

Dipl. Met. Jörg Rapp • Prof. Dr. Christian-Dietrich Schönwiese

Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Frankfurt/M.

Niederschlags- und Temperaturtrends in Baden-Württemberg 1955-1994 und 1895-1994

Vorwort

Schon seit einigen Jahren werden am Institut für Meteorologie und Geophysik der Frankfurter Universität systematisch Klimatrends untersucht, deren Analyse sich zunächst auf die Entwicklung der wichtigsten Klimatelemente in Europa konzentrierte, sich inzwischen aber - räumlich wesentlich besser aufgelöst - auf das Untersuchungsgebiet Deutschland verlagerte, somit eine „Regionalisierung“ erfahren hat. Fast auf den Tag genau mit den ersten provisorischen Arbeitsergebnissen dieser Analyse, trat im Januar 1995 ein in den Medien viel beachtetes Hochwasserereignis auf. Nachdem erst im Dezember 1993 ein „Jahrhunderthochwasser“ beklagt werden mußte, wurde nun intensiv danach gefragt, was denn die Ursachen dafür seien. Vom klimatologischen Standpunkt aus konnte aufgrund eben dieser Arbeiten vermutet werden, daß für das häufigere Auftreten von Hochwasser neben wasserbaulichen Maßnahmen auch Klimatrends verantwortlich sein könnten.

Der *Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg* ist zu danken, daß sie den Mut (und die finanziellen Mittel) aufbrachte, uns den Auftrag zu geben, für diese offenen Fragen Antworten zu finden, und zwar in einer Bearbeitungszeit, die in der wissenschaftlichen Praxis unkonventionell kurz ist, nämlich noch nicht einmal zwei Monate betrug. Daher ist der vorläufige Charakter dieses „Pilotprojektes“ unvermeidbar gewesen; genauere und erheblich zeitaufwendigere Datenanalysen müssen folgen, um diese ersten Abschätzungen weiter abzusichern und zu präzisieren.

Für die rasche und trotzdem gewissenhafte Datenerfassung ist den studentischen Mitarbeitern Andreas Walter und Martin Weyres zu danken. Für die Bereitstellung der Daten sei dem Deutschen Wetterdienst, insbesondere seinen vielen ehrenamtlichen Mitarbeitern an den Niederschlags- und Klimastationen, gedankt. Und schließlich gilt unsere Aner-

kennung den hier ungenannt bleibenden Mitarbeitern unseres Instituts, die uns mit gutem Rat oder technischer Hilfestellung unterstützt haben. Bei so viel Licht gibt es leider auch Schatten: Die Projektarbeiten wurden seitens der Universität durch zeitweilig unerträgliche Lärmbelästigung in Form von mehrmonatigen Bauarbeiten behindert.

Die Durchführung dieses Projektes kann auch aus diesem Grunde (Arbeiten unter erschwerten Bedingungen) als „Generalprobe“ für den in Kürze erscheinenden „Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland“ gesehen werden.

Wir hoffen, daß wir diese zur Zufriedenheit der Auftraggeber bestanden haben.

Jörg Rapp
Christian-Dietrich Schönwiese

Frankfurt/M., im April 1995

Zusammenfassung

Auf der Grundlage von maximal 78 Zeitreihen monatlicher Niederschlagssummen und 18 Zeitreihen monatlicher Mitteltemperaturen ist eine systematische Analyse der Niederschlags- und Temperaturtrends in Baden-Württemberg für die beiden Zeitintervalle 1955-1994 und 1895-1994 durchgeführt worden.

Nach der Datenerfassung und -ergänzung, verschiedenen Qualitätskontrollen und Fehlerkorrekturen konnte durch eine Repräsentanzanalyse nachgewiesen werden, daß genügend große Korrelationen der Zeitreihen untereinander vorliegen, so daß eine notwendige Voraussetzung für die Anwendung der relativen Homogenitätstests und des Interpolationsverfahrens, also des Zeichnens von Trendkarten, erfüllt ist.

Die Homogenitätsanalyse als zweite vorbereitende Datenanalyse hatte die Elimination von etwa einem Drittel der Niederschlagszeitreihen für 1955-1994 bzw. rund der Hälfte der Zeitreihen für 1895-1994 zur Folge, für die trendverfälschende Inhomogenitäten anzunehmen sind.

Für die Isolinienanalyse der berechneten linearen und relativen Trends sowie ihrer Signifikanz (Mann-Kendall-Test) wurde das Kriging-Interpolationsverfahren zusammen mit einem $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ -Gitternetz benutzt, was eine genügend große räumliche Auflösung ermöglicht.

Die Ergebnisse der Trendanalysen lassen sich nun wie folgt zusammenfassen:

In den letzten 40 Jahren hat offensichtlich eine bemerkenswerte jahreszeitliche Umverteilung des Niederschlages stattgefunden. Während im Frühling, im Herbst und im Winter der Niederschlag um etwa 10 bis 40 % seines Mittelwertes zugenommen hat, ist im Sommer eine Verringerung der Regemengen um bis zu 35 % zu beobachten. Demzufolge stieg der Anteil des Niederschlages im Winterhalbjahr am Gesamtjahresniederschlag um 5 bis 8 Prozentpunkte an. Ähnliche Entwicklungen hat es auch bei Betrachtung der letzten 100 Jahre gegeben: Einer deutlichen Niederschlagszunahme, die sich vor allem in den drei Wintermonaten bemerkbar macht, steht ein annähernd konstant gebliebenes Niederschlagsniveau im Sommerhalbjahr gegenüber.

Die Signifikanz dieser Trends ist zwar meist gering, dafür weisen aber in den meisten Fällen sämtliche untersuchten Stationsreihen gleichgerichtete (also entweder zu- oder ab-

nehmende) Trends auf, was gegen ein reines Zufallsverhalten spricht. So hat der Jahresniederschlag verbreitet um 5 bis 15 % des Mittelwertes zugenommen, sowohl in den letzten 100 als auch in den letzten 40 Jahren. Die Lufttemperatur ist in dieser Zeit um rund 1 K gestiegen, ohne daß sich ausgeprägte regionale Besonderheiten ergeben haben.

Die Niederschlagstrends in Baden-Württemberg fügen sich gut in die entsprechenden großräumigeren Entwicklungen in Europa und der mittleren nördlichen Breiten ein, wie Vergleiche mit entsprechenden, bereits vorliegenden Publikationen (einschließlich unserem „Klimatrend-Atlas Europa 1891-1990“) zeigen.

Wie sich der Niederschlag in Baden-Württemberg jedoch in Zukunft entwickeln wird, bleibt ungewiß. Folgt man den insbesondere regional noch relativ unsicheren Prognosen des Hamburger Max-Planck-Institutes für Meteorologie über die klimatischen Konsequenzen des anthropogenen Treibhauseffektes (Zirkulationsmodellrechnungen), ist eine Tendenz zu größeren winterlichen Niederschlagssummen wahrscheinlicher als ein Niederschlagsrückgang. Dadurch würde das Hochwasserrisiko eher anwachsen.

1. Einführung

Zu den Ursachen von Hochwasserereignissen im Binnenland zählen nicht nur wasserbauliche Gründe (wie die Erhöhung bzw. Beschleunigung des Abflusses durch fehlende Zwischenspeicher, Flächenversiegelung, Kanalisation oder die Bach- und Flußbegradigungen), sondern auch meteorologische Ursachen. Langanhaltender, ergiebiger und verbreiteter Regen stellt die wesentliche Voraussetzung für Hochwasser dar, welches durch die Beschleunigung des Abflusses des Regenwassers auf gefrorenem oder wassergesättigtem Boden, also durch eine entsprechend ungünstige „Vorwitterung“, noch verstärkt werden kann. Eine plötzlich eintretende, umfassende Schneeschmelze durch Regenfälle, hohe Temperaturen und starken Wind kann die Gefahrensituation zusätzlich erhöhen (Abb. 1.1).

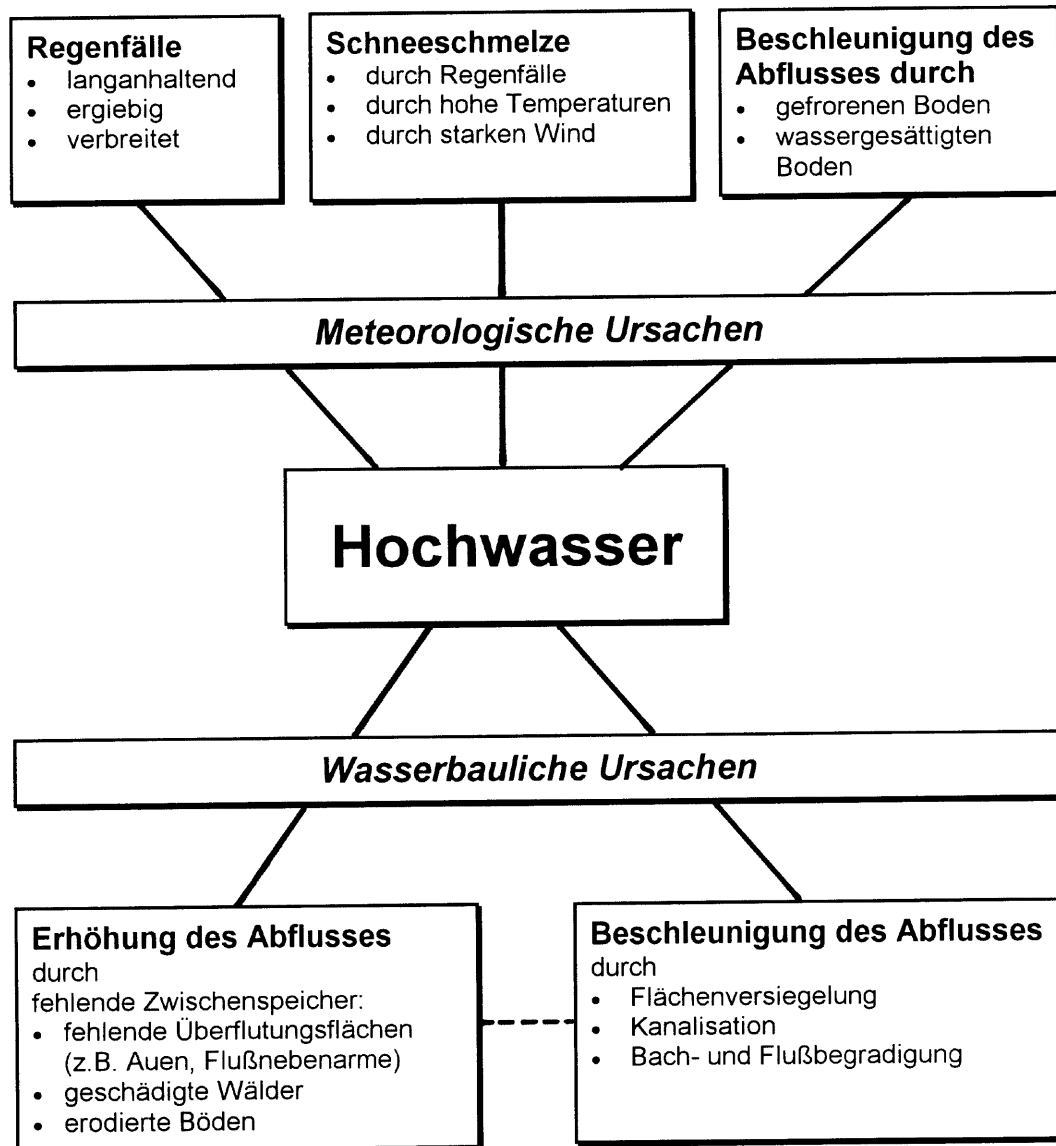


Abb. 1.1 Schema der Ursachen für Hochwasserereignisse im Binnenland. Die wasserbaulichen, also direkt anthropogenen Ursachen „Erhöhung“ bzw. „Beschleunigung“ des Abflusses sind nicht immer klar voneinander unterscheidbar. Die meteorologischen Ursachen können aufgrund einer indirekt wirkenden anthropogenen Beeinflussung (zum Beispiel durch mögliche Zirkulationsvariationen in folge des Zusatz-„Treibhauseffektes“) zu Veränderungen im Hochwassergeschehen führen.

Es ist daher unumgänglich, die meteorologischen Aspekte für das Entstehen von Hochwasserereignissen näher zu untersuchen. Dabei spielt naturgemäß der Niederschlag, genauer gesagt, das Auftreten sogenannter Starkniederschlagsereignisse, die ausschlaggebende Rolle. Unter der berechtigten Annahme, daß solche Extremniederschläge bei allgemein ansteigenden Niederschlagsmengen häufiger auftreten müssen, lohnt eine detaillierte Betrachtung der Entwicklung der monatlichen bzw. jahreszeitlichen Niederschlagssummen. Da die Lufttemperatur indirekt Einfluß auf den Niederschlagstrend nehmen (siehe Kapitel 4) und ganz allgemein Hinweise auf eine Klimaveränderung geben kann, ist deren Analyse ebenfalls von Relevanz.

Mit dem Einfluß des Niederschlags auf das Abfluß- und Hochwasserverhalten in Deutschland haben sich schon eine Reihe von Autoren beschäftigt, die hier nur auszugsweise zitiert sind, falls sie für Baden-Württemberg von Interesse sind: Wildenhahn (1986) stellt fest, daß für einzelne Teileinzugsgebiete des Rheins zwischen 1892 und 1980 die Jahresniederschläge, vor allem aber die Winterniederschläge, zugenommen haben, während einzelne Monate, zum Beispiel August und September, negative Tendenzen aufweisen. Caspary & Bárdossy (1995) brachten steigende Abflüsse mit den in den letzten 20 Jahren im Winter vermehrt auftretenden zyklonalen Westwetterlagen und somit mit erhöhter Niederschlagstätigkeit in Verbindung. Engel (1993) macht auf eine jahreszeitliche Umverteilung der Niederschläge im Einzugsgebiet des Rheins aufmerksam, mit Abnahmen in den Monaten Juni bis Oktober und entsprechend überproportionalen Zunahmen in den Monaten Februar bis Mai, nachdem er die mittleren Monatsniederschläge der beiden letzten Klimanormal-Perioden (1931-1960, 1961-1990) gegenüberstellte.

Flächendeckende Regionalanalysen von Klimatrends in Deutschland sind dagegen selten durchgeführt worden (zum Beispiel in RAPP, 1994). Meist basieren Aussagen über das zeitliche Verhalten von Klimaelementen, worunter die Lufttemperatur und der Niederschlag als die beiden wichtigsten Größen zu zählen sind, auf die nähere Untersuchung von Einzelzeitreihen. Dabei besteht die Gefahr, daß von diesen punktuell vorliegenden Daten auf zu große Gebiete geschlossen wird, was nicht notwendigerweise richtig sein muß. Erst das Vorliegen eines Datensatzes, der aus einer genügend großen Zahl von Stationszeitreihen besteht, berechtigt zu Aussagen über Klimatrends in bestimmten Regionen oder Landschaftsräumen, also zu Trendkarten.

Gegenstand und Untersuchungsgebiet des Projektes ist Baden-Württemberg. Abb. 1.2 gibt die wichtigsten Flüsse und Landschaften dieses Bundeslandes wieder, natürlich ohne Anspruch auf Vollständigkeit (der Fluß „Kocher“ fehlt der Übersichtlichkeit halber, obwohl er seinem Nachbarfluß „Jagst“ bestimmt in nichts nachsteht). Umriss und Fluß-

verläufe (die einem digitalisierten Datensatz entnommen wurden) werden in dieser Form auch in den Trendkarten, die sich im Anhang befinden, erscheinen, so daß es lohnt, sich diese einzuprägen.

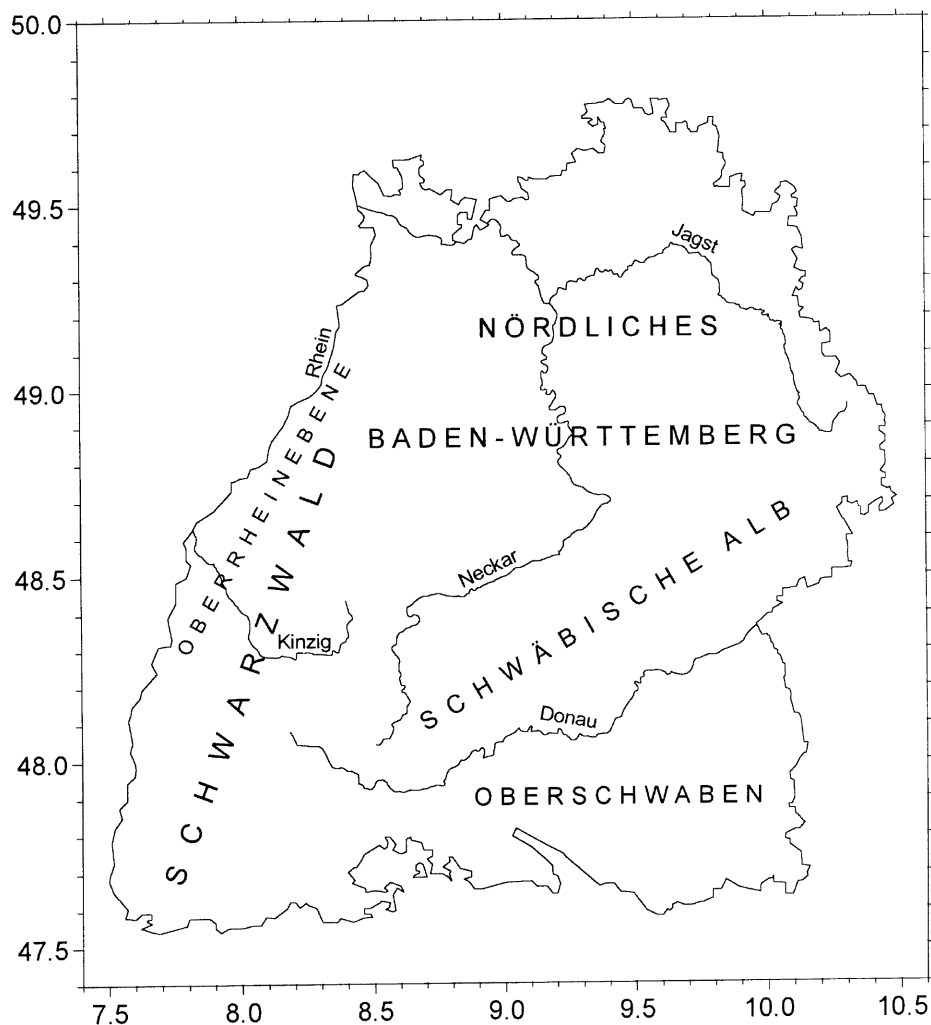


Abb. 1.2: Die wichtigsten Flüsse und Landschaften Baden-Württembergs.

Ausführlicher geht der schon im Vorwort angekündigte „Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland“ (Rapp & Schönwiese, 1995) auf die methodischen Aspekte der Trendanalyse im weitesten Sinne, so auch auf deren statistischen Grundlagen, ein. Die Gesamtsystematik der statistischen Analyse von Klimatrends zeigt dagegen Abb. 1.3. Praktisch sämtliche Analysenschritte, die in den folgenden Kapiteln jeweils in aller Kürze vorgestellt werden, konnten für die vorliegende Ausarbeitung realisiert werden.

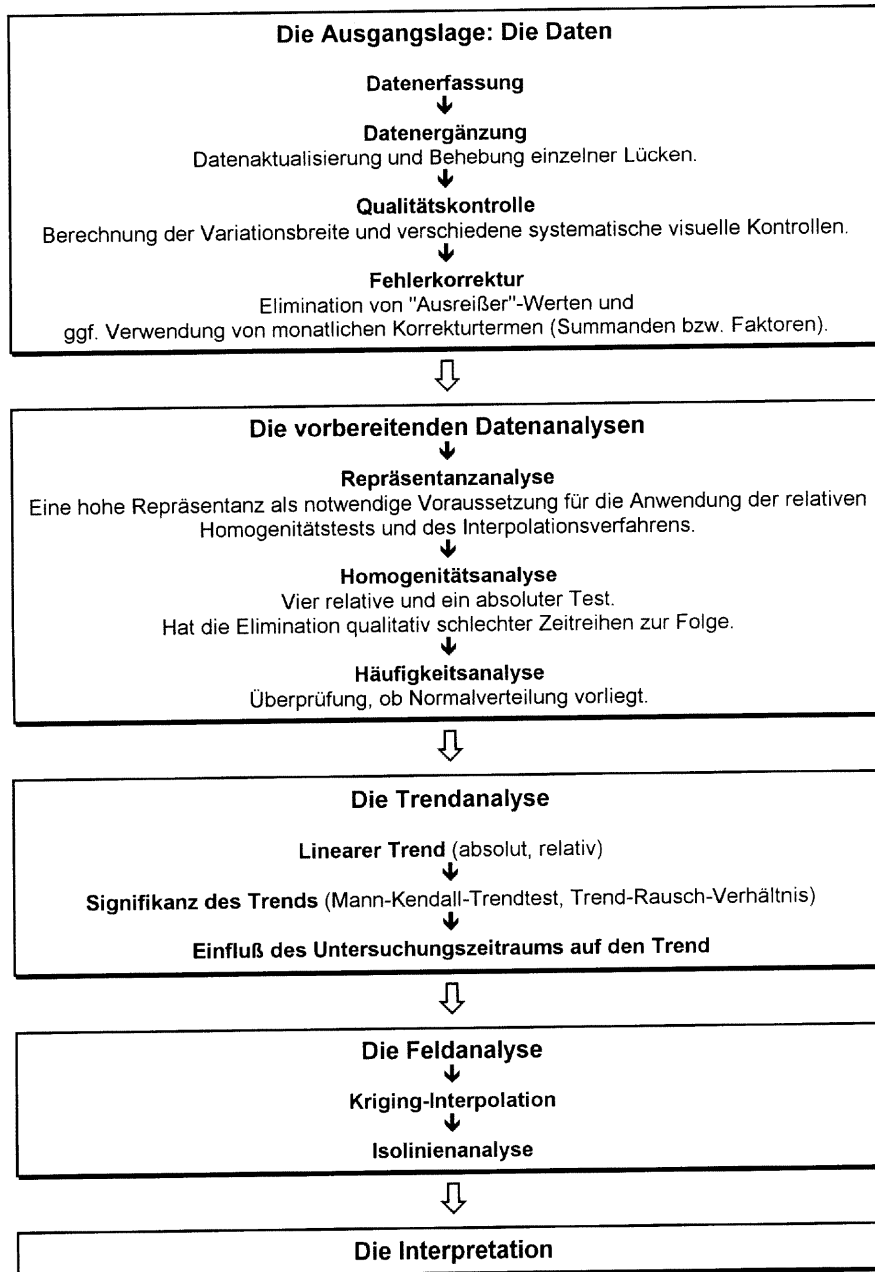
SYSTEMATIK DER STATISTISCHEN ANALYSE VON KLIMATRENDS

Abb. 1.3: Systematik der statistischen Analyse von Klimatrends. Praktisch sämtliche Analyseschritte konnten für die vorliegende Ausarbeitung realisiert werden.

2. Die Daten

Datengrundlage der Analyse sind insgesamt 78 Stationszeitreihen des Niederschlages (davon 54 innerhalb Baden-Württembergs) und 18 Stationszeitreihen der Lufttemperatur (davon 9 innerhalb Baden-Württembergs), die als monatliche Summen bzw. als monatliche Mittelwerte vorliegen. Von den Niederschlagsreihen umfassen 48, von den Temperaturreihen nur 11 das säkulare Zeitintervall 1895-1994. Für das Projekt wurden eigens 32 Niederschlagsreihen neu erfaßt (darunter auch zwei Reihen für den hundertjährigen Zeitraum), um eine befriedigende Stationsdichte zu erreichen. Außerdem wurden alle Zeitreihen bis 1994 aktualisiert. Schließlich mußten einzelne Lücken aufgefüllt und fehlerhafte Werte („Ausreißer“) mittels verschiedener systematischer visueller Kontrollen korrigiert werden, da sie andernfalls einen stark verfälschenden Einfluß auf den Trend ausgeübt hätten.

Einen räumlichen Überblick über diese Datengrundlage, mithin einen Eindruck von der Stationsdichte, verschafft Abb. 2.1, die zwischen Stationen mit einer Höhenlage von weniger und mehr als 600 m NN unterscheidet. Für das Klimaelement Niederschlag konnte eine Stationsverdichtung um fast alle Orte, die mit einem unausgefüllten Kreis oder Quadrat markiert sind, erreicht werden.

Während eine Korrektur der Daten auf offensichtliche EDV-Fehler hin möglich und geboten ist, ist die Messung des Niederschlages mit teils unüberwindlichen Schwierigkeiten und Fehlern verbunden. Experimentelle Untersuchungen mit wechselnder Orientierung und Höhenanordnung des Meßgerätes haben ergeben, daß die verbreiteten Standardauf-fanggeräte nur 5 bis 50 % des „wahren“ Niederschlages messen (Sevruk, 1989). Die gebräuchlichen Messungen liefern also zu niedrige Ergebnisse, wobei der Fehlbetrag mit wachsender Windexposition zunimmt. Legates (1993) stellte fest, daß bei starkem Wind durchschnittlich 20 % des tatsächlichen Niederschlages von einer in Deutschland gebräuchlichen Hellmannschen Apparatur nicht aufgenommen wird (Abb. 2.2). Bei Schneefall betragen die Verluste zum Teil sogar weit mehr als 50 %, was den Sinn der Angabe eines Absolutwertes zunächst vollständig in Frage stellt. Speziell konstruierte, vor Windeinfluß geschützte Geräte verbessern zwar die Niederschlagsmessungen deutlich, jedoch werden auch bei ausgefeilter Konstruktion immer noch erhebliche Differenzen zum wahren Niederschlag festgestellt.

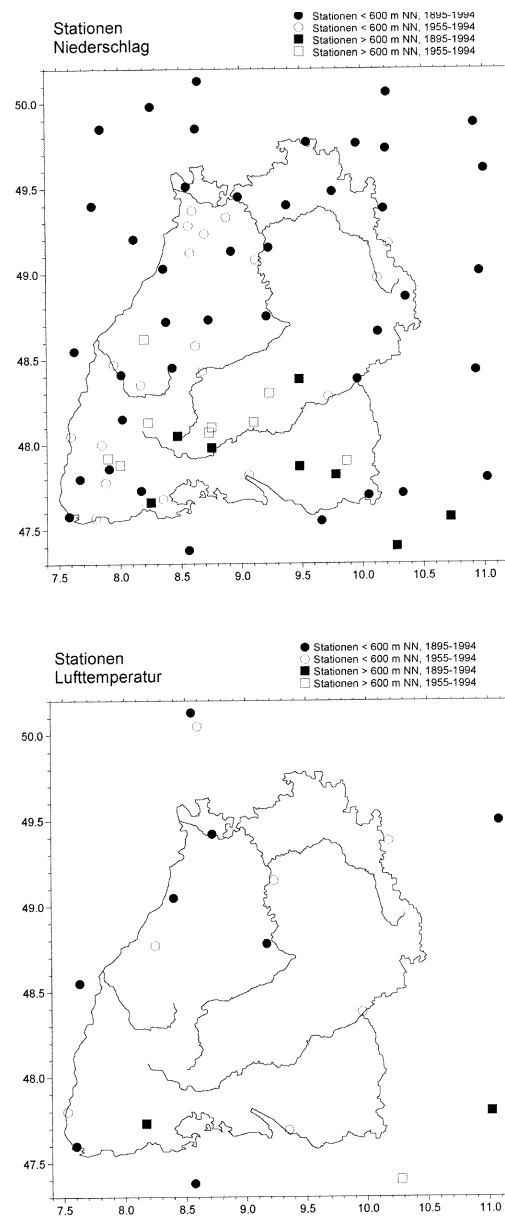


Abb. 2.1: Stationskarten für Baden-Württemberg. Regionale Verteilung der untersuchten Stationszeitreihen für den Niederschlag (oben) und die Lufttemperatur (unten). Neben der generellen Aktualisierung der Niederschlagsreihen (1991-1994) wurden die für die Zeit von 1955-1994 vorliegenden Niederschlagsreihen (Symbole: o, °) fast vollständig neu erfaßt.

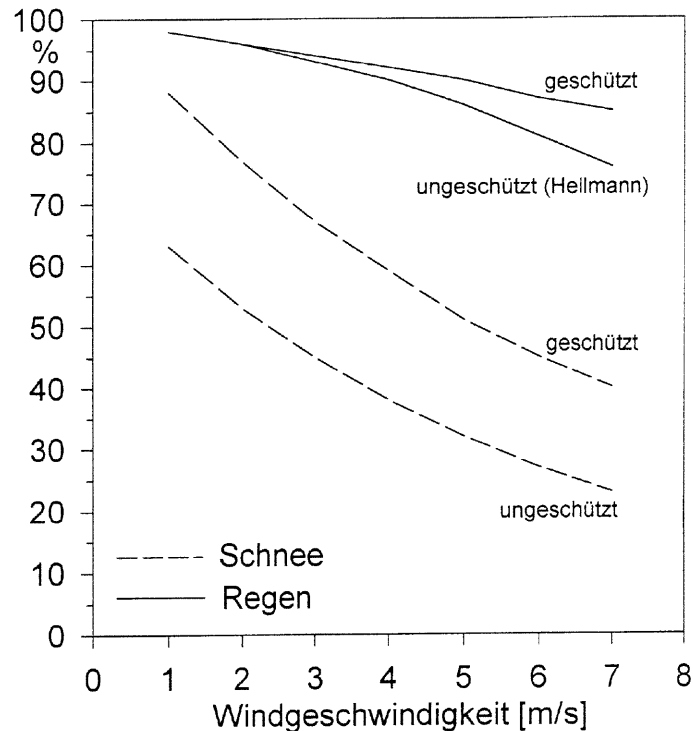


Abb. 2.2: Gemessener Niederschlag in Prozent des „wahren“ Niederschlages in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für windungeschützte (Hellmann'sche) und windgeschützte Auffanggefäße (nach Legates, 1993).

Neben dem Einfluß des Windes, der zu Turbulenzen, zu Wirbeln und Spritzwasser an der Meßvorrichtung führt, spielen auch der Aufbau und die Eigenschaften des Meßinstrumentes (Maße, Installationshöhe, Form, usw.) sowie eventuell auftretende Gerätefehler (Verdunstung, Benetzung, Neigung, usw.) eine wichtige Rolle (Abb. 2.3). Außerdem können bestimmte meteorologische Größen, wie Strahlung, Lufttemperatur und Luftfeuchte, die Güte und damit die Vergleichbarkeit der Niederschlagsmessung beeinflussen (Sevruk, 1989).

Da diese Probleme bei fast allen Niederschlagsmeßstationen auftreten und sich die Fehler durch die Aufsummierung der einzelnen Meßergebnisse zu monatlichen Summen wenigstens teilweise ausgleichen, andererseits zu Beginn und am Ende eines Untersuchungsintervalls in gleicher Weise auftreten, sind Relativaussagen (wie die Berechnung von Trends), ggf. mit möglichen Korrekturen (vergleiche Kapitel 4), durchaus brauchbar.

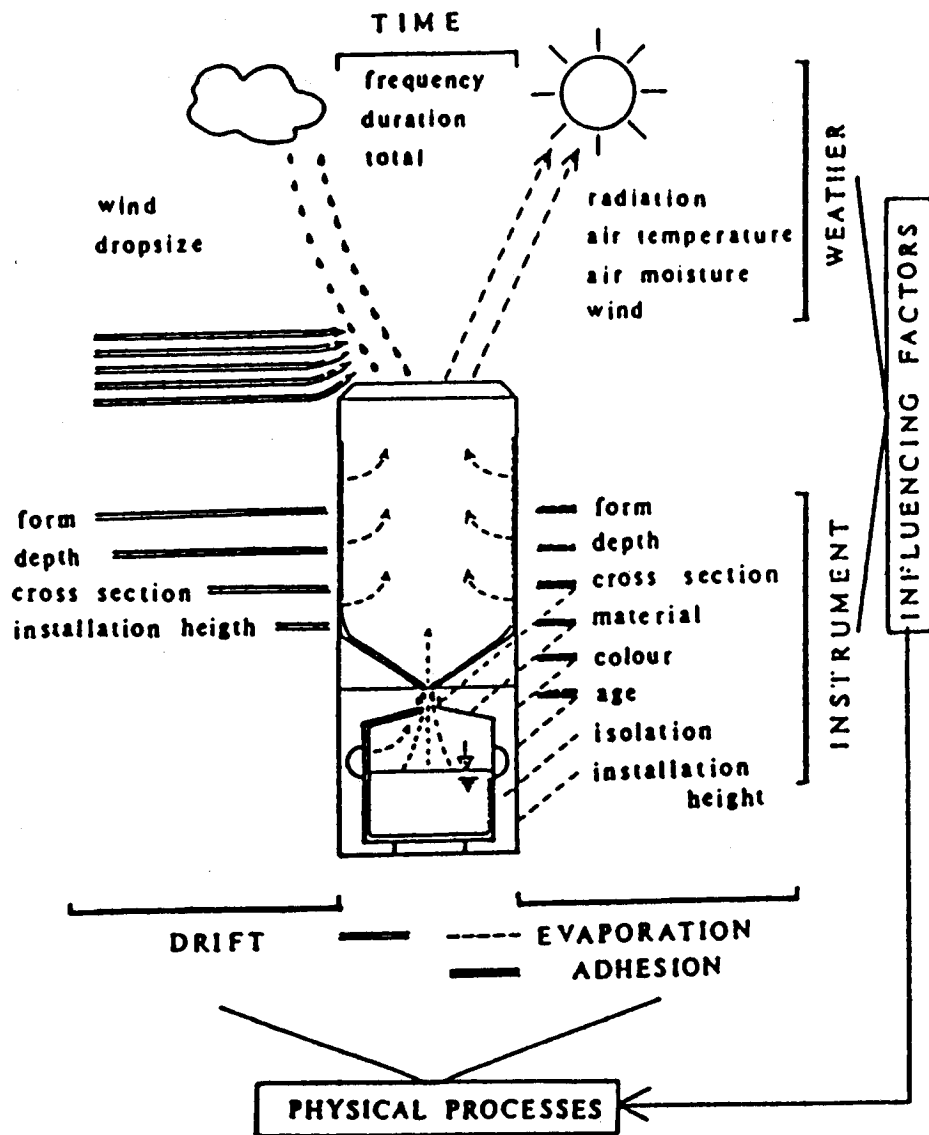


Abb. 2.3: Schema der wichtigsten physikalischen Prozesse, die systematische Fehler bei der Niederschlagsmessung hervorrufen können (aus Sevruk, 1989).

3. Die vorbereitenden Datenanalysen

3.1. Die Repräsentanzanalyse

Die Repräsentanz eines Klimaelementes gibt Auskunft, inwieweit seine zeitliche Schwankungsstruktur (zum Beispiel sein Trend), stellvertretend für ein bestimmtes Gebiet stehen kann. Zur Erfassung der Repräsentanz dient der räumliche Korrelationskoeffizient nach Pearson, der die Ähnlichkeit zweier Zeitreihen angibt. Erst dann, wenn diese Übereinstimmung groß genug ist, macht eine Isolinienanalyse, also die Interpolation der klimatologischen Größe zwischen zwei benachbarten Datenpunkten, und damit die Aussage für ein größeres Gebiet, strenggenommen Sinn. Auch die Anwendung relativer Homogenitätstests (Kapitel 3.2), bei der die zu analysierende Reihe nur mit gut korrelierten Nachbarzeitreihen verglichen werden darf, benötigt eine vorausgehende Repräsentanzanalyse.

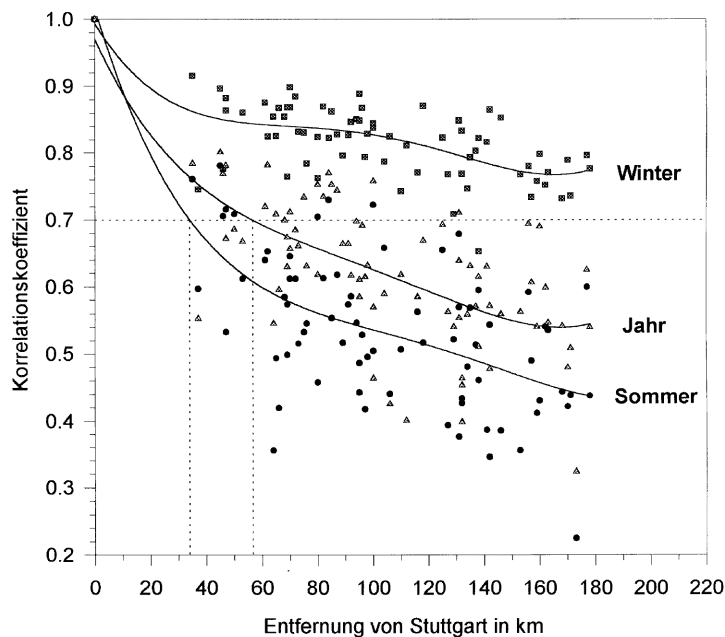


Abb. 3.1.1: Repräsentanz der Niederschlagszeitreihe von Stuttgart in Abhängigkeit von der Entfernung zu den untersuchten Niederschlagsstationen. Dargestellt ist der Pearson-Korrelationskoeffizient für die meteorologischen Jahreszeiten Sommer (Kreise) und Winter (Quadrate) sowie das Jahr (Dreiecke) mit entsprechenden Näherungskurven.

Abb. 3.1.1 zeigt nun die Abnahme der Repräsentanz des Niederschlages mit der Entfernung bezüglich der zentral gelegenen Referenzstation Stuttgart. Als Mindestvoraussetzung für eine ausreichend hohe Repräsentanz sollte gelten, daß zwei Zeitreihen die halbe gemeinsame Varianz aufweisen. Dies entspricht einem Korrelationskoeffizienten von ca. 0.7 (gestrichelte horizontale Linie). Es ist deutlich zu erkennen, daß im Sommer die Repräsentanz aufgrund der in dieser Jahreszeit häufiger auftretenden konvektiven Niederschläge (Schauer und Gewitter) wesentlich geringer ist als im Winter (siehe auch Abb. 3.1.3), wenn der Niederschlag überwiegend als flächenhafter Frontalregen auftritt.

Die Repräsentanz der Lufttemperatur ist wesentlich größer als die des Niederschlages, was Abb. 3.1.2 illustriert. Der Korrelationskoeffizient sinkt auch in größerer Entfernung nicht unter 0.9.

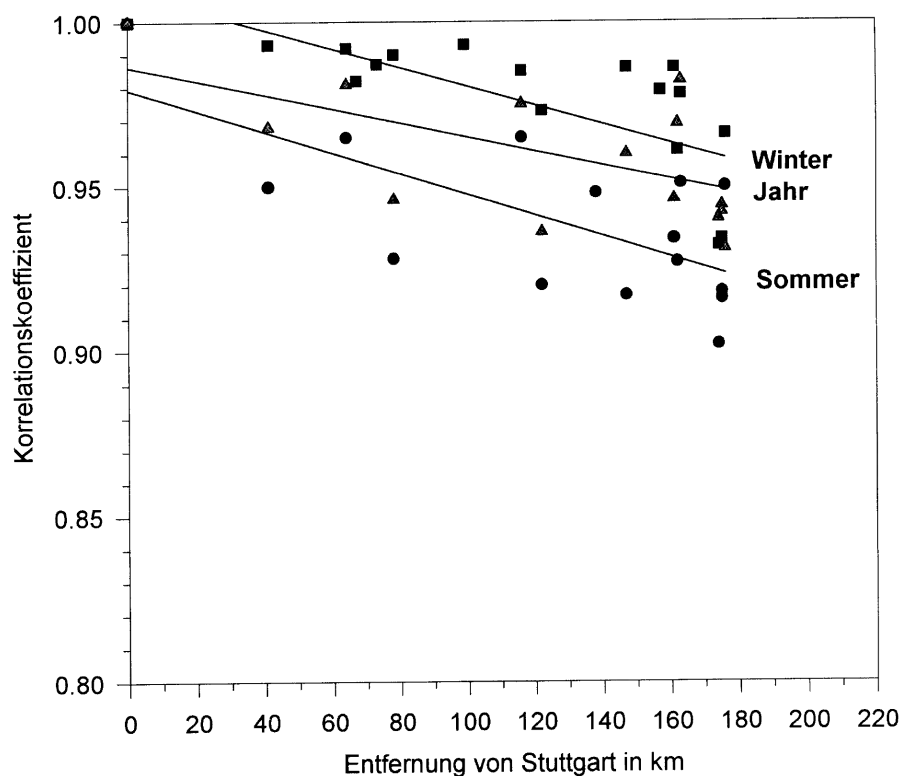


Abb. 3.1.2: Regionale Repräsentanz der Lufttemperaturzeitreihen in Relation zu Stuttgart in Abhängigkeit von der Entfernung zu den untersuchten Niederschlagsstationen. Dargestellt ist der Pearson-Korrelationskoeffizient für die meteorologischen Jahreszeiten Sommer (Kreise) und Winter (Quadrate) sowie das Jahr (Dreiecke) mit Ausgleichsgeraden, die exakt in der linken, oberen Ecke der Grafik enden müssten (da der Korrelationskoeffizient für die Entfernung 0 km ja 1 sein muß).

Für beide Klimaelemente existiert damit eine genügend große Zahl von Stationen mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.7 oder mehr, so daß die beiden Datensätze die gestellten Bedingungen erfüllen.

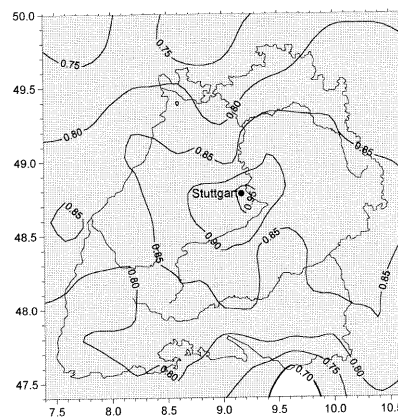
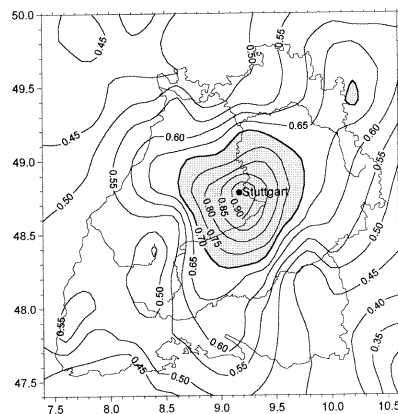


Abb. 3.1.3: Regionale Repräsentanz der Niederschlagszeitreihen in Relation zu Stuttgart. Dargestellt ist der Pearson-Korrelationskoeffizient für die meteorologischen Jahreszeiten Sommer (oben) und Winter (unten). Schraffiert ist der Bereich mit Korrelationskoeffizienten > 0.7 , für den also die Niederschlagszeitreihen mindestens die halbe gemeinsame Varianz mit der Stuttgarter Reihe aufweist.

3.2 Die Homogenitätsanalyse

Als zweite wichtige vorbereitende Datenanalyse ist die Überprüfung der Homogenität der Zeitreihen von besonderer Bedeutung. Denn rein künstliche Klimaänderungen (Inhomogenitäten), die besonders bei äußeren Einflüssen, zum Beispiel bei Stationsverlegungen oder zunehmendem Bewuchs, auftreten, haben nichts mit einer tatsächlichen natürlichen Klimavariation zu tun. Eine Inhomogenität kann somit den Trend verfälschen und zu unplausiblen Trendkarten führen. Daher sind vermutliche Inhomogenitäten aus der weiteren Datenanalyse möglichst vollständig zu eliminieren. Dies hat zwingend eine Reduktion des Datensatzes zur Folge, was aber in Kauf genommen werden muß.

Zur Anwendung kamen ein absoluter und vier relative Homogenitätstests, die zweifach berechnet wurden, da in einem 1. Schritt die näherungsweise homogenen Referenzreihen festzustellen waren, die in einem 2. Schritt als „gute“ Vergleichsreihen für die eigentlichen relativen Tests fungieren mußten. Für nähere methodische Einzelheiten muß an dieser Stelle erneut auf den „Atlas der Niederschlagstrends in Deutschland“ (Rapp & Schönwiese, 1995) verwiesen werden.

Die Einzelergebnisse wurden schließlich in Homogenitätsklassen zusammengefaßt: Mit 1 wurden sehr wahrscheinlich homogene, mit 2 wahrscheinlich homogene, mit 3 unsichere, mit 4 wahrscheinlich inhomogene und mit 5 sehr wahrscheinlich inhomogene Zeitreihen beurteilt; die Ergebnisse sind in Abb. 3.2 zu sehen. Für die Trendanalysen bleiben alle Zeitreihen der Homogenitätsklassen 4 und 5 unberücksichtigt.

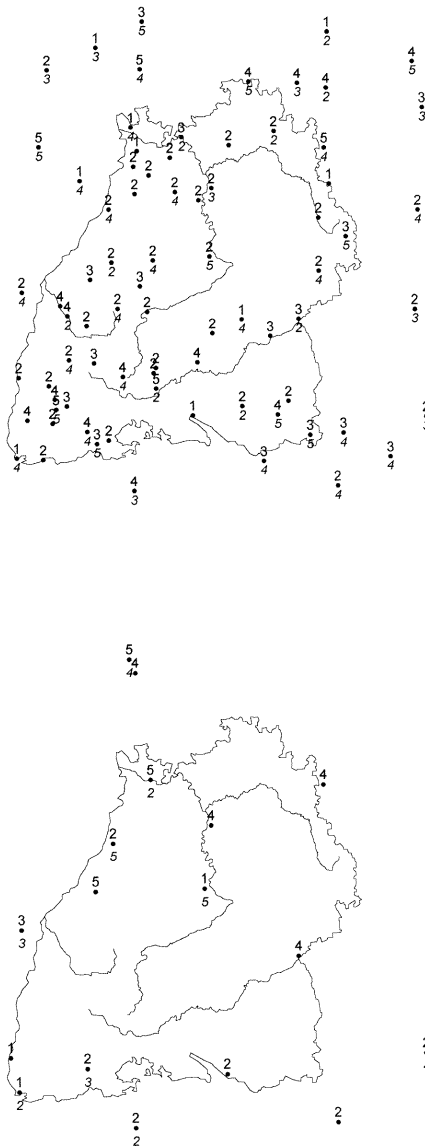


Abb. 3.2: Homogenitätsklassen (1=sehr wahrscheinlich homogen, 2=wahrscheinlich homogen, 3=unsicheres Ergebnis, 4=wahrscheinlich inhomogen, 5=sehr wahrscheinlich inhomogen) als Ergebnis der Homogenitätstests für den Niederschlag (oben) und die Lufttemperatur (unten). Oberhalb des Stationspunktes ist das Ergebnis für 1955-1994, darunter dasjenige für 1895-1994 (kursiv) vermerkt.

4. Die Trendanalyse

Es existieren verschiedene Möglichkeiten, zeitliche Trends einer Klimagröße anzugeben. In der Klimatologie ist die Berechnung des linearen Trends weit verbreitet, stellt sie doch eine einfache, gleichwohl effiziente Methode dar, sich einen Einblick in das zeitliche Verhalten einer klimatologischen Größe zu verschaffen. Der lineare Trend ergibt sich aus der Produkt-Moment-Korrelation mit der Zeit in Form von Regressionsgleichungen (Schönwiese, 1992) nach der Methode der kleinsten Quadrate. Im engeren Sinn bedeutet „Trend“ die Differenz des Ordinatenwertes am Ende des untersuchten Zeitintervalls gegenüber dem Anfang (vergleiche Abb.4.1).

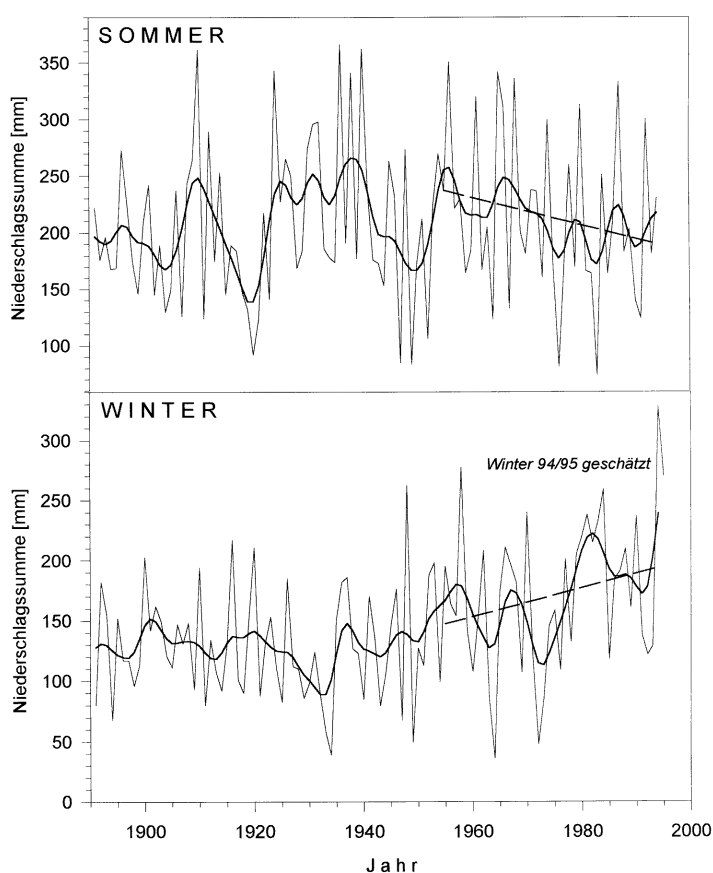


Abb. 4.1: Zeitreihe der Niederschlagssummen in Bad Mergentheim 1891-1994 für den Sommer (Juni, Juli, August; oben) und den Winter (Dezember, Januar, Februar; unten). Fett liniierte Kurve: zehnjährig geglättete (tiefpaßgefilterte) Werte. Gestrichelte Gerade: Trendgerade für 1955-1994.

Der Trend alleine kann jedoch ohne Angabe seiner Signifikanz nicht richtig interpretiert werden. Vielmehr muß eine zusätzliche Aussage darüber getroffen werden, wie deutlich der Trend gegenüber der gesamten Zeitreihenvariabilität heraustritt, also wie „sicher“ oder „streng“ er ist. Der Mann-Kendall-Test bietet dafür ein geeignetes Verfahren, da er keine Voraussetzungen bezüglich der Häufigkeitsverteilung verlangt, also parameterfrei funktioniert. Die Ergebnisse dieses Tests sind Zahlenwerte, die mit den Signifikanzniveaus bzw. den Irrtumswahrscheinlichkeiten in folgendem Zusammenhang stehen:

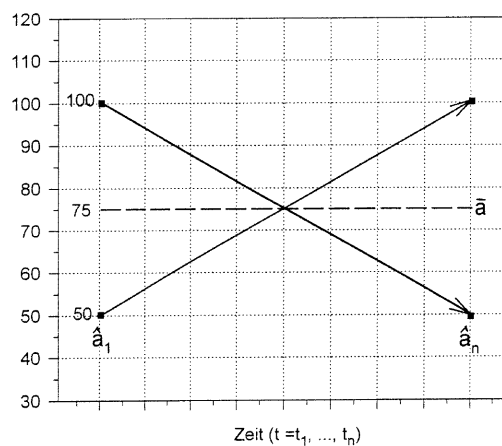
Mann-Kendall-Trendtestwert	Signifikanz in %	Irrtumswahrscheinlichkeit
1	68	0.32
2	95	0.05
3	99	0.01

Für nähere Einzelheiten muß auf die Literatur verwiesen werden (Sneyers, 1990; Denhard & Schönwiese, 1992).

Für die Angabe von Niederschlagstrends erweist es sich als zweckmäßig, relative Trends einzuführen, da die (absoluten) linearen Trends stark höhenabhängig sind und somit einen direkten Vergleich verschiedener Regionen erschweren können. Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten, relative Trends zu definieren, und man muß sich bei der Interpretation dieser Trends immer vor Augen halten, was eigentlich gemeint ist. Abb. 4.2 zeigt drei Möglichkeiten, einen relativen Trend anzugeben, die zu stark unterschiedlichen Ergebnissen bei gleicher Ausgangslage führen. In dieser Bearbeitung wurde die 1. Möglichkeit gewählt; das heißt, der zuvor ermittelte lineare Trend wird durch den Mittelwert der jeweiligen untersuchten Zeitreihe dividiert.

Von großer Wichtigkeit für Trenduntersuchungen ist es auch, festzustellen, wie empfindlich ein Trend gegenüber einer Veränderung des Untersuchungsintervall reagiert. Ausgehend vom konstanten Endjahr (1994) wurde in Abb. 4.3 das Anfangsjahr der untersuchten Zeitreihe, beginnend mit 1891, um jeweils ein Jahr heraufgesetzt und jeweils der Trend (der Vergleichbarkeit wegen normiert auf ein Jahr) berechnet. Im Falle des Niederschlages in Bad Mergentheim, und zwar für den Sommer-, den Winter- und den Jahresniederschlag, ist zu erkennen, daß die Wahl des Untersuchungszeitraumes den Trend bei genügend großen Zeitintervallen kaum verändert. Je kürzer das Zeitintervall, das für eine

Untersuchung gewählt wurde, umso zufälliger wird jedoch der berechnete Trend. Abb. 4.3 verdeutlicht weiterhin, daß die Fluktuationen des Trends für Bearbeitungsintervalle kleiner als 30 Jahre so groß werden, daß die Angabe eines Trendwertes für solche Zeiträume nicht mehr sinnvoll ist. Deshalb wurden die Analysen auf das Zeitintervall 1955-1994 (also auf 40 Jahre) bezogen, da die Feststellungen für Bad Mergentheim für ganz Baden-Württemberg gelten. Für die Temperatur ergeben sich analog sinnvolle Untersuchungszeiträume schon ab 20 Jahren.



Möglichkeit 1:
 Veränderung gegenüber der Situation am Anfang des Untersuchungszeitraumes
 (angegeben in Prozent des Mittelwertes für den gesamten Untersuchungszeitraum)

$$\frac{\hat{a}_n - \hat{a}_1}{\bar{a}}$$

Beispiel: $\pm \frac{50}{75} \rightarrow \pm 67\%$

Möglichkeit 2:
 Veränderung gegenüber den mittleren Verhältnissen
 (angegeben in Prozent des Mittelwertes für den gesamten Untersuchungszeitraum)

$$\frac{1}{2} \frac{(\hat{a}_n - \hat{a}_1)}{\bar{a}}$$

Beispiel: $\pm \frac{25}{75} \rightarrow \pm 33\%$

Möglichkeit 3:
 Veränderung gegenüber der Situation am Anfang des Untersuchungszeitraumes
 (angegeben in Prozent des Anfangswertes des Untersuchungszeitraumes)

$$\frac{\hat{a}_n - \hat{a}_1}{\hat{a}_1}$$

Beispiel: $+\frac{50}{50} \rightarrow +100\%$; $-\frac{50}{100} \rightarrow -50\%$

Abb. 4.2: „Der relative Trend ist relativ“: Bei der Interpretation des relativen Trends ist zu bedenken, was damit genau gemeint ist. Die Abb. zeigt drei verschiedene Möglichkeiten zur Berechnung eines relativen Trends; die diesem Bericht zugrunde liegende Alternative ist die Möglichkeit 1.

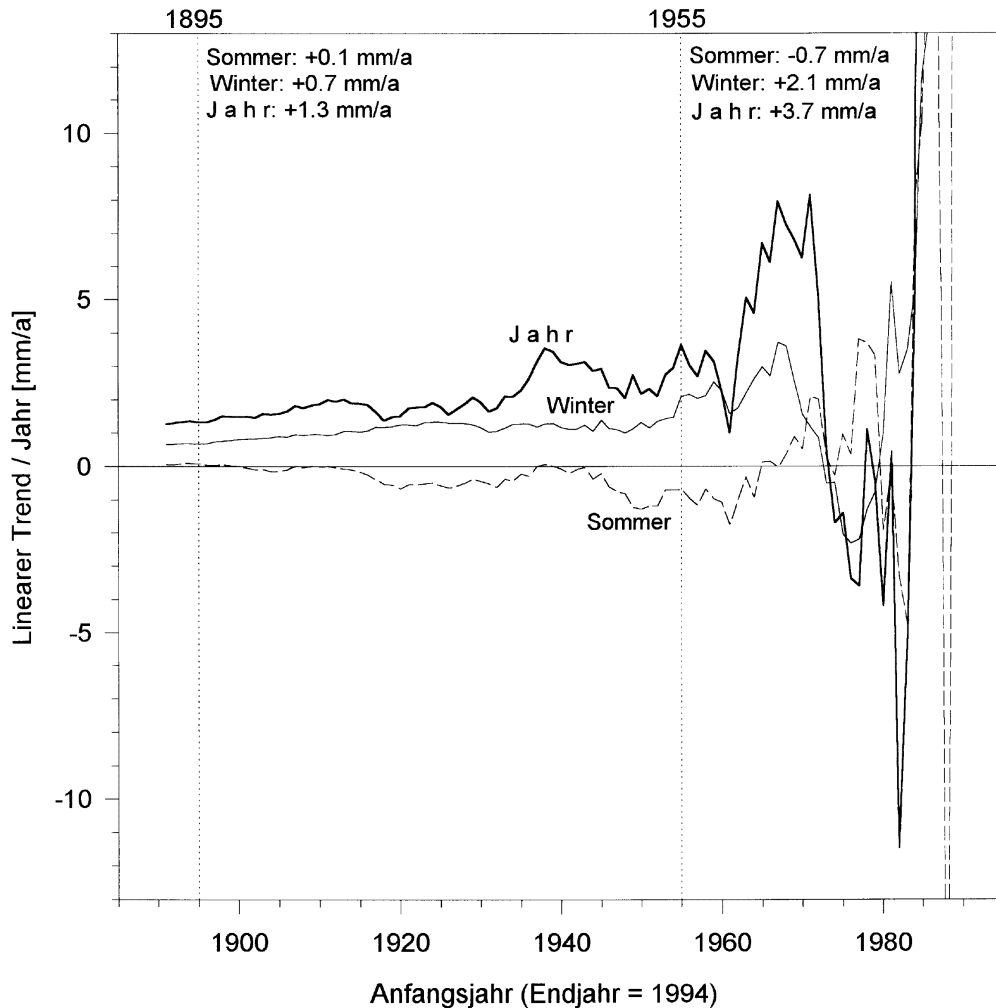


Abb. 4.3: Abhängigkeit des linearen Trends der Niederschlagssummen (in mm/Jahr) vom gewählten Zeitintervall in Bad Mergentheim; für Sommer (gestrichelt), Winter (dünn liniert) und Jahr (fett liniert). Zusätzlich sind die Trendwerte (ebenfalls in mm/Jahr) für die beiden Untersuchungszeitintervalle 1955-1994 und 1895-1994 angegeben.

Die Abb. 4.1 und 4.3 zeigen zudem erste substantielle Ergebnisse der Trendanalysen für die ausgewählte Station Bad Mergentheim (nördliches Baden-Württemberg). Demnach ist, unabhängig vom Untersuchungsintervall, ein Anstieg des Winterniederschlages, wie auch der Jahresniederschlagssumme, zu sehen. Der Sommer weist dagegen nur für kürzere Zeiträume (so auch für 1955-1994, nicht aber für 1895-1994) einen merklichen Niederschlagsrückgang auf. Erst die Trendkarten, die im Anhang zu finden sind, werden jedoch zeigen, ob dieses Trendmuster eine prinzipielle Erscheinung in Baden-Württemberg ist oder lediglich einen Einzelfall darstellt.

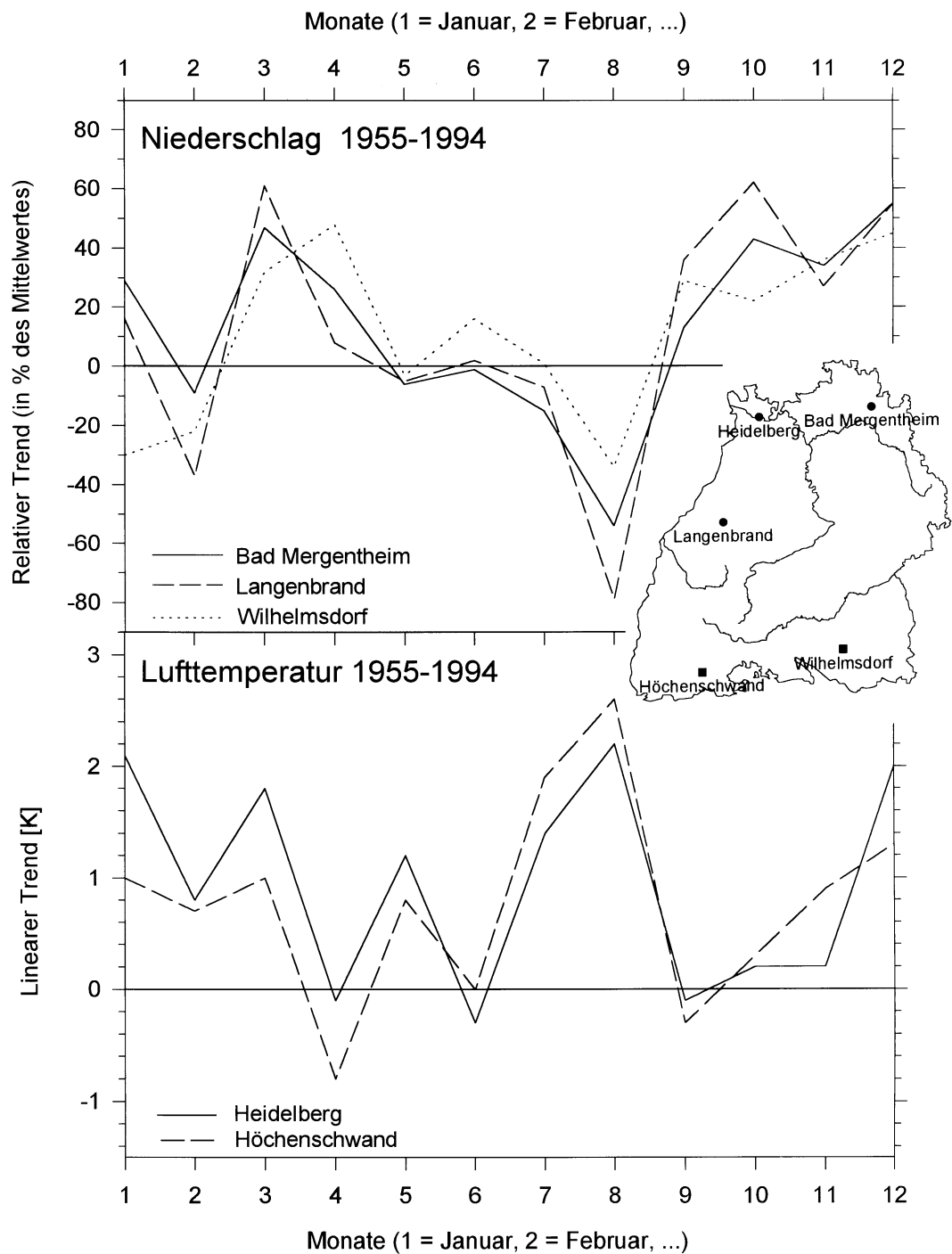


Abb. 4.4: Lineare Trends 1955-1994 für alle Monate an ausgewählten Orten in Baden-Württemberg. Oben: Relativer Trend des Niederschlages (in % des Mittelwertes), unten: Trend der Lufttemperatur (in K = °C). Im Sommerhalbjahr treten Niederschlags- und Temperaturtrends gegensinnig auf, im Winterhalbjahr dagegen gleichsinnig. Vergleiche auch mit den Trendkarten für ausgewählte Monate im Anhang.

Der zurückgehende Sommerniederschlag rührt im wesentlichen von einer ausgeprägten 40jährigen Niederschlagsabnahme im August her, die auch in anderen Landesteilen zu beobachten ist, während die beiden anderen Sommermonate (Juni und Juli) keine signifikanten Trends zeigen, vergl. Abb. 4.4. Niederschlagszunahmen verzeichnen in den letzten 40 Jahren insbesondere der März und die Monate September bis Dezember. Eine Erhöhung der Lufttemperatur, die unterschiedlich groß ausfiel, gab es in fast allen Monaten (bis auf April, Juni und September). Dabei treten offensichtlich die Niederschlags- und Temperaturtrends im Sommerhalbjahr gegensinnig, im Winterhalbjahr dagegen gleichsinnig auf.

Für die letzten 100 Jahre (1895-1994) ist eine winterliche Niederschlagszunahme für die drei ausgewählten (im übrigen wahrscheinlich homogenen) Stationszeitreihen (Abb. 4.5) ebenfalls zu erkennen, und zwar vor allem in den Monaten Januar, Februar, Oktober, November und Dezember. Dagegen hat sich die Niederschlagsmenge im Sommerhalbjahr weniger stark verändert. Die Erwärmung der Lufttemperatur betrifft dagegen in den letzten 100 Jahren alle Monate, am deutlichsten die Sommer- und Herbstmonate.

Der Anstieg der Lufttemperatur im Winterhalbjahr um ca. 1 K hat zur Folge, daß der Niederschlag häufiger in flüssiger als in fester Form fällt und damit besser aufgefangen und vollständig gemessen werden kann (vergl. Kapitel 2, sowie Abb.en 2.2 und 2.3). Die Lufttemperatur beeinflusst damit indirekt den Niederschlagstrend. Eine grobe Abschätzung für die mittleren Niederschlags- und Windverhältnisse in Karlsruhe (die Klimawerte wurden einer Publikation von Hörschle & Kalb, 1988, entnommen) liefert bei einer Temperaturerhöhung von 1 K einen „künstlichen“ Zusatztrend von ca. 6 mm für den Winter (Dezember, Januar, Februar), was 3,5 % des Mittelwertes beträgt. Auf diese Unsicherheit muß bei der Verwendung und Interpretation einzelner Trendangaben geachtet werden.

Ausführlichere methodische Erläuterungen enthält der Klimatrendatlas für Deutschland (Rapp & Schönwiese, 1995).

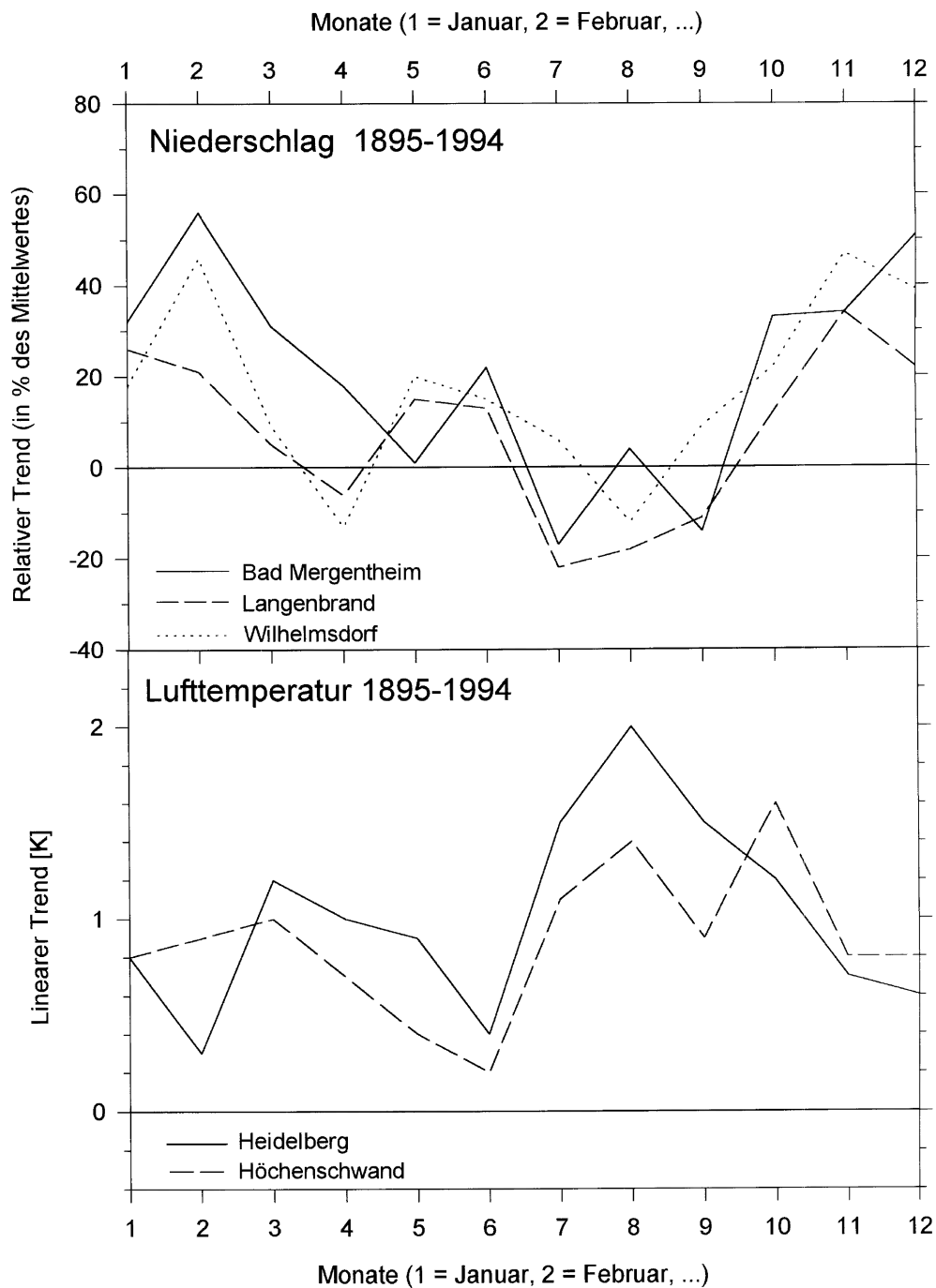


Abb. 4.5: Lineare Trends 1895-1994 für alle Monate an ausgewählten Orten in Baden-Württemberg. Oben: Relativer Trend des Niederschlages (in % des Mittelwertes), unten: Trend der Lufttemperatur (in K = °C). Vergleiche auch mit den Trendkarten für ausgewählte Monate im Anhang.

5. Die Feldanalyse

Die Repräsentanzanalyse (Kapitel 3.1) hat gezeigt, daß für den Bearbeitungszeitraum und die vorliegende Zahl der Stationszeitreihen, sowohl für den Niederschlag, als auch für die Lufttemperatur, ohne Bedenken Isolinien analysiert werden können.

Bei der Feldanalyse wurde nun das in den Geowissenschaften verbreitete Kriging-Interpolationsverfahren benutzt. Es ist hinsichtlich der Annäherung an die Stationswerte trotz guter Glättungseigenschaften anderen Verfahren (z. B. dem „Inverse-Distance-Verfahren“) überlegen und liefert insgesamt ein harmonischeres Isolinienbild, in dem keine „Abstands-Sprünge“ auftauchen. Für die Interpolation der Gitterpunktswerte aus den Stationsdaten, auf denen die Isolinienanalyse beruht, wurde ein $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ -Gitternetz gewählt, ein Kompromiß aus regional befriedigender Auflösung und vorliegendem Datenmaterial. Für nähere Einzelheiten, auch zur Theorie der Kriging-Interpolation, muß an dieser Stelle wieder auf die Literatur verwiesen werden (Rapp & Schönwiese, 1995; Schönwiese et al., 1993; Isaaks & SrivaStava, 1989).

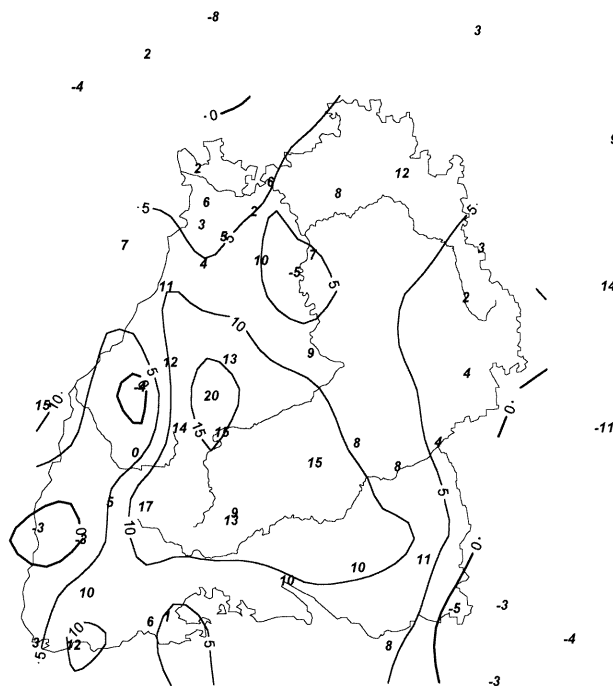


Abb. 5.1: Beispiel für die Umsetzung einzelner Stationswerte (kursive Zahlen) in eine Feld- (Isolinien-) Darstellung unter Heranziehung der Kriging-Interpolation (hier: Relativer Trend des Niederschlages in Prozent des Mittelwertes, Jahr, 1955-1994; s. auch Anhang).

Abb. 5.1 vergleicht am Beispiel des relativen Trends der Jahresniederschlagssumme 1955-1994 die Trendwerte, wie sie für die einzelnen Stationszeitreihen ermittelt wurden, mit den daraus interpolierten Isolinien. Es ist zu sehen, daß einzelne „Ausreißer“, die sich nicht in das Niveau ihrer Umgebung einfügen, kaum Berücksichtigung finden. Die dargestellten Isolinien sind also angesichts der räumlichen Variabilität der Trends geglättet, was aufgrund der Meß- und Datenunsicherheit, insbesondere beim Niederschlag, nur wünschenswert sein kann.

Bei der Mittelwertkarte der Jahresniederschlagssumme für die letzten 40 Jahre spielen solche Unsicherheiten jedoch keine wesentliche Rolle. Abb. 5.2 zeigt strukturell erstaunliche Übereinstimmungen mit den aus Klimaatlanten bekannten Übersichtskarten, obwohl doch die Zahl der zugrunde liegenden Zeitreihen immer noch relativ gering ist und topographische Daten in den Analysen nicht berücksichtigt werden konnten. Der Schwarzwald hebt sich prägnant als Niederschlagsmaximum heraus, die absolut höchsten Niederschlagsmengen in Baden-Württemberg werden tatsächlich in seinem nördlichen Teil im Raum Freudenstadt gemessen. Dagegen bildet sich die Schwäbische Alb im Isolinienverlauf nur andeutungsweise ab. Der Einfluß des Odenwaldes im Norden und der Allgäuer Alpen im äußersten Südosten ist jedoch wieder besser auszumachen.

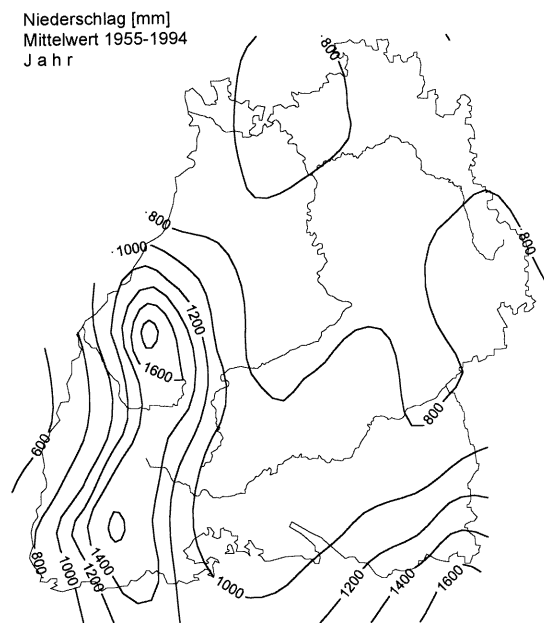


Abb. 5.2: Karte des Mittelwertes der Jahresniederschlagssumme in mm 1955-1994.

Aus praktischen Gründen werden alle Trendkarten im Anhang dokumentiert, da sie dort als vollständiges, systematisches Nachschlagewerk sicher bessere Dienste leisten, als verstreut im Text. An dieser Stelle kann nicht auf alle Einzelheiten der Ergebnisse eingegangen werden. Auch sollten allzu lokale oder gar punktuelle Interpretationen vermieden werden. Doch lassen sich einige bemerkenswerte grundsätzliche Resultate festhalten:

5.1 Die Niederschlagstrends

In den letzten 40 Jahren (1955-1994) verzeichneten bis auf den Sommer (Juni, Juli, August) alle Jahreszeiten in Baden-Württemberg eine deutliche Niederschlagszunahme, die im Frühling (März, April, Mai) meist zwischen 10 und 25 %, im Herbst (September, Oktober, November) 20 bis 40 % und im Winter (Dezember, Januar, Februar) bis zu 20 % des Mittelwertes betrug. Allerdings beschränkt sich im Winter der ansteigende Trend auf die zentralen Bereiche des Bundeslandes, während im äußersten Westen, Süden und Osten auch leicht abnehmende Niederschlagsmengen beobachtet werden konnten. Zur Erhöhung des Winterniederschlags trägt interessanterweise der Dezember am meisten bei (mit +30 bis +70 % des Mittelwertes), während der Januar regional unterschiedlich gerichtete Trends erkennen läßt (vergl. auch Abb. 4.4), die ohne weitere Analysen im einzelnen nicht erklärt werden können (was für andere Trendkarten gleichfalls gilt).

Im Sommer zeigt sich im ganzen Bundesland eine auffällige Tendenz zu Niederschlagsrückgang, der im Südwesten mit Werten bis zu -35 % maximal ist, im Südosten und Osten des Landes sich jedoch kaum noch bemerkbar macht. Diese Abnahme wird zum allergrößten Teil durch das Niederschlagsdefizit im Monat August (-30 bis -80 % des Mittelwertes gegenüber den Werten zu Beginn des Untersuchungszeitraumes) hervorgerufen. Der Niederschlagstrend für das gesamte Jahr, der aus der Überlagerung der einzelnen Trends in den Jahreszeiten bzw. in den Monaten resultiert, ist mit einzelnen Ausnahmen im äußersten Westen und Osten ansteigend, und zwar meist um 5 bis 15 %.

Naturgemäß sind die linearen Trends (in mm) dort am größten, wo auch der meiste Niederschlag fällt, nämlich im Mittelgebirge, vor allem aber im Schwarzwald (vergl. Abb. 5.2). Die Karten der relativen Trends haben also den Vorteil, daß die Abhängigkeit des Niederschlags und des (absoluten) linearen Trends von der Höhe hier keine Rolle spielt (vergl. Abb. 4.2) und somit die Topographie nicht mit abgebildet wird. Die Niederschlagszunahme beträgt im Frühling meist 20 bis 60 mm, im Herbst 40 bis 120 mm und

im Winter bis zu 80 mm. In den Sommermonaten allerdings nimmt der Niederschlag um 20 bis über 150 mm ab, so daß für das Gesamtjahr eine verbreitete Steigerung des Wasserangebotes um 50 bis 200 mm feststellbar ist.

Im strengen statistischen Sinn sind nur solche Trends signifikant, deren Mann-Kendall-Testergebnisse Beträge von mehr als 2 liefern (Kapitel 4). Jedoch ist zu beachten, daß für fast alle Niederschlagsstationen - voneinander unabhängig - gleichgerichtete Trends errechnet werden konnten, die die Aussagen trotz der formal geringen Signifikanz für die Einzelzeitreihen, die in den entsprechenden Trendkarten meist Werte von 2 nicht überschreitet, zusätzlich absichern. Dabei besitzen die größten Trends, da sie aus dem „Hintergrundrauschen“ einer Niederschlagszeitreihe am augenscheinlichsten hervortreten, auch die größte Signifikanz (so tritt zum Beispiel die ausgeprägte herbstliche Niederschlagszunahme zwischen Karlsruhe und dem oberen Neckar mit einer maximalen Signifikanz auf, die Mann-Kendall-Trendtestwerte von immerhin mehr als 2.5 erreicht).

Somit läßt sich für die letzten 40 Jahre eine jahreszeitliche Niederschlagsumverteilung in Baden-Württemberg vom Sommer zum Winter hin feststellen. Der Vergleich des Anteils des Niederschlages im Winterhalbjahr (Monate Oktober bis März) am Gesamtjahresniederschlag (in %) zu Beginn und am Ende des Untersuchungszeitraumes 1955-1994 soll diese Aussage noch einmal in veränderter grafischer Form veranschaulichen. Die im Anhang gezeigten Karten der Situation in den Jahren 1955 und 1994 wurden aus der linearen Regression, und nicht aus den Werten der Jahre selbst, abgeleitet. Der Anteil des Niederschlages im Winterhalbjahr hat in diesen 40 Jahren meist um 5 bis 8 Prozentpunkte zugenommen, in den Gebirgen (Odenwald und Schwarzwald) erreicht er in jüngster Zeit sogar mehr als 50 %. In der Analyse für das Zeitintervall 1895-1994, also für die letzten 100 Jahre, ist diese Zunahme zwar auch vielerorts erkennbar, jedoch weniger markant (durchschnittlich rund +4 %). Zu beachten ist dabei das eher fragwürdige Ergebnis für den Winterniederschlag des Jahres 1895 im südlichen Schwarzwald.

Die Betrachtung der Karten des Anteils des Winterniederschlages am Gesamtjahresniederschlag läßt erkennen: Während des Zeitintervalls 1895-1994 hat es ganz offensichtlich ähnliche Entwicklungen wie in den letzten 40 Jahren gegeben. Das illustrieren die im Anhang dokumentierten Trendkarten. Frühling, Herbst und Winter zeigen wiederum fast durchgängig ansteigende Niederschlagstrends, die im Winter am stärksten ausfallen (meist 10 bis über 35 %, was 25 bis 70 mm entspricht). Die Monate Januar und Dezember tragen dabei etwa in gleichem Maße zur Steigerung des Niederschlagsangebotes bei (siehe auch Abb. 4.5).

Im Herbst und Frühling liegen diese Steigerungsraten lediglich bei meist +5 bis +20 % (oder +10 bis +40 mm). Die Signifikanz der Trends in diesen beiden Jahreszeiten ist wiederum gering, während für den Winter verbreitet Trendtestwerte um oder über 2.5 erreicht werden. Im Sommer haben sich keine eindeutigen Trends ausgebildet, die Signifikanz liegt nahe bei Null, so daß sich in dieser Jahreszeit - betrachtet man die letzten 100 Jahre - nichts wesentliches verändert hat.

Daraus resultiert dann auch die Zunahme des Jahresniederschlages in den letzten 100 Jahren um 5 bis etwas über 15 % des Mittelwertes, oder in absoluten Werten ausgedrückt, um 40 bis 120 mm, bei Mann-Kendall-Trendtestwerten von verbreitet 1.0 bis 2.5, das heißt, bei vergleichsweise hohen Signifikanzbeträgen.

5.2 Die Temperaturtrends

Aufgrund der hohen Repräsentanz der Lufttemperatur läßt sich die Beschreibung der Temperaturtrends viel stärker generalisieren als für den Niederschlag. Da jedoch für den Zeitraum 1895-1994 sehr wenige Stationen zur Verfügung standen, die überdies teilweise inhomogen sein dürften (was zum Beispiel für Stuttgart zutrifft), wurde auf eine Isolinienanalyse verzichtet und die Trendwerte lediglich in die Karte eingedruckt.

Die Lufttemperatur ist in allen Jahreszeiten angestiegen, sowohl in den letzten 40, wie auch in den letzten 100 Jahren, was im übrigen im Einklang mit den Ergebnissen des „Klimatrendatlas Europa 1891-1990“ (Schönwiese, Rapp et al., 1993) steht. Erstaunlicherweise ist diese Erwärmung im Sommer (1.0 bis 1.6 K [= °C]) und im Winter (1.0 bis 1.4 K) größenordnungsmäßig ohne Unterschied aufgetreten. Die Temperaturzunahme für das gesamte Jahr der Zeitspanne zwischen 1955 und 1994 betrug rund 1 K. Allerdings erscheint es zweifelhaft, ob diese Zunahme tatsächlich regional so abgestuft, wie es die Karten suggerieren, stattgefunden hat. Immerhin sind in diese Isolinienanalyse auch die Ergebnisse wahrscheinlich inhomogener (Homogenitätsklasse 4) bzw. zumindest fragwürdiger Stationen (Homogenitätsklasse 3) eingegangen (vergl. Abb. 3.2). Die Erwärmung in den letzten 100 Jahren dürfte etwas über der in den letzten vier Jahrzehnten gelegen haben.

6. Fazit

Niederschlag ist ein zeitlich und regional stark variierendes Klimaelement. Diese grundlegende Tatsache wird durch Trendkarten des Niederschlages anschaulich illustriert. Zwar treten sehr unterschiedliche jahreszeitliche und monatliche Entwicklungen auf, doch in der Mehrzahl der Fälle weisen alle Stationszeitreihen aus Baden-Württemberg ein wenn auch quantitativ unterschiedliches, so doch qualitativ gleichsinniges Trendverhalten auf. Betrachtet man dagegen Niederschlagstrends für ein viel größeres Untersuchungsgebiet, zum Beispiel Europa, variieren die Trends räumlich viel stärker. So zeigt die entsprechende Trendkarte für die Jahresniederschlagssumme 1891-1990 Gebiete mit zunehmendem Niederschlag (vor allem im Norden) und solche mit zurückgehenden Niederschlagsmengen (Britische Inseln, Teile Osteuropas, Mittelmeerregion; Abb. 6.1). Das sommerliche Regendefizit in West- und Mitteleuropa und die winterliche Niederschlagszunahme im zentralen europäischen Raum sind die wichtigsten Veränderungen in den letzten Jahrzehnten (Abb. 6.2). Damit fügen sich die analysierten Trends für Baden-Württemberg gut in die entsprechenden großräumigeren Entwicklungen in Europa ein (Schönwiese, Rapp et al., 1993).

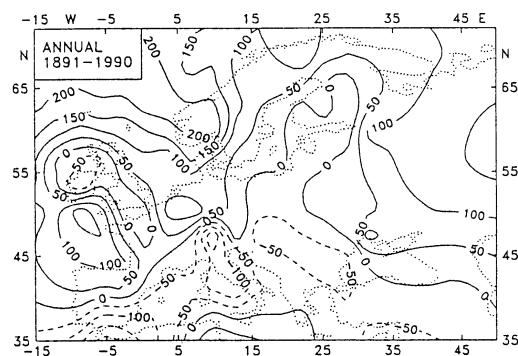


Abb. 6.1: Beobachteter linearer Trend der Jahresniederschlagssumme in Europa (in mm) für 1891-1990 (nach Schönwiese et al., 1994).

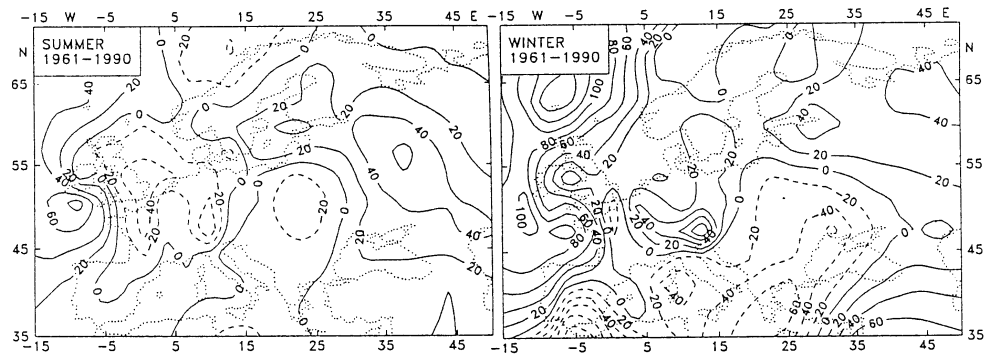


Abb. 6.2: Beobachteter linearer Trend des Niederschlages in Europa (in mm) für Sommer (links) und Winter (rechts), 1961-1990 (nach Schönwiese et al., 1994).

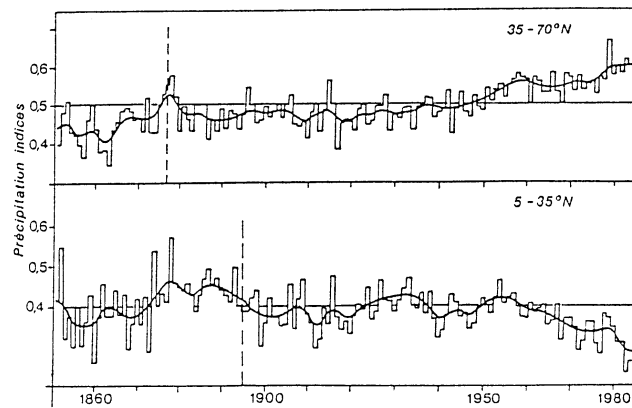


Abb. 6.3: Beobachtete Veränderungen des für zwei Breitenkreiszonen ($35-70^{\circ}N$ und $5-35^{\circ}N$) gemittelten Niederschlages der Nordhemisphäre (nach Bradley et al., 1987).

Die langfristige Zunahme der Jahresniederschlagssumme, wie sie für Baden-Württemberg und Europa feststellbar ist, paßt sich wiederum gut in die Entwicklung des Niederschlages ein, wie sie für die Breitenkreiszone von 35 - 70°N seit 1850 beobachtet werden konnte (Bradley et al, 1987). Im Gegensatz zur tropischen bzw. subtropischen Breitenkreiszone der Nordhemisphäre ist in den gemäßigten Breiten seit etwa 1920 eine kontinuierliche Zunahme des Niederschlages auszumachen (Abb. 6.3)

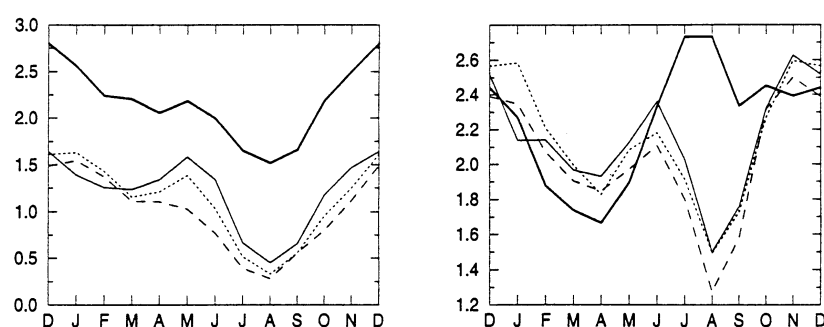


Abb. 6.4: Jahreszyklus des Niederschlages (in mm/Tag) in Südeuropa (35-50°N, 10°W-45°E; links) und Mittel- und Nordeuropa (50-70°N, 10°W-40°E; rechts), wie er zur Zeit beobachtet (fett liniert) und vom Max-Planck-Institut für Meteorologie (Cubasch et al., 1995) für eine Verdoppelung (gepunktet) bzw. Verdreifachung des CO₂ (gestrichelt) angegeben wird. Die Diskrepanz zwischen der momentan beobachteten und der für die Gegenwart modellierten Niederschlagsverteilung (dünn liniert) ist bemerkenswert groß, insbesondere für den Sommer.

Ob sich der beobachtete Trend in Baden-Württemberg fortsetzt, sich umkehrt oder ob der Niederschlag auf dem momentanen Niveau verbleibt, ist nur sehr schwer vorhersagbar. Es ist wahrscheinlich, daß sich der anthropogene Zusatz-Treibhauseffekt nicht nur in einer Temperaturerhöhung äußert, sondern auch über die globale Zirkulation der Einfluß auf das Niederschlagsverhalten nimmt. Berechnungen des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg (Cubasch et al., 1995; gekoppeltes atmosphärisch-ozeanisches Zirkulationsmodell „ECHAM3“) zufolge soll der Niederschlag bei einer Verdoppelung des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre in Südeuropa in fast allen Monaten (bis auf Januar und Februar) abnehmen (vergl. Abb. 6.4). Auch für Zentral- und Nordeuropa wird es demnach in den Frühlings- und Sommermonaten zu einem Niederschlagsrückgang kommen, während für den Winter eher zunehmende Niederschlagsmengen erwartet wer-

den. Allerdings sind diese Simulationen trotz hohem rechnerischem Aufwand relativ unsicher (vor allem für die Sommermonate), was ein Vergleich der in den einzelnen Monaten gegenwärtig gemessenen Niederschlagssummen mit den vom Hamburger Klimamodell entsprechend berechneten veranschaulicht (vergl. wiederum Abb. 6.4).

Es bleibt abschließend festzustellen, daß trotz solcher Unwägbarkeiten die jahreszeitlichen Muster der Niederschlagstrends, wie sie aufgrund eines verstärkten Treibhauseffektes von „ECHAM3“ modelliert werden, in den Beobachtungsdaten der letzten 40 bzw. 100 Jahre in überraschend ähnlicher Struktur schon vorzufinden sind (vergl. Abb.en 4.4 und 4.5). Aus diesem Grund ist es wahrscheinlicher, daß die Tendenz zu größeren winterlichen Niederschlagsmengen anhält, als daß - langfristig gesehen - eine durchgreifende Verringerung des Winterniederschlags erwartet werden könnte.

Literatur

- Bradley, R.S., Diaz, H.F., Eischeid, J.K., Jones, P.D., Kelly, P.M., and Goodess, C.M., 1987: Precipitation fluctuations over Northern Hemisphere land areas since mid 19th century. *Science*, 237, 171-175.
- Caspary, H.J. und Bárdossy, A., 1995: Markieren die Winterhochwasser 1990 und 1993 das Ende der Stationarität in der Hochwasserhydrologie infolge von Klimaänderungen? *Wasser & Boden* 47, 3, 18-24.
- Cubasch, U., Waszkewitz, J., Hegerl, G.C., and Perlwitz, J., 1995: Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. MPI report No. 153, Hamburg, 40 pp.
- Denhard, M., and Schönwiese, C.-D., 1992: Non-parametric trend statistics and rank correlations of long European sea level pressure time series. In: *Environment Canada* (ed.), 5th Internat. Meeting Statist. Climatol., 575-578.
- Engel, H., 1993: Derzeit erkennbare Abflußentwicklungen im Rhein und seinen Nebenflüssen und Änderung des Niederschlagsverhaltens in den zugehörigen Einzugsgebieten. Manuskript zum DVWK-Vortrag, Ludwigshafen, 29.11.1993.

- Höschele, K., und Kalb, M., 1988: Das Klima ausgewählter Orte der Bundesrepublik Deutschland Karlsruhe. Bericht des Deutschen Wetterdienstes Nr. 174, Offenbach am Main.
- Isaaks, E.H., and Srivastava, R.M., 1989: An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford Univ. Press, New York, 561 pp.
- Legates, D.R., 1993: Biases in Precipitation Gage Measurement. In: Global Observations, Analyses and Simulation of Precipitation. World Climate Programme Research, WMO/Td-No. 544, 31-34.
- Rapp, J., 1994: Langfristige Niederschlagstrends in Norddeutschland. In: Materialsammlung des Vereins für Umweltschutz e.V. und des Landesverbandes Bürgerinitiativen Umweltschutz Niedersachsen e.V., Hannover.
- Rapp, J., und Schönwiese, C.-D., 1995: Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie B, Band 5, 255 S.
- Schönwiese, C.-D., 1992: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Borntraeger, Stuttgart, 2. Auflage.
- Schönwiese, C.-D., Rapp, J., Fuchs, T. und Denhard, M., 1993: Klimatrend-Atlas Europa 1891-1990. Berichte des Zentrums für Umweltforschung der Univ. Frankfurt/M., Nr. 20, Frankfurt/M, 4. Auflage, 218 S.
- Schönwiese, C.-D., Rapp, J., Fuchs, T., and Denhard, M., 1994: Observed climate trends in Europe 1891-1990. Meteorol. Zeitschrift, N.F. 3, 22-28.
- Sevruk, B., 1989: Reliability of Precipitation Measurement. In: Sevruk, B. (ed.), Precipitation measurement, Workshop on Precipitation Measurement, WMO/IAHS/ETH, Zurich, 13-19.
- Sneyers, R., 1990: On the Statistical Analysis of Series of Observations. WMO Publ. No. 415, Geneva.

Wildenhahn, E., 1986: Der Einfluß langfristiger Änderungen im Niederschlagsgeschehen auf die Abflußverhältnisse des Rheins. In: Mitteilungen 1 der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 119-129.

Anhang

Katalog der Trendkarten (vorläufige Ergebnisse)

A 1.1 Niederschlagstrends 1955-1994

A 1.2 Niederschlagstrends 1895-1994

A 2.1 Temperaturtrends 1955-1994

A 2.2 Temperaturtrends 1895-1994

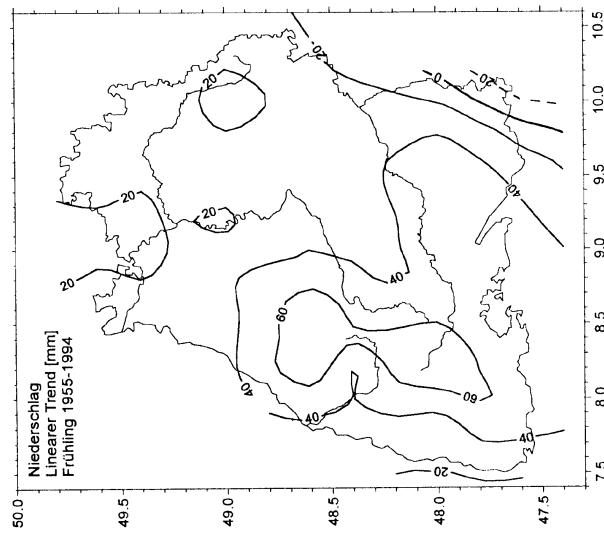
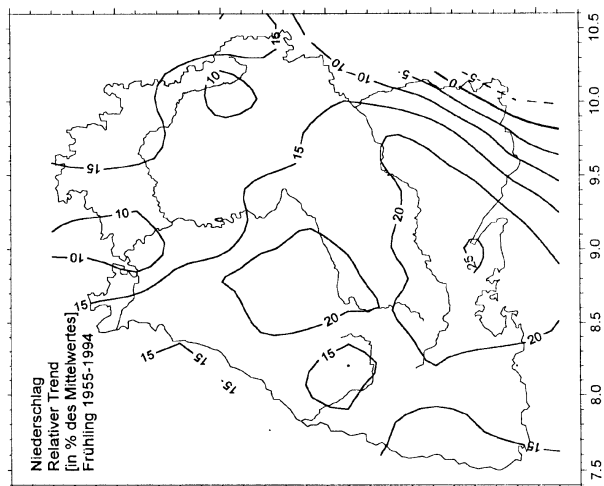
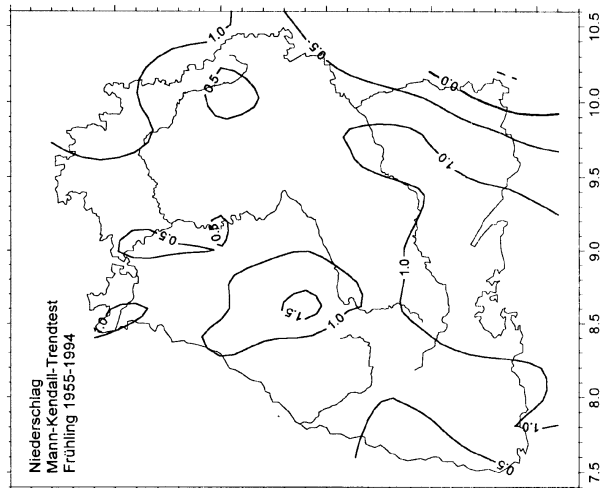
A 1.1 Niederschlagstrends 1955-1994

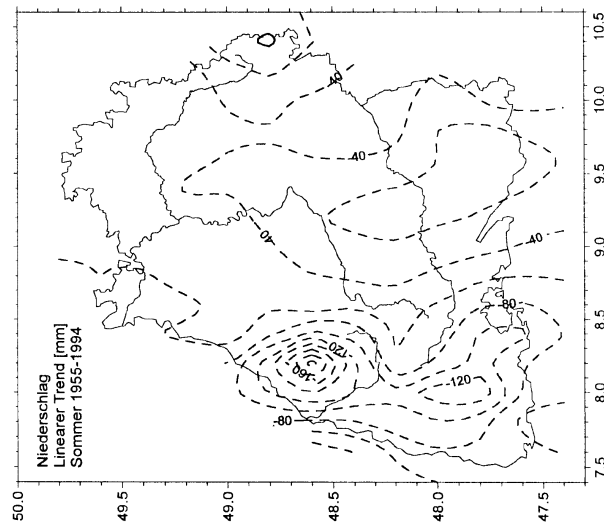
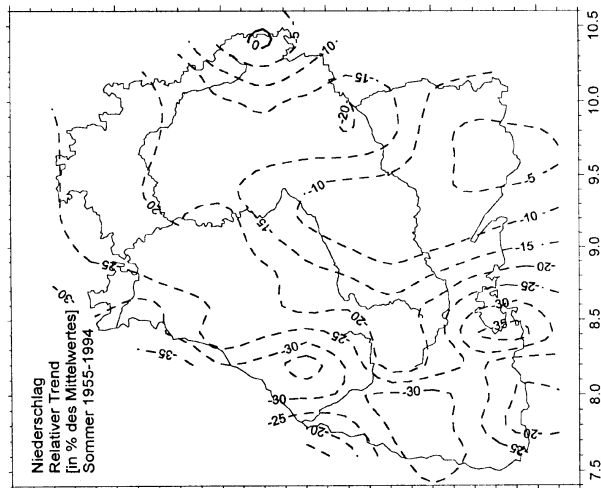
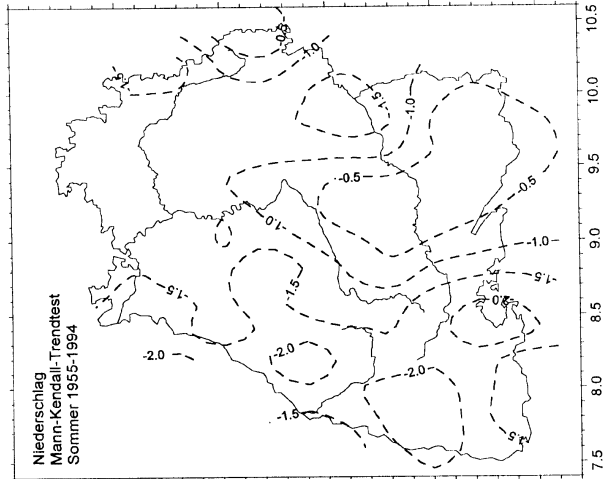
Linearer Trend (in mm), relativer Trend (in % des Mittelwertes) und Mann-Kendall-Trendtestwerte (Signifikanz) für alle Jahreszeiten, das Jahr und einzelne Monate.

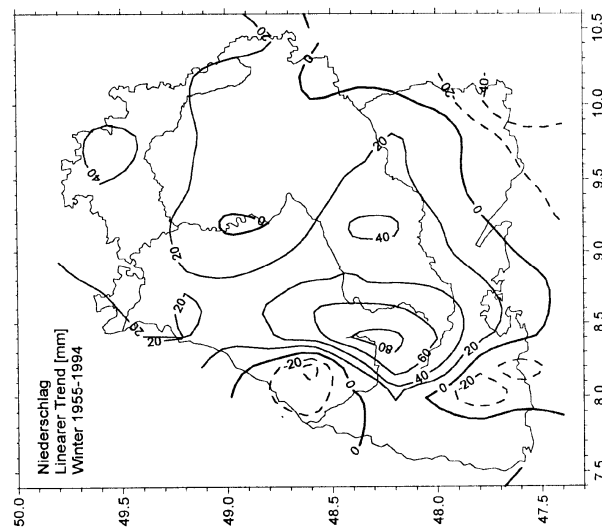
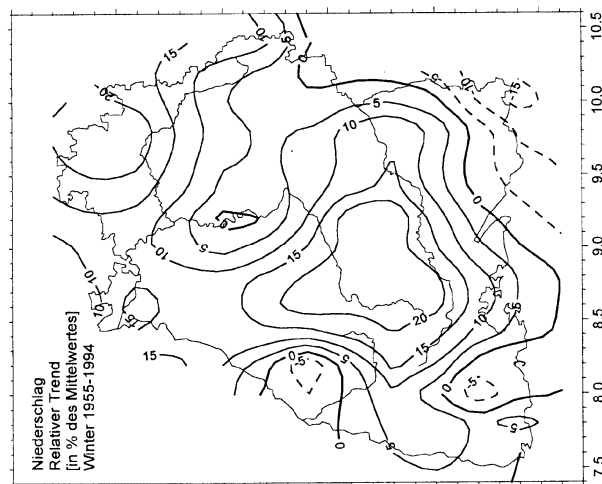
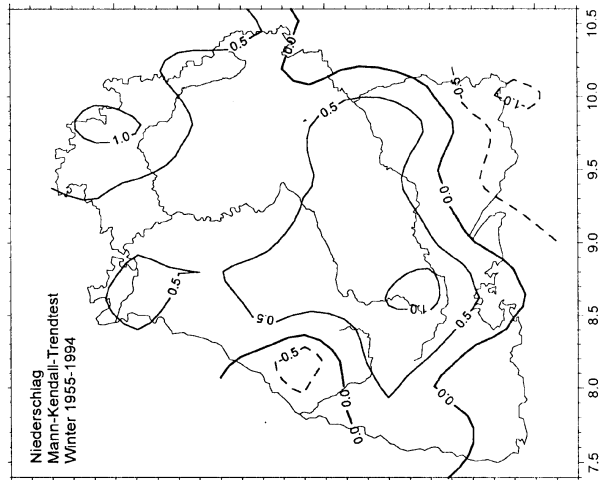
Gestrichelte Isolinien: Niederschlagsrückgang, durchgezogene Isolinien: Niederschlagszunahme, fett durchgezogene Isolinien: keine Veränderung (Null-Isolinie).

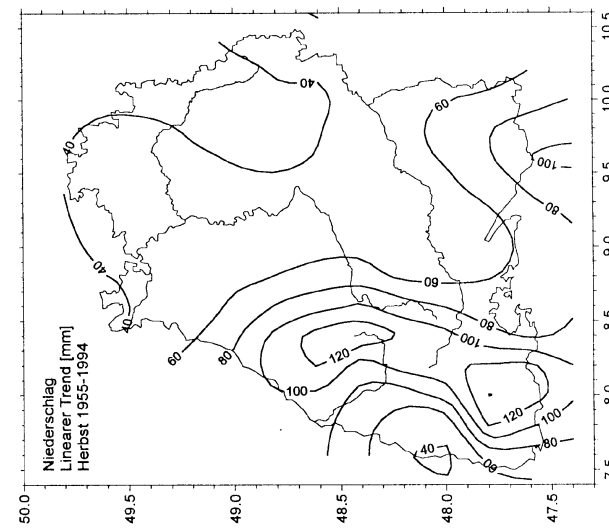
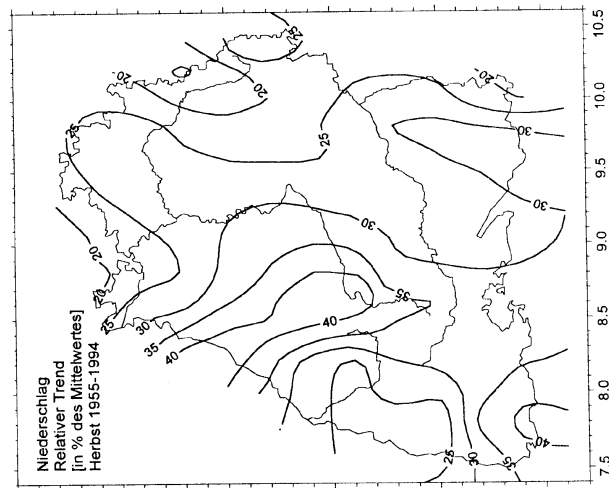
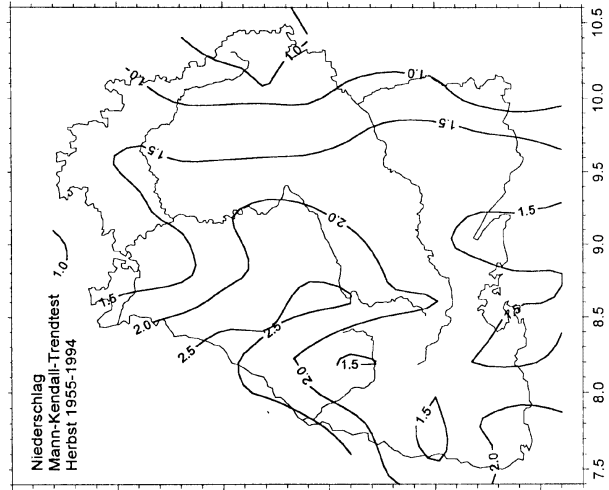
Anteil des Niederschlages im Winterhalbjahr am Gesamtjahresniederschlag (in %).

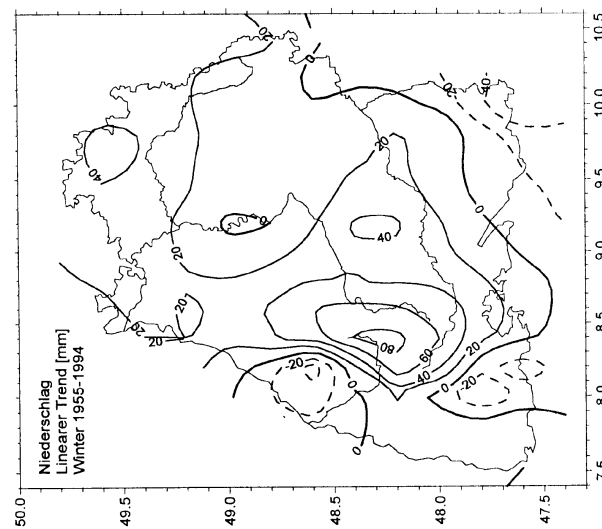
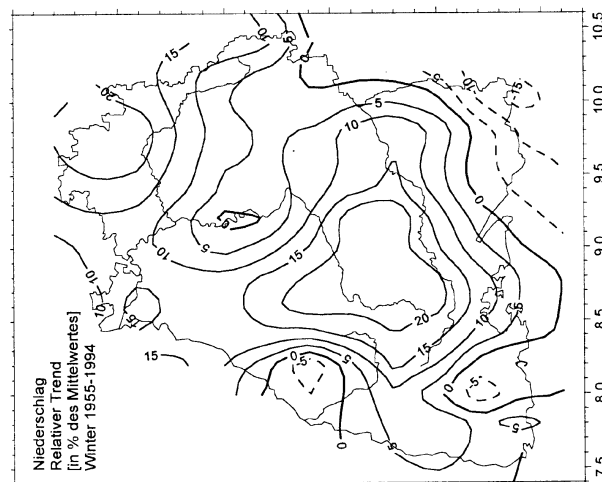
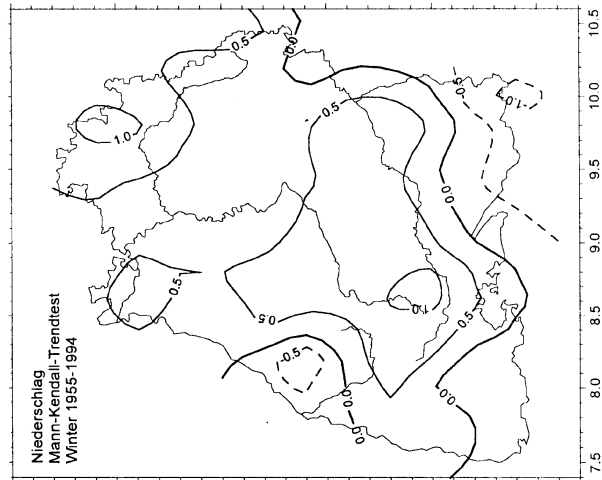
Schraffierte Bereiche: Anteil <44 %, fett durchgezogene Isolinie: Anteil =50 %.

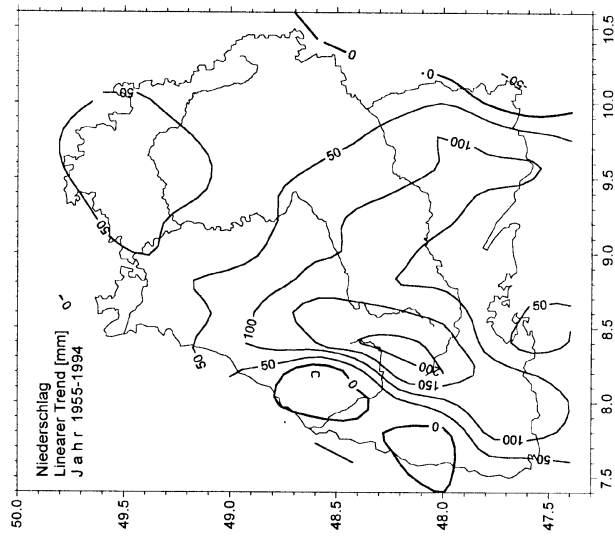
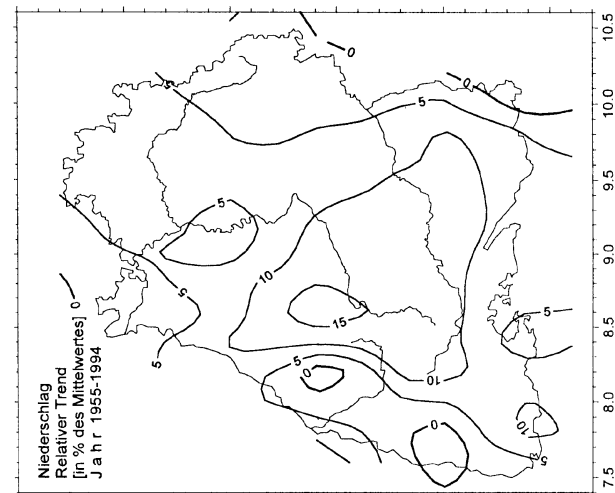
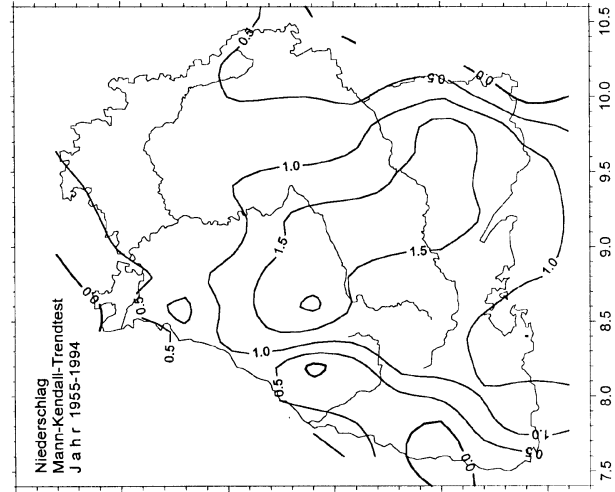


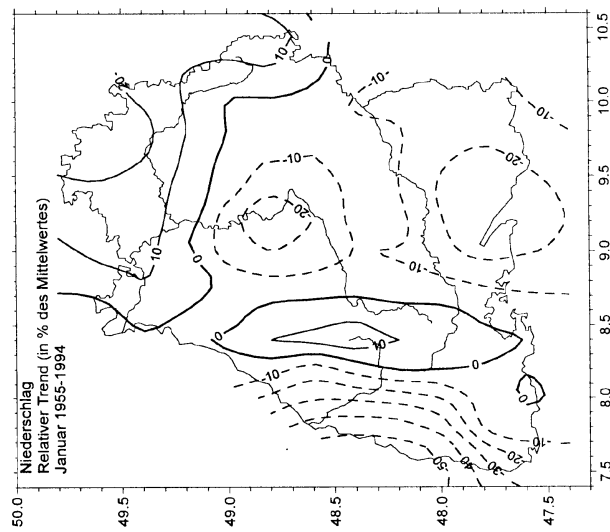
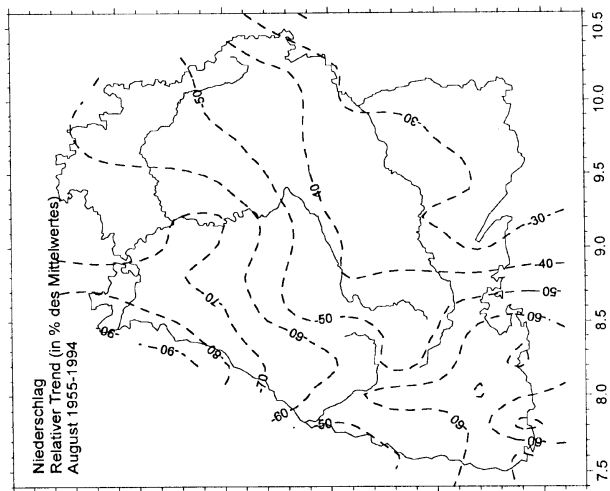
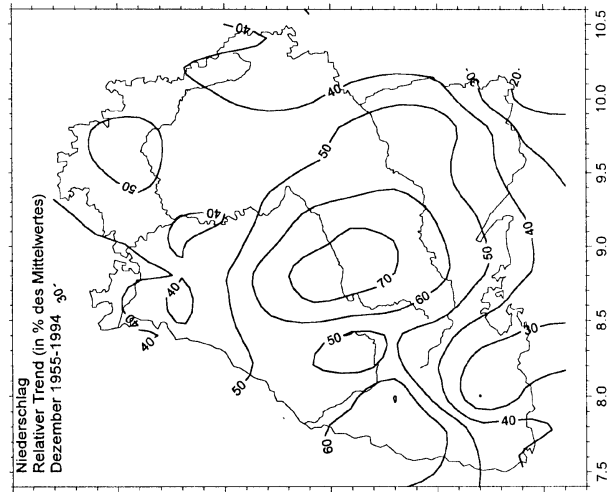




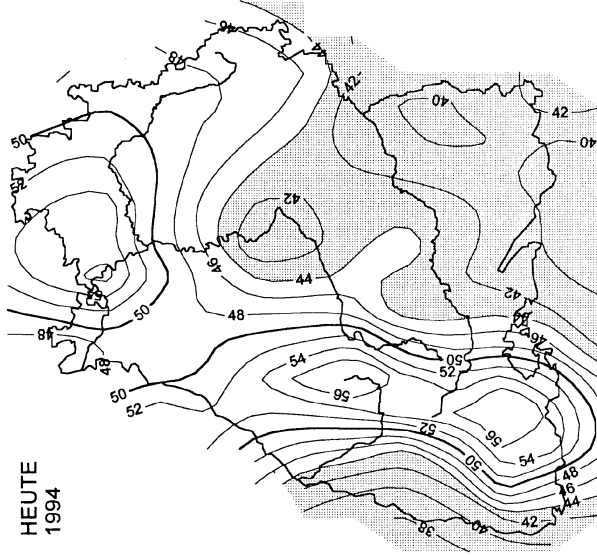




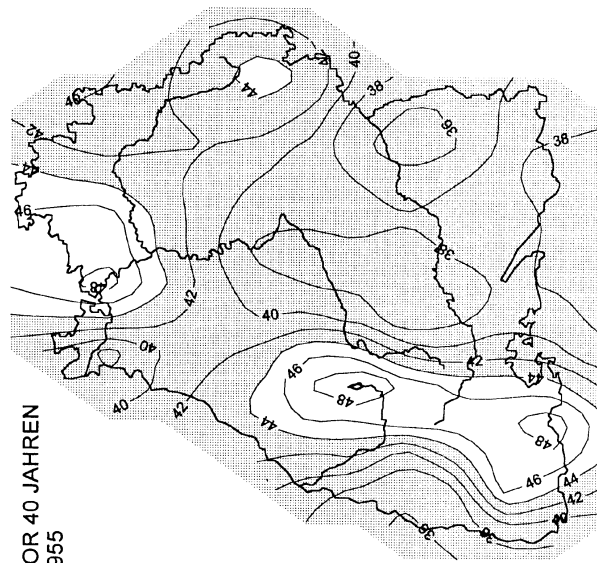




Anteil des Niederschlages im Winterhalbjahr (Oktober - März)
am Gesamtniederschlag [%]
(aus lin. Regression 1955-1994)



Anteil des Niederschlages im Winterhalbjahr (Oktober - März)
am Gesamtniederschlag [%]
(aus lin. Regression 1955-1994)



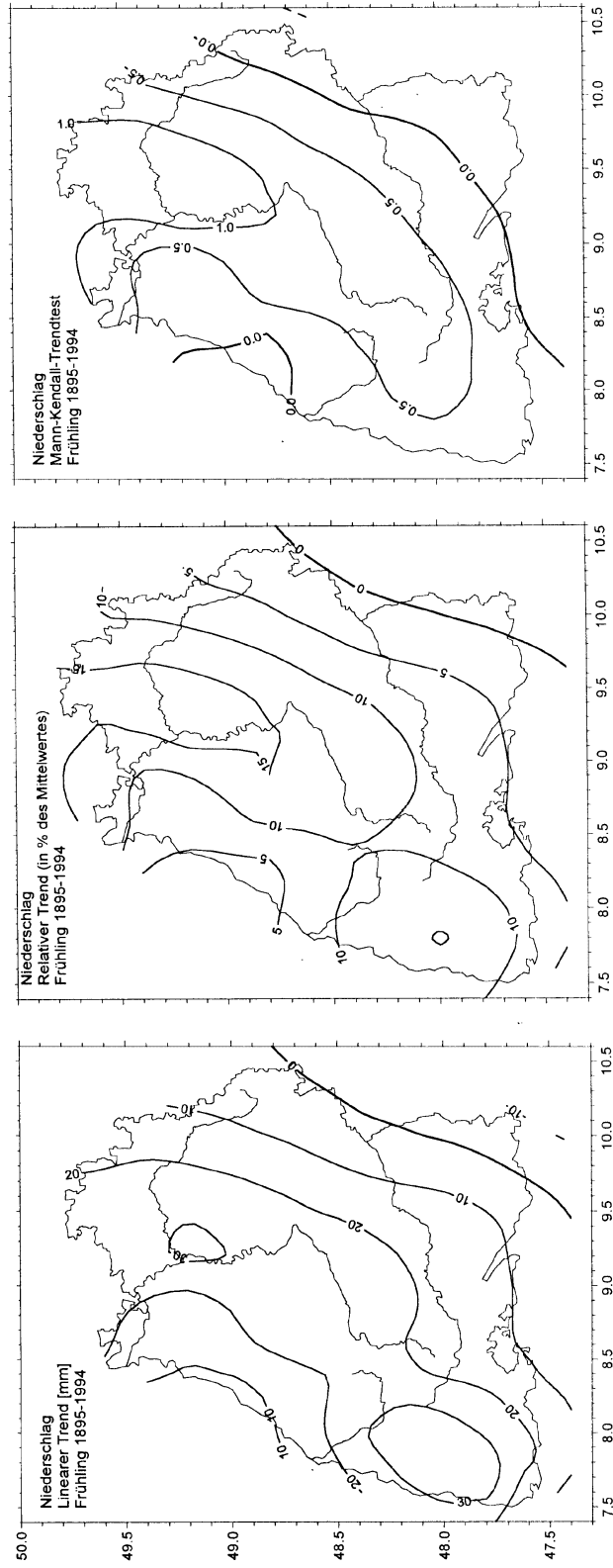
A 1.2 Niederschlagstrends 1895-1994

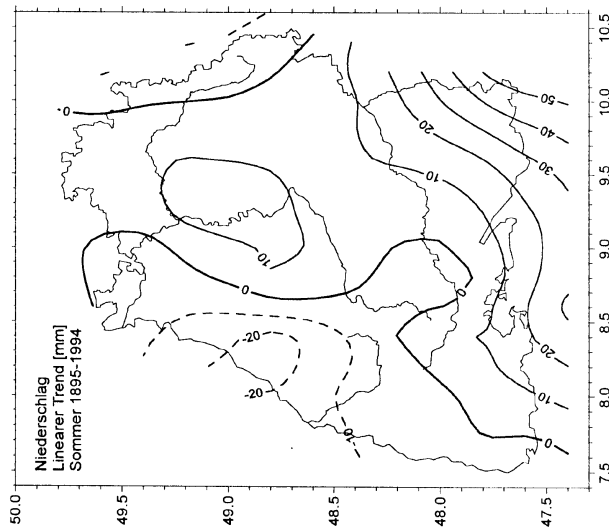
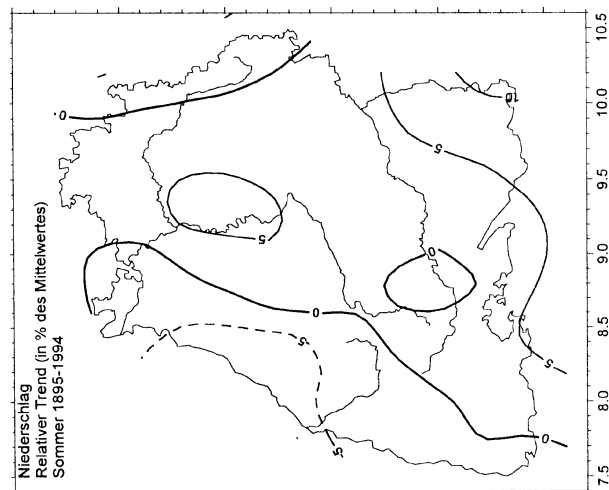
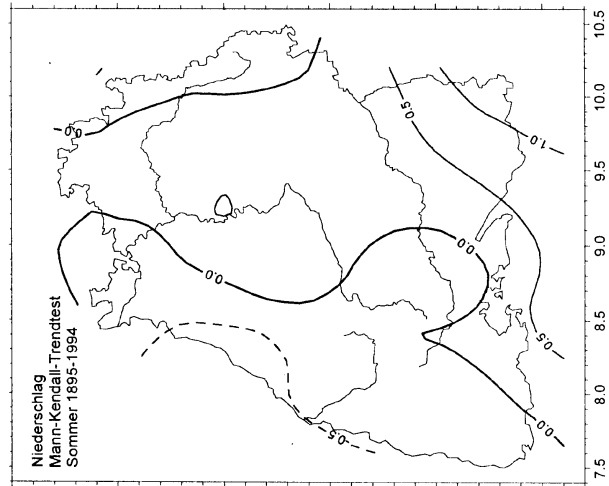
Linearer Trend (in mm), relativer Trend (in % des Mittelwertes) und Mann-Kendall-Trendtestwerte (Signifikanz) für alle Jahreszeiten, das Jahr und einzelne Monate.

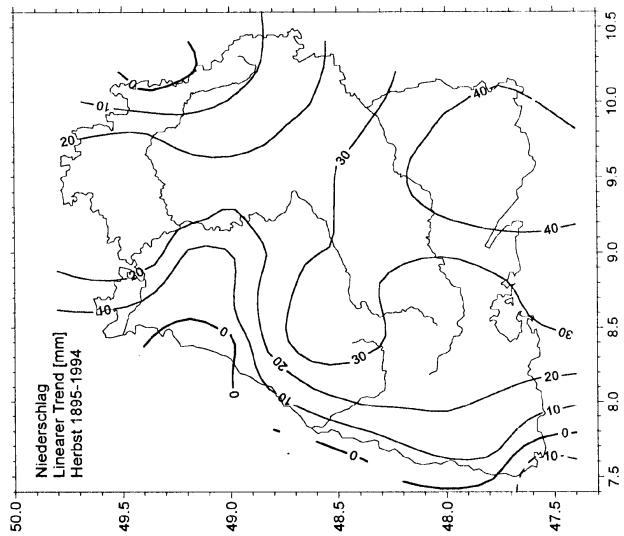
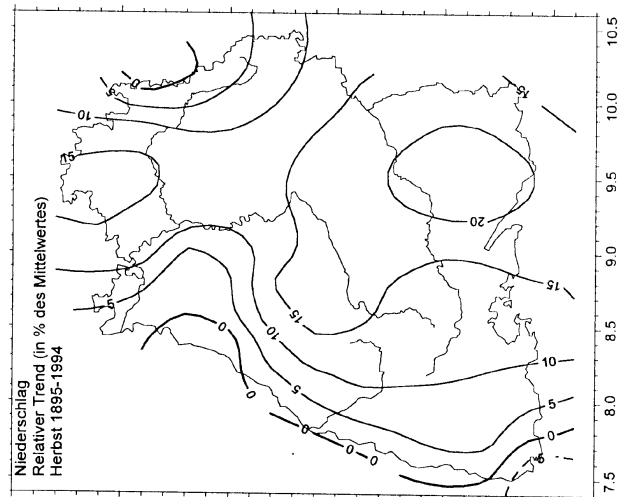
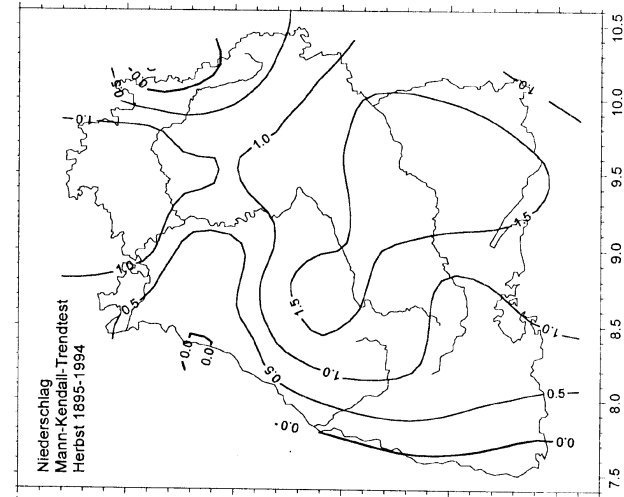
Gestrichelte Isolinien: Niederschlagsrückgang, durchgezogene Isolinien: Niederschlagszunahme, fett durchgezogene Isolinien: keine Veränderung (Null-Isolinie).

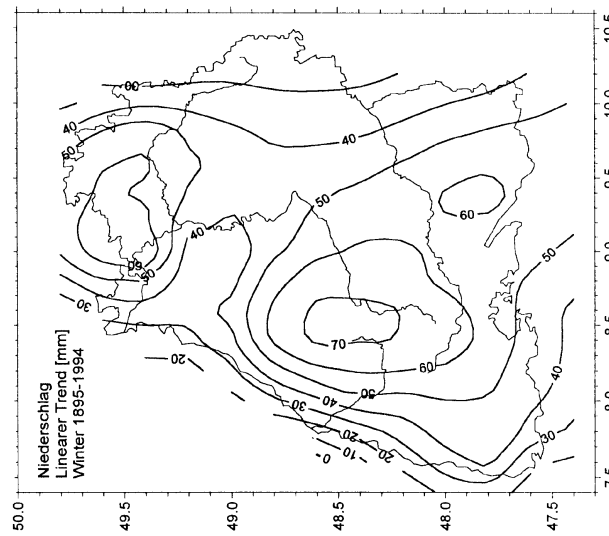
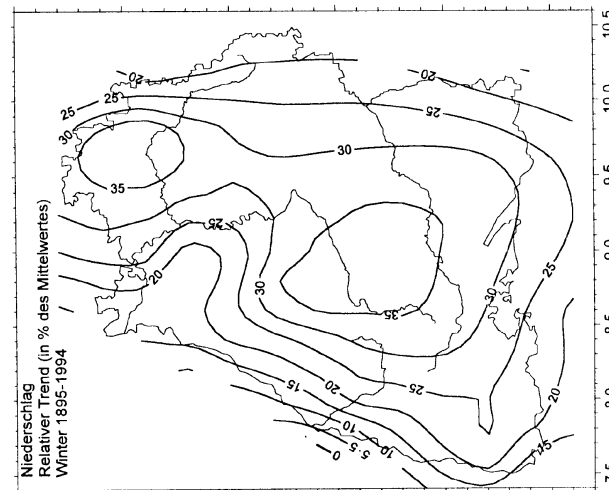
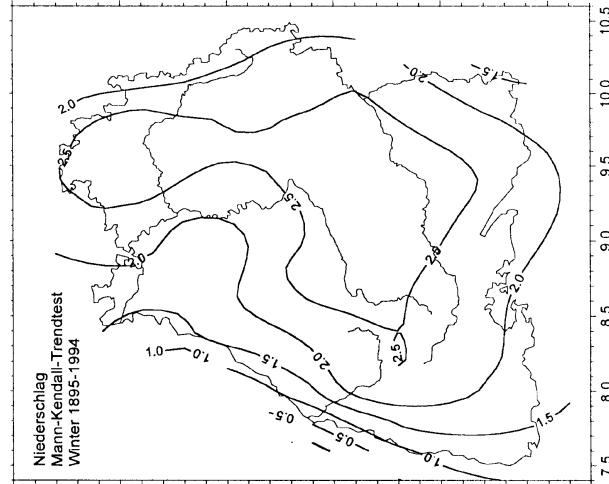
Anteil des Niederschlages im Winterhalbjahr am Gesamtjahresniederschlag (in %).

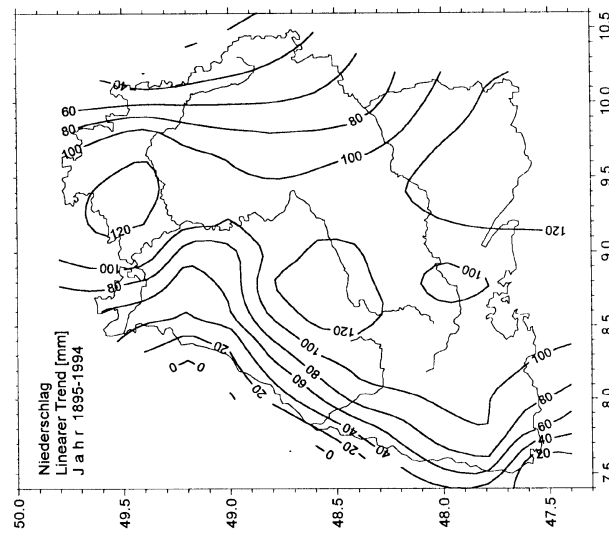
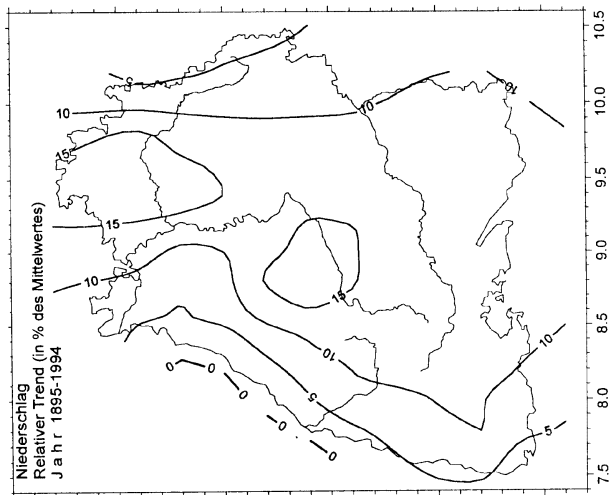
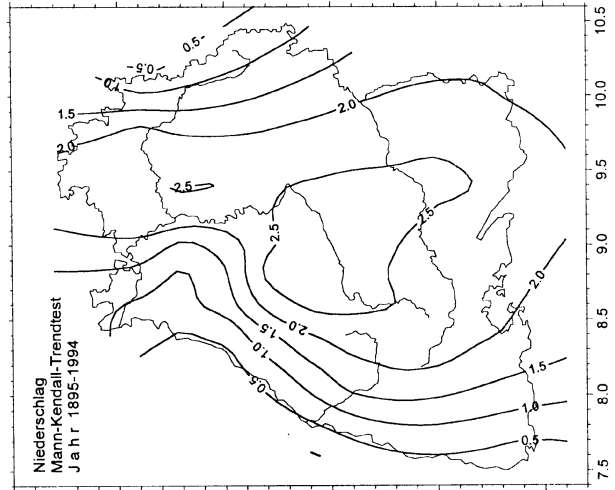
Schraffierte Bereiche: Anteil <44 %, fett durchgezogene Isolinie: Anteil =50 %.

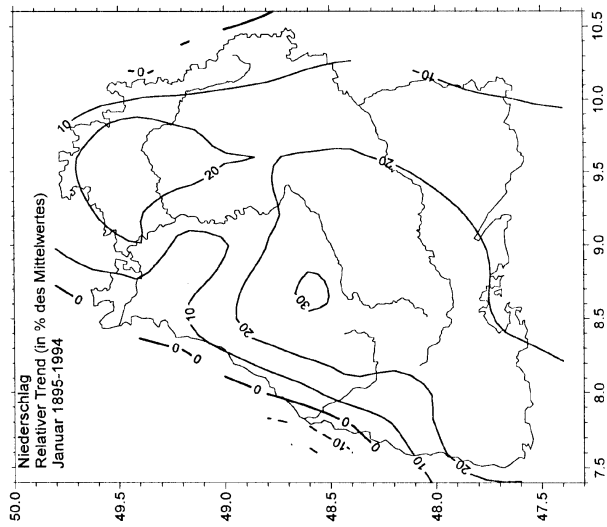
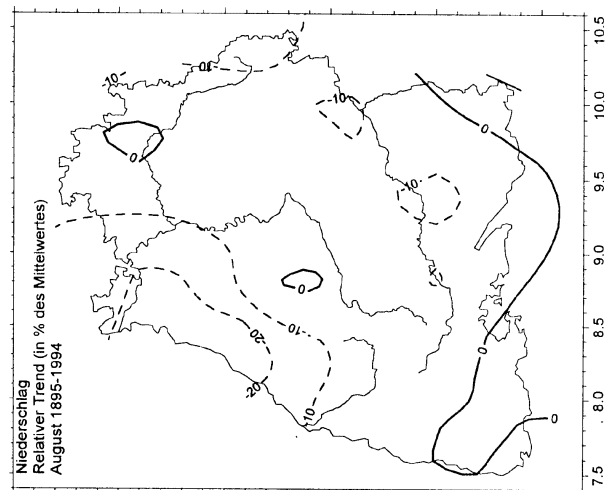
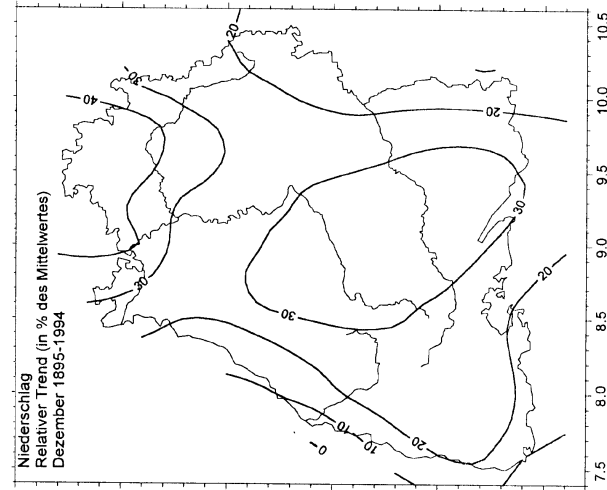






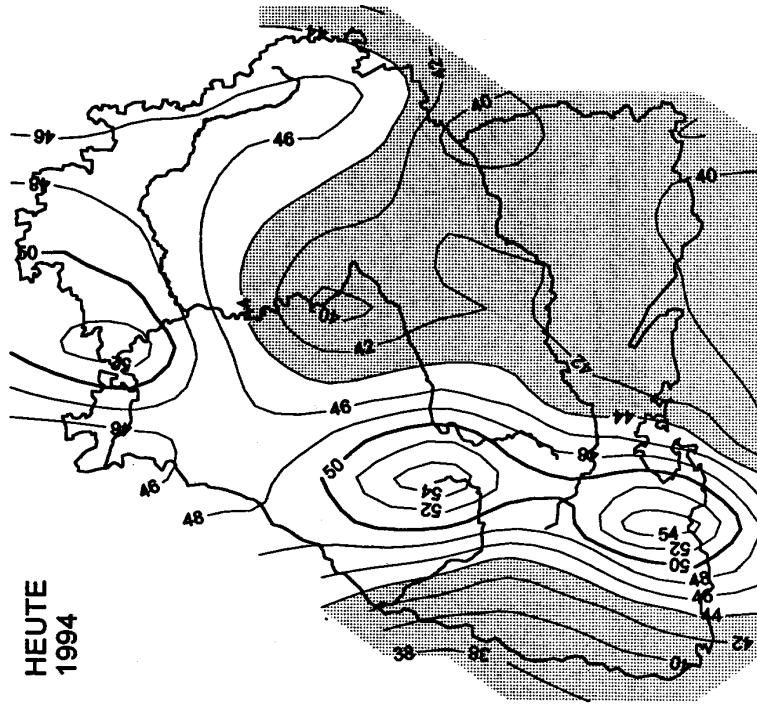






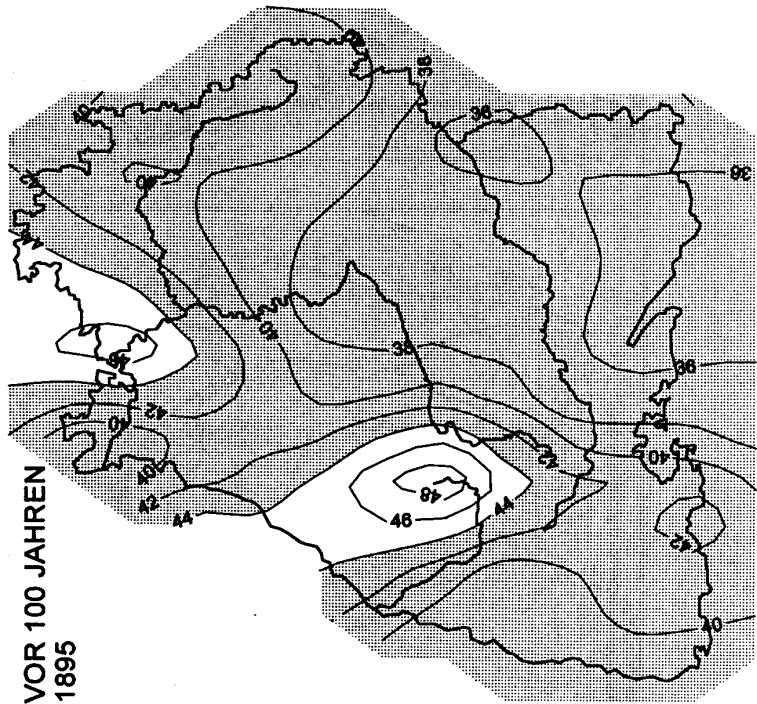
Anteil des Niederschlages im Winterhalbjahr (Oktober - März)
am Gesamthresniederschlag [%]
(aus lin. Regression 1895-1994)

HEUTE
1994



Anteil des Niederschlages im Winterhalbjahr (Oktober - März)
am Gesamthresniederschlag [%]
(aus lin. Regression 1895-1994)

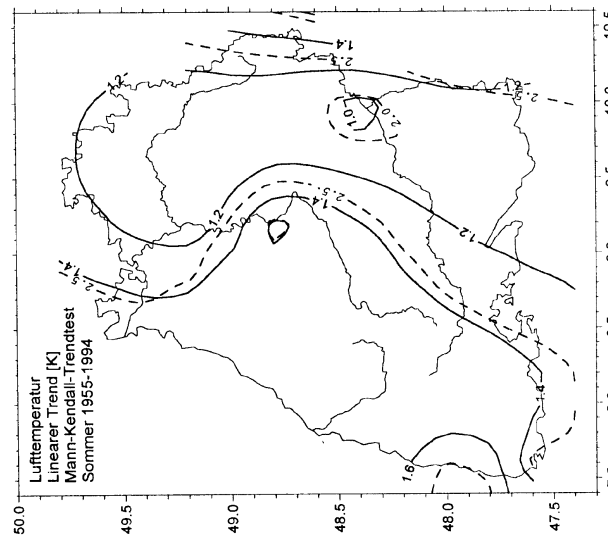
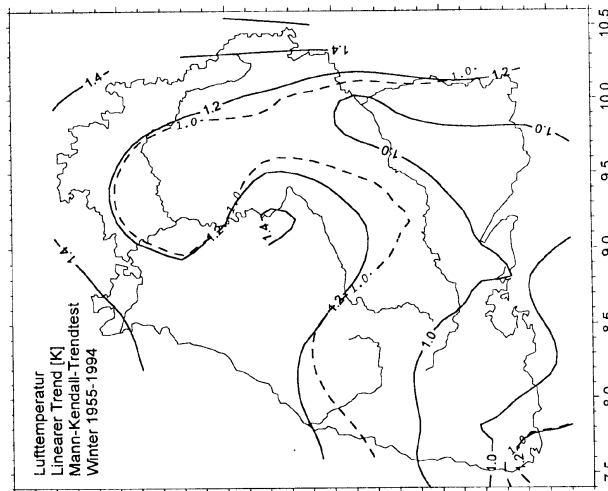
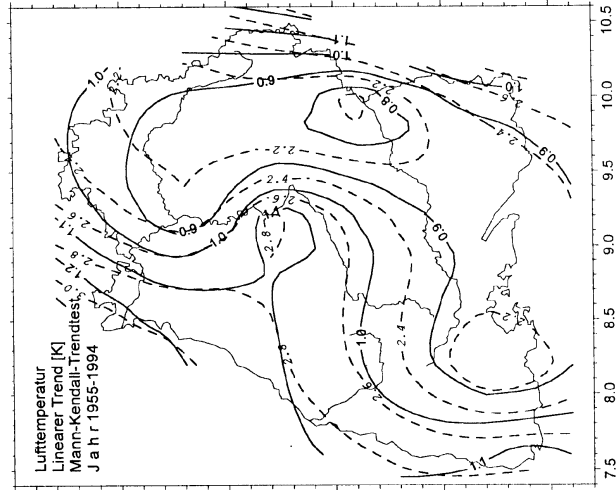
VOR 100 JAHREN
1895



A 2.1 Temperaturtrends 1955-1994

Linearer Trend (in K = °C) und Mann-Kendall-Trendtestwerte (Signifikanz) für Sommer, Winter und das Jahr.

Durchgezogene Isolinien: Lineare Trends in K, gestrichelte Isolinien: Mann-Kendall-Trendtestwerte.



A 2.2 Temperaturtrends 1895-1994

Linearer Trend (in K = °C) und Mann-Kendall-Trendtestwerte (Signifikanz) für Sommer, Winter und das Jahr.

Obere Zahl: Linearer Trend in K, untere Zahl: Mann-Kendall-Trendtestwert, fett gedruckte Zahl = Homogenitätsklasse.

