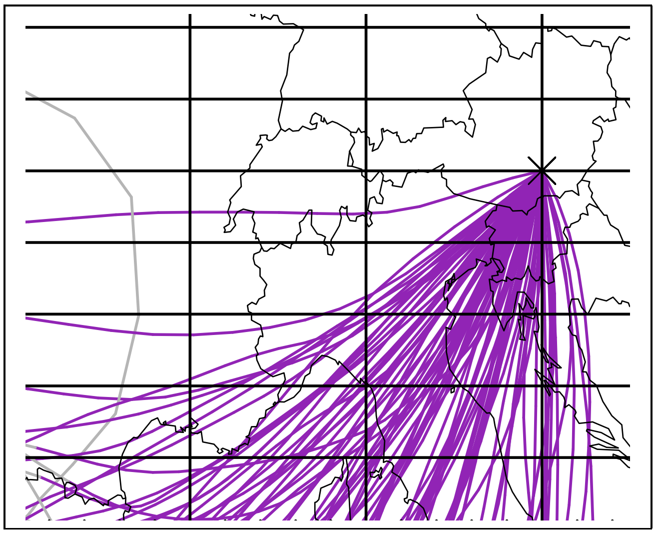
StartClim.4

Diagnose von Extremereignissen aus großräumigen meteorologischen Feldern

Andreas Frank
Petra Seibert



Institut für Meteorologie und Physik
Universität für Bodenkultur Wien

2003

Diagnose von Extremereignissen aus großräumigen meteorologischen Feldern.

Endbericht zum Projekt StartClim.4

Andreas Frank
Petra Seibert

Institut für Meteorologie und Physik (IMP)
der Universität für Bodenkultur Wien
Türkenschanzstr. 18, 1180 Wien
http://www.boku.ac.at/imp/
http://www.boku.ac.at/imp/envmet/

Diese Version unterscheidet sich im Layout geringfügig von der Originalversion (offizieller Endbericht). Zusätzlich wurde die Matrixcodierreihenfolge auf Seite 14 und 15 am 26.2.2004 korrigiert, da sie mit den Anwendungen inkonsistent war.

Wien, November 2003

Teilprojekt von StartClim
„Startprojekt Klimaschutz: Erste Analysen extremer Wetterereignisse
und ihrer Auswirkungen in Österreich"

Projektleitung: Institut für Meteorologie und Physik
der Universität für Bodenkultur Wien
Türkenschanzstr. 18, 1180 Wien
URL: http://www.austroclim.at/startclim/

Inhaltsverzeichnis

Abstract / Zusammenfassung

Abstract

In Startclim.4 a new method was developed for the diagnosis of extreme events from large-scale meteorological fields. The data basis comprised the 15-year re-analysis of the ECMWF (used for calculating back trajectories) and daily precipitation sums of 132 climate stations in Austria. The period covered is 1979 to 1983. The main tool applied was clustering. For this purpose, existing methods were further developed and a promising new clustering procedure was thus created. First, the stations were grouped into seven regions with similar precipitation series. For each day and each region the area mean of the precipitation was calculated. As extreme events to be studied, cases with daily precipitation sums exceeding the 98th percentile of the respective region were considered. In order to identify synoptic situations prone to heavy precipitation, a combination of the horizontal position during the last 24 h of trajectories near ground and in the mid-troposphere at different times of the day and arrival points proved optimal. In addition, potential vorticity at one grid point was considered. With the clustering procedure, seven synoptic patterns were identified which are characteristic for the heavy precipitation events in Austria. They differ considerably with respect to frequency and regional impacts. For example, the "Suedstau" pattern causes heavy precipitation primarily in the southwest of Austria, while in Western and Southeastern Austria one quarter of the heavy precipitation cases are due to this pattern. On the other hand, the weak-gradient "Vorderseite" pattern is not only rather frequent, it is also able to cause heavy precipitation in all of Austria, totally almost 50% of all cases. The so-called Vb pattern is, as expected, responsible mainly for heavy precipitation in the East and North of Austria.

Zusammenfassung

In StartClim.4 wurde eine neue Methode zur Diagnose von Extremereignissen aus großräumigen meteorologischen Feldern entwickelt. Als Datenbasis dienten die 15-Jahre-Reanalyse des EZMW (mit deren Hilfe Rückwärtstrajektorien berechnet wurden) und tägliche Niederschlagssummen an 132 Klimastationen Österreichs. Der überdeckte Zeitraum ist 1979 bis 1983. Als Werkzeug wurde hauptsächlich das Clusterungsverfahren angewendet. Dazu wurden bestehende Methoden weiterentwickelt und so ein vielversprechendes neues Verfahren geschaffen. Zunächst wurden die Stationen in sieben Regionen mit ähnlichen Niederschlagsverläufen eingeteilt. Für jeden Tag und jede Region wurde das Flächenmittel des Niederschlags gebildet. Als zu untersuchende Extremereignisse wurden Fälle mit Tagesniederschlagssummen über dem 98. Perzentil für die jeweilige Region betrachtet. Zur Identifikation von starkniederschlagsträchtigen Wetterlagen erwies sich eine Kombination aus der horizontalen Position der letzten 24 h von Trajektorien in Bodennähe und der mittleren Troposphäre zu verschiedenen Tageszeiten und von zwei verschiedenen Ankunftspunkten als optimal. Zusätzlich wurde noch die potentielle Vorticity an einem Gitterpunkt berücksichtigt. Mithilfe des Clusterungsverfahrens ergeben sich daraus sieben Wetterlagen, die für die Starkniederschlagsereignisse in Österreich typisch sind. Sie unterscheiden sich beträchtlich hinsichtlich ihrer Häufigkeit und ihrer regionalen Auswirkungen. So führt z. B. die Südstau-Lage primär in der Südstau-Region zu hohen Niederschlagswerten, wobei auch im Südosten und Westen Österreichs noch ein Viertel der Starkniederschlagsfälle von solchen Lagen verursacht werden. Andererseits ist die gradientschwache Vorderseite nicht nur sehr häufig, sie kann auch in ganz Österreich Starkniederschläge verursachen, insgesamt fast die Hälfte aller Fälle. Die Vb-Lage ist erwartungsgemäss vor allem für die Starkniederschläge in der Ostregion und der Region Wald- und Mühlviertel verantwortlich.

4-1 Einleitung

4-1.1 Motivation

Es scheint, dass wir im Kontext der Klimaänderungsforschung und besonders unter dem Titel "Downscaling" zu einer Problemstellung zurückkehren, welche die synoptische Meteorologie bereits vor 15, 20 und mehr Jahren beschäftigte (zu den Zeiten, als die Wettervorhersage ähnlich oder gar schlechter waren als heutzutage die Klimamodelle): Wie kann ich aus grossräumigen, von einem Modell gelieferten Feldern Aussagen über das konkrete Wetter in einer Region ableiten? Auch das gegenständliche Projekt ist im Kontext dieser Fragestellung angesiedelt. Dabei wird das vorhandene Wissen um die Bedeutung von Wetterlagen genützt, aber wir gehen neue Wege, die nicht einer traditionellen Wetterlagenklassifikation entsprechen.

Das zentrale Ziel ist, Wetterlagen zu finden, die charakteristisch für "extreme Ereignisse" sind und die automatisch aus den Ergebnisfeldern grossräumiger meteorologischer Modelle, insbesondere den Klimamodellen, diagnostiziert werden können. Die Kenntnis und Beschreibung dieser Wetterlagen ist an sich schon ein interessantes Ergebnis. Darüber hinaus eröffnen sich verschiedene wichtige Anwendungen:

- Untersuchung der Frage, inwieweit die Klimamodelle die Häufigkeit und Variabilität dieser Wetterlagen für das Klima der Gegenwart bzw. jüngeren Vergangenheit reproduzieren können. Dies geht über die Frage hinaus, ob sie die Wettererscheinungen (Temperatur, Niederschlag, ...) richtig reproduzieren. Vielmehr kann damit untersucht werden, wie gut die zugrundeliegende Prozessen erfasst werden, und so ein Beitrag zur Überprüfung der Glaubwürdigkeit der Modelle – und zwar speziell für die ausgewählten Extremereignisse – geleistet.
- Im Falle einer positiven Beantwortung der ersten Frage kann untersucht werden, welche Änderungen in der Häufigkeit dieser Wetterlagen von den Modellen in verschiedenen Szenarien produziert werden. Man kann versuchen, den Einfluss von Wetterlage und von anderen Parametern (z. B. Feuchtegehalt) zu trennen.
- Schließlich könnte mittels Analogmethode (siehe dazu Startclim.5) ein "Downscaling" versucht werden.

Konventionelle Wetterlageneinteilungen für den Alpenraum (siehe z. B. Kerschner (1989); hier nur stichwortartig aufgezählt: Grosswetterlagen Mitteleuropas nach Hess-Brezowsky, Ostalpine Wetterlagen nach Lauscher, Witterungslagen und sogenannte SYNOP-Klassifikation für die Schweiz nach Schüepp und analog für Österreich nach Kerschner, Strömungslagen nach Steinacker) sind für die Verwendung im Rahmen der gegenständlichen Problemstellung ungeeignet, da ihnen die zeitliche Dimension und die Charakterisierung der Intensität fehlt und sie nicht auf von Klimamodellen errechneten meteorologischen Felder angewendet werden können. Letzteres liegt daran, dass das beobachtete Wetter einfließt und / oder subjektive Klassifizierungsverfahren verwendet werden, die für einen großen Datensatz ungeeignet sind.

Wir suchen nach Kategorien, die eine möglichst gute Trennschärfe für Extremereignisse besitzen sollen. Yarnal (1993) nennt dies "Environment-to-circulation"-Klassifikation, und dies ist der umgekehrte Weg zu jenem, der bei den klassischen Wetterlagen eingeschlagen worden ist.

Die hier verwendete neue Methode unterscheidet sich jedoch auch von den derzeit gängigen statistischen Verfahren des "Downscaling". Die Untersuchungen sollen auf einer Zeitskala durchgeführt werden, die synoptische Ereignisse auflöst. Zu diesem Zweck werden 3-D Rückwärts-Trajektorien (Bahnen von Luftpaketen) verwendet (Stohl and Wotawa, 1995). Sie sind ein aggregiertes Produkt meteorologischer Information und beinhalten auch den zeitlichen Ablauf, der für den Charakter der Wettersituation oft wichtig ist. Methodisch wird primär auf die Clusteranalyse zurückgegriffen.

Als “Extremereignis” wurde in dieser Pilotstudie das Eintreten von Starkniederschlägen herangezogen, welche als Überschreitung des 98er Perzentils des Tagesniederschlags in einer Region definiert wurden.

4-1.2 Stand der Wissenschaft

Es existiert eine reichhaltige Literatur über Wetterlagen und ihre Beziehung zu Wetter und Klima in den Alpen. Die erwähnte Arbeit von Kerschner (1989) bietet einen guten Einstieg und genügend Verweise auf andere Autoren.

Die Verwendung von Trajektorien und ihre Bearbeitung mittels Clusteranalyse geht auf Dorling und Mitarbeiter an der University of East Anglia zurück (Dorling and Davies, 1992; Dorling et al., 1992). Diese Autoren und ihre Nachfolger waren vor allem an Zusammenhängen zwischen Wetterlage und Luftverschmutzung interessiert. Dies trifft auch auf Stohl and Scheifinger (1994) zu, die erstmals Wetterlagen für Österreich durch Clusterung von Trajektorien generierten. Sie verwendeten horizontale (isobare) Rückwärtstrajektorien vom Sonnblick, jeweils 48 h zurück und zweimal täglich während einer Periode von dreieinhalb Jahren gerechnet. Diese wurden in neun Cluster gruppiert. Einige Ergebnisse bezüglich der Klimatologie luftchemischer, aber auch meteorologischer Parameter werden präsentiert.

Während der Projektlaufzeit wurden in Deutschland im Kontext der Klimaänderungsforschung verwandte Studien präsentiert.

Um die klassische, für Deutschland als Standard geltende Einteilung sogenannter Großwetterlagen nach Hess und Brezovsky besser nutzbar zu machen, haben Schneider et al. (2003) eine objektive Zuordnungsmethode für diese entwickelt. Ihre Ergebnisse unterscheiden sich zum Teil deutlich von der konventionellen Zuordnung, wobei die Autoren dies eher als Vorteil werten. Als Besonderheit wird in dieser Arbeit die Zugehörigkeit eines Tages zu einer Lage im Sinne von “fuzzy sets” kontinuierlich anstatt binär quantifiziert.

Fricke (2003) stützt sich in seiner Untersuchung über die Rolle von Wetterlagen bei der Zunahme der Starkniederschlagshäufigkeit an der Station Hohenpeissenberg (bayerischer Alpenrand) in den vergangen 120 Jahren auf die konventionell klassifizierten Grosswetterlagen. Er kommt zum Ergebnis, dass einerseits die Wetterlagen mit überdurchschnittlicher Wahrscheinlichkeit von Starkniederschlägen häufiger geworden sind, andererseits jedoch auch bei diesen Wetterlagen häufiger die Starkniederschlagsschwelle überschritten wird. Die Arbeit macht aber auch die begrenzte Trennschärfe der Standardwetterlagen für solche Extremereignisse deutlich.

Die Arbeitsgruppe Immissionsforschung an der Forstwissenschaftlichen Fakultät München versuchte im Sommer 2002, die Herkunft der Feuchte bei den katastrophalen Niederschlägen im August mit einer Trajektorienanalyse zu klären (Paul James, pers. Mitteilung [unveröffentlichtes Poster beim AFO2000 Statusseminar]).

4-2 Daten

4-2.1 Meteorologische Felder (Reanalyse-Daten)

Zur Berechnung der Trajektorien, sind großräumige meteorologische Felder nötig, deren Auflösung in etwa jener von Zeitscheibenläufen globaler Klimamodelle entspricht, um die entwickelte Methode später auch auf Klimaszenarien anwenden zu können. Derzeit haben diese Läufe eine typische spektrale Auflösung von T106.

Aus diesem Grund wurden die vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) berechneten Reanalysedaten (ERA15), welche für die 15-jährige Periode von 1979-1993 zur Verfügung stehen, verwendet. Diese Daten beinhalten globale Felder der Windgeschwindigkeit, sowie anderer meteorologischer Parameter wie zum Beispiel der Temperatur oder der Feuchte auf 31 vertikalen Modell-Levels. Die Daten wurden von Kollegen in München extrahiert und liegen mit einer horizontalen Auflösung von einem Grad (entsprechend 111 km in N-S Richtung und ca. 70 km in E-W Richtung) und einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden vor.

Für dieses Projekt wurde der Umfang der ursprünglich globalen Daten insofern verringert, als ein horizontaler Ausschnitt von 30°W – 50°E und von 30°N – 70°N extrahiert wurde, und in der Vertikalen die drei obersten Niveaus (Druck unter 100 hPa) weggelassen wurden, da sie für Anwendungen in der Troposphäre von vernachlässigbarer Bedeutung sind.

4-2.2 Niederschlagsdaten

Als Basis für die Untersuchungen dienen tägliche Niederschlagssummen ausgewählter Klimastationen in Österreich. Der Zeitraum wurde, wegen der Verfügbarkeit der ERA-15-Daten, auf denen die Trajektorien basieren, auf 1979–1993 begrenzt. Die Tagessummen des Niederschlags wurden dankenswerterweise vom Projekt Startclim.5 zur Verfügung gestellt. Dort fand auch eine Datenprüfung und die Abstimmung mit der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik bzw. dem Projekt Startclim.1 statt. Im gegenständlichen Projekt wurden nur mehr die höchsten Werte jeder Station auf Plausibilität geprüft, wobei kein Fehler gefunden wurde.

Wegen der immer wieder vorkommenden Stationsverlegungen mussten Stationen an einem Ort (gleicher Stationsname), aber unterschiedlicher Lage (verschiedene Stationsnummern) zu einer Reihe zusammen gefasst werden. Damit standen zunächst 132 Stationen zur Verfügung (Tabelle 4-1). Die Station Hahnenkamm wurde wegen kurzer Betriebsdauer (erst ab November 1992) bei den meisten Auswertungen nicht verwendet. Von den verbliebenen Stationen haben 4 weniger als 10 Jahre Daten (innerhalb unseres Intervalls 1979–1993), und weitere 16 Stationen weniger als 14 Jahre. Bei den verschiedenen Auswertungen wurden zum Teil Stationen, deren Datenverfügbarkeit unter einem Mindestwert blieb, nicht berücksichtigt (Detail siehe bei den Auswertungen).

Die Lage der Stationen ist aus diversen Karten im Auswertungsteil ersichtlich.

Tabelle 4-1: Liste der verwendeten Niederschlagsstationen. Die Stationsnummer ist bei zusammengesetzten Reihen die niedrigste Nummer der verwendeten Stationen. Als Zusatzinformation ist angegeben: die vorhandene Datenmenge (Werte über 15 Jahre zeigen teilweisen Parallelbetrieb von zusammengefassten Stationen an einem Ort an), in der angegebenen Zeit gefundener maximaler Tagesniederschlag, sowie die Niederschlagsregion, der die Station zugeordnet wurde (siehe Kapitel 4-4). Die Regionen sind wie folgt nummeriert: 1 Westösterreich, 2 Nordstau, 3 Wald- und Mühlviertel, 4 Ostregion, 5 Ennstal-Semmering, 6 Südost, 7 Südstau.

Stationsnr.	Stationsname (vereinfacht)	Region	Länge Zeitreihe [a]	max. Tagesniederschlag [mm]
9900	Admont	5 Ennstal-Semm.	15.0	110.7
5315	Amstetten	3 W/M-Viertel	11.0	58.1
10600	Aspang	6 Südost	15.0	90.4
9640	Badaussee	2 Nordstau	15.0	128.2
5870	Baden	4 Ostreg.	14.9	93.3
13700	Bernstein	6 Südost	7.2	93.5
12503	Bischofshofen	2 Nordstau	10.2	87.4
11102	Bregenz	1 Westöst	17.8	95.0
14801	Brenner	1 Westöst	15.3	107.6
13301	Bruck/Mur	6 Südost	14.8	86.7
14100	Buers	1 Westöst	15.0	125.5
19700	Dellach	7 Südstau	14.8	117.7
10800	Deutschkreuz	4 Ostreg.	14.6	107.2
18900	Deutschlandsberg	6 Südost	15.0	183.5
18000	Doellach	7 Südstau	15.0	87.5
7704	Eisenstadt	4 Ostreg.	15.0	131.7
5103	Enns	3 W/M-Viertel	14.7	82.0
15300	Enzingerboden	2 Nordstau	14.9	119.3
11110	Feldkirch	1 Westöst	15.3	99.1
6610	Feuerkogel	2 Nordstau	17.0	103.7
1601	Freistadt	3 W/M-Viertel	15.1	44.8
18600	Friesach	6 Südost	14.7	88.2
6020	Fuchsenbigl	4 Ostreg.	8.1	51.9
17001	Galtuer	1 Westöst	15.0	88.7
15500	Gastein	7 Südstau	14.9	92.7
19201	Gleichenberg	6 Südost	15.0	112.6
16500	Gleisdorf	6 Südost	15.0	56.3
6620	Gmunden	2 Nordstau	13.6	73.4
9603	Goisern	2 Nordstau	14.6	81.0
16400	Graz-airport	6 Südost	15.0	74.3
16412	Graz	6 Südost	15.0	73.2
5968	Grossenzersdorf	4 Ostreg.	16.7	50.7
6910	Grossraming	2 Nordstau	15.0	84.0
16701	Guessing	6 Südost	14.3	61.4
9811	Gumpenstein	5 Ennstal-Semm.	18.1	85.0
5881	Gumpoldskirchen	4 Ostreg.	12.2	96.1
10000	Hieflau	5 Ennstal-Semm.	15.0	115.0
14500	Hochserfaus	1 Westöst	9.8	76.4
5000	Hoersching	3 W/M-Viertel	15.0	51.8
2600	Hohenau	4 Ostreg.	15.0	43.6
11400	Holzgau	1 Westöst	15.0	88.2
14512	Imst	1 Westöst	13.3	67.0
11803	Innsbruck	1 Westöst	15.3	83.5
9610	Ischl	2 Nordstau	15.0	110.7
700	Japons	3 W/M-Viertel	15.0	78.0
11900	Jenbach	1 Westöst	15.0	93.2
15343	Kals	7 Südstau	14.1	76.7
20100	Kanzelhoehe	6 Südost	15.0	84.7
12200	Kitzbuehl	2 Nordstau	14.9	77.0
20211	Klagenfurt	6 Südost	15.0	94.1
18100	Kolbnitz	7 Südstau	15.0	77.1
1400	Kollerschlag	2 Nordstau	15.0	60.0
19710	Kornat	7 Südstau	15.0	162.3
3801	Krems	3 W/M-Viertel	14.9	73.3
5010	Kremsmuenster	2 Nordstau	15.0	57.8
9620	Krippenstein	2 Nordstau	11.7	86.2

Stationsnr.	Stationsname (vereinfacht)	Region	Länge Zeitreihe [a]	max. Tagesniederschlag [mm]
9010	Kufstein	2 Nordstau	16.4	83.8
2400	Laa	4 Ostreg.	15.0	43.9
4900	Lambach	2 Nordstau	15.0	76.5
14403	Landeck	1 Westöst	15.3	66.5
14310	Langen	1 Westöst	15.0	82.0
4081	Langenlebarn	4 Ostreg.	15.2	50.7
19011	Leibnitz	6 Südost	14.5	88.0
17901	Lienz	7 Südstau	15.0	101.1
500	Litschau	3 W/M-Viertel	14.8	78.9
16300	Lobming	6 Südost	15.0	102.0
21100	Loibl	7 Südstau	15.0	205.0
18110	Mallnitz	7 Südstau	21.7	82.2
7220	Mariazell	5 Ennstal-Semm.	16.0	82.5
3600	Martinsberg	3 W/M-Viertel	15.0	69.2
6411	Mattsee	2 Nordstau	15.0	87.6
15001	Mayrhofen	1 Westöst	15.0	110.5
10500	Moenichkirchen	6 Südost	15.0	100.2
6510	Mondsee	2 Nordstau	15.0	89.4
15310	Moserboden	2 Nordstau	15.0	102.0
10400	Muerzzuschlag	5 Ennstal-Semm.	15.0	85.0
17100	Nauders	1 Westöst	13.0	64.7
16015	Neumarkt	6 Südost	8.1	78.0
7905	Neusiedl	4 Ostreg.	15.1	89.0
17300	Obergurgl	1 Westöst	15.0	86.8
2410	Oberleis	4 Ostreg.	15.0	55.8
10701	Oberpullendorf	6 Südost	10.0	92.0
3410	Pabneukirchen	3 W/M-Viertel	15.0	50.8
14810	Patscherkofel	1 Westöst	15.9	72.1
18805	Preitenegg	6 Südost	15.6	111.3
7500	Puchberg	5 Ennstal-Semm.	14.9	80.2
18300	Radenthein	7 Südstau	15.0	65.0
12610	Radstadt	2 Nordstau	15.0	70.0
15402	Rauris	2 Nordstau	16.0	81.9
10510	Reichenau	5 Ennstal-Semm.	15.3	68.2
2900	Reichersberg	2 Nordstau	15.0	62.1
19800	Reisach	7 Südstau	15.0	159.7
901	Retz	3 W/M-Viertel	15.0	50.4
11500	Reutte	1 Westöst	15.0	107.5
4700	Ried	2 Nordstau	15.0	73.8
6300	Salzburg	2 Nordstau	15.0	88.8
12311	Schmittenhoehe	2 Nordstau	13.5	108.0
16421	Schoeckl	6 Südost	14.9	82.7
11200	Schoppernau	1 Westöst	10.0	88.3
11300	Schroecken	1 Westöst	10.4	96.5
7400	Schwarzau	5 Ennstal-Semm.	15.0	80.2
5990	Schwechat	4 Ostreg.	15.0	73.2
13110	Seckau	6 Südost	10.4	64.8
11700	Seefeld	1 Westöst	13.0	103.7
10410	Semmering	5 Ennstal-Semm.	10.0	85.8
19500	Sillian	7 Südstau	14.9	115.6
15410	Sonnblick	2 Nordstau	15.0	49.8
18705	Standrae	6 Südost	14.8	110.6
5112	Steyr	2 Nordstau	16.6	78.1
17700	Stjakob	7 Südstau	14.6	99.0
15910	Stolzalpe	6 Südost	14.9	74.8
5604	Stpoelten	4 Ostreg.	15.0	73.2
18620	Stveit	6 Südost	15.0	95.8
15710	Tamsweg	6 Südost	14.9	67.5
6900	Ternberg	2 Nordstau	15.0	100.1
14630	Umhausen	1 Westöst	15.0	60.6
9201	Unken	2 Nordstau	11.5	147.6
12220	Uttendorf	2 Nordstau	15.0	94.5
20123	Villach	6 Südost	14.6	92.2
20020	Villacheralpe	7 Südstau	15.0	147.4
7011	Waidhofen	2 Nordstau	14.3	68.7
3110	Waizenkirchen	2 Nordstau	15.0	46.5
1800	Weitra	3 W/M-Viertel	15.0	60.0

Stationsnr.	Stationsname (vereinfacht)	Region	Länge Zeitreihe [a]	max. Tagesniederschlag [mm]
16520	Weiz	6 Südost	15.0	58.4
5904	Wien	4 Ostreg.	16.7	98.3
16710	Woerterberg	6 Südost	15.0	76.4
4810	Wolfsegg	2 Nordstau	15.0	67.0
4078	Wolkersdorf	4 Ostreg.	10.0	40.7
12322	Zell am See	2 Nordstau	14.5	91.4
16101	Zeltweg	6 Südost	15.2	89.7
1910	Zwettl	3 W/M-Viertel	15.0	62.3

4-3 Methodik

4-3.1 Überblick

Ein grundlegender Ansatz in unserem Projekt ist die Hypothese, dass Rückwärtstrajektorien von verschiedenen Ausgangspunkten im Raum Österreich (geographisch verteilt und in unterschiedlichen Höhen) zusammen mit einigen Zusatzparametern wie Feuchte, Vorticity und Labilität die meteorologischen Situationen charakterisieren können, in denen mit Starkniederschlägen zu rechnen ist. Diese Daten zusammen werden in der Folge auch als „meteorologische Information"bezeichnet.

Im Projektantrag waren alternativ zu Trajektorien auch sogenannte abgeleitete Größen wie Windrichtung und -geschwindigkeit, Temperatur, Vorticity usw. vorgeschlagen worden. Es stellte sich heraus, dass im gegebenen Rahmen nur die Verfolgung einer der beiden Optionen möglich war. Die Trajektorien wurde vor allem deshalb gewählt, weil dieser Ansatz neu ist. Es ist keineswegs ausgeschlossen, dass die abgeleiteten Größen genauso gut oder vielleicht sogar besser „funktionieren".

Der methodische Ablauf kann etwa wie folgt dargestellt werden:

1. Auswahl der Ereignisse (Tage), die als „Starkniederschläge" betrachtet werden, und in Zusammenhang damit Bildung von Niederschlagsregionen mittels Clusteranalyse.
2. Aufbereitung der meteorologischen Information (Trajektorienberechnung und Erstellung der Distanzmatrizen).
3. Zusammenfassung dieser Ereignisse in Gruppen mit ähnlicher Wetterlage durch Clusteranalyse der meteorologischen Information.
4. Ableitung einer Entscheidungsfunktion, ob ein beliebiger gegebener Tag (charakterisiert durch die zugehörige meteorologische Information) als einem der Starkniederschlags-Cluster zugehörig betrachtet werden kann, an einem Test-Datensatz.
5. Gegebenenfalls Wiederholung der Schritte 3 und 4 mit geänderter meteorologischer Information bzw. verschiedenen Varianten des Cluster-Verfahrens. Ziel soll sein, mit möglichst wenig Information eine möglichst gut zwischen Starkniederschlags-Tagen und anderen Tagen trennende Entscheidungsfunktion zu finden.
6. Klassifizierung aller Tage eines Datensatzes (z. B. Reanalysedaten oder Klima-Simulationslauf) und statistische Auswertung der daraus resultierenden Zeitreihen der Starkniederschlagsneigung aufgrund der synoptischen Situation.

Für Schritt 4 und 5 konnte nur ein erstes Ergebnis erreicht werden, für Schritt 6 war innerhalb des Projekts keine Zeit mehr.

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Schritte näher besprochen.

4-3.2 Identifizierung von Starkniederschlags-Tagen

Um einen Tag als „Tag mit Starkniederschlag" zu qualifizieren, sollte an diesem „irgendwo" in Österreich „starker" Niederschlag gefallen sein. Wir haben uns entschieden, unter „irgendwo" nicht nur eine einzelne Station, die vielleicht von einem isolierten Gewitter betroffen ist, zu verstehen, sondern zumindest eine ganze Region. Damit ergibt sich die Notwendigkeit, solche Regionen zu definieren. Als „starker" Niederschlag wird ein Tag angesehen, der in mindestens einer Region zu einer Tagessumme des Niederschlags führte, die über dem 98. Perzentil der Tagesniederschläge in der jeweiligen Region liegt.

Die Auswahl der Regionen wurde aufgrund einer Clusteranalyse aller Niederschlagsdaten vorgenommen. Die zu gruppierenden Elemente waren die Niederschlagszeitreihen aller Stationen, die mindestens 5 Jahre Daten innerhalb des Untersuchungszeitraumes 1979-1993 aufwiesen. Es wurde das gesamte Jahr sowie Sommer (April bis September) und Winter (Oktober bis März) jeweils getrennt bearbeitet. Das Clusterungsverfahren, hierarchische Clusterung, ist das gleiche, das auch für die Clusterung der Trajektorien verwendet wurde. Es ist in Abschnitt 4-3.5.1 beschrieben, wobei anstelle der Distanzen zwischen den Trajektorien die Ähnlichkeit zwischen den Stationen tritt. Als Ähnlichkeitsmaß für jeweils zwei Stationen wurde der quadrierte Korrelationskoeffizient der zugehörigen Niederschlagsreihen verwendet. Zwar wurden alle Tage in die Analyse einbezogen, jedoch erhalten Tage mit starken Niederschlägen aufgrund des quadratischen Charakters der Varianzen und Kovarianzen, welche den Korrelationskoeffizienten bestimmen, ein wesentlich höheres Gewicht. Für spezielle Anwendungen (zum Beispiel Katastrophenschutz-Planung) könnte bei Bedarf auch ein Teildatensatz, nur aus stärkeren Niederschlägen bestehend, herangezogen werden. Die mit dem hierarchischen Clusterverfahren erzeugten Cluster wurden anschließend iterativ umgruppiert (vergl. Kapitel 4-3.5.2). Dies geschah allerdings nur am Schluss und nicht in jeder Stufe des hierarchischen Clusterprozesses, und die Umordnung basierte auf der Ähnlichkeit mit dem arithmetischen Mittel des Clusters (Standardverfahren der iterativen Clusterungsmethode).

Im nächsten Schritt wurden für jede Region tägliche Mittelwerte des Niederschlags berechnet. Der Beitrag jeder Station wurde dabei mit der ihr zugeordneten Fläche gewichtet. Diese Flächen wurden im GIS mit Thyssen-Polygonen berechnet.

Für die weiteren Schritte wurden die aus den ganzjährigen Niederschlagsreihen abgeleiteten Niederschlagsregionen und die auf dem gesamten Jahr beruhenden Perzentile verwendet. Die zugrunde liegende Hypothese war, dass jene Wetterlagen, die bevorzugt im Sommer oder im Winter Starkniederschläge verursachen, durch die Clusteranalyse der meteorologischen Information ohnehin zum Vorschein kommen sollten.

Die Neigung zu Starkniederschlägen hat einen Jahresgang, der von Region zu Region unterschiedlich ist. Im Sinne der Einheitlichkeit des Datenmaterials und in Anbetracht der begrenzten zur Verfügung stehenden Zeit wurde von einer zeitlich variablen Definition von „Starkniederschlag“ abgesehen. Im stark anwendungsbezogenen Kontext von Startclim wäre auch eine Definition vorstellbar, die nicht nur auf meteorologischen Kriterien abstellt, sondern auch die unterschiedlichen Auswirkungen zu verschiedenen Jahreszeiten oder in Abhängigkeit von Zusatzparametern wie Vorregen oder Schneefallgrenze (im Hinblick auf Hochwässer und Muren) oder Schneefallgrenze und Höhenwind (im Hinblick auf Lawinen). Allerdings ist der damit verbundene Bearbeitungsaufwand um einiges größer.

4-3.3 Trajektorienberechnung

Zur Berechnung von dreidimensionalen Rückwärtstrajektorien wurde das Modell Flextra (Stohl et al., 1995) herangezogen. Ein derartiges Modell berechnet die Bahnen von Luftpartikeln aufgrund der grossräumigen Windfelder (horizontale und vertikale Komponente der Luftbewegung). Entsprechend der Orographie der ERA15 Modelldaten wurden 8 Punkte (Abb. 4-1) im Raum Österreichs ausgewählt. Es sollte sichergestellt werden, dass möglichst alle im östlichen Alpenraum auftretenden Strömungen erfaßt werden können.

An diesen 8 Ankunftspunkten (Abb. 4-1) wurden in 8 vertikalen Niveaus (Tab.4-2) Rückwärtstrajektorien berechnet, welche vier Tage zurückreichen. In den ersten 48 Stunden vom Ankunftszeitpunkt zurückgerechnet beträgt die zeitliche Auflösung der Trajektorienpunkte eine Stunde, an den letzten beiden Tagen 6 Stunden. Diese gröbere zeitliche Auflösung in der längeren Vergangenheit ist zum einen damit begründet, dass dadurch der für die Trajektorien benötig-

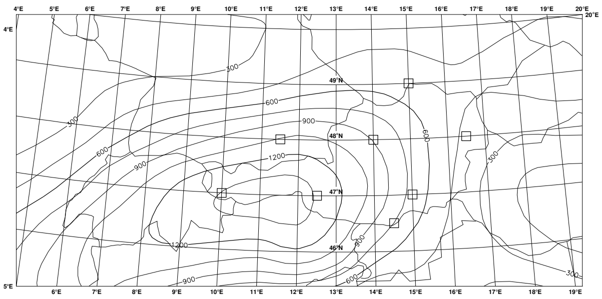


Abbildung 4-1: Die 8 Ankunftspunkte an denen Rückwärtstrajektorien berechnet wurden sind durch Quadrate gekennzeichnet. Mit Isolinien ist die Höhe der Modellorographie (ERA15) dargestellt.

te Speicheraufwand erheblich reduziert werden kann, zum anderen aber natürlich damit, dass kurzzeitige Richtungsänderungen der Trajektorien welche bereits zwei Tage alt sind für die Wetterlage in Österreich weniger relevant sind. Richtungsänderungen, welche im Stundenbereich liegen, können in den letzten 48 Stunden sehr wohl Auswirkungen auf die Wetterlage haben. Um den zeitlichen Ablauf besser erfassen zu können, wurden an jedem Startpunkt und in jedem Niveau Trajektorien für 8 verschiedene Ankunftszeiten (Tab. 4-2) berechnet. Zusätzlich zur Gesamtbetrachtung der Trajektorien wurden diese noch in drei Abschnitte (0–24 h, 24–48 h, 48–96 h) unterteilt, um die jüngere Vergangenheit der Trajektorie von der älteren getrennt betrachten zu können.

Tabelle 4-2: Übersicht der möglichen Startniveaus und Ankunftszeiten für die Trajektorien.

Ankunftszeiten:	07:30	10:30	13:30	16:30
UTC	19:30	22:30	01:30	04:30
Niveaus:	250 m agl	500 m agl	1000 m agl	1500 m agl
	2000 m agl	3000 m agl	500 hPa	300 hPa

4-3.4 Berechnung der Distanzmatrizen für Trajektorien

Zur Quantifizierung der (Un-)Ähnlichkeit zweier Trajektorien ist es nötig, eine geeignete Distanzfunktion zu wählen. Da es sich um dreidimensionale Trajektorien handelt, ist eine Trennung zwischen horizontalem Abstand (Gl. 1) und vertikaler Distanz (Gl. 2) möglich und aufgrund der unterschiedlichen Skalen und Wirkungen durchaus sinnvoll.

Die horizontale Distanz (d_{xy}) zwischen den Trajektorien k und l wird wie folgt berechnet:

$$d_{xy}(k,l) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left({\sigma_{x_i}}^{-1} \left| x_i(k) - x_i(l) \right| + {\sigma_{y_i}}^{-1} \left| y_i(k) - y_i(l) \right| \right) \tag{1}$$

Die Summation in der Gleichung erfolgt über alle verwendeten Trajektorienpunkte. Für jeden Trajektorienpunkt wird der Absolutbetrag der Distanz zwischen den x-Koordination (x_i) berechnet und mit der jeweiligen Streuung (σ_{xi}) zu diesem Zeitpunkt normiert. Gleiches passiert für die y-Koordinate (y_i). Die Summe der beiden Werte wird nun über alle verwendeten Trajektorienpunkte aufsummiert und durch die Gesamtanzahl N der verwendeten Trajektorienpunkte geteilt. Auf diese Weise wird es möglich, unterschiedlich lange Trajektorienteile miteinander zu vergleichen; auch wird die unterschiedliche zeitliche Auflösung der Trajektorienabschnitte ausgeglichen.

Die vertikale Distanz (d_z) wird auf analoge Weise berechnet:

$$d_z(k,l) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} {\sigma_z}_i^{-1} \left| z_i(k) - z_i(l) \right| \tag{2}$$

Auch bei dieser Berechnung wird über alle verwendeten Trajektorienpunkte N aufsummiert und diese Summe durch die Gesamtanzahl (N) geteilt. Zur Normierung der Absolutbeträge der Differenzen zwischen den Trajektorien k und l wird die Streuung der vertikalen Koordinate (σ_z) verwendet.

Wegen des Ziels dieser Studie, nämlich der Bestimmung von Wetterlagen für Starkniederschlagstage, haben wir zusätzlich die Feuchte und auch die potentielle Vorticity (Stohl and Seibert, 1998) am Ankunftsort als Maß herangezogen. Die entsprechenden Distanzen sind:

$$d_q(k,l) = \sigma_q^{-1} \left| q_1(k) - q_1(l) \right| \tag{3}$$

$$d_p(k,l) = \sigma_p^{-1} \left| p_1(k) - p_1(l) \right| \tag{4}$$

Die Distanzen der Feuchte (d_q) in Gl. 3 und der potentiellen Vorticity (d_p) in Gl. 4 werden jeweils nur für den Ankunftspunkt der Trajektorien k und l berechnet. Auch hier wird mit den entsprechenden Streuungen σ_q und σ_p normiert.

Die Normierung der Größen mit der jeweiligen Streuung, wodurch die Zahlen dimensionslos werden, ermöglicht es später, verschiedene Beiträge zu einer Gesamtdistanz aufzuaddieren. Die Streuung der x-, y- und z-Koordinaten aller Trajektorien in Abhängigkeit von der Zeit entlang der Trajektorie, sowie die Streuung der Feuchte- und Vorticitywerte zum Ankunftszeitpunkt wurde für alle 8 Niveaus getrennt berechnet.

Die Distanzfunktionen werden jeweils zwischen zwei Trajektorien berechnet und geben Auskunft über deren Ähnlichkeit bzw. Verschiedenheit. Bei sehr schnellen Trajektorien kann es vorkommen, dass diese das Rechengebiet verlassen. Solche Trajektorien weisen dann weniger vorhandene Datenpunkte auf als andere. Um jede Trajektorie mit jeder anderen vergleichbar zu machen, wurden fehlende Trajektorienpunkte durch lineare Extrapolation der letzten verfügbaren Datenpunkte berechnet. Aufgrund der 8 Startpunkte, 8 vertikalen Niveaus und 8 verschiedenen Ankunftszeiten pro Tag steht eine große Auswahl an möglichen Trajektorien zur Verfügung. Die verfügbaren Trajektorieninformationen werden durch folgende Codes kompakt beschrieben:

$\texttt{k\_h}plta$; $\texttt{k\_v}plta$; $\texttt{q\_\_}plta$; $\texttt{pv\_}plta$;
wobei $p, l, t \in \{1, .., 8\}$ und $a \in \{0, .., 3\}$

Die Werte von p, l und t beschreiben hier den Startpunkt, das Startniveau und die Ankunftszeit am Tag, und die Werte von a, welchen Trajektorienabschnitt man gerade betrachten will. Hier kennzeichnet der Wert 0 die gesamte Trajektorie, 1 den ersten Tag, 2 den zweiten Tag und 3 den Rest der Trajektorien. Die Abkürzung `k_` steht für Koordinaten, `h` für horizontal und `v` für vertikal, `q_` bezeichnet die Feuchte und `pv` die potentielle Vorticity am Ankunftsort.

Alle dieser möglichen Beiträge zur Distanzfunktion (Gln. 1-4) wurden für ein ausgewähltes Kollektiv an Tagen berechnet und für die spätere Auswertung in einer symmetrischen Distanzmatrix abgespeichert. Jedes Element der Matrix beschreibt die Distanz für ein spezifische Trajektorienelement zwischen je zwei Tagen. Es gibt gesonderte Matrizen für die horizontalen Distanzen, die vertikalen Unterschiede, die Feuchtewerte und die potentiellen Vorticitywerte. Die Matrizen können beliebig addiert werden, um verschiedene Kombinationen meteorologischer Information zur Clusterung zu verwenden. Ermöglicht wird dies durch die Normierung der einzelnen Größen mit ihrer Streuung. Obgleich kein Gebrauch davon gemacht wurde, könnten einzelne Summanden unterschiedlich gewichtet werden.

Die Datenkollektive, für die diese Matrizen berechnet wurden, enthalten jeweils alle in den 15 Jahren aufgetretenen Tage mit starkem Niederschlag (über dem 98er Perzentil) und eine ausgewählte Anzahl an Vergleichstagen, deren Niederschlag unter dem 98er Perzentil liegt. Für die Starkniederschlagstage der sieben Regionen Österreichs und für Österreich als Ganzes wurde jeweils ein Datenkollektiv erstellt. Im letzteren Fall enthält dieses einerseits alle Tage, an denen in mindestens einer Region der Niederschlag das für diese Region charakteristische 98er Perzentil überschritt, und andererseits Vergleichstage, wo dies in keiner der Regionen der Fall war.

Anhand eines praktischen Beispiels soll diese Kombination verschiedener Summanden erläutert werden: Aus synoptischer Sicht betrachtet ist es sinnvoll, Trajektorien in zwei Niveaus zu betrachten (bodennah und in höheren Atmosphärenschichten). Ausserdem ist beispielsweise eine Trennung zwischen Ost- und Westösterreich durch Wahl geeigneter Startpunkte möglich. Als Beispiel einer solchen Summe an Teilbeträgen zur Gesamt-Distanzfunktion könnte man die horizontale Distanz der Trajektorien der Startpunkte 5 und 8 in den Niveaus 2 und 7, jeweils zur Ankunftszeit 4, für die gesamte Trajektorie kombinieren, was folgende Beiträge ergäbe (kodierte Schreibweise, wie oben erläutert):

```
k_h5240
k_h8240
k_h5740
k_h8740
```

In diesem Beispiel werden vier Matrizen für die Gesamtmatrix verwendet. Jede Einzelmatrix beinhaltet die Distanzinformation zwischen allen Terminen der jeweiligen Trajektorie. Ein Programm liest zuerst die gewünschten Beiträge in der kodierten Schreibweise ein, und liest dann die bereits abgespeicherten Matrizen, addiert sie zu einer Gesamtmatrix und führt damit die Clusteranalyse durch, ohne dass das umfangreiche Trajektorien-Datenmaterial gelesen werden müsste.

4-3.5 Clusterung

Die Wahl eines passenden Clusteralgorithmus bildete eine zentrale Rolle des Projekts. Da mit Trajektorien gearbeitet wurde, schien es zunächst naheliegend, die iterative Methode von Dorling and Davies (1992) zu verwenden.

Bei diesem Clusteralgorithmus wird eine bestimmte Anzahl von Trajektorien („Saattrajektorien“) vorgegeben, die mehr oder weniger beliebige Form haben können (sie können ein Teil des Datensatzes sein oder auch künstlich). Diese dienen am Beginn als Zentren der Cluster. Nun werden die anderen Trajektorien den jeweils nächstliegendsten Clustern zugeordnet. Ist dies für alle Trajektorien geschehen, wird die Mitteltrajektorie jedes Clusters durch arithmetische Mittelung der Koordinaten der Stützstellen bestimmt und als neue Saattrajektorie definiert. Der Vorgang wird wiederholt indem wieder alle Trajektorien zu den ähnlichsten Saattrajektorien zugeordnet werden. In einem iterativen Prozess werden die Elemente so lange umgeordnet bis eine stabile Lösung erreicht wird.

In der Literatur (Krishnaiah and Kanal, 1982) wird darauf hingewiesen, dass die Wahl der Saattrajektorien das Ergebnis beeinflusst, weshalb diese Methode vorerst verworfen wurde.

4-3.5.1 Hierarchische Clusterung

Eine hierarchische Clustermethode (Anderberg, 1973) erschien uns aufgrund der Literaturstudien (Krishnaiah and Kanal, 1982; Deichsel and Trampisch, 1985; Kaufmann and Rousseeuw, 1990) am geeignetsten. Bei ihr kann entweder die Ähnlichkeit oder die „Unähnlichkeit" der zu gruppierenden Elemente als Entscheidungsmaß für die Clusterung dienen. Ein Vorteil dieser Clustermethode ist die schnelle Berechnung der Gruppierung. Als Input wird eine symmetrische Matrix der Ähnlichkeiten bzw. Distanzen zwischen den Elementen verwendet. So können alle möglichen Kombinationen an Distanzfunktionen vorab ausgerechnet werden, um dann eine Clusterung mit verschiedene Kombinationen davon zu testen.

Das hierarchische Clusterverfahren verbindet in jedem Schritt zwei Gruppen miteinander. Am Beginn stellt jedes Element eine eigene Gruppe dar. Die beiden Elemente, die zueinander die geringste Distanz aufweisen, werden zusammengefasst. In der von uns verwendeten "average linkage"-Methode wird dann aus den Distanzen der beiden verbundenen Elemente zu allen anderen jeweils der Mittelwert bestimmt, der für den nächsten Iterationsschritt als „Gesamtdistanz" gilt. Nach und nach werden nun immer zwei Gruppen zusammengeführt, bis am Ende nur mehr eine Gruppe übrig bleibt.

Wir verwendeten als Basis für unseren hierarchischen Cluster-Algorithmus das CLUSBAS Fortran-Programm von John S. Uebersax, welches in der STATLIB Softwaresammlung unter `http://lib.stat.cmu.edu/general/hcfb` frei zugänglich ist.

Wie bei jedem Clusteralgorithmus, muss auf irgendeine Weise die Anzahl der Cluster festgelegt werden. Während sie im iterativen Verfahren von vornherein fixiert wird, kann sie beim hierarchischen Clustern aus der Reihe der Cluster-Kohärenz-Werte durch einen Algorithmus bestimmt werden. Das Maß der Cluster-Kohärenz ist der mittlere Abstand zwischen allen Elementen jenes Clusters, der als letztes gebildet wurde. Ein hohes Maß bedeutet also geringe Kohärenz, und es nimmt von Schritt zu Schritt zu. Üblicherweise wählt man eine Clusterzahl, bei der unmittelbar danach die Maßzahl deutlich ansteigt. Unser Algorithmus zur Festlegung der Clusterzahl sucht innerhalb der letzten 20 Schritte (also einer Clusterzahl von maximal 20) jenen Schritt, nach dem der größte relative Anstieg der Maßzahl stattfindet.

Ist ein Element einmal einer Gruppe zugeteilt, kann es diese beim üblichen hierarchischen Clustern nicht mehr verlassen. Das erschien uns als Nachteil dieser Methode, denn durch das Wachsen der Gruppen kann es durchaus sein, dass ein Element später eine wesentlich kleinere Distanz zu einer anderen Gruppe aufweist als zu jener, der es am Beginn zugeteilt wurde. Wieder kam uns die Methode der Saattrajektorien in den Sinn und wir entschieden uns, das fertige Clusterresultat auch noch diesem Verfahren zu unterwerfen, um eine nachträgliche Umordnung der Elemente zu ermöglichen. Für jeden der gebildeten Cluster wird dabei die mittlere Trajektorie bestimmt, welche als Saattrajektorie dient. Die Elemente werden nun so lange umgeordnet bis sich eine stabile Lösung eingestellt hat. Da für die Berechnung der mittleren Trajektorie alle Trajektorien nochmals eingelesen werden mussten, geht dabei der Vorteil der schon abgespeicherten Distanzfunktionen verloren und der Rechenaufwand für die Clusterung steigt deutlich an.

4-3.5.2 Kombinierter hierarchisch-iterativer Clusteralgorithmus

Beim Betrachten der Ergebnisse stellten wir fest, dass in manchen Clustern die Mitteltrajektorie den im Cluster vorhanden Trajektorien nicht besonders ähnlich war, was den statistischen „Leitsatz", wonach das Mittel jene Größe ist, die nie auftritt, bestätigte. Daraus entstand die Idee, anstelle der mittleren Trajektorie ein „zentrale" Trajektorie zu suchen. Wir definierten diese als jenes Element, welches zu allen anderen in der Gruppe befindlichen in Summe die kleinste Distanz aufweist. Wird der iterative Clusteralgorithmus in diesem Sinne modifiziert, entfällt auch die Notwendigkeit zum Einlesen der Trajektoriendaten, und die abgespeicherten Distanzmatrizen reichen auch für die Umordnung aus.

Auch bei diesem Verfahren waren wir mit den Clusterungsergebnissen immer noch nicht ganz zufrieden, weshalb wir den Algorithmus noch einmal abänderten. Die Tatsache das man erst umzuordnen beginnt, wenn die Gruppierung abgeschlossen ist, erschien suboptimal. Da nun ja ausschließlich die Distanzmatrizen zur Clusterung verwendet werden, ist es problemlos möglich, den zuvor beschriebenen Prozess des iterativen Umordnens zu jedem Schritt des hierarchischen Algorithmus durchzuführen. Es werden also jeweils die beiden Gruppen mit der geringsten Distanz verbunden, und anschließend werden die Elemente wie oben beschrieben umgeordnet.

Die anfänglich gespeicherte Distanzmatrix existiert nur für alle Elemente separat. Daher muss nach jedem Gruppierungsschritt die Distanzmatrix erneuert werden. Dieser Vorgang erhöht den Rechenaufwand aber nicht übermäßig, da die Anzahl zu vergleichender Elemente durch laufende Verringerung der Gruppenzahl reduziert wird.

4-3.6 Entscheidungsalgorithmus

Je nachdem, welche Kombinationen von Distanzfunktionen gewählt werden, ergeben sich unterschiedliche Cluster, sowohl was ihre Größe als auch ihre Anzahl anbelangt. Um ein besseres Gefühl für die Methode zu bekommen, werden zunächst nur einzelne Regionen Österreichs betrachtet. Für diese wird eine Clusterung durchgeführt. Damit erhält man Wetterlagen, die in dieser Region zu Starkniederschlag führen. Ob diese Gruppierung aber auch eine Trennung von Starkniederschlagstagen und Tagen mit wenig oder keinem Niederschlag in der jeweiligen Region ermöglicht, wird so noch nicht ersichtlich. Dazu dienen die Trajektorien der Vergleichstage. Das sind zufällig ausgewählte (mit dem selben Jahresgang wie die Starkniederschlags-Tage), an denen die Niederschlagsmenge unter dem 98er Perzentil blieb.

Diese werde zunächst einmal jenem Cluster zugeordnet, zu dessen Zentralelement sie die geringste Distanz aufweisen. In einem nächsten Schritte werden alle Tage als entweder starkniederschlagsträchtig oder nicht beurteilt, und zwar in Abhängigkeit der Distanz zum Zentralelement ihres Clusters. Dieser Schwellwert der Distanz muss bestimmt werden.

Dazu wird ein Gütemaß für die Trennung zwischen Starkniederschlags- und Vergleichstagen berechnet, und als Schwellwerte jene Distanz gewählt, bei der das Gütemaß den besten Wert erreicht. Dazu werden die Distanzen D in Klassen eingeteilt und die kumulative Häufigkeitsverteilung berechnet, getrennt für die Starkniederschlags- und die Vergleichsfälle. Das Ausmaß, in dem sich die Flächen unter den Kurven der relativen Häufigkeiten, also die jeweiligen Werte der kumulativen Häufigkeitsverteilungen, für die Starkniederschlagsfälle (P_w) und die Vergleichsfälle (P_d) überschneiden, liefert den Skillscore s:

$$s(D) = 0.5 \cdot [1 - P_w(D) + P_d(D)] \tag{5}$$

Dieser Wert ist im Idealfall Null. Dann ist $P_w(D) = 1$, d. h. alle Starkniederschlagsfälle werden erfasst, und $P_d(D) = 0$, d. h. keiner der Vergleichsfälle wird irrtümlich zugeordnet. Als Schwellwert sollte also jenes D gewählt werden, für das s den kleinsten Wert annimmt. Konkrete Beispiele finden sich in Kapitel 4-5.1.

4-4 Analyse der täglichen Niederschlagssummen

Die mittels Clusteralgorithmus bestimmten Niederschlagsregionen Österreichs sind in Abb. 4-2 für das ganze Jahr dargestellt. Aus Tab. 4-1 können die Namen der Stationen in den einzelnen Regionen abgelesen werden.

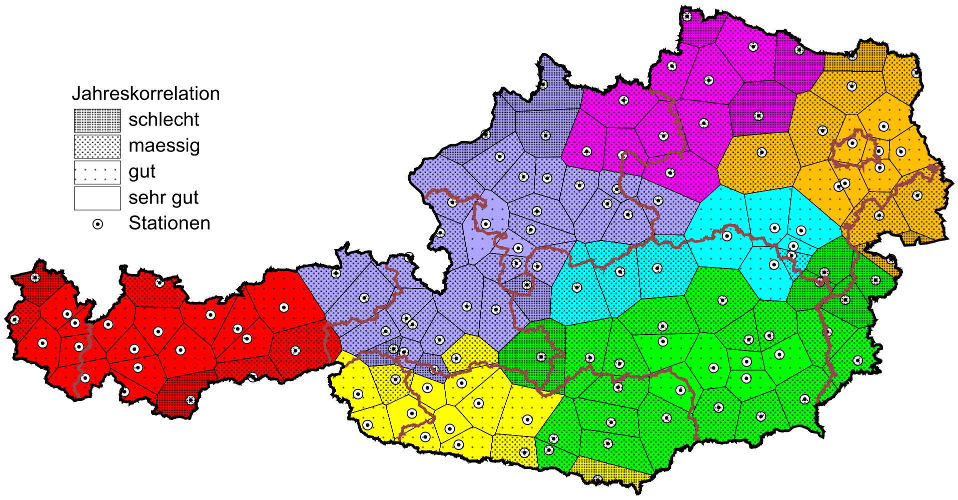


Abbildung 4-2: Niederschlagsregionen Österreichs unter Berücksichtigung aller Tage der Jahre 1979-1993. Die verwendeten Stationen sind als Punkte zusammen mit den ihnen zugeordneten Thyssen-Polygonen eingetragen. Die Schraffur innerhalb jedes Polygons zeigt den Mittelwert der Korrelation dieser Station zu allen anderen Stationen der Region.

Die Region Westösterreich umfasst das Bundesland Vorarlberg sowie Nordtirol ohne das östliche Unterland. Es mag überraschen, dass hier extreme Nordstaulagen mit inneralpinen Stationen zusammen gefasst werden. Die Korrelationsangaben zeigen auch an, dass sowohl die nördlichsten Stationen (Bregenz und Reutte) als auch die unmittelbar am Alpenhauptkamm gelegenen Stationen (vor allem Obergurgl und Brenner) weniger gut zur Region passen. Jedoch sind sie einander immer noch ähnlicher als den weiter östlich gelegenen Nord- bzw. Südstauregionen, vermutlich wegen der von West nach Ost wandernden Fronten.

Der Kern der Region "Nordstau" ist das Salzkammergut. Nahezu das ganze Bundesland Salzburg gehört ihr an, dazu Oberösterreich ohne das östliche Mühlviertel. Es handelt sich hier also nicht nur um die Nordstauregion im engeren Sinne, sondern auch jene alpenferneren Gebiete, die nach Nordwesten offen sind, werden der Region zugeordnet. Auch das oberste Ennstal (Radstadt) gehört dazu.

Die Region Mühl- und Waldviertel enthält neben dieser Kernregion auch den angrenzenden Donauraum zwischen Krems und Hörsching.

Die "Ostregion" erstreckt sich von St. Pölten über den Wienerwald in das östliche Tiefland (Wein- und Industrieviertel) bis zum Neusiedler See im Süden.

Die Region "Ennstal" beinhaltet neben dem Ennstal auch den Mariazeller Raum, das oberste Mürztal und die niederösterreichischen Alpen.

Die Südost-Region setzt sich aus dem Mittel- und Südburgenland, Unterkärnten (bis nach Villach), dem Lungau sowie den nicht anderweitig zugeordneten Teilen der Steiermark zusammen.

In der Region Südstau finden wir ganz Osttirol, Oberkärnten und die Karawankenstation Loiblpass (die Station mit den massivsten Starkniederschlägen in Österreich – eigentlich bräuchte

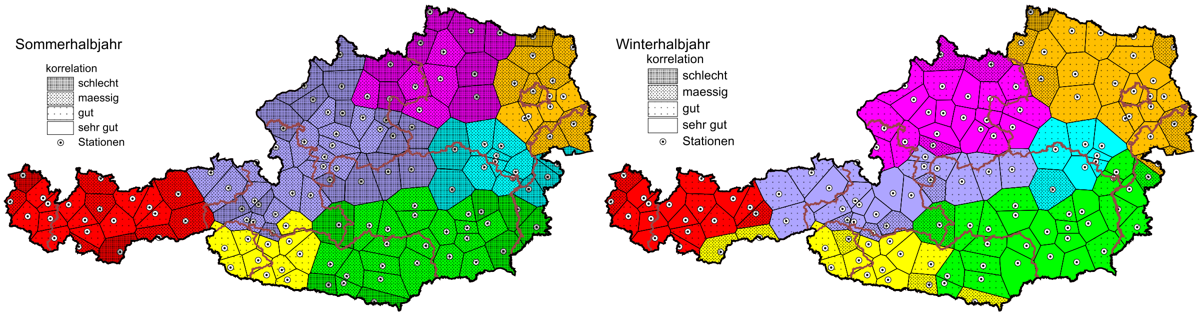


Abbildung 4-3: Niederschlagsregionen Österreichs im Sommer- und im Winterhalbjahr, sonst wie Abb. 4-2.

sie eine eigene Region). Auch die knapp nördlich des Hauptkamms gelegene Station Mallnitz-Böckstein gehört dazu. Angemerkt werden sollte, dass es sich bei den meisten Stationen nur um gemäßigte Südstaulagen handelt, die sich nicht mit slowenischen oder Friauler Stationen vergleichen können, wo noch wesentlich extremere Niederschläge vorkommen.

Bei einer getrennter Betrachtung von Sommer- und Winterhalbjahr ergeben sich einige Verschiebungen (Abb. 4-3). Im Sommer erfasst die Region Mühl- und Waldviertel auch den Raum St. Pölten. Das eigentliche Ennstal wird ein Teil der Nordstau-Region, während die im Jahresmittel mit ihm zusammenhängenden Regionen weiter östlich sich mit dem Raum Bruck/Mur und der Wechselregion bis hin zur ungarischen Grenze vereinen. Vermutlich sind diese Gebiet häufig von denselben Gewitter-Zugbahnen betroffen (“Wechsel-Gewitter”). Die Südostregion wächst auf Kosten des Südstau-Gebietes.

Im Winterhalbjahr gewinnt der Südstau auch die Hauptkamm-Stationen Obergurgl und Brenner in Tirol, Böckstein bleibt dafür beim Nordstau, der sich auch auf das gesamt Tiroler Unterland (bis vor Innsbruck) ausdehnt. Das eigentliche Ennstal wird ebenfalls ein Teil des Nordstaus, so dass sich die sog. Ennstal-Region auf ein kleines Gebiet im Raum Hochschwab – Rax zusammenzieht. Das Waldviertel vereinigt sich mit der Ostregion, während das Mühlviertel die Flachlandregionen Oberösterreichs und den Salzburger Flachgau dazu bekommt.

Speziell beim Betrachten der jeweils besonders schlecht mit dem Restgebiet korrelierten Stationen wird deutlich, dass die vorliegende Einteilung auch davon geprägt ist, dass wir sie auf das politische Gebiet Österreich begrenzt haben. Würden wir etwa die ganzen Ostalpen einbeziehen, würden zusätzliche Gebiete entstehen, von denen einige grenznahe österreichische Stationen enthielten.

In Tabelle 4-3 sind die Quartilswerte sowie die Werte für das 90., das 95. und das 98. Perzentil und das Maximum der Tagesniederschläge in den einzelnen Regionen wiedergegeben. Etwa die Hälfte aller Tage weist in ganz Österreich Niederschläge mit zumindest einigen Zehntel Millimetern auf. Das 98er Perzentil, welches als Kriterium für die in der Folge zu bearbeitenden Starkniederschlagstage herangezogen wurde, entspricht in den trockensten Regionen – der Ostregion sowie dem Wald- und Mühlviertel – 13 bzw. 14 mm, in den anderen Regionen etwas über 20 mm und im feuchtesten Gebiet, der Südstauregion, 27 mm. Die Maximalwerte des flächengemittelten Tagesniederschlags in den untersuchten 15 Jahren sind in der Mehrzahl der Regionen etwa einen Faktor 3 stärker als die des 98er Perzentils und liegen damit zwischen 60 und 70 mm (82 mm im Südstau). Auffallend ist die Ostregion: obwohl sie das niedrigste 98er Perzentil aufweist, ist das Maximum mit 70 mm höher als in den Nordstauregionen (Faktor 5.5!). Andererseits ist der Faktor im Ennstal nur 2.6. Das Wald- und Mühlviertel weist mit

Tabelle 4-3: Perzentilen des flächengemittelten Tagesniederschlags (in mm) in den einzelnen Niederschlagsregionen Österreichs. Zusätzlich ist noch das Verhältnis zwischen dem maximalen Tagesniederschlag und dem Wert des 98er Perzentils angegeben. Basis sind jeweils 5479 Tage im Zeitraum 1979 – 1993.

		Perzentile							
	Region	25.0	50.0	75.0	90.0	95.0	98.0	100.0	p100/p98
1	Westösterreich	0.0	0.6	4.0	9.6	14.4	21.2	65.8	3.1
2	Nordstau	0.0	0.9	4.8	10.4	15.2	20.8	62.5	3.0
3	Wald- und Mühlviertel	0.0	0.3	2.2	5.9	9.1	13.9	51.0	3.7
4	Ostregion	0.0	0.1	1.5	4.9	8.2	12.9	70.5	5.5
5	Ennstal-Semmering	0.0	0.5	3.5	9.4	14.3	21.7	56.2	2.6
6	Südost	0.0	0.2	2.1	7.4	12.5	20.7	70.7	3.4
7	Südstau	0.0	0.3	2.7	9.2	16.0	27.3	82.2	3.0

51 mm den geringsten Maximalwert auf. Die beiden aussergewöhnlichen Niederschlagsereignisse im August 2002 würden diese Statistik allerdings wesentlich verändern. Auf jeden Fall ist sichtbar, dass in den Nord- und Südstauregionen starke Niederschläge mit einer gewissen Regelmäßigkeit eintreten, während in Ostösterreich (Regionen 3, 4 und 6) extreme Niederschläge viel stärker episodisch sind, d. h. sie treten nur sehr selten ein, können dann aber eher intensiver als in Westösterreich oder im Nordstau ausfallen.

4-5 Analyse der Trajektorien

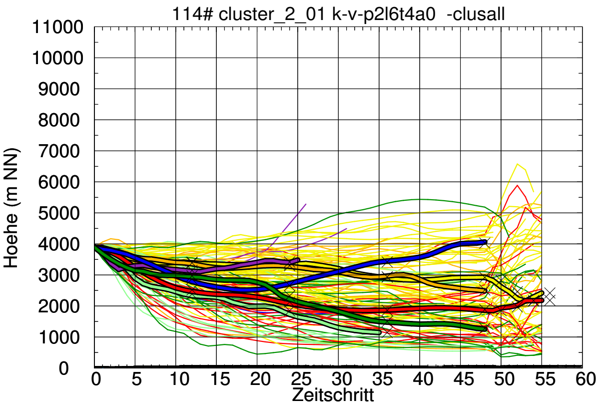
Die Trajektorien wurden mit Hilfe des in Kapitel 4-3.5 beschriebenen Clusteralgorithmus auf objektive Weise zu Gruppen zusammengefasst. Dafür werden nur Starkniederschlagstage wie in Kapitel 4-3.2 beschrieben herangezogen. Aus den unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten von Beiträgen zur Distanzfunktion resultieren zahlreiche verschiedene Möglichkeiten der Gruppierung. Daher sollte ein Optimum gesucht werden, das folgende Ziele bestmöglich erfüllt:

- gute Unterscheidung zwischen Starkniederschlagstagen und anderen Tagen,
- Identifikation von synoptisch relevanten Wetterlagen, und
- Anwendbarkeit auch auf Klimaszenarien, d. h. keine zu große Abhängigkeit von kleinskaligen und damit schwer reproduzierbaren Strukturen.

Eine Sonderrolle spielt die Feuchte. Man geht davon aus, dass durch die globale Erwärmung die Menge des Wasserdampfs in der Atmosphäre im Mittel zunimmt, was eine Intensivierung des Wasserkreislaufs und damit auch stärkere Niederschläge bewirken sollte. Der zweite Mechanismus, der in einem veränderten Klima die Niederschläge beinflussen kann, ist die unterschiedliche Häufigkeit und Ausprägung von Wetterlagen. Beide Aspekte sollten getrennt werden, obgleich Strömungsmuster natürlich mit Feuchteanomalien in Beziehung stehen.

4-5.1 Optimierung der Distanzfunktion

Am Beispiel der Region Nordstau sollen die Wahl der passenden Kombination von Distanzfunktionen und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile diskutiert werden. Um systematisch vorzugehen, wird im ersten Schritt zwischen horizontaler und vertikaler Distanz unterschieden. Die vertikale Distanz hat den Vorteil, dass damit aufsteigende niederschlagsträchtige Fälle von absinkenden trockenen Fällen getrennt werden können (Abb. 4-4). Dem stehen zwei Nachteile gegenüber: Da ganz unterschiedliche Strömungsmuster mit ähnlichem Aufsteigen verbunden sein können, lassen sich so nur schlecht Wetterlagen finden. Zudem ist die Vertikalbewegung ein im synoptischen Sinne sehr kleinräumiger Parameter.



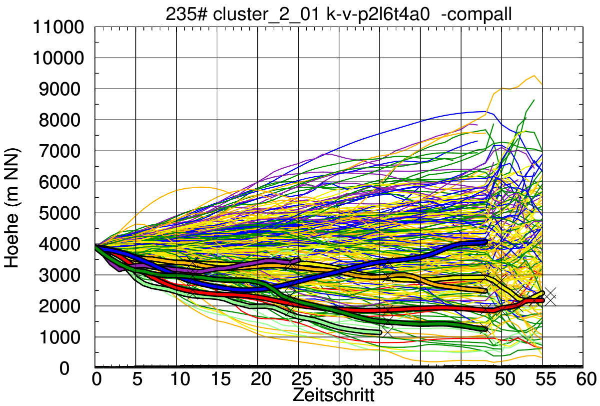


Abbildung 4-4: Vertikalschnitt der Trajektorien von (links) Starkniederschlags- und (rechts) Vergleichsfällen. Die Trajektorien wurden mit der optimaler vertikalen Distanzfunktionen (Tab. 4-4, `kv2440 kv2140 kv2640 q_2540 kv2480`) geclustert. Die Farben entsprechen Clustern, und die Zentraltrajektorie jedes Clusters ist mit einer dicken Linie hervorgehoben; diese sind bei den Vergleichsfällen zusätzlich eingezeichnet. Die Einfärbung der Vergleichstrajektorien entspricht dem nächstliegenden Cluster des Starkniederschlags-Kollektivs.

Tabelle 4-4: Trennschärfe der Clusterung für verschiedene Distanzfunktionen bei Starkniederschlägen der Region Nordstau. Die Spalte „Kombination“ kennzeichnet die gewählten Distanzfunktionen, die Spalte „in “ den Anteil der Starkniederschlagsfälle, welche als solche vom Algorithmus identifiziert werden, die Spalte „out “ gibt jenen Anteil der Vergleichsfälle, welcher fälschlicherweise als Starkniederschlagsfall zugewiesen wird, und die Spalte „Score “ zeigt den Skillscore, der optimal bei Null liegen sollte und im schlechtesten Fall Eins werden kann. In der letzten Spalte ist die Anzahl der entstandenen Cluster eingetragen.

Kombination	in	out	Score	Clusteranzahl
kv2440 kv2140	0.76	0.30	0.27	7
kv2440 kv2140 kv2640	0.82	0.32	0.25	5
kv2440 kv2140 kv2640 kv2340	0.66	0.28	0.31	2
kv2440 kv2140 kv2640 q2540	0.91	0.31	0.20	3
kv2440 kv2140 kv2640 q2540 q2140	0.87	0.31	0.22	3
kv2440 kv2140 kv2640 q2540 kv2480	0.86	0.19	0.17	7
kh2240 kh2240	0.57	0.29	0.36	4
kh2240 kh2340 kh2440	0.67	0.35	0.34	19
kh2240 q2740	0.84	0.34	0.25	17

Wie erwähnt, gibt es sehr viele verschiedene Möglichkeiten, die Startpunkte, Niveaus und Ankunftszeiten miteinander zu verknüpfen – zu viele, um sie alle auszuprobieren. Eine systematische Vorgangsweise ist daher angebracht. Die Optimierung wurde für die Starkniederschlagstage der Region Nordstau durchgeführt.

Zunächst wurde nur eine Ankunftszeit (in der Mitte des Tages [n=4]) und ein Trajektorienendpunkt (Mitte_Nord) gewählt. Dafür wurden alle möglichen Kombinationen der vertikalen Distanz von Trajektorien in jeweils zwei Niveaus ausgetestet. Es zeigte sich, dass die Kombination der Niveaus 1 und 4 den höchsten Score erzielen. Nun wurde diese Kombination wieder mit allen anderen Niveaus verknüpft; die Kombination mit Niveau 6 verbesserte den Score weiter (siehe Tab. 4-4). Beim nochmaligen Versuch ein Niveau beizumischen verschlechterte sich der Score, woraus hervor geht, dass die Kombination der Niveaus 1, 4 und 6 für den Ankunftspunkt 2 in bei Ankunftszeit 4 das beste Resultat für die Region Nordstau liefern. Als nächster Schritt wurde nun die Feuchte dieser vertikalen Kombination beigemischt, was den Score nochmals deutlich verbessert. Versucht man zusätzlich unterschiedliche Ankunftszeiten zu verwenden, so verbessert sich das Ergebnis nicht.

Verwendet man die horizontalen Distanzen, so zeigt sich ein deutlich anderes Bild. Anders als bei der vertikalen Distanz bringt eine Kombination mehrerer Niveaus zwar eine Verbesserung des Scores, da dann aber 17 bzw. 19 Gruppen gebildet werden und viele davon aus nur ein oder zwei Elementen bestehen, sind diese Kombinationen für die praktische Anwendung ungeeignet und daher zu verwerfen.

Es zeigt sich, dass für die Trennung der Starkniederschlagsfällen von den Vergleichstagen die vertikale Distanz deutlich bessere Ergebnisse liefert als die horizontale Distanz. Die Starkniederschläge in Abb. 4-5 für den Fall der vertikalen Distanz liegen fast zur Gänze links der Trenngeraden, während die Vergleichsfälle doch überwiegend rechts davon sind.

Die optimale Kombination für die vertikale Distanz wurde nun auch auf die Starkniederschlagsfälle der Südstauregion angewandt, wobei der Startpunkt Süd_Mitte verwendet wurde. Auch in dieser Region resultiert eine gute Trennung von Starkniederschlags- und anderen Fällen und anderen (Abb. 4-5 rechts). Die Kombination von vertikaler Distanz und Feuchte bietet also die Möglichkeit, regionsspezifisch zwischen Tagen mit Starkniederschlag und andern zu unterscheiden, die Clusterung bringt jedoch keine typischen Wetterlagen zum Vorschein, weshalb

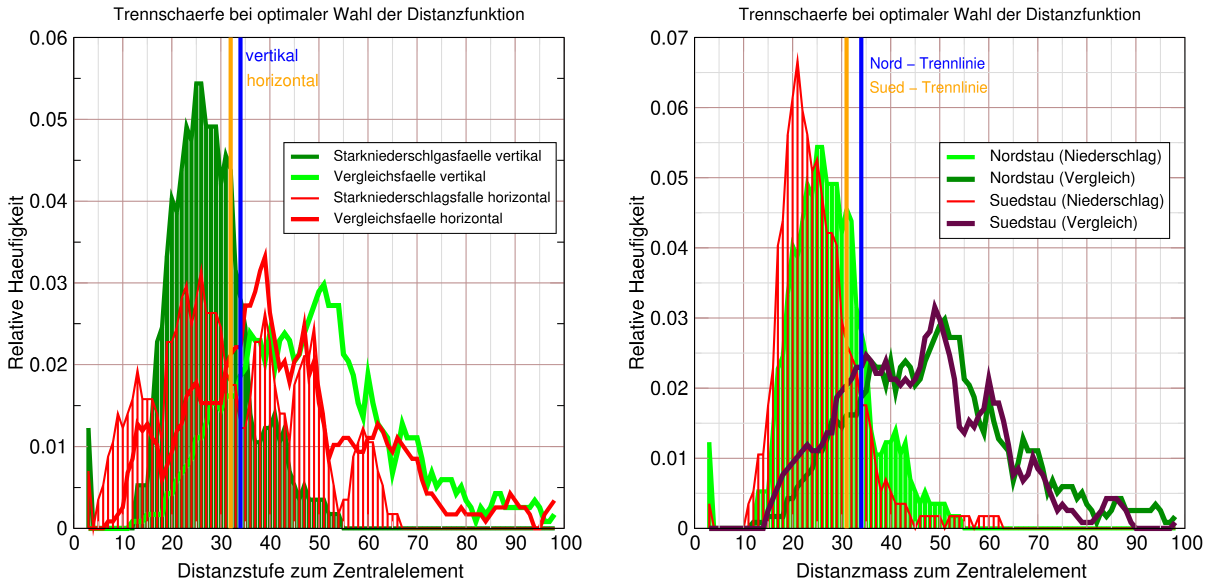


Abbildung 4-5: Vergleich der Trennschärfe bei unterschiedlichen Kombinationen der Distanzfunktion. Links: Region Nordstau, Vergleich der Clusterung mittels vertikalen und mittels horizontaler Distanzen. Rechts: Vergleich zwischen der Region Nordstau und der Region Südstau, jeweils Clusterung aufgrund der Vertikaldistanzen. Dargestellt sind jeweils die relativen Häufigkeiten der Distanz jedes Tages vom Zentralelement des zugehörigen Clusters, für die Starkniederschlags- (ausgefüllte Kurve) und die Vergleichstage (offene Kurve). Ausserdem sind als vertikale Linien die Schwellwerte eingetragen, die den optimalen Skillscore (Gl. 5) ergeben. Die Kurven wurden zur Darstellung mit einem gleitenden Mittels über 5 Punkte geglättet. Die ausgefüllte Kurve der Starkniederschlagsfälle sollte im Idealfall zur Gänze links von dieser Trennlinie liegen und die offene Kurve der Vergleichsfälle rechts davon.

sie für das Ziel dieses Projekts eher ungeeignet erscheint und daher vorerst nicht weiter verfolgt wurde.

4-5.2 Resultierende Wetterlagen

Um ein Clusterungsergebnis zu erhalten, das Wetterlagen im Sinne der Synoptik abbildet, also etwa Südwest- und Nordwest-Lagen, erscheint es sinnvoll, die horizontale Distanz zu verwenden, und diese für unterschiedlichen Niveaus zu kombinieren. Wie die Tests zeigten, bilden Niveau 2 (500 m agl) und Niveau 7 (500 hPa) die optimale Kombination, die in weiterer Folge betrachtet wird.

4-5.2.1 Wetterlagen für Starkniederschläge in der Region Nordstau

Wie schon bei der Optimierung der Distanzfunktion, betrachten wir zunächst wieder die Fälle mit Starkniederschlag in der Region Nordstau. Es wurde die ganze Länge der Trajektorie in der Distanzfunktion berücksichtigt. Auf diese Weise ergeben sich drei Cluster. Einer davon besteht jedoch aus einem Einzelfall, der sich durch sehr hohe Windgeschwindigkeiten von den anderen abhebt. Dieser Fall wird nicht weiter diskutiert.

Betrachtet man nur die Zentraltrajektorien (fette Linien in Abb. 4-6), so zeigt sich am Boden folgendes Bild: Die Zentraltrajektorie des einen Clusters (C1) kommt nahezu aus Westen, während jene des anderen (C2) in den letzten 24 h aus Westen, davor aus Süden kommt. Die Zentraltrajektorie des dritten Clusters C3, der nur aus einem Mitglied besteht, kommt aus

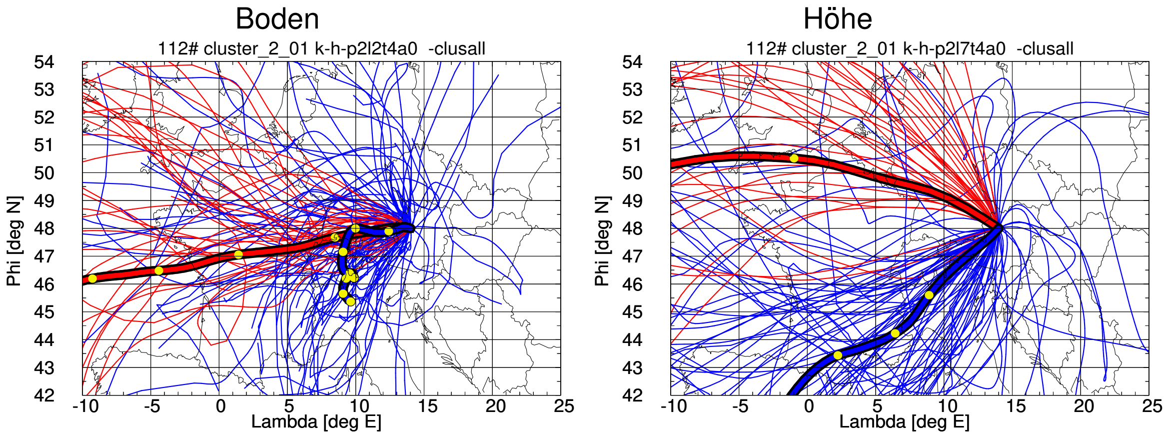


Abbildung 4-6: Trajektorien der Cluster, die sich unter Verwendung der horizontalen Distanz in zwei Niveaus (`kh2240 kh2740`) für die Starkniederschlagstage der Region Nordstau ergeben. Die fetten Linien stellen die Zentraltrajektorien dar. Links ist das Niveau 2 (500 m agl) dargestellt und rechts das Niveau 7 (500 hPa, etwa 5 km), rot sind die Trajektorien des Clusters C1 und blau die von C2. Die gelben Punkte entlang der Zentraltrajektorien sind alle 12 Stunden eingezeichnet und zeigen so die Geschwindigkeit der Trajektorie an.

Nordwesten. Betrachtet man auch alle anderen Trajektorien, so zeigen diese bei Wetterlage C1 eine Streuung von SSW bis NW mit leicht zyklonaler Krümmung und im anderen Fall C2 eine Streuung von Süd bis Nord. In diesem Cluster ist generell weit weniger Ordnung zu erkennen, was mit der zum Teil recht langsamen Geschwindigkeit der Trajektorien zu tun haben dürfte.

In der Höhe zeigt sich ein wesentlich geordneteres Bild. Die Zentraltrajektorie des Clusters C1 kommt aus NNW mit leicht antizyklonaler Krümmung, jene des anderen Kollektivs aus SW. Nahezu alle Trajektorien der Wetterlage C1 zeigen diese antizyklonale Krümmung. Bei der anderen Wetterlage C2 ist die Streuung der Trajektorien weit geringer als am Boden und bis auf wenige Ausnahmen kommen sie, zumindest in den letzten Stunden, aus Süd bis Südwest.

Bei den Fällen der Wetterlage C1 zeigt die Rechtsdrehung der Trajektorien mit der Höhe eine Warmluftadvektion an. Die synoptische Erfahrung zeigt, dass hier oft Warmfrontwellen oder offene Warmsektoren involviert sind, wo die Warmluft über am Alpennordrand keilförmig angestaute Kaltluft gehoben wird. Bei einem quasistationären Höhentrog können mehrere Fronten hintereinander durchgehen bzw. der Ostalpenraum längere Zeit direkt im Bereich der Frontalzone verbleiben. Solche Wetterlagen bringen vor allem im Winter erhebliche Niederschlagsmengen und können so katastrophale Lawinenlagen verursachen.

Bei den Niederschlagstagen des Clusters C2 sind auch konvektive Ereignisse beteiligt, wie die vielen Schwachwind-Trajektorien am Boden und die südwestliche Höhenströmung anzeigen. Die Winddrehung zeigt Kaltluftadvektion an. Wir vermuten, dass in dieser Gruppe sowohl präfrontale Gewitter (etwa an “squall lines”) als auch Niederschläge während bzw. im Anschluss an Kaltfrontdurchgänge enthalten sind, einschließlich solcher mit Wellenbildung im Alpenraum.

Möchte man exemplarisch je einen Termin pro Cluster zur Illustration herausgreifen, so bietet sich die Zentraltrajektorie dafür an. Für den Cluster C1 ist dies der 28.7.1993 und für den Cluster C2 der 17.8.1985. In der Abbildung 4-7 sind die Tagessummen des Niederschlags dieser beiden Fälle dargestellt. Am 28.7.1993 traten demnach fast ausschließlich nördlich der Alpen Niederschläge mit dem Zentrum im Bundesland Salzburg auf. An diesem Tag überquerte eine Warmfront Österreich. Recht schön erkennt man die maximalen Mengen in der Region Nordstau, wo Tagesniederschläge mit über 50 mm gemessen wurden. Beim zweiten Beispiel vom 17.8.1985 zeigt sich ein gänzlich anderes Bild. Die Niederschlagsmengen in der Region Nord-

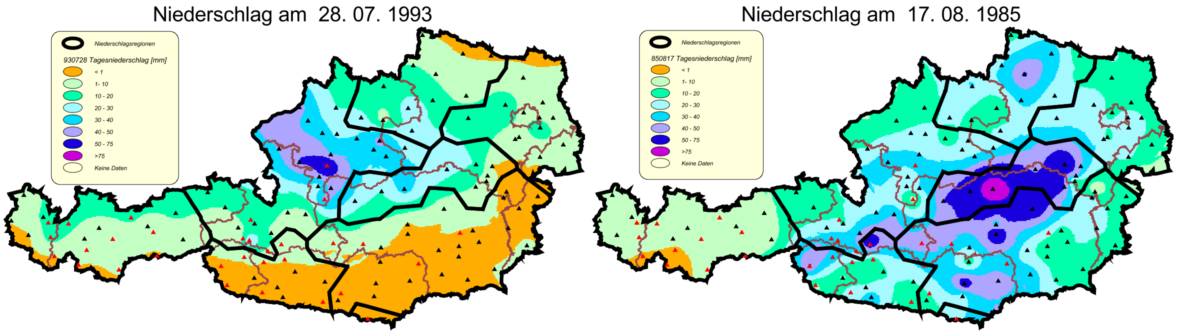


Abbildung 4-7: Tagessummen des Niederschlags an zwei typischen Tagen der beiden Wetterlagen der Region Nordstau. Das linke Bild bezieht sich auf das Zentralelement des Clusters C1 (Warmluft-Advektion bei Nordweststromung in der Höhe), das rechte auf jenes des Clusters C2 (Vorderseite eines Kaltlufttropfens). Die Felder wurden im GIS mittels Kriging interpoliert. Die Stationen sind mit Dreiecken markiert, wobei jene über 1000 m Seehöhe rot dargestellt sind.

stau sind zwar wieder relativ hoch, noch höher sind sie aber in der Region Ennstal-Semmering (über 75 mm). Auslösend war an diesem Tag ein Kaltlufttropfen, an dessen Vorderseite es zu Labilisierung kam. Die stärker zelluläre Struktur des Niederschlagsfeldes ist ein Hinweis auf eine wesentliche Rolle der Konvektion in dieser Situation.

4-5.2.2 Wetterlagen für Starkniederschläge in Österreich

Um die Gesamtmenge aller Wetterlagen zu finden, die in Österreich Starkniederschläge verursachen können, wurden alle Tage, an denen es in zumindest einer Region Österreichs stark geregnet bzw. geschneit hat, für die Clusterung herangezogen. In Summe ergeben sich daraus 400 Fälle.

Da zwischen den Ankunftspunkten der Trajektorien eine gewisse räumliche Autokorrelation besteht, die darin enthaltene Information also teilweise redundant ist, ist a priori nicht vorgegeben, wieviele und welche Punkte man zur Clusterung verwenden soll. Aufgrund der synoptischen Erfahrung müssen die Trajektorien in verschiedenen vertikalen Niveaus betrachtet werden, um den Effekt der vertikalen Windscherung und damit der Temperaturadvektion erfassen zu können. Die Distanz der potentiellen Vorticity am Ankunftspunkt wird als zusätzliche Information für die Clusterung verwendet, da die Vorticity auf die Niederschlagsverteilung einen nicht unwesentlichen Einfluss hat. Die potentielle Vorticity wurde in diesem Projekt verwendet, weil sie bei der Trajektorienberechnung im Flextra mit bestimmt wird. Da in ihr auch die Stabilität der Luftschichtung enthalten ist, wird man bei zukünftigen Betrachtungen eher die relative Vorticity heranziehen.

Mit diesem Grundwissen und der Tatsache, dass die vertikale Clusterung keine synoptisch aussagekräftigen Wetterlagen hervorbringt, wurde nach mehreren Tests folgende Kombination an Distanzfunktionen als die am besten geeignete gefunden: `pv4640,kh7241, kh5241, kh7211, kh5211, kh7281,kh5281, kh7741, kh5741`. Wie schon für die Region Nordstau, werden die Niveaus 2 und 7 verwendet. Für die potentielle Vorticity wird ausschließlich das Niveau 6 verwendet. Das tiefere Niveau bekommt weit mehr Gewicht, indem mehrere Ankunftszeiten an einem Tag gleichzeitig verwendet werden, sodass dieses wesentlich öfter als Summand in der Gesamtdistanzfunktion vorkommt. Als Ankunftspunkte wurden die Punkte Nord_West (7) und Süd_Ost (5) und für die Vorticityinfomation der Punkt Nord_Ost (4) betrachtet. Außerdem werden immer nur die letzten 24 h der Trajektorie für die Clusterung verwendet, was dem Algorithmus eine schärfere regionale Trennung ermöglicht. Dies gilt natürlich nicht für die Vorticity-

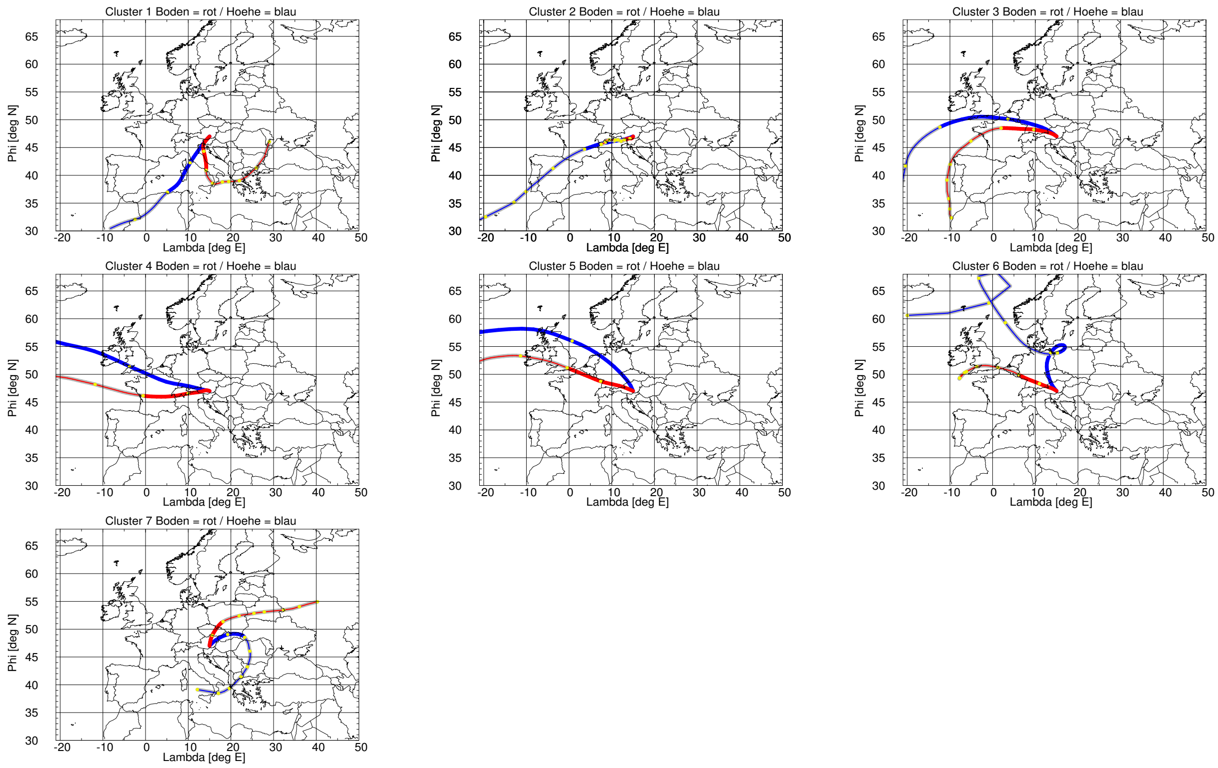


Abbildung 4-8: Zentraltrajektorien der sieben Starkniederschlags-Wetterlagen Österreichs in zwei Niveaus (Boden rot , Höhe blau). Zur Clusterung wurde folgende Kombination an Distanzfunktionen verwendet: `pv4640`, `kh7241`, `kh5241`, `kh7211`, `kh5211`, `kh7281`, `kh5281`, `kh7741`, `kh5741`. Der Übersichtlichkeit wegen sind hier nur die Trajektorien für den Ankunftspunkt Süd_Ost und die mittlere Ankunftszeit (16:30 UTC) dargestellt. Die gelben Punkte markieren die Position alle 12 Stunden. Damit wird es möglich die Geschwindigkeit der Partikel und damit der Niederschlagssysteme abzuschätzen.

information, welche nur am Ankunftspunkt verwendet wird. Durch die gleichzeitige Verwendung von mehreren Trajektorien am selben Tag sollte eine Aufspaltung zwischen sehr rasch durchziehenden und eher stationären Strukturen ermöglicht werden. Die Verweildauer eines Niederschlagsereignisses ist für die daraus resultierende Menge an Niederschlag in vielen Fällen von wesentlicher Bedeutung.

Aus dieser doch recht komplizierten Clusterung ergeben sich insgesamt 8 Wetterlagen, wobei ein Cluster wieder nur aus einem Einzelfall besteht und für die weitere Betrachtung außer Acht gelassen werden kann. Somit ergeben sich bei einer derartigen Clusterung sieben typische Wetterlagen, die in Österreich starke Niederschläge verursachen.

Die Wetterlagen werden in der Folge mithilfe ihrer Trajektorien dargestellt. Im nachfolgenden Kapitel wird dann die Niederschlagsverteilung pro Cluster besprochen, und im Anhang sind Wetterkarten für die Tage der Zentralelemente wiedergegeben. Der Übersichtlichkeit willen werden die dargestellten Trajektorien auf je eine Boden- und Höhentrajektorie pro Tag begrenzt. In Abb. 4-8 sind in einer Teilabbildung die Boden- bzw. Höhentrajektorie des zentralen Elements je eines der sieben Cluster zusammen gefasst. Diese Darstellung dient dem ersten Überblick. Für genauere Aussagen zu den einzelnen Clustern ist es vorteilhaft, diese jeweils getrennt, aber dafür mit allen Elementen darzustellen (Abb. 4-9).

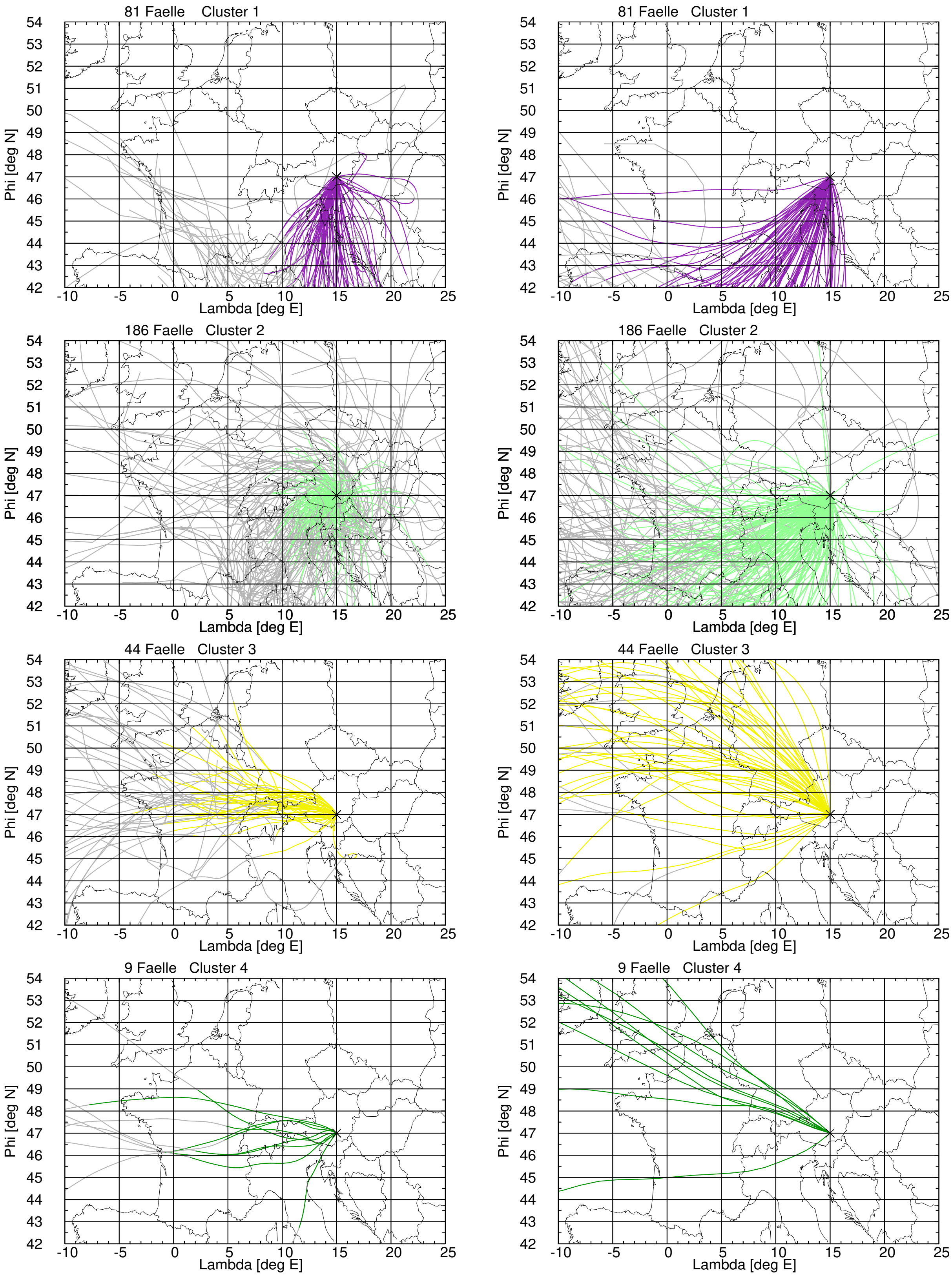


Abbildung 4-9 (1. Teil): Cluster C1 bis C4 der Starkniederschlagstage in Österreich, dargestellt durch jeweils eine Trajektorie pro Tag, links für das tiefe Niveau (500 m agl), rechts für das obere Niveau (500 hPa). Die Abbildung wird auf der folgenden Seite mit den restlichen drei Clustern fortgesetzt.

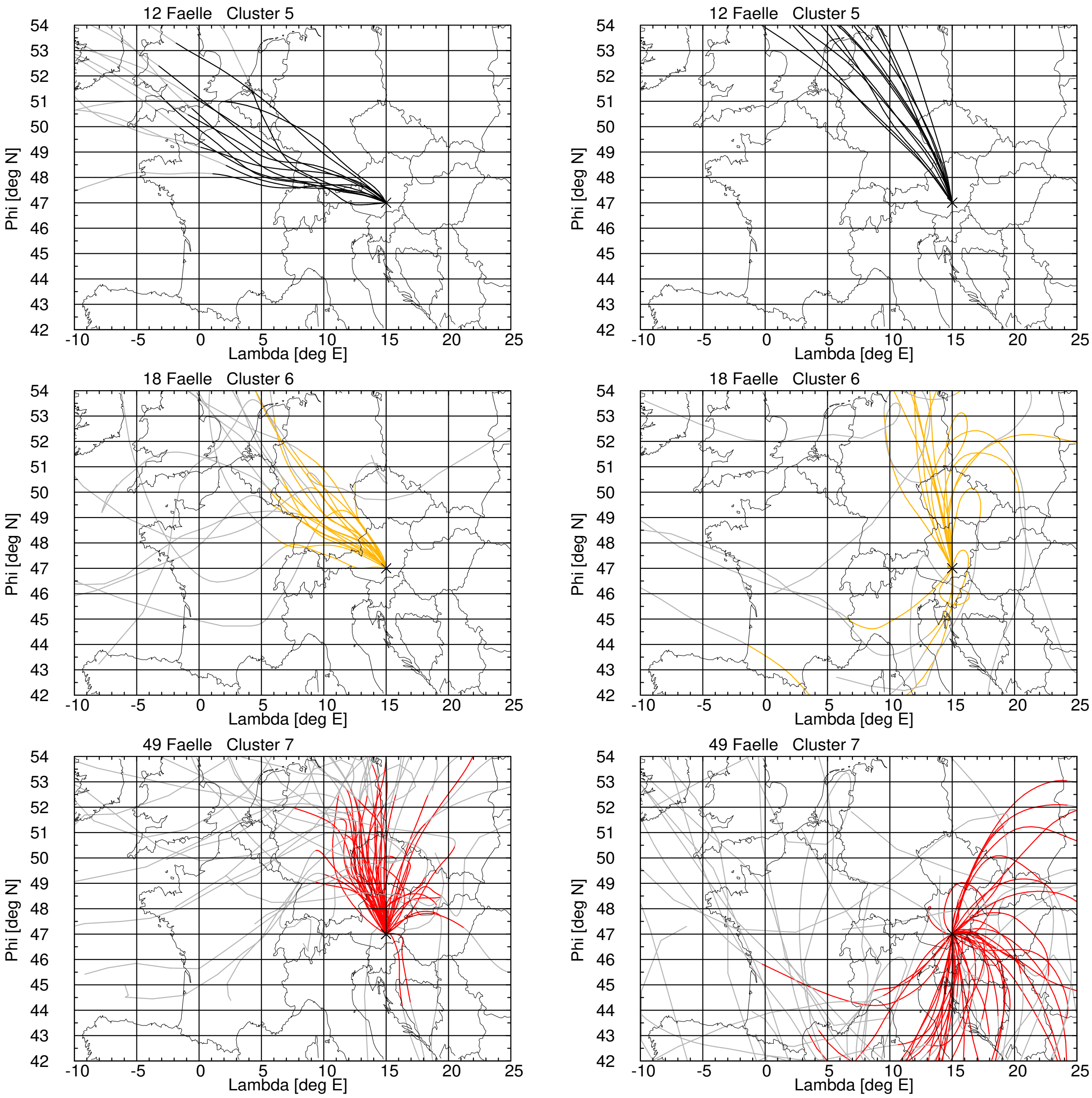


Abbildung 4-9: (2. Teil) Cluster C5 bis C7 der Starkniederschlagstage in Österreich, dargestellt durch jeweils eine Trajektorie pro Tag (Ankunftspunkt Süd_Ost, Ankunftszeit 16:30 UTC) links für das tiefe Niveau (500 m agl), rechts für das obere Niveau (500 hPa). Zur Clusterung wurde folgende Kombination an Distanzfunktionen verwendet: `pv4640`, `kh7241`, `kh5241`, `kh7211`, `kh5211`, `kh7281`, `kh5281`, `kh7741`, `kh5741`. Der letzte Tag jeder Trajektorie (dieser Teil wurde in der Distanzfunktion verwendet) ist jeweils eingefärbt, der Rest der Trajektorie ist grau dargestellt.

Bereits bei Betrachtung der Zentraltrajektorien (Abb. 4-8) zeigt sich bei den meisten Clustern eine Rechtsdrehung des Windes mit der Höhe und damit verbunden Warmluftadvektion. Bei vielen Trajektorien ist die für den Niederschlag typische zyklonale Krümmung zu erkennen. Die ersten zwei Cluster weisen südliche Strömungskomponenten auf, die Cluster 3 bis 6 sind mit Strömungen aus West bis Nord verbunden, und der Cluster 7 sticht durch seine stark gekrümmte Trajektorie im 500 hPa Niveau heraus. Es ist auch der einzige Cluster, welcher mit Luftströmungen verbunden ist, die den Ostsektor überstreichen.

Für die weitere Diskussion der einzelnen Cluster werden diese mit C1 bis C7 bezeichnet, wobei C1 den Cluster links oben in Abb. 4-8 darstellt und die weiteren nach rechts (zeilenweise) durchnummeriert werden. In der nun folgenden Diskussion ist auch die relative Häufigkeit der Cluster, bezogen auf die Gesamtzahl von 400 Starkniederschlagstagen in unserem 15-jährigen Datenkollektiv angegeben; die absolute Fallzahl kann den Abbildungen selbst entnommen werden. Als Anhaltspunkt für die Interpretation: ein im Durchschnitt einmal jährlich vorkommendes Ereignis hätte eine relative Häufigkeit von knapp 4%. Entsprechend unserer regionalen Definition treten in Österreich pro Jahr (im Mittel 1979-93) etwa 27 Starkniederschlagstage auf.

Cluster C1 enthält offensichtlich die typischen Südstaufälle (zyklonale S-SW Lagen), welche in den betroffenen Gebieten zu extremen Niederschlagsmengen und -intensitäten führen können. Bei diesen Fällen ist die Südweströmung in der Höhe markant. Am Boden herrscht eine dem Druckgradient folgende Südanströmung an die Alpen. Die zentrale Bodentrajektorie zeigt, wie die Luft über dem Mittelmeer Feuchte tankt, die dann im Südstau der Alpen ausgeregnet wird. Diese Wetterlage beinhaltet 20% aller untersuchten Starkniederschlagsfälle.

Cluster C2 ist ein vollkommen anderer Typ. In der Höhe kommen die Trajektorien aus Südwest bis West. Am Boden herrscht eine flache Druckverteilung vor, was man an der ziemlich langsamen Zentraltrajektorie erkennt, die innerhalb von vier Tagen kaum Österreich verläßt. Viele Fälle dieser Wetterlage dürften solche konvektiven Ereignisse sein, die oft das Ende einer Schönwetterperiode bringen. Die große Streuung der einzelnen Bodentrajektorien dieses Clusters zeigt an, dass neben den Niederschlägen in Form von Gewittern und Schauern auch andere Fälle dabei sind. Einige Bodentrajektorien sind fast Nord-Süd gerichtet, was mit Durchzug von Kaltfronten in Verbindung gebracht werden kann. Vor diesen Fronten sind Gewitterlinien keine Seltenheit. Diese eher wenig spezifische Wetterlage findet sich am häufigsten (46% aller Fälle).

Bei den Clustern C3-C5 handelt es sich um die für Österreich typischen Nordwestwetterlagen. Da sie vom Clusteralgorithmus nicht weiter zusammengefasst werden, haben sie offenbar typische Merkmale, durch die sie sich voneinander unterscheiden. Diese müssen sich in den zur Clusterung verwendeten Distanzfunktionen niederschlagen, da nur diese für den Algorithmus entscheidend sind. Ein Hauptunterschied dürfte die Geschwindigkeit der Trajektorien sein.

Von den drei Nordwest-Clustern (C3-C5) ist der Cluster C3 am häufigsten (11% aller Fälle). Die Bodentrajektorie zeigt einen langen Aufenthalt der Luft über dem Atlantik, wodurch eine starke Anfeuchtung derselben ermöglicht wird. Die von Nordwesten über das Land ziehenden Fronten bringen im Norden Österreichs bis in den Wiener Raum, abgesehen von lokalen Gewittern, am häufigsten Regentage mit sich. Südlich der Alpen bringen diese Fälle – meist begünstigt durch Nordföhneffekte – eher selten Niederschläge mit sich.

Der Cluster C4 (dunkelgrün in Abb. 4-9, 2% aller Fälle) verbindet hohe Windgeschwindigkeiten mit fast rein westlicher Strömung in Bodennähe, bei Höhenwinden aus West bis Nordwest. Dies sollte im Westen Österreichs für intensive Niederschläge sorgen (Weststaueffekt).

Die Wetterlage C5 (3 % der Fälle) zeigt sowohl am Boden als auch in der Höhe eine Nordweströmung, die vor allem in der Höhe kräftig ist und im Unterschied zu C4 eine deutliche Nordkomponente aufweist. Vor allem Aufgleiten von Warmluft kann hier in den Nordstaulagen starke Niederschläge verursachen.

Eine schnelle Luftströmung am Boden, wie dies beim Cluster C4 und C5 der Fall ist, erschwert eine Anreicherung mit Feuchte, was dazu beitragen könnte, dass diese Fälle im Kollektiv der Extremniederschläge eher selten vorkommen.

Beim Cluster C6 (5% aller Fälle) handelt es sich um sog. Kaltlufttropfen im Raum östlich von Österreich. Ein mächtiges nahezu kreisrundes Höhentief im (Nord-)Osten Österreichs bringt an seiner Rückseite mit kräftiger Nordströmung in der Höhe polare Luftmassen zu uns. Durch die in der Höhe einfließende Kaltluft wird die Luftschichtung labilisiert, was die Niederschlagsbildung fördert. Dieser Effekt wird durch das erzwungene Aufsteigen der Luft im Norden der

Alpen verstärkt, weshalb vor allem in den Staulagen nördlich der Alpen starke Niederschläge zu erwarten sind.

Als siebente Wetterlage identifiziert der Algorithmus die sog. Vb-Lage, welche in 12% aller Fälle vorkommt. Bei dieser Wetterlage bildet sich südlich der Alpen ein Tiefdruckgebiet, welches dann langsam nach Nordosten weiterzieht. Durch die intensive Befeuchtung der im Tief aufsteigenden Luft über der Adria habe diese Lagen ein Potential für massive Niederschläge. Typisch ist auch die am Boden einströmende kalte Luft aus Norden, weshalb im Osten Österreichs heftige Wintereinbrüche von Fällen dieser Wetterlage verursacht werden. Das langsame Aufgleiten der feuchten Höhenströmung auf der kalten Bodenluft ermöglicht intensive und langanhaltende Niederschläge. Je nach Phase der Wetterlage (die sich in ihrer gesamten Entwicklung oft über 3-4 Tage hinzieht) und genauer Zugbahn des Tiefs wandert das Niederschlagsmaximum dabei vom Süden über den Osten in den Norden Österreichs. Für die bei vielen anderen Wetterlagen eher geschützten Gebiete im äussersten Osten und Norden Österreichs ist die Vb-Lage klimatologisch gesehen besonders relevant. Unser Cluster 7 repräsentiert wohl vornehmlich die mittlere Phase; die Anfangsphase einer Vb-Lage könnte in C1 fallen, und ihr Abschluss könnte als C6 eingestuft werden.

4-5.3 Niederschlag und Wetterlage

4-5.3.1 Niederschlagsmengen und ihre geographische Verteilung

Aus der synoptischen Erfahrung kann erwartet werden, dass die verschiedenen, durch Clusterung identifizierten Wetterlagen jeweils mit spezifischen (Stark-)Niederschlagsmustern verbunden sind. Traditionell ist es auch ein Ziel von Wetterlagen-Klassifikationen, dass sie eine gute Trennschärfe in Bezug auf Wettererscheinungen aufweisen sollen.

Wir betrachten hier als erstes das Mittel des Tagesniederschlag pro Region und Cluster. Es sei in Erinnerung gerufen, dass die Grundgesamtheit dafür jene 400 Tage sind, an denen zumindest eine Region Starkniederschlag aufwies. Natürlich kann in anderen Regionen auch einen geringere Menge oder gar kein Niederschlag gefallen sein. Tabelle 4-5 enthält diese mittleren Niederschläge, wobei sie jeweils mit dem Mittelwert der entsprechenden Region normiert wurden. So lässt sich leicht erkennen, welche Wetterlagen (Cluster) in den einzelnen Regionen über- bzw. unterdurchschnittlich viel Niederschlag bringen. Analog zur Beschreibung der Trajektorien wird der Cluster mit nur einer Trajektorie weggelassen.

Tabelle 4-5: Mittlerer Tagesniederschlag in den einzelnen Niederschlagsregionen Österreichs, getrennt nach Clustern (entsprechend der Clusterung für ganz Österreich). Die Werte sind mit dem Mittelwert der jeweiligen Region (letzte Spalte) normiert. Die Clustermittelwerte sind mit dem österreichweiten Mittelwert normiert. Der Mittelwert basiert auf den 400 österreichweiten Starkniederschlagstagen.

Region	Clu 1	Clu 2	Clu 3	Clu 4	Clu 5	Clu 6	Clu 7	Mittel
Westösterreich	1.1	1.0	1.2	1.8	1.6	0.5	0.5	15.0
Nordstau	0.6	1.0	1.3	1.4	1.5	1.2	0.9	15.6
W/M-Viertel	0.5	1.1	0.9	1.1	0.8	1.0	1.4	9.6
Ostregion	0.7	1.1	0.9	0.8	0.6	0.9	1.6	8.7
Ennstal-Semm.	0.6	1.0	1.2	1.1	1.9	1.4	1.1	15.3
Südost	1.2	1.2	0.5	0.4	0.4	0.4	0.9	12.7
Südstau	2.0	1.0	0.4	0.4	0.6	0.3	0.4	17.7
Mittelwert	1.0	1.1	0.9	1.0	1.2	0.8	0.9	13.5

Einige Cluster haben ein sehr ausgeprägtes Niederschlagsmuster. Beispielsweise bringen die Fälle des „Südstau-Clusters“ C1 tatsächlich im Südstau doppelt so viel Niederschlag als im Mittel über alle 400 Fälle. Cluster C4 (Nordwest-Lage) bringt in allen Regionen nördlich der Alpen durchschnittliche Starkniederschlagsmengen, im Süden aber nur 40% des Durchschnitts. Beim Cluster C6, der als typisch für den Staueffekt im Norden erkannt wurde, zeigen sich in den Regionen Nordstau, Ennstal-Semmering und Westösterreich überdurchschnittliche Niederschlagsmengen und in den südlichen Regionen stark unterdurchschnittliche Mengen. Auch der Cluster C5 hat erwartungsgemäß sein Maximum im Bereich Nordstau, Ennstal-Semmering und Westösterreich. Vergleicht man die Mittelwerte der einzelnen Cluster über alle Regionen, so zeigt sich, dass Cluster 5 am meisten Niederschlag bringt und Cluster 6 am wenigsten.

Bei den Maxima des Tagesniederschlags im Mittel über jede Region (nicht einzelner Stationen wie in Tab. 4-3) zeigen sich für Cluster C2 in fast allen Regionen hohe Maxima zeigt (Tab. 4-6), was wiederum mit den darin inkludierten Gewittern zu tun haben dürfte. An den Mittelwerten der Maxima jeder Region erkennt man deutlich, dass in den Staulagen (Ennstal-Semmering, Nord- Südstau) die Niederschlagsmengen deutlich höher sind als beispielsweise in Ostösterreich. Die Werte in Tab.4-6 stellen die Maxima des Niederschlags einer Region dar und sind deshalb wesentlich kleiner als die tatsächlich an einzelnen Stationen aufgetretenen kleinräumigen Maxima.

Der Median stellt eine weitere Möglichkeit dar, die Intensität der Niederschläge bei den einzelnen Wetterlagen zu charakterisieren. Diese Maßzahl gibt den Wert an, der in 50% aller Fälle der entsprechenden Wetterlage überschritten wird. In Abb. 4-10 ist dieser Wert flächenhaft in Österreich für alle die sieben Wetterlagen dargestellt. Dazu wurde für jede Station der Median aus den Niederschlagsdaten aller Tage der entsprechenden Wetterlage berechnet. Zur Darstellung wurden die Werte mittels Kriging in einem GIS in die Fläche interpoliert.

Die Wetterlage C1 bringt fast ausschließlich in den Südstauregionen intensive Niederschläge (in 50% der Fälle sind Tagessummen über 50 mm möglich). Nördlich der Alpen regnet es bei dieser Wetterlage kaum beziehungsweise nur schwach, da die Alpen als Wetterscheide zwischen Nord und Süd wirken.

Wetterlage C2 kann im ganzen Land intensive Niederschläge bringen, wobei die Intensität im Nordosten geringer ist. Das Maximum des Medianwerts in Österreich ist bei dieser Wetterlage geringer als bei der Südstaulage. Da die Niederschläge aber in großen Teilen des Landes gleichzeitig auftreten können, erreichen die Flächenniederschläge möglicherweise höhere Werte als beim Südstau-Cluster.

Tabelle 4-6: Maximaler Tagesniederschlag [mm] in den einzelnen Niederschlagsregionen Österreichs entsprechend der Clusterung für ganz Österreich. In der letzten Spalte ist der mittlere maximale Tagesniederschlag jeder Region dargestellt, in der letzten Zeile der maximale Tagesniederschlag jedes Clusters, gemittelt über alle Regionen.

Region	Clu 1	Clu 2	Clu 3	Clu 4	Clu 5	Clu 6	Clu 7	Mittel
Westösterreich	60.2	65.8	45.3	49.6	45.5	17.5	44.0	46.8
Nordstau	31.2	62.5	39.9	42.6	55.8	43.6	50.0	46.5
W/M-Viertel	23.3	51.0	20.4	16.0	16.7	31.5	28.8	26.8
Ostregion	22.8	39.7	20.6	15.2	11.4	18.6	70.5	28.4
Ennstal-Semm.	36.4	56.2	54.2	32.1	53.9	42.3	45.1	45.7
Südost	70.7	53.7	32.5	16.6	12.1	36.6	37.6	37.1
Südstau	82.2	78.0	37.4	21.0	28.2	35.1	33.2	45.0
Mittelwert	46.7	58.1	35.8	27.6	31.9	32.2	44.2	39.5

Bei der am häufigsten vorkommenden Nordwestwetterlage C3 sind vor allem die Region Nordstau, aber auch die Nordstaulagen im Westen von hohen Niederschlagsmengen betroffen. Medianwerte von über 30 mm treten bei dieser Wetterlage an mehreren Stationen auf.

Wetterlage C4 („Weststau") hat ihr Niederschlagsmaximum in der Westregion, was sich am Maximum im Arlberggebiet widerspiegelt. Auch an einigen exponierten Stationen der Region Nordstau muss bei dieser Wetterlage mit Tagesniederschlägen über 30 mm gerechnet werden.

Von der Wetterlage C5 sind die Regionen nördlich der Zentralalpen am stärksten betroffen, mit dem Maximum im Ennstal, wo bei dieser Lage durchaus über 50 mm Tagesniederschlag fallen können.

Die sechste Wetterlage (Kaltlufttropfen im Osten) führt in den typischen Stauregionen im Norden zu den stärksten Niederschlägen. Die Maxima sind im Ennstal und im Salzkammergut zu finden und betragen auch bei dieser Wetterlage rund 40 mm.

Der als Vb-Wetterlage identifizierte Cluster C7 bringt im Nordosten Österreichs die höchsten Niederschlagsmengen. Ostregion, Mühl- und Waldviertel sowie die Region Ennstal-Semmering sind von dieser Wetterlage am intensivsten betroffen. Ein Maximum findet sich auch im äussersten Süden der Steiermark. In der Ostregion beträgt der Median bis zu 20 mm, was für diese Gegend schon recht hoch ist.

4-5.3.2 Häufigkeit von Starkniederschlagsfällen

Will man neben der Aussage über die Niederschlagsmenge auch Informationen über die Häufigkeit von starken Niederschlagsereignissen in den einzelnen Regionen ableiten, kann man für jeden Cluster all jene Tage zählen, deren Tagesniederschläge über dem 98er Perzentil der jeweiligen Region liegen. So kann das Gefahrenpotential der einzelnen Cluster für die Regionen besser abgeschätzt werden. Die Ergebnisse können jedoch bestenfalls als erste Trends angesehen werden, weil das Datenkollektiv für statistisch gut abgesicherte Aussagen zu klein ist. Tabelle 4-7 zeigt die Ergebnisse. Da die einzelnen Regionen (geringfügig) unterschiedlich viele Fällen enthalten und mit der Gesamtzahl Fälle pro Region normiert wurde, können die Werte spaltenweise miteinander verglichen werden, um zu erkennen, welche Regionen von den entsprechenden Wetterlagen betroffen sind. Bei zeilenweiser Betrachtung der Tab. 4-7 erhält man Informationen, in wieviel Prozent der Fälle die einzelnen Regionen bei den sieben Wetterlagen mit extremen Niederschlägen rechnen müssen.

Beim Cluster 2 zeigt sich auch bei dieser Betrachtungsweise, dass er in allen Regionen Österreichs mit etwa gleicher Wahrscheinlichkeit zu starken Niederschlägen führt. In manchen Regionen gehen über 50% der Starkniederschläge auf diese Wetterlage zurück. Einzig in den Regionen Westösterreich und Südstau ist diese Wetterlage nicht die häufigste.

Tabelle 4-7: Relative Anzahl der Tage mit Niederschlag über dem 98er Perzentil der jeweiligen Region, ausgedrückt als Prozent der Gesamtanzahl an Tagen pro Region.

Region	Clu 1	Clu 2	Clu 3	Clu 4	Clu 5	Clu 6	Clu 7	Summe
Westösterreich	19.6	44.6	17.0	6.2	7.1	0.0	4.5	100.
Nordstau	7.0	50.0	19.3	2.6	7.0	6.1	7.9	100.
W/M-Viertel	3.7	56.5	4.6	3.7	0.9	4.6	25.9	100.
Ostregion	13.4	50.9	8.9	0.9	0.0	3.6	22.3	100.
Ennstal-Semm.	12.1	43.0	13.1	0.9	9.3	8.4	13.1	100.
Südost	20.6	64.5	5.6	0.0	0.0	0.9	8.4	100.
Südstau	54.5	38.2	4.5	0.0	0.9	0.9	0.9	100.

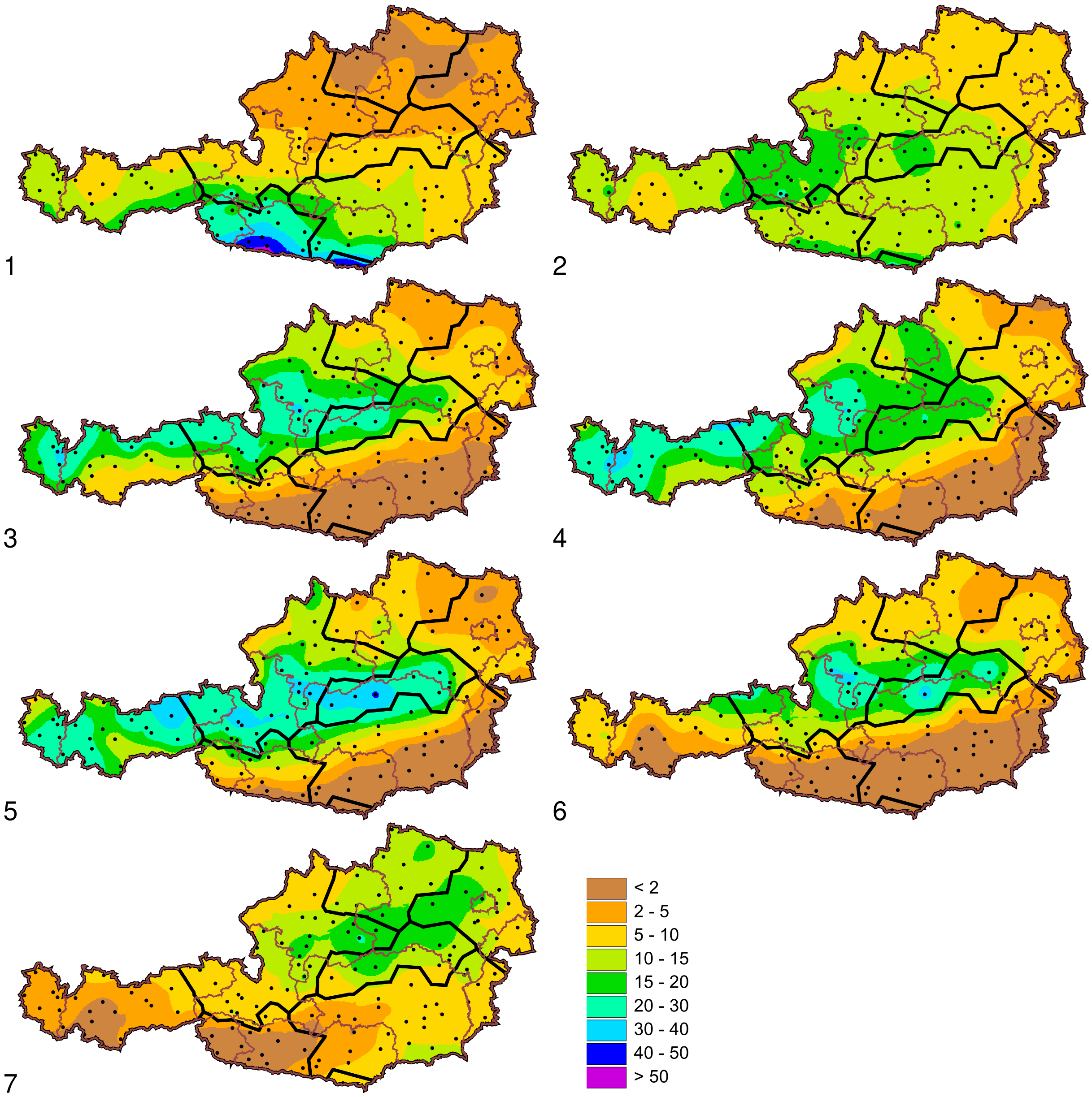


Abbildung 4-10: Median der Tagesniederschläge für die sieben Wetterlagen in Bezug auf das Kollektiv der 400 Starkniederschlagstage. Die Stationswerte wurden mittels Kriging im GIS interpoliert. Mit schwarzen Linien eingezeichnet sind die sieben Niederschlagsregionen Österreichs (fett) und die Bundesländer (dünn). Die Punkte kennzeichnen die Stationen.

In Westösterreich sind Cluster 3 und 1 neben Cluster 2 von wesentlicher Bedeutung. Dabei ist vor allem interessant, dass die Südstau-Lage auch in diesem Raum, der zur Gänze nördlich des Alpenhauptkamms liegt, für immerhin 20% der Starkniederschlagsfälle verantwortlich ist. Bei den sehr zyklonalen Südlagen liegt die zugehörige Kaltfront oft schon östlich der Region, und die häufige Wellenbildung an den Alpen bzw. über Norditalien kann dann bis weit über den Hauptkamm nach Norden reichende Aufgleitniederschläge verursachen.

In der Region Nordstau sind es überwiegend die Fälle von Cluster 2 und 3 (in Summe fast 70% aller Fälle), welche für intensiven Niederschlag sorgen.

In der Region Wald- und Mühlviertel entfällt etwas mehr als die Hälfte der Starkniederschlagstage auf die gradientschwache Wetterlage 2, ein gutes Viertel auf die Vb-Lage (Cluster 7). Das Wald- und Mühlviertel ist für die Vb-Lage auch jene Region, wo sie den höchsten Anteil hält.

Ähnlich verhält es sich in der Ostregion, nur dass hier die Südlagen ebenfalls noch einen gewissen Einfluss haben.

In der Region Ennstal-Semmering dominiert ebenfalls die gradientschwache Lage 2. Daneben bringen alle Wetterlagen mit Ausnahme des Weststaus (Cluster 4), welcher kaum wirksam ist, jeweils um die 10% der Starkniederschlagsfälle.

Im Südosten entfallen fast zwei Drittel der Fälle auf Wetterlage 2 – ein Hinweis auf die Rolle von Gewittern, die in weiten Teilen der Steiermark bei Kaltfrontdurchgängen zu großen Niederschlagsmengen führen können. Weitere 20% entfallen auf Südstaulagen, an dritter Stelle (aber nur mehr mit 8%) folgen die Vb-Lagen.

Wie zu erwarten, wird die Südstau-Region von den Südstau-Lagen des Cluster 1 dominiert (55%). An zweiter Stelle folgt der gradientschwache, mit einer südwestlichen Höhenströmung verbundene Cluster 2. Von den übrigen Wetterlagen vermag lediglich die langsame Nordwestlage (Cluster 3) in einigen Prozent der Fälle Starkniederschläge auszulösen, während alle anderen Lagen nur marginale oder gar keine Wirksamkeit aufweisen.

4-5.3.3 Weitere Differenzierung einzelner Wetterlagen

Der Clusteralgorithmus liefert trotz zwischenzeitigem Umordnen von Elementen einen Cluster (C2), der mit 186 Tagen fast die Hälfte aller Fälle enthält und weit größer ist als alle anderen. Dies veranlaßte uns dazu, die Fälle dieses Cluster nochmals getrennt zu clustern und so weiter aufzuspalten. Dafür wurde die Anzahl der neu zu bildenden Cluster nicht durch die stärkste Änderung im Kohärenzmaß festgelegt, sondern fixe Zahlen von zwei, drei oder vier Clustern vorgegeben. Bei vier Clustern bleibt wiederum ein Einzelfall übrig, weshalb diese Aufspaltung nicht sinnvoll erscheint. Als ideale Lösung erscheint in diesem Fall eine Teilung in drei Gruppen, doch auch bei nur zwei Gruppen kann eine bessere Regionalisierung erfolgen. Diese objektive Aufspaltung in drei Gruppen führt allerdings nicht dazu, dass jede Gruppe gleich viele Elemente enthält.

Tabelle 4-8: Mittlerer Tagesniederschlag in den einzelnen Regionen getrennt nach Clustern. Cluster 2 wurde im Vergleich zu Tab. 4-5 in drei weitere Cluster (2a-c) aufgespalten. Die Niederschlagswerte pro Cluster sind mit dem Mittel über alle Cluster, gewogen mit der Anzahl Fälle pro Cluster, normiert.

Region	C 1	C 2a	C 2b	C 2c	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	Mittel [mm/d]
Westösterreich	1.1	0.5	1.0	1.2	1.2	1.8	1.6	0.5	0.5	15.0
Nordstau	0.6	0.3	1.1	1.1	1.3	1.4	1.5	1.2	0.9	15.6
W/M-viertel	0.5	0.5	1.1	1.4	0.9	1.1	0.8	1.0	1.4	9.6
Ostregion	0.7	1.2	1.0	1.6	0.9	0.8	0.6	0.9	1.6	8.7
Ënnstal-Semm.	0.6	0.5	1.0	1.0	1.2	1.1	1.9	1.4	1.1	15.3
Südost	1.2	1.1	1.2	1.3	0.5	0.4	0.4	0.4	0.9	12.7
Südstau	2.0	1.0	1.0	1.0	0.4	0.4	0.6	0.3	0.4	17.7
Mittelwert	1.0	0.7	1.0	1.2	0.9	1.0	1.2	0.8	0.9	13.5

Cluster C2b bleibt nach wie vor als sehr großer Cluster übrig und könnte vermutlich erst dann weiter aufgespalten werden, wenn man zusätzliche Informationen zur Identifizierung von Gewittern in die Clusteranalyse mit einfließen lassen würde, etwa die Labilität. Tab. 4-8 ist analog zu Tab. 4-5, wobei aber nun die Aufspaltung von Cluster 2 durchgeführt wurde. Ähnlich wie der originale Cluster 2 zeigt Cluster C2b kaum regionale Unterschiede. Cluster C2a beinhaltet nun aber Fälle, die vorwiegend im Süden und Osten stärkere Niederschläge verursachen. Cluster 2c ist am wirksamsten in der Ostregion, wo die Niederschlagsmenge denselben Wert erreicht wie bei den Vb-Lagen (und damit das Maximum für diese Region). Auch der Südosten und das Mühl- und Waldviertel erhalten überdurchschnittliche Niederschlagsmengen.

4-6 Schlussfolgerungen

In StartClim.4 wurde eine neue Methode zur Charakterisierung von Wetterlagen, die in Österreich zu Starkniederschlägen führen können, abgeleitet. Die Methode basiert auf Rückwärtstrajektorien, die von mehreren Ankunftspunkten im Raum Österreich zumindest einen Tag zuruck gerechnet werden, und zwar in mehreren Höhen (z. B. 500 m über Grund und 500 hPa [entsprechend ca. 5 km NN]). Die Methode erwies sich als geeignet, mit der synoptischen Erfahrung übereinstimmende Lagen zu identifizieren. Die Methode ist automatisch einsetzbar und beruht nur auf grossräumigen Feldern, wie sie von Wettervorhersage- und globalen Klimamodellen geliefert werden. Allerdings ist der Algorithmus, mit dem für nicht in der ursprünglichen Clusterung enthaltene Fälle eine Zuordnung zu den einzelnen Clustern getroffen werden kann, noch verbesserungswürdig.

Sozusagen als Nebenprodukt wurde ein neues Clusterungsverfahren entwickelt und eine Einteilung Österreichs in Niederschlagsregionen gefunden.

Das Clusterverfahren kombiniert die etablierten Methoden der hierarchischen und der iterativen Clusterung, wobei die iterative Clusterung noch modifiziert wurde. Die Modifikation besteht darin, das arithmetische Mittel aus allen Elementen eines Cluster durch das Zentralelement zu ersetzen, wobei das Zentralelement jenes ist, welches im Mittel die geringste Distanz zu allen anderen Elementen des jeweiligen Clusters aufweist. Damit kann die Rechnung erheblich beschleunigt werden, was für einen umfangreichen Datensatz wie den der Trajektorien überhaupt erst die Kombination mit dem hierarchischen Verfahren auf jeder Stufe erlaubt.

Eine Kombination der horizontalen Distanz der letzten 24 h von Trajektorien in Bodennähe und in der mittleren Troposphäre (500 hPa), von mehreren Trajektorienendpunkten und Tageszeiten, erwies sich als optimale Basis für die Clusterung. Dabei wurde auch noch die potentielle Vorticity an einem Gitterpunkt verwendet.

Als Niederschlagsregionen wurden – wenn das Jahr als Ganzes betrachtet wird – gefunden: Westösterreich, Nordstau, Wald- und Mühlviertel, Ostregion, Ennstal-Semmering, Südoststösterreich, Südstau. Bei getrennter Betrachtung des Sommer- und des Winterhalbjahres kommt es zu einigen Verschiebungen, die vor allem die Regionen Wald- und Mühlviertel und Ennstal-Semmering betreffen. Die Regionen zeichnen sich jeweils durch relative ähnliche Verläufe der täglichen Niederschläge aus. Diese Information könnte, evt. in noch verfeinerter Form, für die Katastrophenplanung genützt werden.

Bei der Analyse der Trajektorien mittels Cluster-Verfahren wurden folgende Wetterlagen identifiziert: Südstau, gradientschwache Vorderseite, normale Nordwestlage, Weststaulage, zügige Nordwestlage, Kaltlufttropfen im Osten, Vb-Lage.

Die Wetterlagen unterscheiden sich in Häufigkeit und Auswirkung deutlich. Einige Lagen wie z. B. Südstau wirken sich meist nur in einigen wenigen Regionen aus, andere – wie die gradientschwache Vorderseite oder die normale Nordwestlage – in großen Gebieten Österreichs.

Ein interessantes Ergebnis war auch, dass Starkniederschläge im Osten und Norden Österreichs zwar deutlich seltener sind als im Westen und im Süden, jedoch die höchsten Extremwerte dort höher sind als in Westösterreich.

4-7 Ausblick

Die vorliegende Studie kann nur als erster Schritt in eine spannende neue Richtung betrachtet werden, eine Fortsetzung der Arbeiten wäre sinnvoll. Einige Aspekte wurden bisher nur kursorisch behandelt und müssten noch vertieft werden. Im folgenden sollen die wichtigsten weiteren Schritte kurz skizziert werden.

Anwendungen der neuen Klassifikationsmethode für Extremwetterlagen:

- Anwendung auf ERA-15-Daten (evt. auch ERA-40-Daten) und Vergleich der Jahr-zu-Jahr Variabilität, jahreszeitlichen Verteilung und allfälliger Trends der beobachteten Extremereignisse mit der Häufigkeit der entsprechenden Wetterlagen.
- Anwendung auf Kontrollläufe von Klimamodellen und Vergleich mit ERA-15 oder evt. ERA-40: Wie gut stimmen simulierte und beobachtete Häufigkeiten und Trends der Extremwetterlagen überein?
- Anwendung auf prognostische Klimaszenarienrechnungen, Untersuchung der Änderungen in der Häufigkeit und jahreszeitlichen Verteilung der Extremwetterlagen.
- Anwendung zum Downscaling von Niederschlägen unter Verwendung der Analogmethode (unter Einbeziehung weiterer Parameter wie unten dargestellt).

Vertiefung des vorhandenen Ansatzes:

- Optimierung des Entscheidungsalgorithmus für Zugehörigkeit zu Cluster.
- Optimierung (Ausdünnung) der verwendeten Trajektorieninformation.

Verbreiterung des vorhandenen Ansatzes:

- Untersuchung möglicher Verbesserungen durch Labilitätsparameter.
- Untersuchung des Einflusses der Feuchte auf Niederschlagsintensitäten, Trennung von Feuchte und Wetterlage, Prüfung der Güte von Feuchtewerten in Kontrollläufen.
- Verlängerung des Untersuchungszeitraumes mit Hilfe der ERA-40 Daten und der Ergebnisse der Projekte StartClim.1 und 2, sodass statistisch besser abgesicherte Aussagen bzw. auch die Untersuchung extremerer Ereignisse als das 98. Perzentil möglich werden.
- Verwendung von abgeleiteten Feldgrössen (Windrichtung- und Geschwindigkeit, Vorticity, usw.) anstelle der Trajektorien.
- Einbeziehung von anderen Extremereignissen als Starkniederschlägen, zum Beispiel Sturm oder Extremtemperaturen. Auch an komplexere Ereignisse wie Lawinen oder Hochwässer kann gedacht werden, was allerdings eine aufwändigere Methode verlangen würde, da hier u.U. Abläufe über etliche Tage berücksichtigt werden müssen.

Danksagung

Dieses Projekt wurde vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, dem Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kunst, dem Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten, der Österreichischen Hagelversicherung, der Österreichischen Nationalbank und dem Umweltbundesamt im Rahmen des "Startprojekts Klimaschutz" finanziell gefördert.

Die Startclim.5-Gruppe (Herbert Formayer, Christoph Matulla, Patrick Haas, alle IMP) hat uns auf vielfältige Weise tatkräftig unterstützt. Besonders hervorgehoben werden soll die Bereitstellung der Stationsdaten und ihre Qualitätskontrolle (mit nachfolgender Berichtigung in Zusammenarbeit mit der ZAMG) und die Herstellung der Niederschlagskarten sowie die Berechnung der Stationsflächen mittels GIS durch Herbert Formayer, der auch zu Diskussionen produktiv beigetragen hat.

Die Arbeitsgruppe Immissionsforschung an der Forstwissenschaftlichen Fakultät München unseres ehemaligen Kollegen Andreas Stohl hat uns unterstützt, indem sie die von ihnen aus dem MARS-Archiv des ECMWF extrahierten ERA-15-Daten, die als Input für Flexpart dienen, zur Verfügung stellten und uns so viel Arbeit ersparten. Speziell genannt seien hier Caroline Forster und Sabine Eckhardt.

Das frei zugängliche Trajektorienmodell Flexpart (`http://www.forst.tu-muenchen.de/EXT/LST/METEO/stohl/flextra.html`) wurde im Rahmen unserer Arbeitsgruppe primär von Andreas Stohl und Gerhard Wotawa entwickelt. Unser Cluster-Algorithmus wurde auf der Basis des CLUSBAS Fortran-Programms von John S. Uebersax erstellt, welches in der STATLIB Softwaresammlung an der Carnegie Mellon Unviersity, Department of Statistics, unter `http://lib.stat.cmu.edu/general/hcfb` frei zugänglich ist.

Die ECMWF-Daten wurden im Rahmen des Special Project SPATMOT genutzt.

Die Daten der österreichischen Klimastationen wurden freundlicherweise von der ZAMG zur Verfügung gestellt.

Den zahlreichen Entwicklern der freien Software, die in diesem Projekt eingesetzt wurde (insbesondere NCAR Graphics, LaTeXund ghostscript), sei für ihre uneigennützige Arbeit ebenfalls gedankt.

Literaturverzeichnis

Anderberg, M.R., 1973: *Cluster analysis for applications*. Probability and Mathematical Statistics. Academic Press.

Deichsel, G., and H.J. Trampisch, 1985: *Clusteranalyse und Diskriminanzanalyse*. Gustav Fischer Verlag.

Dorling, S., and T. Davies, 1992: Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry—method and applications. *Atmos. Environ.*, **26A**, 2575–2581.

Dorling, S., T. Davies, and C. Pierce, 1992: Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry—results from Eskdalemuir, South Scotland. *Atmos. Environ.*, **26A**, 2583–2602.

Fricke, W., 2003: Sind veränderte Wetterlagen die Ursache für zunehmende Starkniederschläge in Deutschland? In: *6. Deutsche Klimatagung, Potsdam*, pp. 150–154. Alfred-Wegener-Stiftung.

Kaufmann, L., and P.J. Rousseeuw, 1990: *Finding groups in data. An introduction to cluster analysis*. John Wiley.

Kerschner, H., 1989: *Beiträge zur synoptischen Klimatologie der Alpen zwischen Innsbruck und dem Alpenostrand*. Number 17 in Innsbrucker Geographische Studien. Institut für Geographie der Universität Innsbruck.

Krishnaiah, P.R., and L.N. Kanal (Eds.), 1982: *Classification, pattern recognition and reduction of dimensionality*. Handbook of Statistics. Elsevier Science Publishers.

Schneider, F., W. Enke, and T. Deutschländer, 2003: Eine Objektivierungsmethode für die Großwetterlagen nach Hess & Brezovsky. In: *6. Deutsche Klimatagung, Potsdam*, pp. 380–384. Alfred-Wegener-Stiftung.

Stohl, A., and H. Scheifinger, 1994: A weather pattern classification by trajectory clustering. *Meteorol. Z.*, **3 (N.F.)**, 333–336.

Stohl, A., and P. Seibert, 1998: Accuracy of trajectories as determined from the conservation of meteorological tracers. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 1465–1584.

Stohl, A., and G. Wotawa, 1995: A method for computing single trajectories representing boundary layer transport. *Atmos. Environ.*, **29**, 3235–3238.

Stohl, A., G. Wotawa, P. Seibert, and H. Kromp-Kolb, 1995: Interpolation errors in wind fields as a function of spatial and temporal resolution and their impact on different types of kinematic trajectories. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 2149–2165.

Yarnal, B., 1993: *Synoptic climatology in environmental analysis*. Studies in Climatology Series. Belhaven Press.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

ANHANG

Abbildungen(Abb. 4-11) zeigt, wie sich die Niederschlagsverhältnisse in den einzelnen Regionen je nach Jahreszeit verändern. Man erkennt auch sehr schön, dass die Region Ostösterreich im Mittel mit 1-2 mm Niederschlag pro Tag die trockenste ist. Auch das Wald- und Mühlviertel zeigen weniger Niederschlag als die oft als so trocken bezeichnete Südostregion. Beim Südstau sticht das sekundare Maximum im Herbst heraus. Betrachtet man die Anzahl an Tagen mit starken Niederschlägen in den einzelnen Regionen (rechte Seite in Abb. 4-11) so sticht auch hier die Region Südstau heraus, da sie als einzige ihr Maximum ausserhalb der konvektiven Saison, nämlich im Oktober hat. Die Region Südost zeigt auch zu diesem Zeitpunkt ein zweites Maximum. Ganz im Gegenteil zum Südstau hat die Region Semmering-Ennstal fast alle intensiven Niederschlagsereignisse in der konvektiven Saison zu verzeichnen. In den Wintermonaten sind die Ereignisse in allen Regionen seltener. In dieser Jahreszeit sind vor allem die Regionen Nordstau und Westösterreich von Starkniederschlägen betroffen.

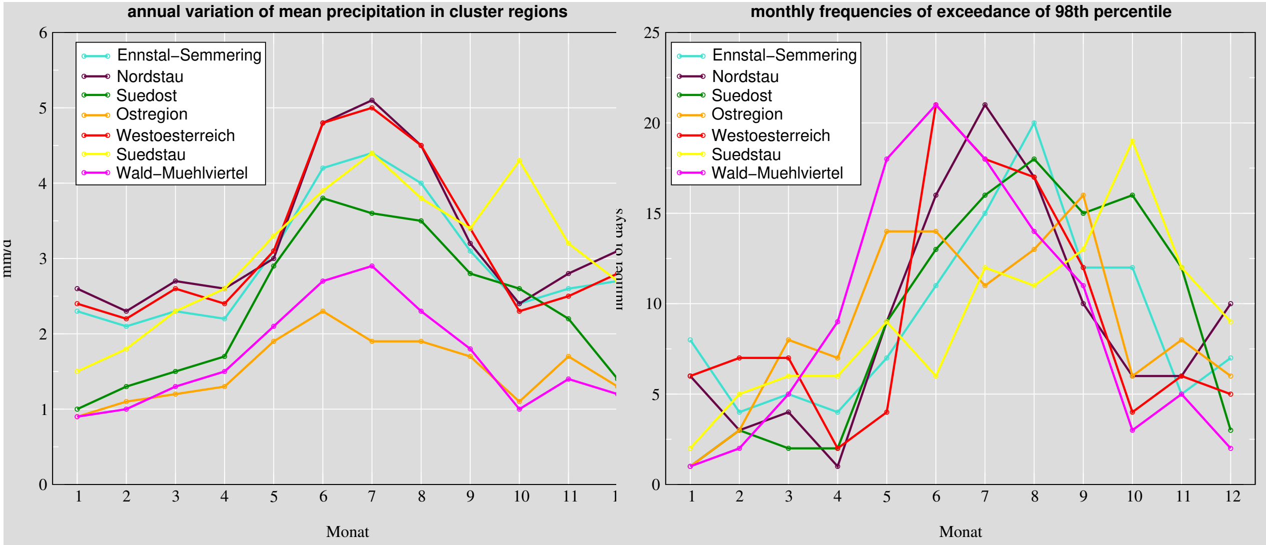


Abbildung 4-11: Jahresgang des Niederschlag in den einzelnen Regionen. Links: Mittlerer Tagesniederschlag pro Monate jeder Regionen. Rechts: Anzahl der Tage pro Monat und Region, an denen das 98er Perzentil überschritten wird. (Die Regionen sind ohne Umordnung nach dem hierarchischen Clustern und unterscheiden sich daher leicht von jenen, die sonst zugrunde liegen.)

Im folgenden werden für die Termine der Zentraltrajektorien aller Wetterlagen NCEP - Reanalysekarten dargestellt. Auf den Druckkarten, die jeweils auf der linken Seite abgebildet sind, sind sowohl der Bodendruck (weiße Isolinien), als auch das Geopotential der 500 hPa Fläche (bunte Farbflächen) eingetragen. Die Karte auf der rechten Seite stellt die Temperatur (Farbflächen) in 850 hPa dar. Die Karten sind im Internet frei zugänglich (`http://www.wetterzentrale.de/topkarten/tkreaar2.htm`) und stehen jeweils für den 00 UTC Termin zur Verfügung.

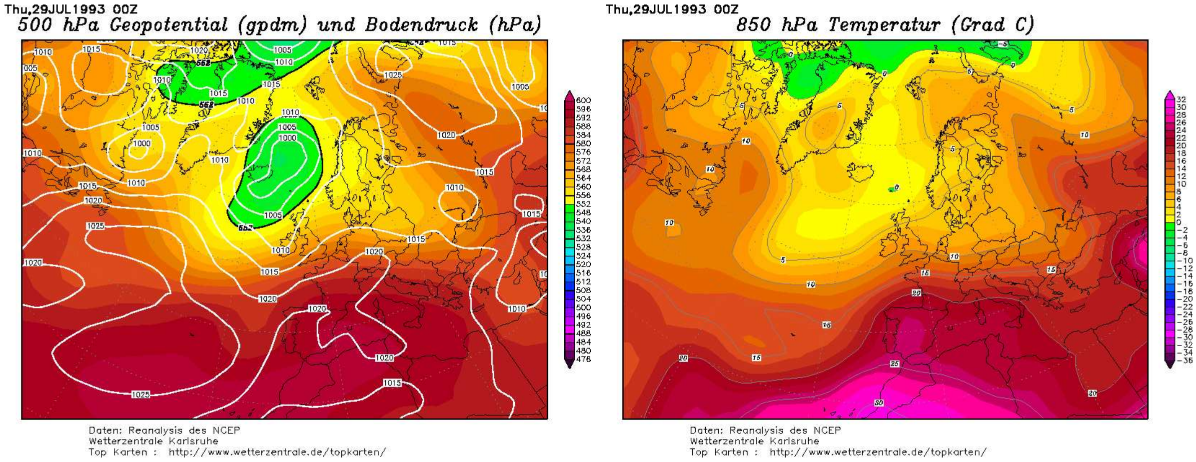


Abbildung 4-12: 1. Wetterlage der Region Nordstau Beispiel 29.7.1993 00 UTC

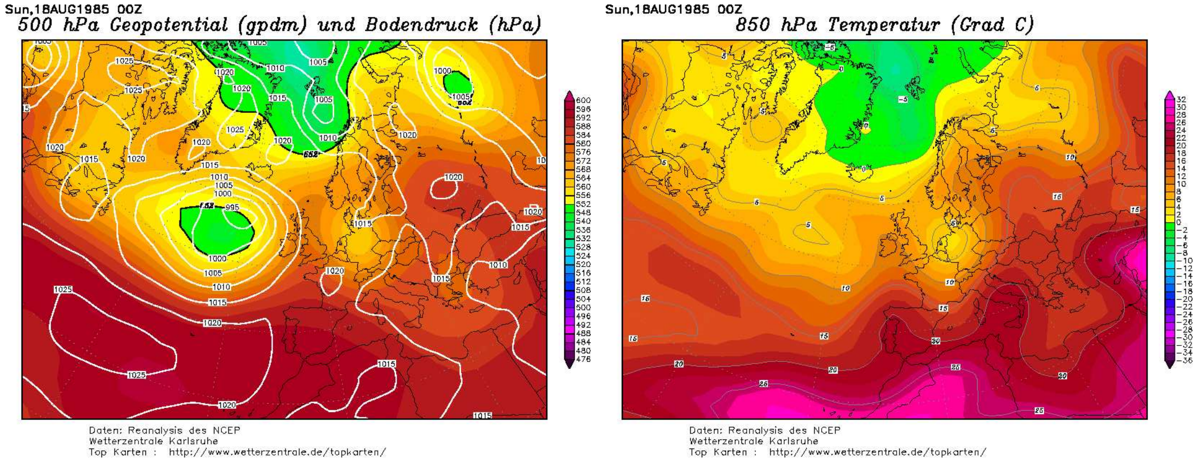


Abbildung 4-13: 2. Wetterlage der Region Nordstau, Beispiel 18.8.1985 00 UTC

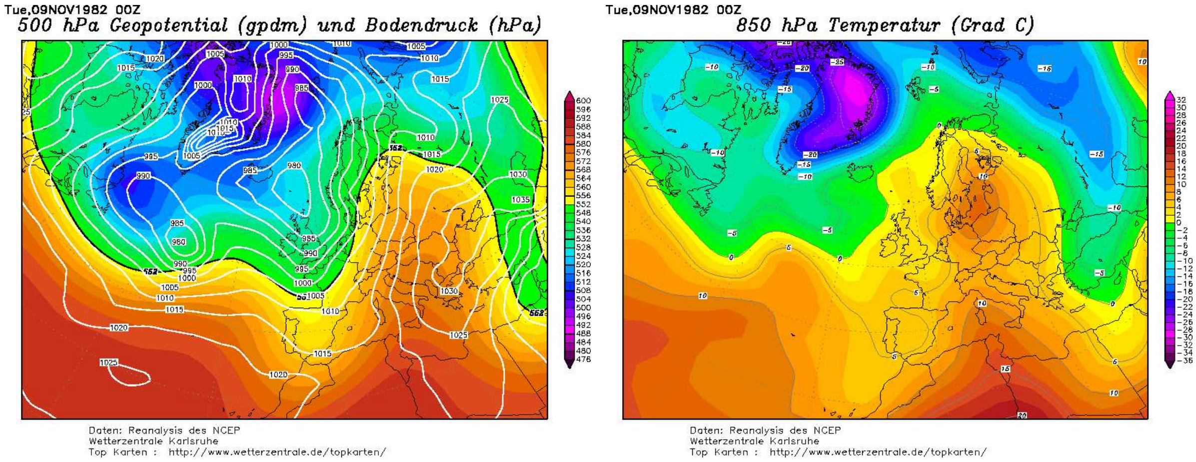


Abbildung 4-14: Wetterlage 1 (Südstau), Beispiel vom 9.11.1982

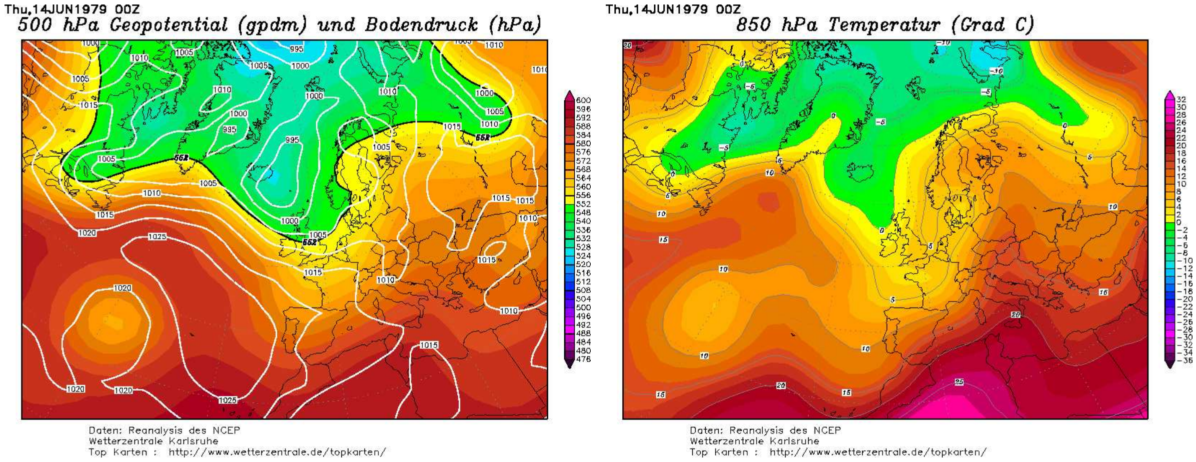


Abbildung 4-15: Wetterlage 2 (flache Druckverteilung), Beispiel vom 14.6.1979 00 UTC

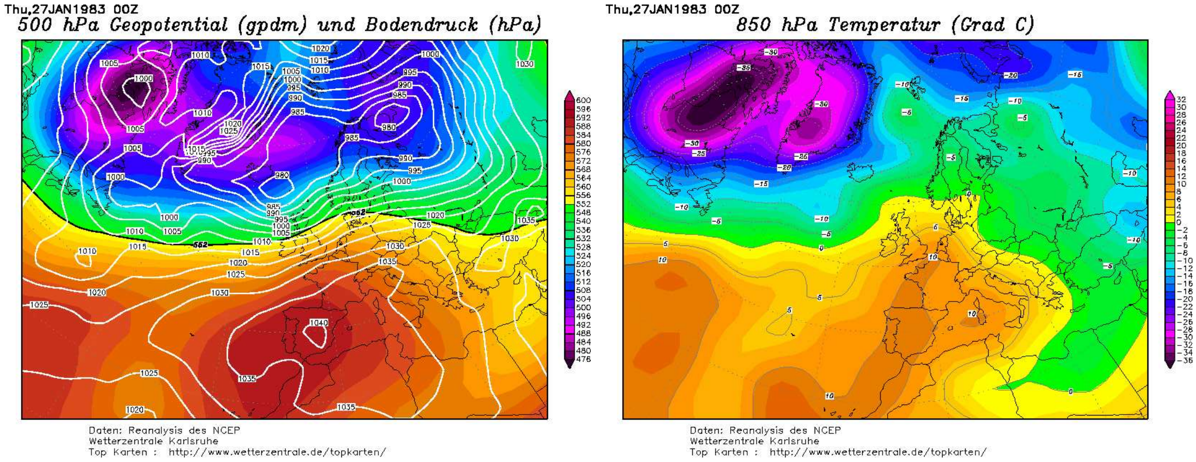


Abbildung 4-16: Wetterlage 3 (zykl. Nordwest), Beispiel vom 27.1.1983 00 UTC

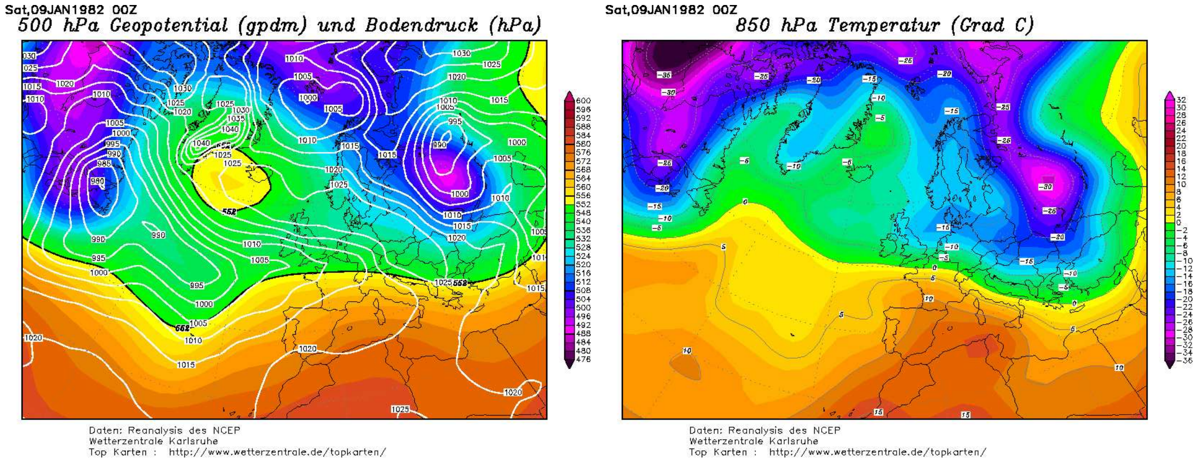


Abbildung 4-17: Wetterlage 4 (Weststau), Beispiel vom 9.1.1982 00 UTC

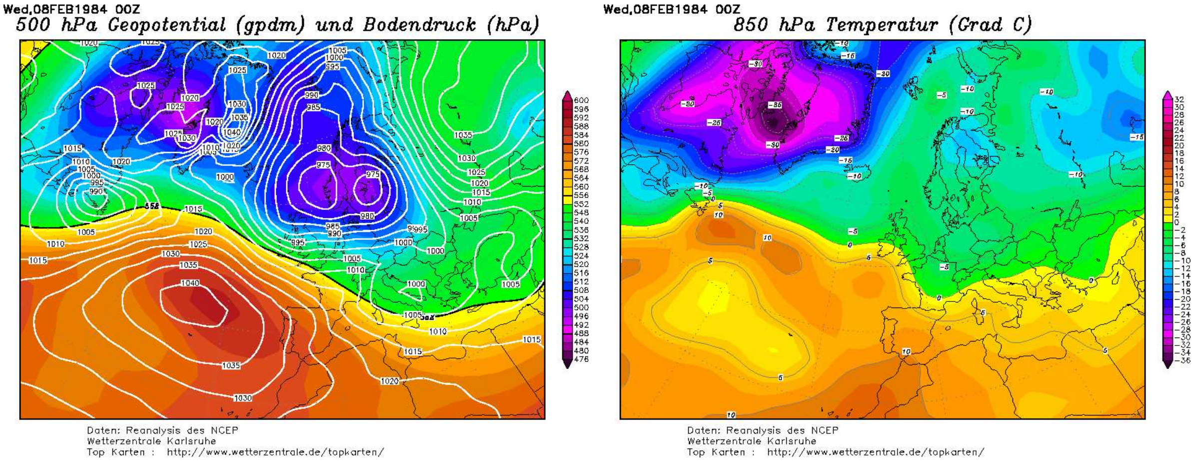


Abbildung 4-18: Wetterlage 5 (Boden: NW, Höhe NNW), Beispiel vom 8.2.1984 00 UTC

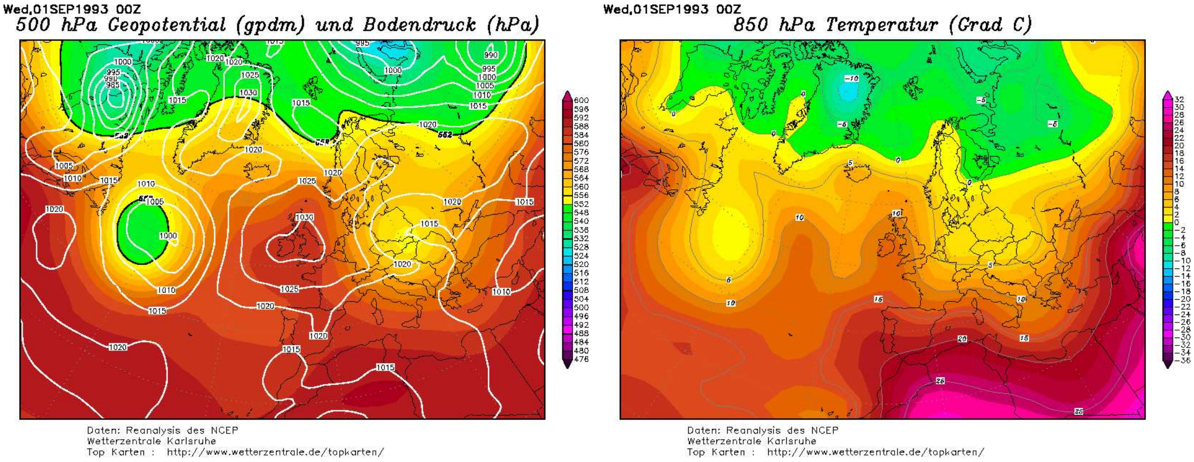


Abbildung 4-19: Wetterlage 6 (Kaltlufttropfen im Osten), Beispiel vom 1.9.1993 00 UTC

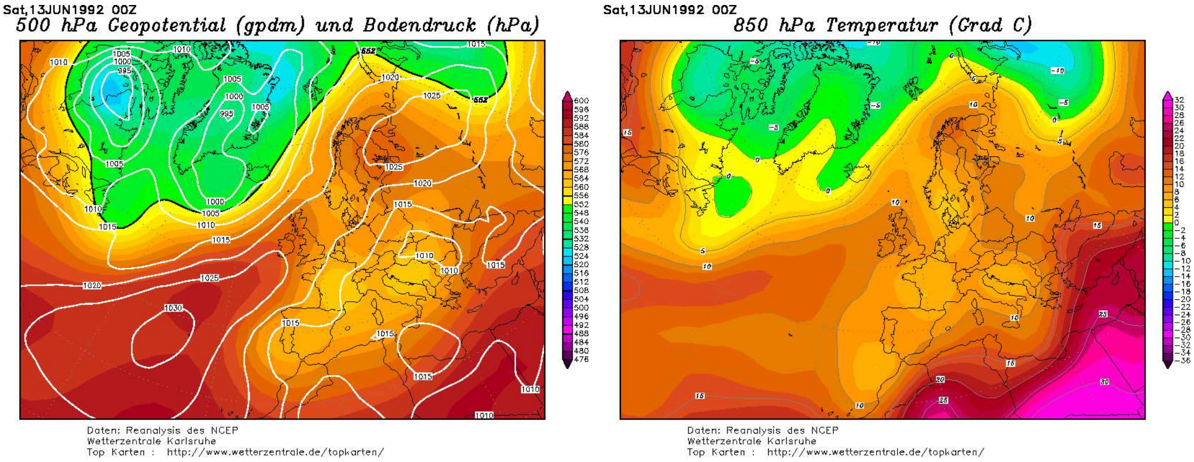


Abbildung 4-20: Wetterlage 7 (Vb), Beispiel vom 13.6.1992 00 UTC