

---

# Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern

*KLIWA-Projekt A 1.2.1 /1.2.2*

*"Flächendeckende Analyse des Langzeitverhaltens  
der potentiellen und tatsächlichen Verdunstungshöhe"*

*KLIWA-Projekt A 1.2.4*

*"Langzeitverhalten der Sonnenscheindauer und Globalstrahlung  
für hydrologische Auswertungen"*

---

KLIWA-Berichte

Heft 12

---



**KLIWA**

Klimaveränderung  
und Wasserwirtschaft

---

# Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und Klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern

*KLIWA-Projekt A 1.2.1*

*"Flächendeckende Analyse des Langzeitverhaltens der  
potentiellen Verdunstungshöhe"*

*KLIWA-Projekt A 1.2.2*

*"Flächendeckende Analyse des Langzeitverhaltens der  
tatsächlichen Verdunstungshöhe"*

*KLIWA-Projekt A 1.2.4*

*"Erarbeitung und Bereitstellung von langen Stationsreihen  
der Sonnenscheindauer / Globalstrahlung (Tageswerte) und  
Analyse ihres Langzeitverhaltens für hydrologische Anwendungen"*

---

KLIWA-Berichte

**Heft 12**

---



**KLIWA**

Klimaveränderung  
und Wasserwirtschaft

## **IMPRESSUM**

### **Herausgeber**

Arbeitskreis KLIWA

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz  
Baden-Württemberg (LUBW)  
Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU)  
Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbe-  
aufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG)  
Deutscher Wetterdienst (DWD)

[www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)

### **Herausgabedatum**

März 2008

### **ISBN**

978-3-88148-429-9

### **Bearbeitung**

Dipl.-Met. Adelheid Klämt  
Deutscher Wetterdienst  
Abteilung Hydrometeorologie

### **Redaktionelle Bearbeitung**

Dr. Thilo Günther  
Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie  
Vassilis Kolokotronis  
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz  
Baden-Württemberg  
Hans Weber  
Bayerisches Landesamt für Umwelt

### **Umschlaglayout**

Stephan Riedlberger – Graphik Design, München

### **Druck**

Friedrich Bischoff Druckerei GmbH

### **Umwelthinweis**

Druck auf Recyclingpapier

### **Bezug über**

Deutscher Wetterdienst  
Abteilung Hydrometeorologie  
Postfach 100465, 63004 Offenbach  
Fax : 069 8062 3987  
Mail: [bernd.dietzer@dwd.de](mailto:bernd.dietzer@dwd.de)

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung der Herausgeber unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

**Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung  
sowie von  
Verdunstung und Klimatischer Wasserbilanz  
in Baden-Württemberg und Bayern**

**KLIWA-Projekt A 1.2.1**

„Flächendeckende Analyse des Langzeitverhaltens der potentiellen Verdunstungshöhe“  
und

**KLIWA-Projekt A 1.2.2**

„Flächendeckende Analyse des Langzeitverhaltens der tatsächlichen Verdunstungshöhe“  
und

**KLIWA-Projekt A 1.2.4**

"Erarbeitung und Bereitstellung von langen Stationsreihen der Globalstrahlung / Sonnenscheindauer (Tageswerte) und Analyse ihres Langzeitverhaltens für hydrologische Anwendungen"

---

**Inhalt**

	Seite
Zusammenfassung	V
Teil 1: Langzeitverhalten der Sonnenscheindauer und Globalstrahlung in Baden-Württemberg und Bayern	11
Teil 2: Langzeitverhalten der Verdunstung und der Klimatischen Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern	67



## Zusammenfassung

Die Verdunstung ist eine Schlüsselgröße in nahezu allen Prozessen des Wasserhaushaltes und des Abflussgeschehens. In der mittleren jährlichen Wasserbilanz Deutschlands erreicht die Verdunstung etwa 62 % des Niederschlags – die Verdunstungsverluste dominieren im vieljährigen und großräumigen Mittel gegenüber dem Abfluss. Durch die Verdunstung werden Wasser- und Energiehaushalt der Erdoberfläche miteinander verknüpft, und das atmosphärische Energiedargebot für die Verdunstungsprozesse wiederum wird im überwiegenden Maße durch die solare Einstrahlung bereitgestellt. Zur Einschätzung der Auswirkungen des globalen Klimawandels auf den Wasserhaushalt sind daher die Berücksichtigung der Änderungen der Globalstrahlung und der atmosphärisch bedingten Änderungen der Verdunstung unerlässlich.

Im Rahmen des zwischen den Ländern Baden-Württemberg und Bayern sowie dem Deutschen Wetterdienst vereinbarten Kooperationsvorhabens KLIWA – „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ – wurde eine flächendeckende Aufbereitung langer Reihen hydrometeorologischer Größen zur Analyse ihres Langzeitverhaltens im vorigen Jahrhundert durchgeführt. Die Beschreibung der regionalen und zeitlichen Variabilität der hydroklimatischen Bedingungen im süddeutschen Untersuchungsraum stellt einen notwendigen, statistisch fundierten Bewertungsmaßstab für künftige klimatische Änderungen und ihre Auswirkungen auf den Wasserhaushalt dar. Das vorliegende KLIWA-Heft 12 umfasst zwei eigenständige, in sich abgeschlossene KLIWA-Berichte, im Teil 1 über das Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung und im Teil 2 über das Langzeitverhalten von potentieller und tatsächlicher Verdunstung bzw. Klimatischer Wasserbilanz. Über die im Rahmen der KLIWA-Teilprojekte ursprünglich bearbeiteten Zeitreihen von 1931 bis 1997 bzw. 2000 hinaus werden ergänzend für drei repräsentative Stationen die Langzeituntersuchungen bis einschließlich 2006 aktualisiert.

### Teil 1

Das **Langzeitverhalten der Globalstrahlung** im süddeutschen Untersuchungsraum wird auf der Grundlage von **Messreihen der Sonnenscheindauer** von 26 Stationen analysiert, welche klimatisch repräsentativ über Baden-Württemberg und Bayern verteilt sind. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit wird als Hauptuntersuchungszeitraum die Zeitreihe 1951/2000 betrachtet. Für die Stationen Karlsruhe, Bamberg, München und Zugspitze steht die Datenbasis ab 1931 bis 2000 bzw. aktualisiert bis 2006 für die Analyse des Langzeitverhaltens zur Verfügung. Die Daten- und Homogenitätsprüfungen der Messreihen der Sonnenscheindauer und die Zeitreihenergänzungen und -korrekturen werden ausführlich beschrieben.

**Messreihen der Globalstrahlung** liegen aus dem Untersuchungsraum von zehn Stationen über unterschiedliche und meist kürzere Zeiträume vor. Sie wurden zur Ableitung regionaler



Koeffizienten eines Ångström-Ansatzes verwendet, auf dessen Grundlage aus den Stationsreihen der Sonnenscheindauer rechnerisch 50- bis 75-jährige Zeitreihen der Globalstrahlung erstellt wurden. Die für Monats- und Jahreswerte der täglichen Sonnenscheindauer durchgeführten Zeitreihenanalysen erbrachten nachfolgend beschriebene Ergebnisse; die aus den Sonnenscheindauer-Daten abgeleitete Größe Globalstrahlung zeigt ein entsprechendes Zeitreihenverhalten:

- Das Langzeitverhalten der jährlichen Sonnenscheindauer im Zeitraum 1931/2005 ist in Süddeutschland flächendeckend (mit Ausnahme der Gipfelstationen im Schwarzwald und in den Alpen) charakterisiert durch:
  - in den Mittel- und den Extremwerten überdurchschnittlich sonnenscheinreiche Dezenenien zwischen 1931 und 1959;
  - einen deutlich sonnenscheinärmeren Zeitreihenabschnitt von 1960 bis Ende der achtziger Jahre, der in diesem Zeitraum weltweit zu verzeichnen ist ("global dimming");
  - einen wieder sonnenscheinreicheren Zeitreihenabschnitt ab 1990, in dem jedoch nur 2003 die hohen Sonnenscheindauern der dreißiger bis fünfziger Jahre des vorigen Jahrhunderts in etwa wieder erreicht werden;
  - ein extrem sonnenscheinreiches Jahr 2003, das sich bei Betrachtung der Zeitreihe ab 1931 bezüglich der Sonnenscheindauer jedoch nicht als außergewöhnlich darstellt.
- Aufgrund des Zeitreihenverlaufes liegen in der Reihe 1931/2000 signifikante negative Trends der jährlichen Sonnenscheindauer vor, für 1951/2000 sowie mit 2003 ist eine Abschwächung der negativen Trends zu verzeichnen.
- Regionale Schwerpunkte der negativen Trendbefunde in den Jahreswertreihen sind der Norden Baden-Württembergs und Bayern mit Rückgängen von etwa 7 % bis 13 % der jährlichen Sonnenscheinstunden (Bezug:1951/2000).
- Der innerjährliche Schwerpunkt der rückgehenden Sonnenscheindauer fällt auf die Monate März und Juni, Befunde positiver Trends beschränken sich auf Januar/Februar. Für 1951/2000 sind flächendeckend positive Trends im August zu verzeichnen.
- Die hoch gelegenen Gipfelstationen (Feldberg/Schw., Wendelstein, Zugspitze) zeigen in den untersuchten langen Zeitreihen ein relativ gleichmäßiges Schwankungsverhalten der Jahreswerte der Sonnenscheindauer. Dieses gegenüber den tiefer gelegenen Regionen abweichende Zeitreihenverhalten weist auf zunehmende Bewölkung als Ursache der rückgehenden Sonnenscheindauer hin; die häufig oberhalb der Wolkendecke gelegenen Gipfelstationen sind damit weniger betroffen.

- Mit der im KLIWA-Projekt zugrunde gelegten Untersuchungsperiode 1931/2000 wird (im Gegensatz zur Zeitreihe 1951/2000) der strahlungsklimatische Schwankungsbereich als Bewertungsgrundlage künftiger klimatischer Entwicklungen in bestmöglicher Weise erfasst, weil mit den strahlungsreichen dreißiger/vierziger Jahren die Höchstwerte und den strahlungsärmeren sechziger bis achtziger Jahren die Tiefstwerte des vorigen Jahrhunderts im süddeutschen Raum einbezogen werden. Der negative Trend der Sonnenscheindauer/Globalstrahlung in der KLIWA-Untersuchungsperiode entspricht jedoch nicht dem längerfristigen Trendverhalten, was bei der Zeitreihenanalyse von Wasserhaushaltsprozessen, in denen das Energiedargebot eine maßgebliche Rolle spielt, zu beachten ist (s. hierzu die Ergebnisse in Teil 2). Von Interesse wird eine eventuelle weitere Fortsetzung des seit 1990er Jahren zu beobachtenden Wiederanstieges der Sonnenscheindauer / Globalstrahlung sein.

## **Teil 2**

Die flächendeckende **verdunstungsklimatische Langzeitanalyse** für Baden-Württemberg und Bayern basiert auf den Parametern

- potentielle Verdunstung
- Klimatische Wasserbilanz (mit Bezügen zum Niederschlag)
- tatsächliche Verdunstung für ein definiertes Muster-Hydrotop,

von denen Gebietsmittelwertreihen für die in KLIWA abgestimmten 34 Untersuchungsgebiete und den Zeitraum 1931/1997 erstellt wurden. Der Untersuchungszeitraum und die regionale Auflösung dieser Größen entsprechen der Vorgehensweise im KLIWA-Teilprojekt zum Gebietsniederschlag [3], aus dem die Rasterwertreihen der Niederschlagshöhe zur Berechnung der Klimatischen Wasserbilanz und der tatsächlichen Verdunstung übernommen wurden. Für die Berechnung und Regionalisierung der potentiellen Verdunstung wurden die meteorologischen Messreihen von 354 Klimastationen aufbereitet. Zur verdunstungsklimatischen Bewertung der Untersuchungsperiode 1931/1997 wurden die flächendeckenden Auswertungen durch eine Zeitreihenanalyse der o.g. Größen für die 116-jährigen Stationswertreihen 1891/2006 von Karlsruhe, Bamberg und München ergänzt.

In die Interpretation des Zeitreihenverhaltens der Verdunstungsgrößen wurden Ergebnisse aus den KLIWA-Teilprojekten zum Gebietsniederschlag [3], zur Lufttemperatur [4] und zur Sonnenscheindauer (Teil 1 des vorliegenden Berichtes) einbezogen, damit können die komplexen Zusammenhänge im Langzeitverhalten dieser in Wasserhaushaltsprozessen wirksamen hydrometeorologischen Größen dargestellt werden.





Folgende Ergebnisse liegen vor:

### Potentielle Verdunstung

- Der Zeitreihenverlauf der potentiellen Verdunstung in der Untersuchungsperiode 1931/1997 ist in Süddeutschland gekennzeichnet durch eine Folge extrem hoher Jahreswerte zwischen 1945 und 1951, welche die Höchstwerte des gesamten vorigen Jahrhunderts darstellen. Ab Anfang des fünfziger bis gegen Ende des achtziger Dezenniums gibt es eine relativ lang anhaltende Periode mit überwiegend unterdurchschnittlichen Jahreswerten der potentiellen Verdunstung. Am Ende der Untersuchungsperiode tritt ab 1989 wieder ein Zeitreihenabschnitt mit hoher potentieller Verdunstung auf, in dem aber die Höchstwerte aus den Jahren von 1945 bis 1951 nicht wieder erreicht werden.
- Aus diesem Zeitreihenverlauf ergibt sich für die Untersuchungsperiode 1931/1997 flächendeckend ein Rückgang der jährlichen potentiellen Verdunstung. Signifikanzbefunde liegen bei Gebieten am Mittleren/Unteren Main mit Abnahmen um 6 % bis 7 % und Gebieten der südlichen Landeshälfte Baden-Württembergs mit 4 % bis 6 % Rückgang vor.
- Es ist eine markante innerjährliche Verteilung des Trendverhaltens zu verzeichnen:
  - Zunahmen im Jahresabschnitt November bis Februar mit flächendeckend hoch signifikanten Befunden im Dezember (> 99 %),
  - Abnahmen im Jahresabschnitt März bis Oktober; im Juni ein flächendeckender, negativer Trend, je nach Gebiet von 10 % bis 18 % des durchschnittlichen Monatswertes bzw. rd.3 % des Jahreswertes und Signifikanzen über 99 %.
- Die Befunde zum Zeitreihenverlauf und innerjährlichen Trendverhalten der potentiellen Verdunstung in 1931/1997 entsprechen im Wesentlichen denen für Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung. Die stärksten Zunahmen der Lufttemperatur liegen in der Untersuchungsperiode im Winter und haben deshalb geringen Einfluss auf den Jahreswert der potentiellen Verdunstung.
- Die Untersuchungsperiode 1931/1997 ist unter dem Aspekt der gegenwärtigen klimatischen Veränderungen bezüglich des Trendverhaltens der potentiellen Verdunstung (sowie von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung) nicht ausreichend aussagekräftig. Nachweisbar anhand von Stationsreihen seit 1891 bis 2006 liegen im süddeutschen Untersuchungsraum langfristig signifikante Zunahmen der Jahreswerte vor und im innerjährlichen Trendverhalten dominieren die Zunahmen im Sommerhalbjahr gegenüber denen im Winterhalbjahr.

## **Klimatische Wasserbilanz**

Das Zeitreihenverhalten der Klimatischen Wasserbilanz wird überwiegend durch den Niederschlag bestimmt, der eine wesentlich höhere zeitliche Variabilität als die potentielle Verdunstung aufweist. Für die Untersuchungsperiode 1931/1997 liegen folgende wesentliche Befunde vor:

- Die Jahreswerte der Klimatischen Wasserbilanz haben flächendeckend zugenommen, jedoch ohne oder mit meist nur geringer Signifikanz. Die Zeitreihenänderungen der Klimatischen Wasserbilanz bestehen ebenso wie beim Niederschlag zur Hauptsache in einer innerjährlichen Umverteilung mit gegenläufigen Änderungen in den Halbjahren.
- Die Klimatischen Wasserbilanzen in der Summe über das Winterhalbjahr (November – April) weisen flächendeckend Zunahmen mit Signifikanzen von wenigstens 90 % auf, in der südlichen Landeshälfte Baden-Württembergs und in Bayern wird bei den meisten Gebieten die 95 %-Schwelle übertroffen.
- Die Rückgänge der Klimatischen Wasserbilanz in der Summe über das Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) sind überwiegend nicht signifikant. Signifikante Abnahmen treten im August und teilweise im September in Baden-Württemberg sowie in den Mainingebieten auf.
- Anhand langer Stationsreihen für den Zeitraum 1891/2006 ist zu belegen, dass das Trendverhalten der Klimatischen Wasserbilanz und des Niederschlages mit den charakteristischen innerjährlichen Umverteilungen längerfristig vorliegt. In der Untersuchungsperiode 1931/1997 sind die Zunahmen im Winterhalbjahr und Abnahmen im Sommerhalbjahr jedoch stärker ausgeprägt als in 1891/2006.

## **Tatsächliche Verdunstung (Hydrotop-Verdunstung)**

Zielstellung des KLIWA-Teilprojektes zur tatsächlichen Verdunstung war die Ermittlung der ausschließlich meteorologisch – durch Änderungen im Niederschlags- und Energiedargebot – bedingten Trendkomponente im Langzeitverhalten der Vegetationsverdunstung. Das Langzeitverhalten der Gebietsverdunstung infolge von Flächennutzungsänderungen und anderen zeitreihenabhängigen, nicht-meteorologischen Parametern war nicht Gegenstand des Projektes. Die Zeitreihenanalyse wurde für die Verdunstung eines bezüglich Pflanzenbestand und Boden definierten "Muster-Hydrotops" Grasdecke auf einem Boden mittlerer Güte (lehmgiger Sand) vorgenommen. Das Trendverhalten in der Untersuchungsperiode 1931/1997 zeigt folgende Merkmale:

- Bei den Jahreswertreihen treten im Untersuchungsraum nur wenige signifikante Änderungen auf: Am Unteren und Mittleren Main und Tauber sind infolge der Rückgänge von potentieller Verdunstung (mit Signifikanz) und Niederschlag negative Trends der tatsächlichen Verdunstung von 5 % bis 7 % mit Signifikanz > 95 % zu verzeichnen.



- 
- Die im Untersuchungsraum überwiegend geringen und nicht signifikanten Änderungen der Jahreswerte ergeben sich durch teils negative, teils positive monatliche Trends im Jahresablauf. Die Abnahmen der tatsächlichen Verdunstung treten im Wesentlichen in den Monaten der Vegetationsperiode infolge negativer Trends der potentiellen Verdunstung (April, Juni) oder des Niederschlags (August, September) auf. Zunahmen liegen fast flächendeckend und teilweise mit hoher Signifikanz im Jahresabschnitt November bis Februar vor und sind die Folge der positiven Trends der potentiellen Verdunstung.
  - Für die Bilanzgröße aus korrigierter Niederschlagshöhe und Hydrotop-Verdunstung (entsprechend der Sickerung aus der Wurzelzone dieses Hydrotops) ergeben sich in den Monaten November/Dezember und März signifikante positive Trends, die im Wesentlichen durch die Zunahme der Niederschläge bedingt sind.

## **Teil 1:**

# **Langzeitverhalten der Sonnenscheindauer und Globalstrahlung in Baden-Württemberg und Bayern**



## Inhaltsverzeichnis Teil 1

	Seite
1 Einleitung	15
2 Datengrundlagen	17
3 Methodische Grundlagen	21
3.1 Statistische Methoden der Zeitreihenanalyse	21
3.1.1 Bruchpunktanalyse nach MANN-WHITNEY und PETTIT	21
3.1.2 Trendberechnung	21
3.1.3 Trendtest nach MANN-KENDALL	23
3.2 Meteorologische Prüfung der Messreihen der Sonnenscheindauer	24
3.3 Ergänzung und Korrektur (Homogenisierung) der Stationsreihen der Sonnenscheindauer	26
3.4 Berechnungsverfahren der Globalstrahlung	28
4 Mittlere regionale Verteilung der Sonnenscheindauer in Baden-Württemberg und Bayern	31
5 Zeitreihenverhalten der Sonnenscheindauer in Baden-Württemberg und Bayern	37
5.1 Zeitreihenverhalten und Trends der Jahresmittelwerte (Zeitreihe 1951/2000)	37
5.2 Zeitreihenverhalten und Trends im Jahresgang (Zeitreihe 1951/2000)	41
5.3 Zeitreihenvergleich 1951/2000 und 1931/2000; weiterer Verlauf der Zeitreihen bis 2006	45
5.4 Stabilität der Trends	48
5.4.1 Darstellung der Ergebnisse	48
5.4.2 Trendstabilität in den Jahreswertreihen	48
5.4.3 Trendstabilität in den Monatswertreihen	51
6 Literatur	57
Anhang	59
Ergebnistabellen für die Größe Globalstrahlung	



## 1 Einleitung

Das atmosphärische Energiedargebot für die Wasserhaushaltsprozesse wird im überwiegenden Maße durch die Sonneneinstrahlung bereitgestellt. Nach der Verdunstungsformel von PENMAN (s. in [1]) beträgt im süddeutschen Raum das Verhältnis zwischen dem Strahlungsterm und dem Term des turbulenten Austausches ca. 75 % zu 25 % (im vieljährigen Mittel). Diese Relation macht den dominierenden Einfluss der Strahlung auf die Verdunstung und damit auf die Wasserbilanz der Erdoberfläche deutlich.

Die regionale Dichte der Stationen mit Messungen der Sonnenscheindauer ist wesentlich größer als die Dichte der Strahlungsmessstationen. Weiterhin liegen in der Regel längere und geschlossene Reihen von der Messgröße Sonnenscheindauer vor. In der Praxis der hydrologischen und Wasserhaushaltsmodellierung ist es deshalb auch gebräuchlich, als Modellinput die Sonnenscheindauer zu verwenden und mit Hilfe eines Ångström-Ansatzes (vgl. Abschnitt 3.4) in die eigentlich benötigte Größe Globalstrahlung umzurechnen.

Das KLIWA-Teilprojekt A1.2.4 fußt auf den verfügbaren langen Messreihen der täglichen Sonnenscheindauer im Untersuchungsraum Baden-Württemberg und Bayern aus denen mithilfe einer Ångström-Formel Zeitreihen der Globalstrahlung erstellt wurden. Die aus dem Untersuchungsraum verfügbaren Messreihen der Globalstrahlung wurden nur zur regionalklimatischen Anpassung der Parameter des Ångström-Ansatzes einbezogen. Die Untersuchungen zum Langzeitverhalten wurden primär für die Messgröße Sonnenscheindauer durchgeführt. Weil die Zeitreihen der Globalstrahlung aus den Sonnenscheindauermessreihen erstellt wurden, ist von vorn herein dasselbe Zeitreihenverhalten der Globalstrahlung zu erwarten. Die Zeitreihenanalyse dieser Größe beschränkt sich daher auf die Quantifizierung ihrer Trends. (Die Ergebnisse zur Globalstrahlung werden tabellarisch im Anhang zusammengestellt.)

Als Datenbasis konnten von vier Standorten (teils mit Stationsverlegung) Messreihen der Sonnenscheindauer ab 1931 herangezogen werden. Entsprechend dem in weiteren KLIWA-Teilprojekten verwendeten Untersuchungszeitraum 1931/2000 erfolgte für diese Stationen eine Zeitreihenanalyse auf der Basis dieser 70-jährigen Reihe und darüber hinaus eine Zeitreihenbewertung der aktuellen Jahre bis 2006. In den Jahren um 1950 ist eine deutliche Verdichtung des meteorologischen Standardmessnetzes zu verzeichnen. Um diese höhere Informationsdichte zur Ableitung flächendeckender Aussagen zu nutzen wird als weiterer Analysezeitraum die Zeitreihe 1951/2000 verwendet, für welche durch Homogenitätsuntersuchun-





gen Messreihen der Sonnenscheindauer von 26 repräsentativ verteilten Stationen ausgewählt wurden.

Die Bearbeitung umfasste die folgenden Aufgabenkomplexe:

- Auswahl, Homogenitätsprüfung und bei Erfordernis Korrektur und Ergänzung von langen Stationsmessreihen der täglichen Sonnenscheindauer
- Zeitreihenanalyse der mittleren täglichen Sonnenscheindauer in den Monaten und im Jahr von den ausgewählten Stationen
- Untersuchung zu den Koeffizienten des Ångström-Ansatzes im Raum Baden-Württemberg und Bayern
- Erstellung von Stationsreihen der täglichen Globalstrahlung aus den Zeitreihen der Sonnenscheindauer mit Hilfe der abgeleiteten Ångström-Koeffizienten und Berechnung der Trendwerte für die Globalstrahlung (Monats- und Jahreswerte)

Die Bezüge zwischen dem Zeitreihenverhalten von Sonnenscheindauer/Globalstrahlung und von Lufttemperatur und potentieller Verdunstung werden im Teil 2 (Kapitel 5.4 und 6) des vorliegenden Heftes diskutiert.

## 2 Datengrundlagen

Für den Untersuchungsraum Baden-Württemberg und Bayern liegen von insgesamt 35 Stationsstandorten Messreihen der täglichen Sonnenscheindauer vor. Der Untersuchungszeitraum ab 1931 ist dabei nur an den vier Standorten Zugspitze, München, Bamberg und Karlsruhe durch (nahezu) lückenlose Messreihen belegt. Mit Ausnahme der Station Zugspitze sind an den anderen drei Standorten Stationsverlegungen aufgetreten, aus welchen Inhomogenitäten bei den zusammengesetzten Zeitreihen resultieren können. Die strahlungsklimatischen Bedingungen des Untersuchungsraumes werden auch durch diese vier Stationen näherungsweise repräsentativ wiedergegeben.

Seit Ende der 1940er Jahre ist eine deutliche Verdichtung des Messnetzes der Sonnenscheindauer zu verzeichnen, so dass die 50-jährige Zeitreihe 1951/2000 als weiterer geschlossener Untersuchungszeitraum für das Langzeitverhalten aufbereitet werden konnte. Als wichtigste Kriterien bei der Vorauswahl der in die Langzeituntersuchung einzubeziehenden Stationen des verdichteten Messnetzes ab 1951 galten die Länge der Messreihe und die klimatisch möglichst repräsentative Verteilung der Stationen. Die weitere Auswahl und gegebenenfalls erforderliche Ergänzungen verkürzter und Korrekturen inhomogener Reihen erfolgten auf der Grundlage umfassender Datenprüfungen.

Messreihen der Sonnenscheindauer können durch Fehlerquellen unterschiedlichster Art beeinträchtigt sein. Einschränkungen des Horizontes stellen eine wesentliche Ursache für trend- und sprunghafte Änderungen der Messreihen dar. Sofern es sich um fixe Horizonteinschränkungen durch das umgebende Gelände handelt, führt eine Verlegung der Station, eventuell nur des Messplatzes am Stationsstandort, zwangsläufig zu einem Bruch in den Messbedingungen. Aufwachsende Bäume oder die Errichtung von Bauwerken in der Nähe des Messplatzes ergeben eine allmähliche bzw. plötzliche Beeinflussung der Messbedingungen, die je nach Himmelsrichtung des Hindernisses einem jahreszeitlichen Wechsel mit der Höhe der Sonnenbahn unterliegen kann. Nach Möglichkeit wird solchen Beeinträchtigungen durch das Umfeld mit einer geeigneten Verlegung des Messplatzes begegnet. Weitere Fehlerquellen stellen die Wartung des Gerätes (Entfernung von Staub und Reif) und die nicht völlig auszuschließende Subjektivität bei der manuellen Auswertung des Registrierstreifens des über den größten Teil des Untersuchungszeitraumes eingesetzten Campbell-Stokes–Sonnenschein-Autographen dar, die z.B. bei einem Beobachterwechsel die Homogenität der Messreihe beeinflussen können. Die um 1990 einsetzende Automatisierung der Messung durch registrierende photoelektrische Geräte kann ebenfalls zu Brüchen in den betreffenden Stationsreihen

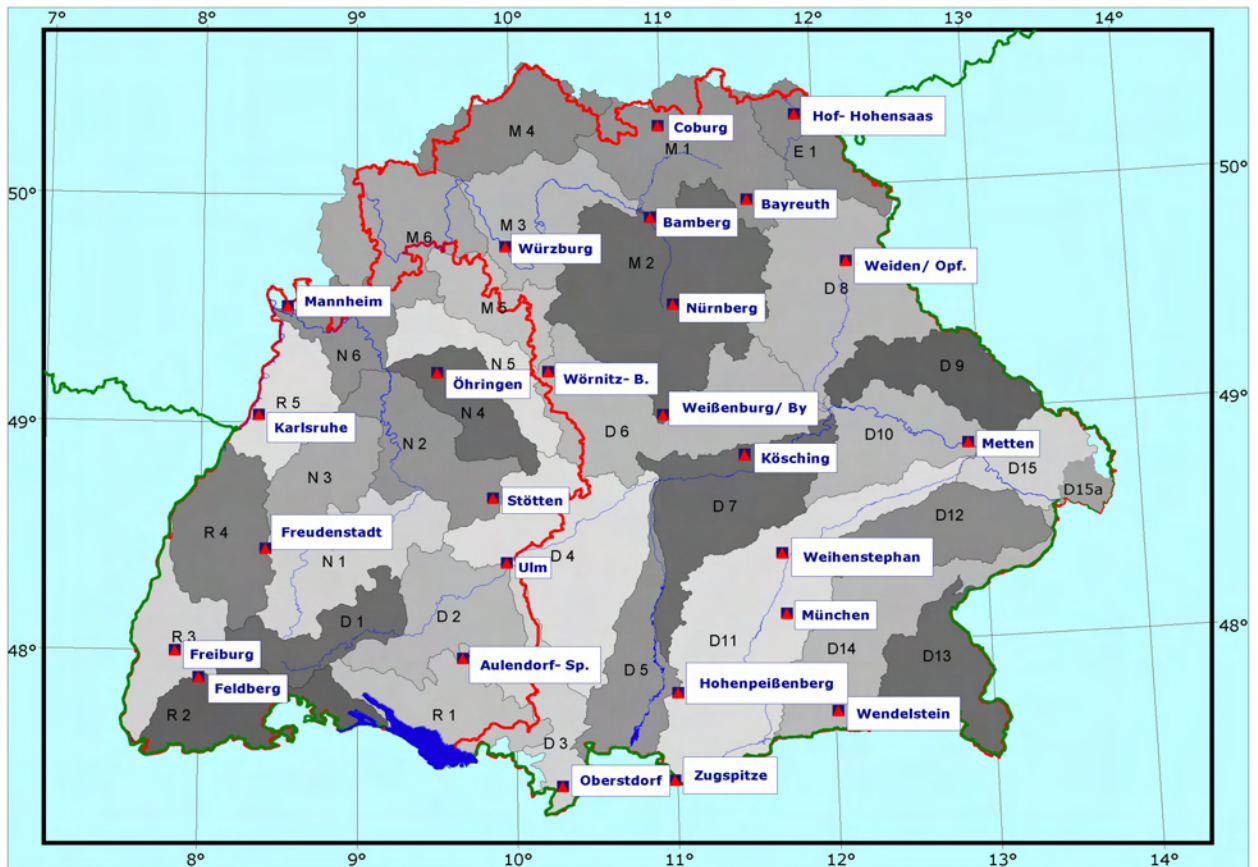


führen, da diese neuen Geräte teilweise andere Messcharakteristika aufweisen als das vorherige Campbell-Stokes-Messgerät.

Zur bestmöglichen Separierung und Korrektur der durch die Messwerterfassung bedingten "künstlichen" Inhomogenitäten wurde den Trenduntersuchungen der Sonnenscheindauer eine umfassende Kontrolle der einzelnen Stationsreihen bezüglich des Zeitreihenverhaltens der Mittel- und Extremwerte vorgeschaltet. Die für die weitere Zeitreihenanalyse ausgewählten Stationen werden in nachstehender Stationsliste, Tabelle 2.1 und in der Übersichtskarte der KLIWA-Untersuchungsgebiete, Abbildung 2.1, aufgeführt.

Station	geographische Länge dezimal	geographische Breite dezimal	Höhe m ü. NN	Gebiet
FREIBURG I.BR.	7,85000	48,00000	269	R3
KARLSRUHE (WST)	8,36667	49,03333	112	R5
MANNHEIM (WST)	8,55000	49,51667	96	-
FELDBERG/SCHW.(WST)	8,00000	47,88333	1486	R2
FREUDENSTADT (WST)	8,41667	48,45000	797	N1
AULENDORF-SPIEGLER	9,66667	47,96667	560	R1
ULM (WST)	9,95000	48,38333	567	D2
STOETTEN (WST)	9,86667	48,66667	734	N2
OEHRINGEN (WST)	9,51667	49,21667	276	N4
HOF-HOHENSAAS (WST)	11,88333	50,31667	567	E1
BAYREUTH	11,55000	49,95000	330	M1
COBURG (WST)	10,98333	50,28333	322	M1
BAMBERG (WST)	10,91667	49,88333	239	M2
NUERNBERG-KRA.(FLUGWEWA)	11,05000	49,50000	314	M2
WEISSENBURG/BAY. (WST)	10,96667	49,01667	422	M2
WUERZBURG (WST)	9,96667	49,76667	268	M3
WOERNITZ-BOTTENWEILER	10,23333	49,21667	464	D6
KOESCHING	11,48333	48,83333	417	D7
WEIDEN/OPF. (WST)	12,18333	49,66667	438	D8
METTEN	12,91667	48,85000	313	D10
WEIHENSTEPHAN (AMBF)	11,70000	48,40000	470	D11
MUENCHEN-RIEM (FLUGWEWA)	11,71667	48,13333	527	D11
HOHENPEISSENBERG (OBS)	11,01667	47,80000	977	D11
ZUGSPITZE (WST)	10,98333	47,41667	2960	D11
WENDELSTEIN (WST)	12,01667	47,70000	1832	D14
OBERSTDORF (WST)	10,28333	47,40000	810	D3

Tabelle 2.1: Untersuchte Stationsreihen der Sonnenscheindauer von Baden-Württemberg und Bayern


**Untersuchungsgebiete:**
**D Donau**

- D 1 Quelle bis Lauchert
- D 2 uh. Lauchert bis oh. Iller
- D 3 Iller
- D 4 Donau, uh. Iller bis oh. Wörnitz und Lech
- D 5 Lech
- D 6 Wörnitz, Altmühl und Schw. Laber
- D 7 Donau, uh. Lech bis oh. Naab
- D 8 Naab
- D 9 Regen
- D 10 Donau, uh. Naab bis oh. Isar
- D 11 Isar
- D 12 Vils und Rott
- D 13 Alz und Salzach
- D 14 Inn
- D 15 Donau, uh. Isar bis Landesgrenze
- D 15a Donau, uh. Isar, oh. Pegel Achleiten

**N Neckar**

- N 1 Quelle bis oh. Fils
- N 2 Fils bis oh. Kocher (ohne Enz)
- N 3 Enz
- N 4 Kocher
- N 5 Jagst
- N 6 uh. Jagst bis Mündung

**R Rhein**

- R 1 Bodensee
- R 2 Bodensee bis Wiese
- R 3 uh. Wiese bis oh. Kinzig
- R 4 Kinzig bis Murg
- R 5 uh. Murg bis oh. Neckar

**E 1 Elbe**
**M Main**

- M 1 Main bis oh. Regnitz
- M 2 Regnitz
- M 3 Main, uh. Regnitz bis oh. Fränk. Saale
- M 4 Fränk. Saale
- M 5 Tauber
- M 6 Main, uh. Fränk. Saale bis Landesgrenze

**Landesgrenzen**

Abbildung 2.1: Untersuchte Stationsreihen der Sonnenscheindauer von Baden-Württemberg und Bayern

Neben den eingesetzten statistischen und meteorologischen Prüfmethode(n) (s. Abschnitt 3) waren die Stationsdokumentationen eine wertvolle Hilfe zur Entscheidungsfindung; sie vermochten aber die Ergebnisse der Prüfverfahren nicht immer und auch nicht widerspruchsfrei



zu klären. Insgesamt ist festzustellen, dass bei aller Sorgfalt die Auswahl von Stationen und die Ergänzung und Korrektur von Messreihen Fehlerquellen für die Zeitreihenanalyse darstellen. Deshalb wurde angestrebt, sowohl die Ergänzungen verkürzter Zeitreihen als auch die Anzahl der Stationen mit Korrekturen offensichtlicher „künstlicher“ Inhomogenitäten möglichst gering zu halten, dabei aber die Fläche des Untersuchungsraumes repräsentativ durch Stationen zu belegen. Im 50-jährigen Untersuchungszeitraum 1951/2000 liegen verkürzte Messreihen bei den Stationen Aulendorf-Spiegler (bis 1992), Coburg (ab 1955), Nürnberg (ab 1956) und Weihenstephan (bis 1995) vor.

Messreihen der Globalstrahlung sind aus dem Untersuchungsraum Baden-Württemberg und Bayern von zehn Stationen verfügbar. Die Messreihen weisen eine Länge zwischen etwa 20 und 40 Jahren auf (s. Tabelle 2.2) und wurden – zusammen mit den Stationsreihen der Sonnenscheindauer – ausschließlich zur Ableitung der Koeffizienten der Ångström-Formel (s. Abschnitt 3.4) verwendet. Für die Zeitreihenuntersuchungen der Globalstrahlung und für die bereitzustellenden Tageswertreihen wurden schon aus Gründen der Homogenität nur die berechneten Globalstrahlungsreihen verwendet.

Station	Zeitreihe
Mannheim	1979/2002
Freiburg i.Br.	1973/2002
Stuttgart	1979/2002
Konstanz	1977/2002
Coburg	1982/2002
Nürnberg	1976/2002
Würzburg	1959/2002
Weißenburg/Bay.	1982/2002
Weihenstephan	1961/1995
Hohenpeißenberg	1961/2002

Tabelle 2.2: Stationsmessreihen der Globalstrahlung

### 3 Methodische Grundlagen

#### 3.1 Statistische Methoden der Zeitreihenanalyse

##### 3.1.1 Bruchpunktanalyse nach MANN-WHITNEY und PETTIT

Zur Auffindung und Bewertung von Bruchpunkten in den Messreihen der Sonnenscheindauer wurde das Verfahren von PETTIT [3] verwendet, das auf einem MANN-WHITNEY-Test basiert. Dieses Verfahren stellt einen einfachen, verteilungsfreien Rangtest dar, bei dem für jedes Wertepaar  $x_i$  und  $x_j$  einer Zeitreihe nicht die genaue rechnerische Differenz sondern nur deren Vorzeichen unter Verwendung der Signum-Funktion  $\text{sgn}$  in die Testgröße eingeht. Die Testgröße  $K_n$  ergibt sich wie folgt aus der Reihe der Rangsummen  $U_{k,n}$ :

$$U_{k,n} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (3.1)$$

mit

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

$$K_n = \max_{1 \leq k \leq n} |U_{k,n}| \quad (3.2)$$

Darin sind  $n$  die Gesamtlänge der Zeitreihe,  $k$  der laufende Zeitschritt und  $x$  die zu prüfende Größe, hier die Stationswerte der mittleren täglichen Sonnenscheindauer oder (berechneten) Globalstrahlung in den Monaten und Jahren. Der Zeitschritt  $k$ , für welchen sich der Extremwert in der Rangsummenreihe ergibt, stellt den wahrscheinlichsten Bruchpunkt in der untersuchten Zeitreihe dar. Die Wahrscheinlichkeit  $P$  (zweiseitiger Test) des Bruchpunktes wird geschätzt über:

$$P = 2 \exp\left(\frac{-6K_n^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (3.3)$$

Das Testverfahren unterscheidet nicht zwischen natürlich (klimatisch) und künstlich (durch Änderung der Messbedingungen) verursachten Inhomogenitäten.

##### 3.1.2 Trendberechnung

Die Analyse des Langzeitverhaltens der Sonnenscheindauer bzw. der Globalstrahlung im Untersuchungsraum Baden-Württemberg und Bayern konzentriert sich auf die Untersuchung der



Trends in den Zeitreihen der Jahreswerte und auf den innerjährlichen Verlauf anhand der Monatswerte, weiterhin auf die Untersuchung der Stabilität dieser Trends über die Zeitreihen 1931/2000 bzw. 1931/2005 und 1951/2000.

Die Berechnungen basieren auf der Annahme eines linearen Trends in der jeweils betrachteten Zeitreihe. Die Trendgerade einer Größe  $x$  – hier der mittleren täglichen Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung im Monat oder Jahr – wird in ihrer Abhängigkeit von der Zeit  $t$  durch folgende Gl. (3.4) beschrieben.

$$x(t) = a + b \cdot t \quad (3.4)$$

Darin sind  $a$  und  $b$  die Koeffizienten der Trendgeraden, die nach der GAUSS'schen Methode der kleinsten Quadrate zu berechnen sind [4].

Der (absolute) Trend  $T$  der Größe  $x$  ergibt sich nach der linearen Beziehung (3.4) als Differenz zwischen dem Endwert  $x_n$  zum Zeitpunkt  $t_n$  und dem Anfangswert  $x_1$  zum Zeitpunkt  $t_1$ :

$$T = x_n - x_1 \quad (3.5)$$

Die Dimension des Trends ist gleich der Dimension der untersuchten Größe  $x$ : bei der Sonnenscheindauer wird er somit in Stunden  $h$  (mit Dezimalteilung) und bei der Globalstrahlung  $J/cm^2$  angegeben.

Aus der Herleitung der Koeffizienten in (3.4) bzw. des Trends (3.5) folgt, dass Trendangaben ausschließlich für das jeweils bearbeitete Zeitintervall gültig sind, was bei Vergleichen mit Trendergebnissen anderer Zeitabschnitte unbedingt zu beachten ist. Zeitliche Extrapolationen von Trendwerten sind selbstverständlich nicht statthaft. Trendangaben weisen somit in Abhängigkeit von der zugrunde gelegten Zeitreihe eine gewisse Zufälligkeit in der Aussage zum Langzeitverhalten der betreffenden Größe auf. Insbesondere durch einzelne, bezüglich der untersuchten Größe extreme Jahre, die – zufällig – zu Beginn oder Ende der bearbeiteten Reihe auftreten, können Trendergebnisse deutlich beeinflusst werden. Eine Methode, Zufälligkeiten in den Tendaussagen für vorgegebene Zeitreihen auszuschließen bzw. zu bewerten, ist die Prüfung der Stabilität der Trends in der Untersuchungsperiode, die anhand so genannter vor- und rückwärts schreitender Trends vorgenommen werden kann. Dabei wird untersucht, wie empfindlich ein Trend auf eine Veränderung des Untersuchungszeitraumes reagiert. Als besonders sicher und aussagefähig gilt die Tendaussage für eine lange Zeitreihe, wenn sich ein Trendwert von hoher Signifikanz bei den Veränderungen des Bezugszeitraumes nur wenig ändert.



Beim rückwärts schreitenden Trend werden die Berechnungen für Teilreihen der gesamten Untersuchungsperiode durchgeführt, die bei festem Zeitreihenende (hier: 2000) jeweils am Zeitreihenanfang sukzessive um einen Wert verringert werden. Beim vorwärts schreitenden Trend wird bei festem Zeitreihenanfang (hier: 1931 bzw. 1951) jeweils am Ende der Teilreihen ein Wert hinzugenommen, bis die Gesamtreihe der Untersuchungsperiode erreicht ist. Als minimale Zeitreihenlänge wurde ein Zeitraum von 20 Jahren vorgegeben; die Ansetzung eines ausreichenden Mindestzeitraums ist erforderlich, damit die Trenaussagen noch sinnvoll bleiben.

### 3.1.3 Trendtest nach MANN-KENDALL

Zur Bewertung der Signifikanz der nach (3.4), (3.5) berechneten Trends wurde das Testverfahren nach MANN-KENDALL eingesetzt. Der von MANN entwickelte Trendtest lautet nach [5]:

$$Q_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i)}{\frac{1}{2}n(n-1)} = \frac{s}{\frac{1}{2}n(n-1)} \quad (3.6)$$

Darin ist  $n$  die Länge der untersuchten Zeitreihe und  $x_i, x_j$  sind die zu vergleichenden Datenelemente der Zeitreihe. Die Summierung erfolgt über alle möglichen, das heißt  $\frac{1}{2}n(n-1)$  Wertepaare  $(x_i, x_j)$ , für die  $i < j$  gilt.

Für  $n > 10$  ist die Testgröße  $Q_s$  näherungsweise normalverteilt mit der Varianz  $\sigma^2 = \frac{1}{18}(n(n-1)(2n+5))$  und dem Mittelwert  $\mu = 0$ . Damit ergibt sich die normierte Testgröße  $Q$  zu

$$Q = \frac{Q_s - \mu}{\sigma} = \frac{s}{\left[\frac{1}{18}n(n-1)(2n+5)\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.7)$$

Durch KENDALL erfolgte eine Modifizierung dieses Tests für den Fall identischer Zeitreihenwerte, der bei der Größe Sonnenscheindauer eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt. In der vorliegenden Arbeit wurde daher die modifizierte Testgröße  $Q$  nach (3.8) verwendet, in der  $b_i$  die Anzahl identischer Zeitreihenwerte  $x_i$  ist.





$$Q = \frac{S}{\left[ \frac{1}{18} \left( n(n-1)(2n+5) - \sum_1 b_i(b_i-1)(2b_i+5) \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.8)$$

Die Testgröße  $Q$  ist standardnormalverteilt und kann mit Hilfe der tabellierten Normalverteilung [4] zur Signifikanzprüfung eingesetzt werden. Die Signifikanz  $S$  wird in % angegeben. Der Signifikanzwert  $S = 80\%$  wurde im Rahmen von KLIWA als unterster Schwellenwert für signifikante Zeitreihenänderungen festgelegt. Wird durch den Test ein Wert  $S < 80\%$  bestimmt, liegt kein signifikanter Trend vor bzw. ein Trend gilt als statistisch nicht nachweisbar. Bei Signifikanzbefunden von  $S > 80\%$  erfolgen in den Ergebnisdarstellungen graduelle Abstufungen mit Kennzeichnung von Überschreitungen der Schwellenwerte von 90 %, 95 %, 99 % und 99,9 %.

### 3.2 Meteorologische Prüfung der Messreihen der Sonnenscheindauer

Als Prüfgröße wird der in den einzelnen Monaten der Zeitreihe aufgetretene höchste Tageswert der relativen Sonnenscheindauer  $\max(s/s_0)$  verwendet. Der Bezug der gemessenen Sonnenscheindauer  $s$  auf den astronomisch möglichen Wert  $s_0$  eliminiert den Einfluss des von geografischer Breite und vom Kalendertag abhängigen Sonnenstandes auf die Messwerte der Sonnenscheindauer. Damit werden die Messwerte der in unterschiedlicher geografischer Breite gelegenen Stationen sowie die Sonnenscheindauern der einzelnen Monate miteinander vergleichbar.

Die Prüfmethode wird im Folgenden am Beispiel von zwei Stationen – Hof-Hohensaas und Regensburg – erläutert. Abbildung 3.1 zeigt die Zeitreihen der maximalen relativen Sonnenscheindauern dieser Stationen, jeweils für die Monate Januar und Juli sowie für das Jahr (Mittel aus den  $\max(s/s_0)$  aller 12 Monate). Bei Witterungsbedingungen mit ganztägig wolkenlosem Himmel und geringer Trübung, wie sie sich insbesondere bei Zufuhr frischer Polarluft einstellen, wird die tägliche gemessene Sonnenscheindauer wesentlich durch den Horizont der Messstelle bestimmt, und es ergeben sich für den jeweiligen Stationsstandort und die einzelnen Monate charakteristische Höchstwerte von  $\max(s/s_0)$ . Diese Höchstwerte sind in der Regel im Winter geringer als im Sommer (vgl. Januar- und Juli-Werte in Abbildung 3.1), weil bei der geringeren Höhe der winterlichen Sonnenbahn witterungsbedingte Einflüsse und die Horizontüberhöhungen stärker wirksam sind. Die an einem Standort maximal erfassbaren Werte der relativen Sonnenscheindauer sind in der Regel auch bei ganztägig wolkenlosem Himmel und klarer Luft geringer als 100 %, weil die Registrierung durch den Sonnenscheinautographen ab einer bestimmten Sonnenhöhe über dem freien Horizont einsetzt bzw. abends

aussetzt. Der gerätebedingte Grenzwinkel der Registrierung liegt bei klarer Luft etwa bei einer Sonnenhöhe von  $4^\circ$  [6] und steigt mit zunehmender Trübung auf Werte an, die in der Größenordnung natürlicher Horizontabschirmungen der Messstelle liegen können.

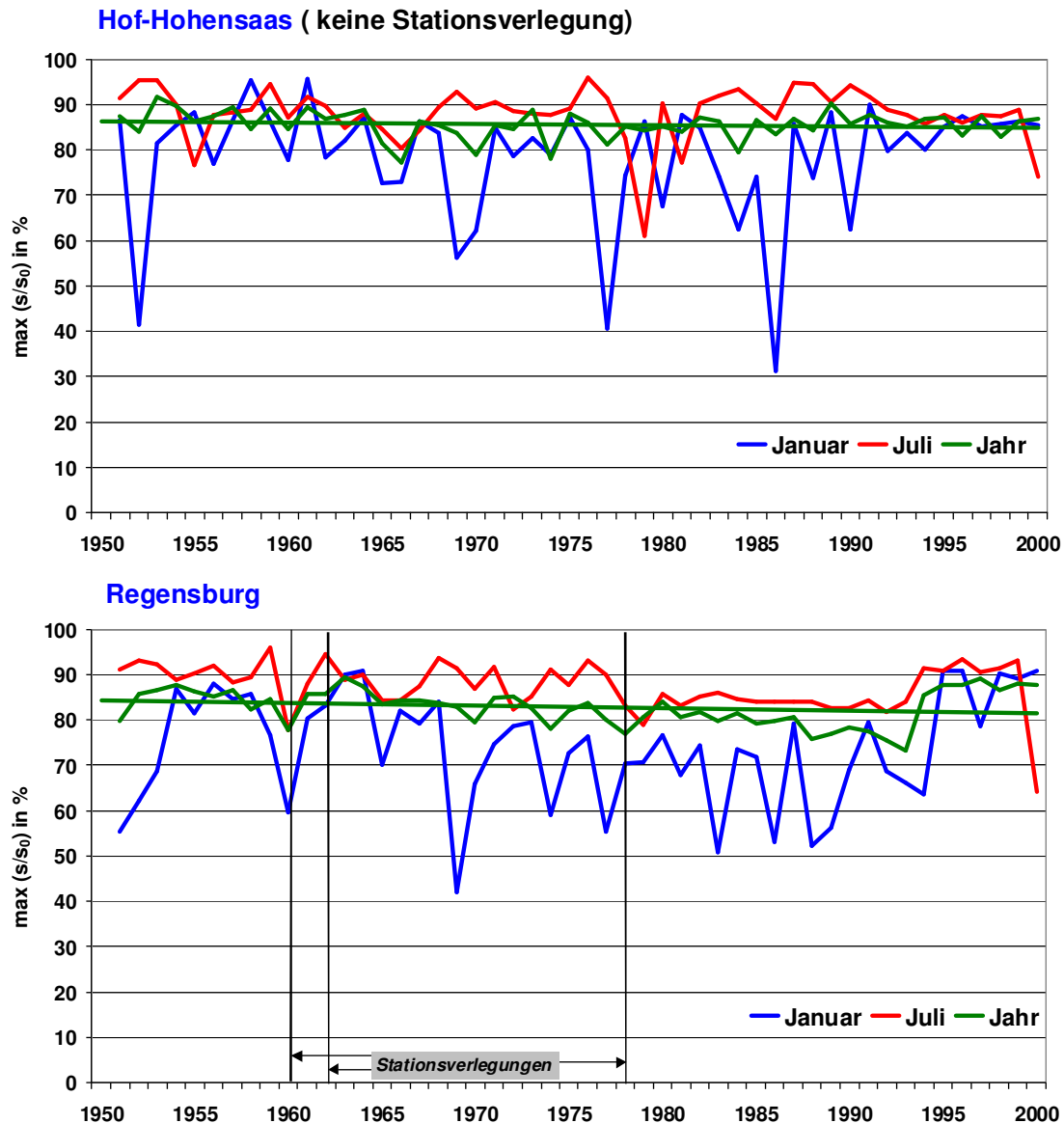


Abbildung 3.1: Zeitreihen der maximalen relativen Sonnenscheindauer  $\max(s/s_0)$  in %, 1951/2000, Stationen Hof-Hohensaas und Regensburg

Die Zeitreihen von  $\max(s/s_0)$  zeigen starke Schwankungen, weil der Witterungsverlauf nicht in jedem Monat mindestens einen Tag mit ganztägig wolkenlosem Himmel erbringt. Besonders die Herbst- und Wintermonate weisen öfter anhaltend trübe Witterung ohne einen sonnenscheinreichen Tag auf; auch in Sommermonaten können solche Witterungsbedingungen auftreten (s. in Abbildung 3.1: Juli 2000 und Juli 1979 (nur bei Hof)). Der monatliche Höchstwert der relativen Sonnenscheindauer ist in solchen Fällen sehr gering. Bei einer langen Stations-



reihe ohne Veränderungen der Messbedingungen sollten die Zeitreihen der monatlichen und insbesondere der jährlichen Werte von  $\max(s/s_0)$  Schwankungen um einen festen Mittelwert aufweisen – hierfür steht in Abbildung 3.1 das Beispiel der Station Hof-Hohensaas. Werden zusätzlich die entsprechenden Auswertungen von benachbarten Stationen zum Vergleich herangezogen, kann beurteilt werden, ob die positiven bzw. negativen Abweichungen auf eine besonders strahlungsreiche bzw. -arme Witterung in den betreffenden Monaten und Jahren zurückzuführen sind.

Zeigen die Zeitreihen der maximalen relativen Sonnenscheindauern trend- und sprunghafte Änderungen, die an den benachbarten Stationen nicht zu verzeichnen sind, ist das als Hinweis auf Veränderungen der Messbedingungen zu werten. Am Beispiel der Stationsreihe von Regensburg werden die Einflüsse der Stationsverlegungen auf die gemessenen Höchstwerte der Sonnenscheindauer deutlich erkennbar. Regensburg wurde wegen der mehrfachen Stationsverlegungen und der damit erforderlichen mehrfachen Zeitreihenkorrekturen nicht in die Trenduntersuchungen einbezogen.

Die Anwendung der hier beschriebenen Prüfmethode liefert nicht in allen Fällen von Änderungen der Messbedingungen an den Stationen eindeutige Hinweise. Auch sind die Zeitpunkte der vermuteten Inhomogenitäten wegen der allgemein großen zeitlichen Variabilität anhand der Zeitreihen der maximalen relativen Sonnenscheindauer nicht eindeutig festlegbar. Zur Bewertung möglicher, nicht klimatisch bedingter Inhomogenitäten in den Messreihen der Sonnenscheindauer wurden deshalb als weitere unabhängige Prüfverfahren die Bruchpunktanalyse nach PETTIT (s. Abschnitt 3.1.1) und die Trendanalyse (Abschnitt 3.1.2) eingesetzt und Informationen zur Stationsgeschichte einbezogen.

### **3.3 Ergänzung und Korrektur (Homogenisierung) der Stationsreihen der Sonnenscheindauer**

#### Zeitreihenergänzungen

Im 50-jährigen Untersuchungszeitraum 1951/2000 liegen von den Stationen

- Aulendorf-Spiegler (bis 1992),
- Coburg (ab 1955),
- Nürnberg (ab 1956),
- Weihenstephan (bis 1995)

leicht verkürzte Messreihen der Sonnenscheindauer vor. Weil nach der Bruchpunktanalyse und der Zeitreihenuntersuchung der maximalen relativen Sonnenscheindauern eine ausreichende Homogenität der verfügbaren Messreihen anzunehmen war, erfolgte für die genannten Stationen eine Zeitreihenergänzung zur Reihe 1951/2000. Die Ergänzung wurde durch Regressionsrechnungen zu den Messwerten der Sonnenscheindauer benachbarter Stationen mit monatlicher Differenzierung der Koeffizienten vorgenommen. Die Prüfung der ergänzten Reihen ergab keine Hinweise auf Inhomogenität infolge der Ergänzung.

### Zeitreihenkorrektur

Die Sonnenscheindauer weist bei zeitlicher Auflösung nach Monats- und Jahreswerten geringe regionale Unterschiede, bzw. nur lokalklimatisch typische Unterschiede z.B. für Tal- und Höhenlagen auf. Das Zeitreihenverhalten der Sonnenscheindauer benachbarter Stationen müsste demnach große Ähnlichkeit aufweisen. Zeigt eine Stationsreihe sprung- oder trendhafte Abweichungen vom Zeitreihenverhalten der Sonnenscheindauer mehrerer benachbarter Stationen, ist das als Hinweis auf eine mögliche Veränderung der Messbedingungen zu werten. Die Befunde über solche künstlichen und zu korrigierenden Einflüsse auf die Messwerte sind aufgrund der zeitlichen Variabilität der Sonnenscheindauer und der unterschiedlichen Auswirkungen der Fehlerquellen häufig nicht eindeutig. Informationen aus der Stationsdokumentation sind für eine Entscheidungsfindung oft nicht ausreichend. Korrekturen wurden deshalb so wenig wie unbedingt nötig vorgenommen. Sie wurden auf Fälle beschränkt, bei denen von den oben beschriebenen Verfahren der Zeitreihenprüfung der Sonnenscheindauermessungen (Monats- und Jahreswerte):

Bruchpunktanalyse

Trendanalyse

Maximalwerte der relativen Sonnenscheindauer

wenigstens zwei Verfahren deutliche Hinweise auf Änderungen der Messbedingungen liefern, die anhand der Stationsdokumentationen nachvollziehbar erscheinen.

Folgende Stationsreihen wurden korrigiert:

Station	Zeitraum / (vermutliche) Ursache	Bezugsstation für die Korrektur
Karlsruhe	ab 1977/ Stationsverlegung	Mannheim und Freiburg i. Br.
Stötten	ab 1983/Messplatzverlegung wegen Beschattung durch Turm	Öhringen
Bamberg	ab 1995 / Messgerät	Nürnberg
Wörnitz-Bottenw.	1951-55 / Stationsverlegung ?	Weißenburg /Bay.
Metten	ab 1982 / Beobachterwechsel	Weiden
München	ab 1997 /Stationsverlegung	Weihenstephan



Dass bei den übrigen Stationen keine Korrekturen durchgeführt wurden, stellt keine Aussage über die Homogenität ihrer verfügbaren Messreihen dar. Bei einer Zeitreihenkorrektur ist zu bedenken, dass die als Bezug herangezogene Station ebenfalls eine nicht meteorologisch bedingte Inhomogenität (z.B. unterhalb von Signifikanz) aufweisen kann, und dass die Regression zwischen der zu korrigierenden und der Bezugszeitreihe eine bestimmte Reststreuung aufweist. Beim Regressionsverfahren muss weiterhin beachtet werden, dass die rechnerisch formale Anpassung der Sonnenscheindauerwerte astronomisch sinnvolle Ergebnisse erbringt.

### 3.4 Berechnungsverfahren der Globalstrahlung

Zur Abschätzung der Globalstrahlung  $R_G$  aus Messwerten der Sonnenscheindauer  $s$  hat der Ångström-Ansatz weltweite Verbreitung gefunden. Gebräuchlich sind hauptsächlich die in (3.9-a) bis (3.9-c) angegebenen Formeltypen einer linearen Beziehung mit konstantem bzw. im Jahresverlauf variablem absoluten Koeffizienten  $a$  und polynomiale Beziehungen:

$$R_G = R_0 \left( a_{\text{const.}} + b \frac{s}{s_0} \right) \quad (3.9-a)$$

$$R_G = R_0 \left( a + b \frac{s}{s_0} \right) \quad (3.9-b)$$

$$R_G = R_0 \left( a + \sum_n b_n \left( \frac{s}{s_0} \right)^n \right) \quad (3.9-c).$$

Darin sind  $R_0$  die extraterrestrische Strahlung in  $\text{J/cm}^2 \text{ d}$  und  $s_0$  die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer in h. Beide Größen sind abhängig von der geografischen Breite des betrachteten Standortes und vom Datum (in fortlaufender Tageszählung 1...365/366), sie lassen sich aus diesen Größen berechnen oder entsprechenden Tabellenwerken entnehmen (beispielsweise in [1]). Anstatt der Bezugsgröße extraterrestrische Strahlung  $R_0$  ist weiterhin (bei gleichen Formeltypen) die Verwendung der so genannten Rayleigh-Strahlung  $R_R$  (Strahlung bei idealer, trübungsfreier Atmosphäre) gebräuchlich, bei der neben geografischer Breite und Jahrestag Abhängigkeiten von der Definition der atmosphärischen Trübung zu beachten sind.

Für das vorliegende KLIWA-Teilprojekt wurden auf der Grundlage der aus dem süddeutschen Untersuchungsraum verfügbaren Messreihen von Globalstrahlung und Sonnenscheindauer (s. Tabelle 2.2) die Koeffizienten für die Formeltypen (3.9-a) bis (3.9-c) für Tageswerte der

Globalstrahlung abgeleitet. Die Abbildung 3.2 zeigt am Beispiel der Stationsstandorte Mannheim und Weihenstephan einen Vergleich der Anpassung der betrachteten Formelansätze.

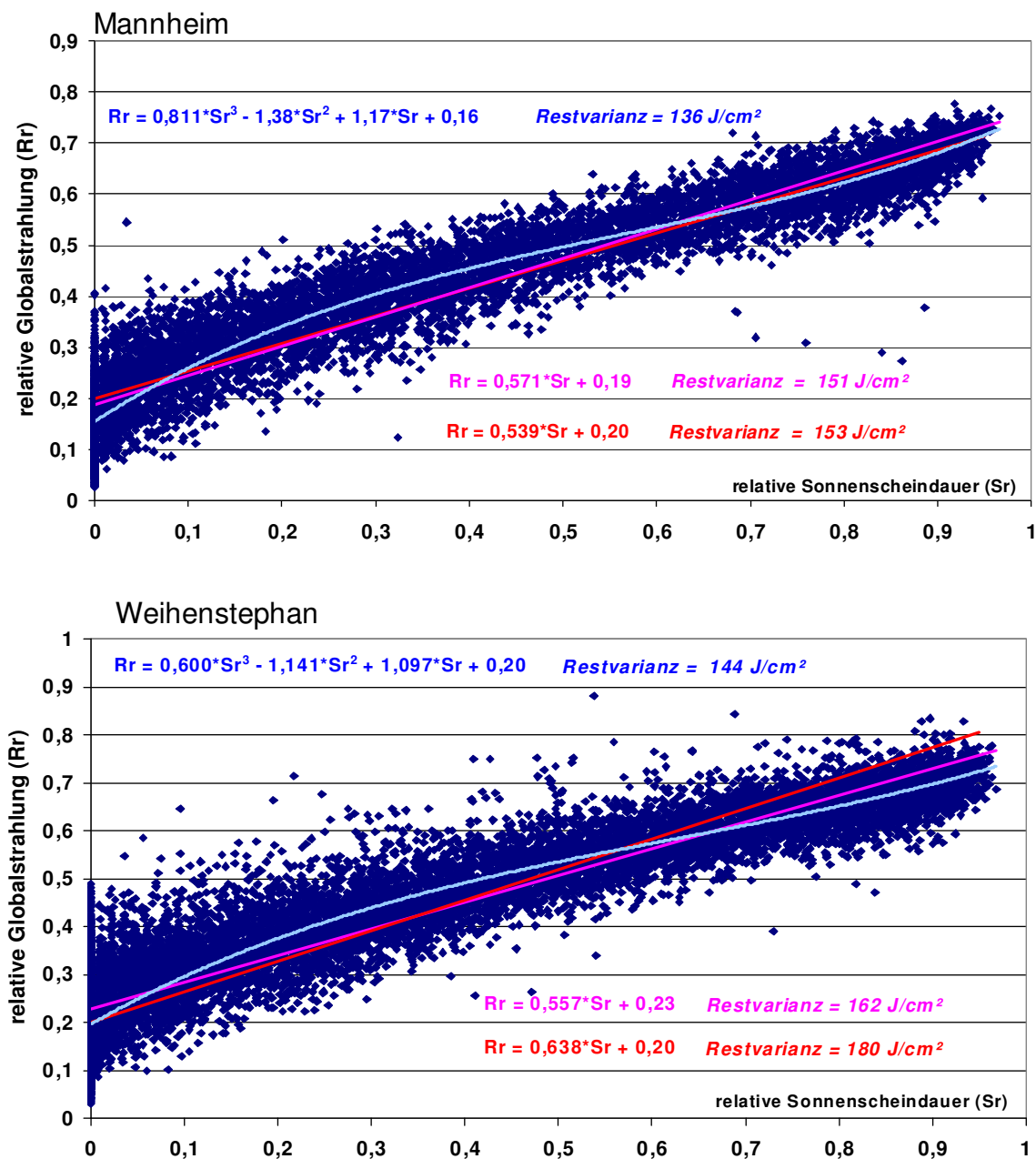


Abbildung 3.2: Vergleich der Anpassung von linearen und polynominalen Ångström-Formeln.

Tageswerte der relativen Globalstrahlung ( $Rr = R_G / R_0$ )

in Abhängigkeit von der relativen Sonnenscheindauer  $Sr = s / s_0$

Ein Polynom-Ansatz (3.9-c) mit  $n=3$  liefert bei allen Stationen eine bessere Schätzung der Globalstrahlung aus der Sonnenscheindauer als die linearen und die quadratischen Ansätze. Bei den linearen Formeln bringt die Verwendung eines monatlich variablen Koeffizienten  $a$  gegenüber dem ganzjährig konstanten Wert 0,20 keine wesentliche Verbesserung der Genau-



igkeit, da  $a$  nur eine geringe Veränderlichkeit im Jahresverlauf aufweist. Der Koeffizient  $b$  der linearen Ångström-Formel zeigt hingegen sowohl einen deutlichen Jahresgang als auch regionale Unterschiede. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit mit anderen hydrometeorologischen Anwendungen des Ångström-Ansatzes wird im vorliegenden KLIWA-Teilprojekt zur Erstellung der Zeitreihen der Globalstrahlung der lineare Ansatz (3.9-a) mit konstantem Koeffizienten  $a = 0,20$  verwendet. Der Koeffizient  $b$  wird monatlich variabel angesetzt. Für die Berechnung der Zeitreihen der betrachteten Stationsstandorte wird dabei das arithmetische Mittel der Koeffizienten  $b$  von den jeweils nächstgelegenen fünf Globalstrahlungsstationen verwendet. Damit wird die regionale Variabilität dieses Koeffizienten berücksichtigt. Die Berechnung der Globalstrahlungsreihen Hohenpeißenberg, Zugspitze und Wendelstein erfolgte auf der Basis der für die Station Hohenpeißenberg abgeleiteten Koeffizienten  $b$ .

Aus Tabelle 3.1 werden die regionalen Unterschiede des Koeffizienten  $b$  in Deutschland ersichtlich. Während sich die für die baden-württembergischen Globalstrahlungsstationen abgeleiteten Koeffizientenwerte recht gut an die Mittelwerte für ganz Deutschland anpassen, sind die Werte der bayerischen Stationen ganzjährig, insbesondere im Winterhalbjahr deutlich höher. In der Mittelwertbildung für die bayerischen Stationen wurden dabei die hohen  $b$ -Koeffizienten der Station Hohenpeißenberg aufgrund ihrer für die Fläche eventuell nur bedingten klimatischen Repräsentativität nicht berücksichtigt. Im Vergleich zu den im DVWK-Regelwerk [1] mit  $a = 0,19$  und  $b = 0,55$  empfohlenen, deutschlandweit verwendbaren Ångström-Koeffizienten zeigt sich, dass bei regionaler Differenzierung der Koeffizient  $a$  nur wenig variiert, während bei den Koeffizienten  $b$  deutliche Unterschiede zu verzeichnen sind. In Bayern sind die Koeffizienten  $b$  größer als im Mittel über ganz Deutschland. Die von KASTEN, F. u.a. (zit. nach [6]) angegebenen Koeffizienten weisen ebenfalls auf eine höhere Globalstrahlung im Verhältnis zur Sonnenscheindauer in Bayern hin.

<b>a = 0,20</b>	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jahr
Deutschl. (42 Stat.)	0,50	0,57	0,59	0,59	0,59	0,61	0,59	0,57	0,57	0,53	0,46	0,41	0,56
BW *	0,51	0,55	0,58	0,60	0,59	0,60	0,57	0,56	0,56	0,53	0,48	0,44	0,56
BY *	0,61	0,63	0,62	0,61	0,61	0,62	0,59	0,58	0,59	0,56	0,50	0,51	0,59
Hohenpeißenberg	0,73	0,74	0,73	0,67	0,63	0,63	0,61	0,60	0,62	0,63	0,65	0,70	0,66

\* Stationen nach Tabelle 2.2, bayerische Stationen ohne Hohenpeißenberg

Tabelle 3.1: Regionale Koeffizienten der linearen Ångström-Formel (3.9-a)



#### 4 Mittlere regionale Verteilung der Sonnenscheindauer in Baden-Württemberg und Bayern

Abbildung 4.1 zeigt einen Kartenausschnitt der mittleren jährlichen Sonnenscheindauer für den Zeitraum 1961/1990 in Süddeutschland aus dem Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland [7]. Im Föhn beeinflussten Raum südlich der Donau, im Bayerischen Wald und großen Teilen des Neckargebietes sind nach dieser Karte durchschnittlich 1600 bis 1700 Stunden Sonnenschein pro Jahr – entsprechend 4,4 bis 4,6 Stunden pro Tag – zu verzeichnen, lokal werden diese Werte noch übertroffen. Der Staubebereich süd- und nordwestlich des Schwarzwaldes, der Odenwald und der Norden Bayerns bis zur Donau (das gesamte Main-/Elbe-Gebiet, Gebiete von Naab und Wörnitz /Altmühl) weisen großräumig geringere Sonnenscheindauer von 1500 bis 1600 Stunden im Jahr (4,1 bis 4,4 Stunden/Tag) auf. Die im Mittel sonnenscheinärmsten Gebiete in Bayern mit Sonnenscheinstunden gebietsweise noch unter 1400 Stunden im Jahr bzw. 3,8 Stunden/Tag sind Oberfranken (insbesondere Selb–Wunsiedler Hochfläche), Schwäbische Alb und der Raum um Fränkischer Saale und mittlerem Main.

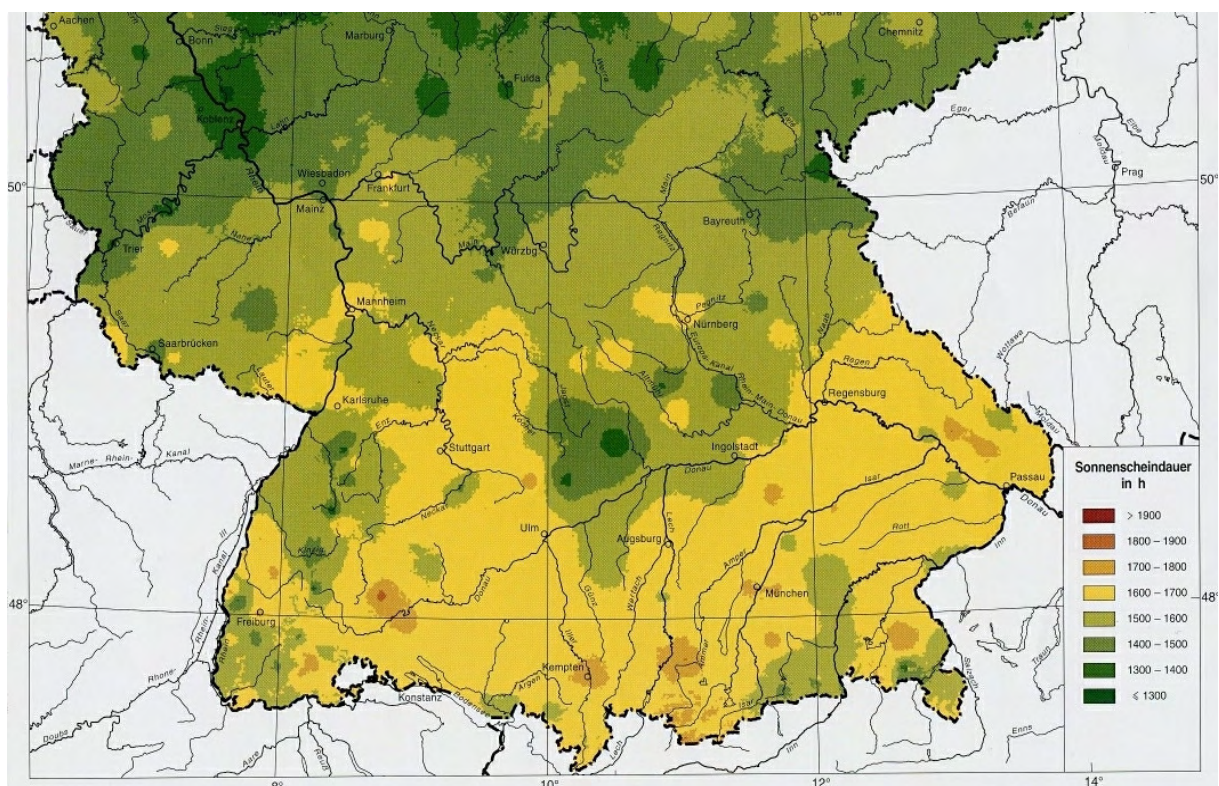


Abbildung 4.1: Regionale Verteilung der mittleren jährlichen Sonnenscheindauer in Süddeutschland, 1961/1990. (Ausschnitt aus der Karte 3.13 des Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland [7])





Die für das vorliegende KLIWA-Teilprojekt berechneten Stations-bezogenen Sonnenscheindauern passen sich in die regionale Verteilung der Karte des Klimaatlasses ein. In Tabelle 4.1-a werden die mittleren täglichen Sonnenscheinstunden der Stationen für die Monate und das Jahr angegeben; in Tabelle 4.1-b stehen die entsprechenden mittleren monatlichen und jährlichen Summen der Sonnenscheindauer. Beide Tabellen enthalten zum Vergleich die monatlichen/jährlichen Mittelwerte der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer für 49°nördlicher Breite (ungefähr Karlsruhe – Weißenburg/ Bay.); die Abweichungen der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer im Süden und Norden des Untersuchungsraumes betragen im Jahresverlauf bis etwa  $\pm 0,2$  Stunden pro Tag.

Bei den Stationen in Baden-Württemberg und in Bayern südlich der Donau liegen die jährlichen Mittelwerte der täglichen Sonnenscheindauer je nach Station bei 4,5 h bis 4,8 h, die mittleren jährlichen Summen bewegen sich im Bereich von etwa 1630 h bis 1750 h. Vergleichsweise wenig Sonnenschein wird an der Station Oberstdorf aufgrund ihrer Tallage und des dadurch eingeschränkten Horizontes verzeichnet. Die Sonnenscheindauer dieser Station ist daher nicht für einen quantitativen Vergleich mit den Werten der anderen Stationen verwendbar, die eine wesentlich geringere Horizonteinschränkung haben. Hinsichtlich des qualitativen Zeitreihenverhaltens besteht jedoch aufgrund der Homogenität der Reihe keine Beschränkung der Vergleichbarkeit. Die höchste Anzahl von Stunden mit Sonnenschein weist die Station Zugspitze mit durchschnittlich 5 h täglich und mehr als 1800 h im Jahr auf. Der Hohenpeißenberg ist nicht nur hinsichtlich der Lufttemperaturen sondern auch der Sonnenscheinstunden (mittlerer Jahreswert  $> 1800$  h) klimatisch begünstigt. Die Stationen im Norden und Nordosten Bayerns (außer Nürnberg) verzeichnen im Mittel über das Jahr tägliche Sonnenscheindauern von 4,2 h bis 4,5 h, die mittleren jährlichen Summen der Sonnenscheindauer verbleiben dort an den meisten Stationen unter 1600 h.

In der 50-jährigen Untersuchungsperiode liegt die witterungsbedingte Variabilität der jährlichen Sonnenscheindauer bei rd. 9 % ihres Mittelwertes. Die geringsten Jahreswerte der mittleren täglichen Sonnenscheindauer betragen je nach Station 3,4 h bis 4,2 h, die höchsten 5,3 h bis 6,2 h. Der durch den Witterungsverlauf hervorgerufene zeitliche Schwankungsbereich der Sonnenscheindauerstunden an den Stationen ist damit größer als der regionale Schwankungsbereich im betrachteten süddeutschen Raum von Baden-Württemberg und Bayern.

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Öhringen	276	1,8	2,9	4,2	5,6	7,0	7,2	7,6	7,1	5,8	3,9	2,0	1,5	4,7
Mannheim	96	1,6	2,8	4,2	5,9	7,1	7,2	7,5	7,1	5,6	3,5	1,8	1,4	4,6
Karlsruhe	112	1,6	2,6	4,1	5,5	6,9	7,2	7,7	7,2	5,7	3,7	1,8	1,4	4,6
Freiburg i. Br.	269	1,8	2,9	4,2	5,5	6,7	7,4	8,0	7,4	5,9	3,9	2,2	1,7	4,8
Ulm	567	1,6	2,7	4,1	5,4	6,6	7,0	7,7	7,0	5,5	3,3	1,6	1,3	4,5
Aulendorf	560	1,6	2,8	4,1	5,3	6,6	7,0	7,6	7,0	5,5	3,4	1,8	1,3	4,5
Stötten	734	1,8	2,7	3,8	5,0	6,4	6,7	7,5	6,7	5,5	3,9	2,0	1,5	4,5
Freudenstadt	797	2,1	2,9	4,0	5,2	6,3	6,7	7,5	6,9	5,7	4,1	2,4	1,8	4,6
Feldberg/Schw.	1486	2,7	3,3	3,8	4,7	5,5	5,9	6,7	6,3	5,2	4,5	3,0	2,7	4,5
Hof	567	1,5	2,7	3,8	5,3	6,6	6,6	6,7	6,5	5,3	3,8	1,6	1,2	4,3
Coburg	322	1,4	2,6	3,8	5,5	6,8	6,9	7,0	6,6	5,1	3,5	1,5	1,2	4,3
Bayreuth	330	1,3	2,4	3,7	5,3	6,6	6,8	6,9	6,6	5,2	3,5	1,4	1,0	4,2
Bamberg	239	1,5	2,7	3,9	5,4	6,7	6,9	7,0	6,6	5,2	3,4	1,6	1,2	4,3
Weiden	438	1,6	2,6	3,9	5,4	6,7	6,7	6,9	6,7	5,3	3,7	1,5	1,2	4,4
Nürnberg	314	1,7	2,9	4,1	5,7	7,1	7,3	7,5	7,1	5,6	3,9	1,8	1,4	4,7
Würzburg	268	1,5	2,7	4,0	5,5	6,8	6,9	7,2	6,7	5,2	3,4	1,6	1,2	4,4
Wörnitz	464	1,4	2,6	4,0	5,5	6,8	7,0	7,5	7,1	5,7	3,8	1,7	1,2	4,5
Weißenburg	422	1,8	2,9	4,2	5,6	6,9	7,2	7,6	7,1	5,7	3,9	1,9	1,4	4,7
Kösching	417	1,5	2,7	4,1	5,6	6,9	7,2	7,6	7,1	5,6	3,5	1,6	1,2	4,6
Metten	313	1,7	2,8	4,2	5,7	7,1	7,1	7,6	7,2	5,5	3,7	1,6	1,4	4,6
Weihenstephan	470	1,9	2,9	4,3	5,5	6,8	6,9	7,5	7,0	5,7	3,8	1,9	1,4	4,6
München	527	1,9	2,8	4,1	5,3	6,5	6,7	7,3	6,9	5,6	3,9	2,0	1,4	4,6
Hohenpeißenberg	977	3,0	3,6	4,4	5,2	6,3	6,5	7,3	6,9	5,8	4,6	3,0	2,7	5,0
Oberstdorf	810	2,5	3,4	4,2	4,7	5,5	5,5	6,3	5,9	5,1	4,2	2,6	2,2	4,3
Wendelstein	1832	3,4	3,8	4,2	4,5	5,4	5,3	6,0	5,9	5,4	5,1	3,6	3,1	4,6
Zugspitze	2960	4,0	4,6	5,0	5,2	5,5	5,0	5,6	5,7	5,9	5,9	4,4	3,7	5,0
<i>astronomisch möglich in 49° n. Breite</i>		<b>8,7</b>	<b>10,2</b>	<b>11,9</b>	<b>13,7</b>	<b>15,3</b>	<b>16,2</b>	<b>15,8</b>	<b>14,4</b>	<b>12,7</b>	<b>10,8</b>	<b>9,2</b>	<b>8,2</b>	<b>12,3</b>

Tabelle 4.1-a: Mittlere Monats- und Jahreswerte der täglichen Sonnenscheindauer [in h],  
Stationen in Baden-Württemberg und Bayern, Zeitreihe 1951/2000

Im mittleren Jahresgang ist an allen bearbeiteten Stationen (außer Zugspitze) der Juli der sonnenscheinreichste Monat. Die mittlere tägliche Sonnenscheindauer im Juli liegt bei den meisten Stationen bei etwa 7 bis 8 Stunden, entsprechend ca. 45 % bis 50 % der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer. An einigen Stationen im Nordosten Bayerns wird der Mittelwert von 7 Stunden täglicher Sonnenscheindauer im Juli leicht unterschritten. Im Hinblick auf den astronomisch möglichen Wert ist in dieser Region der August noch sonnenscheinreicher als der Juli: die relative Sonnenscheindauer  $s/s_0$  ist z.B. in Hof und Weiden im August im Mittel etwas größer als im Juli. Die hoch gelegenen Bergstationen – der Feldberg im Schwarzwald, Wendelstein und Zugspitze – weisen im Juli eine im Mittel um etwa ein bis zwei Stunden geringere tägliche Sonnenscheindauer auf als die tiefer gelegenen Regionen.



Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Öhringen	276	56	82	130	170	216	215	236	221	173	122	59	47	1727
Mannheim	96	50	80	130	176	220	215	234	219	167	109	54	42	1696
Karlsruhe	112	51	74	126	165	214	216	240	223	172	114	54	45	1693
Freiburg i. Br.	269	56	82	131	165	207	221	248	231	176	120	67	52	1756
Ulm	567	50	76	126	163	206	211	238	217	164	101	49	41	1641
Aulendorf	560	49	79	127	159	204	209	236	217	165	105	54	40	1644
Stötten	734	55	75	118	150	198	202	231	207	166	120	61	47	1630
Freudenstadt	797	64	83	123	156	196	200	231	214	172	128	72	56	1693
Feldberg/Schw.	1486	85	94	118	140	172	176	208	194	156	139	89	83	1653
Hof	567	48	76	117	158	204	199	209	202	158	118	50	39	1575
Coburg	322	44	74	117	164	210	207	217	205	154	107	45	37	1578
Bayreuth	330	41	69	114	158	205	204	215	203	155	110	43	33	1550
Bamberg	239	47	77	120	161	209	206	217	204	156	105	47	38	1586
Weiden	438	48	74	121	162	207	201	215	209	158	116	46	38	1594
Nürnberg	314	53	81	128	170	219	220	233	220	168	120	54	42	1709
Würzburg	268	47	77	123	166	211	208	224	208	157	105	49	38	1613
Wörnitz	464	45	74	124	165	211	210	232	220	171	118	52	36	1657
Weißenburg	422	56	82	130	167	214	215	234	221	171	122	57	44	1712
Kösching	417	47	76	128	168	215	217	237	221	168	108	48	37	1669
Metten	313	53	79	130	170	219	213	235	224	166	115	49	43	1695
Weihenstephan	470	59	82	132	164	210	208	232	217	170	119	58	45	1696
München	527	58	80	128	159	202	202	228	213	169	120	60	44	1662
Hohenpeißenberg	977	93	101	137	157	194	196	225	213	175	143	91	83	1809
Oberstdorf	810	78	95	129	140	171	166	195	183	154	131	78	68	1588
Wendelstein	1832	106	107	131	135	168	158	186	184	161	158	107	96	1695
Zugspitze	2960	123	130	154	155	169	149	173	178	178	182	131	116	1839
<i>astronomisch möglich in 49° n. Breite</i>		<b>270</b>	<b>288</b>	<b>369</b>	<b>411</b>	<b>474</b>	<b>486</b>	<b>490</b>	<b>446</b>	<b>381</b>	<b>335</b>	<b>276</b>	<b>254</b>	<b>4480</b>

Tabelle 4.1-b: Mittlere monatliche und jährliche Summen der Sonnenscheindauer [in h],  
Stationen in Baden-Württemberg und Bayern, Zeitreihe 1951/2000

Das innerjährliche Minimum der Sonnenscheindauer fällt im Mittel auf den Dezember und die mittleren Sonnenscheindauern von November und Januar unterscheiden sich nur wenig von den Dezemberwerten. Mit Ausnahme der hohen Bergstationen und dem Hohenpeißenberg liegen die Stationswerte der mittleren täglichen Sonnenscheindauer in diesem Jahresabschnitt verbreitet noch unter 1,5 Stunden. Dabei ist im regionalen Vergleich der Nordosten Bayerns am sonnenscheinärmsten. Die geringe Sonnenscheindauer des Jahresabschnittes November bis Januar ist sowohl astronomisch (Tageslänge) als auch durch die Witterung (hoher Bewölkungsgrad) bedingt. Die Bergstationen sind in diesen Monaten mit durchschnittlich 3 bis 4 Stunden Sonnenschein je Tag (auf der Zugspitze im November sogar mehr als 4 Stunden) erheblich sonnenscheinreicher.

Im mittleren Jahrgang zeigt sich eine vergleichbare regionale Verteilung der Sonnenscheindauer wie bei den Jahresmittelwerten. In Baden-Württemberg ist Freiburg i. Breisgau nahezu ganzjährig die sonnenscheinreichste Station; der Nordosten Bayerns zeichnet sich in allen Monatsmittelwerten gegenüber den anderen bayerischen Stationen mit geringerer Sonnenscheindauer aus. Neben diesen regionalen Unterschieden ist im gesamten süddeutschen Untersuchungsraum eine markante, jahreszeitlich unterschiedliche Änderung der Sonnenscheindauer mit zunehmender Höhenlage der Stationen zu verzeichnen. Im Sommer nimmt die Sonnenscheindauer mit zunehmender Höhenlage der Stationen ab, im Herbst und besonders im Winter sind die hohen Lagen im Mittel sonnenscheinreicher als die tiefer gelegenen Stationen. Aufgrund der bei etwa 1000 m anzunehmenden Untergrenze der sommerlichen Quellbewölkung ist die Sonnenscheindauer an den hoch gelegenen Bergstationen in den Sommermonaten deutlich geringer als in den tiefer gelegenen Regionen. Erkennbar wird dieser Bewölkungseffekt schon ab einer Stationshöhe von 700 m ü. NN (s. Stationen Stötten, Freudenstadt). Der Feldberg im Schwarzwald weist in den Sommermonaten Juni bis August im Mittel eine um rd. 1 bis 1,5 Stunden geringere tägliche Sonnenscheindauer auf als beispielsweise Freiburg i.Br. Die Abnahme der täglichen Sonnenscheindauern zwischen Stationen des Alpenvorlandes bis zur Zugspitze beträgt in diesem Jahresabschnitt im Mittel bis zu zwei Stunden.

Bei der im Herbst und Winter typischen und häufig länger anhaltenden Witterung mit Nebel- und Hochnebeldecken liegen die hohen Bergstationen über dem Wolkenniveau, während in den tiefer gelegenen Regionen verbreitet keine oder nur wenige Sonnenscheinstunden zu verzeichnen sind. Bei der Zugspitze liegt das innerjährliche Maximum der Sonnenscheindauer – absolut und relativ (d.h. in Bezug zur astronomisch möglichen Dauer) – im Oktober. Dass die Station Zugspitze den höchsten Jahresmittelwert der täglichen Sonnenscheindauer in Süddeutschland aufweist, ist insbesondere auf die hohe Sonnenscheindauer im Herbst und Winter (sowie auf den freien Horizont einer Gipfelstation) zurückzuführen. Die mittlere Jahreschwankung der Sonnenscheindauer ist bei den Bergstationen geringer als in den tiefer gelegenen Regionen, die höhere Sommer- und geringere Winterwerte als die Bergstationen aufweisen.



## 5 Zeitreihenverhalten der Sonnenscheindauer in Baden-Württemberg und Bayern

### 5.1 Zeitreihenverhalten und Trends der Jahresmittelwerte (Zeitreihe 1951/2000)

Die Abbildung 5.1 zeigt am Beispiel von 6 Stationen (darunter zwei Gipfelstationen) den zeitlichen Verlauf des Jahresmittels der täglichen Sonnenscheindauer im Zeitraum 1951 bis 2000. Die Graphiken enthalten weiterhin die geglättete Zeitreihe (Gauß-Filter [4] mit  $T = 10$  Jahre) und die Trendlinie. Aus den Stationsreihen der Sonnenscheindauer ist abzuleiten, dass im gesamten süddeutschen Untersuchungsraum von einem grundsätzlich ähnlichen Zeitreihenverhalten auszugehen ist. Dabei zeigen sich regionale Unterschiede, die durch die geographische Lage und die Höhenlage bedingt sind.

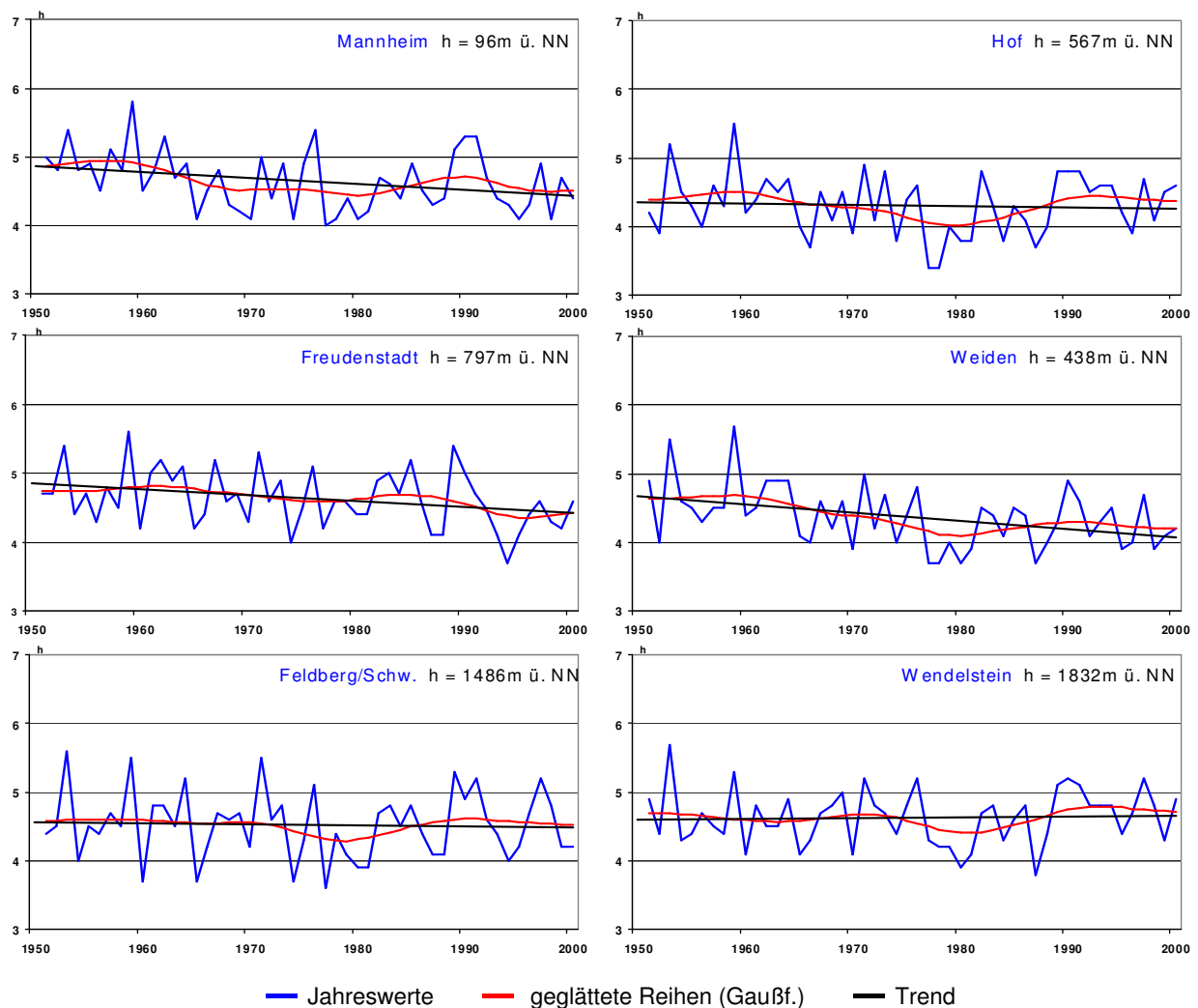


Abbildung 5.1: Jahreswertreihen der mittleren täglichen Sonnenscheindauer [in h],  
1951/2000, ausgewählte Stationen



Generell lässt sich feststellen, dass der Zeitreihenverlauf in 1951/2000 von hohen jährlichen Sonnenscheindauern in den fünfziger Jahren sowie in den Jahren ab 1990 geprägt wird, wobei die hohen Werte der fünfziger Jahre im letzten Dezennium nicht wieder erreicht werden. Zwischenzeitlich, von 1960 bis zum Ende des achtziger Dezenniums trat eine recht lang anhaltende Phase mit überwiegend unterdurchschnittlicher jährlicher Sonnenscheindauer auf. Nach einer Reihe von Studien, über die z.B. bei LIEPERT et al. [8] und WILD et al. [9] berichtet wird, ist in diesem Zeitraum weltweit ein Rückgang der solaren Einstrahlung zu verzeichnen, der von den Autoren auf zunehmende Bewölkung, Luftfeuchte und Aerosolkonzentration zurückgeführt wird. Zu entsprechenden Ergebnissen für den süddeutschen Raum kommen TREPTE & WINKLER [10] aufgrund umfassender Untersuchungen anhand der Messreihen vom Observatorium Hohenpeißenberg.

In den fünfziger Jahren sind mit 1959 und 1953 zwei Jahre zu verzeichnen, die im gesamten Untersuchungsraum Baden-Württemberg und Bayern äußerst sonnenscheinreich waren. Insbesondere die hohe Anzahl von Sonnenscheinstunden des Jahres 1959 wird in den folgenden Dezennien des Jahrhunderts auch in überdurchschnittlich sonnenscheinreichen Jahren nicht wieder erreicht. Bei den meisten Stationen nimmt das Jahr 1953 die zweite Position in der Rangfolge der sonnenscheinreichen Jahre in der zweiten Jahrhunderthälfte ein, überwiegend (ausgenommen die hohen Bergstationen) sogar mit deutlicher Differenz zu den Sonnenscheinstunden des nächsten Jahres in der Rangfolge. Neben diesen beiden Jahren mit extrem hoher Sonnenscheindauer ist das fünfziger Dezennium insgesamt als sonnenscheinreich einzustufen, denn selbst die sonnenscheinärmeren Jahre in diesem Zeitraum (1954 bis 1956) weisen stationsweise eine erheblich höhere Stundenanzahl mit Sonnenschein auf als die sonnenscheinarmen Jahre im nachfolgenden Zeitreihenabschnitt ab 1960. Infolge der Häufung hoher Extrem- und Mittelwerte der jährlichen Sonnenscheindauer zu Beginn der zweiten Jahrhunderthälfte ergeben sich negative Trendwerte für die gesamte 50-jährige Zeitreihe 1951/2000.

Durch die Bruchpunktanalyse nach PETTIT (s. Abschnitt 3.1.1) wird der Zeitreihenverlauf der Sonnenscheindauer in 1951/2000 entsprechend charakterisiert. Unter den 26 Stationsreihen werden an sieben Stationen (Öhringen, Mannheim; Würzburg, Wörnitz, Weißenburg, Kösching, Weihenstephan) signifikante Brüche für das Jahr 1964 ausgewiesen, an weiteren drei Stationen (Karlsruhe, Ulm, Bamberg) ergibt sich der wahrscheinlichste Bruchpunkt ebenfalls für 1964, jedoch wird keine Signifikanz erreicht. Weitere Signifikanzbefunde ergeben sich an drei Stationen für 1976 (Coburg, Weiden, Metten). Die genannten Stationen überdecken den Untersuchungsraum in einem breiten Streifen zwischen Nordwest und Südost – Stationen im Nordosten und Süden des Untersuchungsraumes weisen keine signifikanten Bruchpunkte auf.

Wird in den durch die Bruchpunkte getrennten Teilzeitreihen ein linearer Trend vorausgesetzt, zeigen die ersten Teilzeitreihen bis zum Bruchpunkt meist einen positiven Trend, teils einen negativen Trend, je nach dem, ob die erste oder die zweite Hälfte der fünfziger Jahre sonnenscheinreicher war. Die zweite Teilzeitreihe nach dem Bruchpunkt weist einen erheblich niedrigeren Mittelwert und kaum signifikante Trends auf.

An den hoch gelegenen Bergstationen Feldberg/Schw., Wendelstein (s. Abbildung 5.1) und Zugspitze unterscheidet sich das Zeitreihenverhalten der mittleren jährlichen Sonnenscheindauer für 1951 bis 2000 wesentlich von dem der übrigen Stationen. Das Jahr 1953 ist vor 1959 das sonnenscheinreichste Jahr der 50-jährigen Reihe, aber die Sonnenscheindauern dieser beiden Jahre übertreffen die Werte weiterer sonnenscheinreicher Jahre im nachfolgenden Zeitreihenabschnitt bis 2000 nicht erheblich. Damit geht bei den Gipfelstationen von den sonnenscheinreichen Jahren 1953 und 1959 bzw. dem Mittelwert des fünfziger Dezenniums kein vergleichbarer Einfluss auf das Trendverhalten in 1951/2000 aus wie bei den Stationen der tiefer gelegenen Regionen. Vielmehr ist bei den Gipfelstationen in der zweiten Jahrhunderthälfte ein recht gleichmäßiges Schwankungsverhalten der jährlichen Sonnenscheindauern zu verzeichnen; somit ergeben sich keine signifikanten Änderungen. Die Bruchpunktanalyse erbringt keine signifikanten Brüche.

Abbildung 5.2 gibt einen Überblick über die regionale Verteilung der Trends und ihrer Signifikanzen in der Zeitreihe 1951/2000. Die Jahresmittelwerte der täglichen Sonnenscheindauer weisen in der zweiten Jahrhunderthälfte nahezu an allen Stationen des süddeutschen Untersuchungsraumes Rückgänge, überwiegend mit signifikanten Beträgen auf. Vergleichsweise geringfügige Änderungen der Jahresmittelwerte sind im äußersten Nordosten Bayerns (Stationen Hof, Bamberg, Bayreuth) zu verzeichnen. Für Hof und Bayreuth bleiben die Abnahmen ohne Signifikanz, in Bamberg wird bei einem Rückgang der täglichen Sonnenscheindauer von 0,2 h (73 h im Jahr) die unterste Signifikanzschwelle von 80 % knapp übertroffen. Weiterhin treten im Alpenraum nicht signifikante Zeitreihenänderungen auf: An der Station Oberstdorf errechnet sich eine negative Tendenz von -0,1 h, an den Bergstationen Wendelstein und Zugspitze (vgl. auch Abbildung 5.1) ergeben sich nicht signifikante Zunahmen von 0,1 h. Bei allen anderen, über das Main- und das Donaugebiet Bayerns verteilten Stationen liegen Abnahmen der täglichen Sonnenscheindauer in der fünfzigjährigen Reihe bei 0,3 h bis 0,6 h entsprechend einem Rückgang der jährlichen Sonnenscheinstunden von 110 h bis 220 h in diesem Zeitraum. Das sind, je nach Station, etwa 7 % bis 13% der durchschnittlichen jährlichen Sonnenscheindauer. An den Stationen mit hohen Trendbeträgen (z.B. Weiden, Weißenburg) übertrifft der Trendwert die klimatisch gegebenen regionalen Unterschiede der Sonnenscheindauer von 9 % (s. Abschnitt 4).



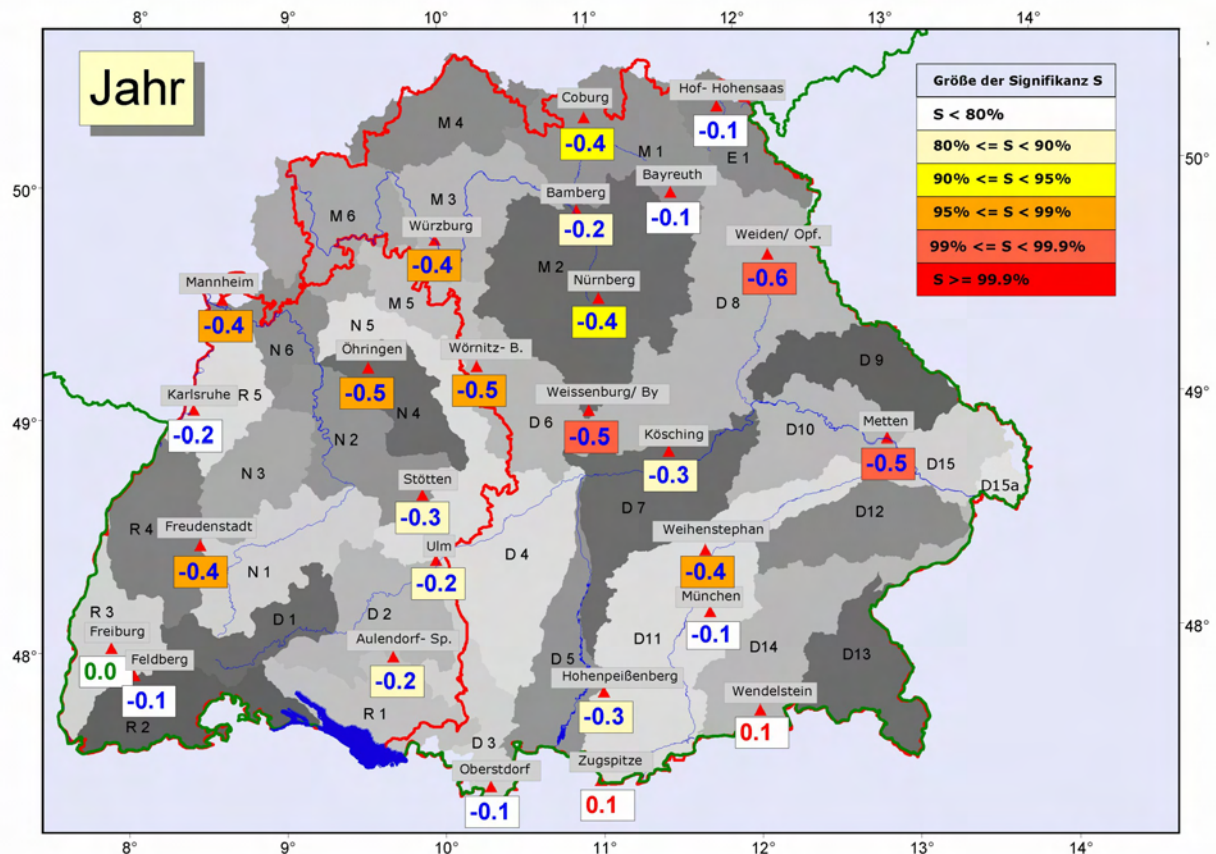


Abbildung 5.2: Trend [in h/50Jahre] des Jahresmittels der täglichen Sonnenscheindauer, Stationswerte 1951/2000

Während in Bayern markante Unterschiede zwischen dem Zeitreihenverhalten auf den hohen Bergen und den Stationen der tiefer gelegenen Regionen bestehen, zeigen die Station Feldberg/Schw. sowie auch Freiburg i.Br. eine unbedeutende, nicht signifikante Zeitreihenänderung des Jahresmittelwertes. Für dieses gleichartige Zeitreihenverhalten von Berg- und Vorlandstation findet sich keine offensichtliche Erklärung. Inhomogenität ist nach den Ergebnissen der Datenprüfung auszuschließen. Der geringe Trend bei der Station Karlsruhe ist eine Folge des Trendverhaltens der Freiburger Reihe, die neben den Daten von Mannheim für die Homogenisierung der Sonnenscheindauerreihe von Karlsruhe verwendet wurde (s. Abschnitt 3.3). Die übrigen Stationen in Baden-Württemberg weisen signifikante negative Trends des Jahresmittels der täglichen Sonnenscheindauer auf. Die stärksten Abnahmen von -0,4 h bis zu -0,5 h im täglichen Mittel, entsprechend rd. 150 h bis 180 h im Jahr und 9 % bis 11 % der mittleren jährlichen Summe, finden sich im Norden von Baden-Württemberg (Mannheim und Öhringen) sowie im Nord-Schwarzwald (Freudenstadt). Die Trends dieser Stationen überschreiten die Signifikanzschwelle von 95 %. Für die Stationen im Südosten Baden-Württembergs (Stötten, Ulm, Aulendorf) errechnen sich nur schwach signifikante Rückgänge des Jahresmittels der Sonnenscheindauer von 0,2 h und 0,3 h täglich, entsprechend 70 h bis 110 h (ca. 4 % bis 7 %) in der jährlichen Summe.



## 5.2 Zeitreihenverhalten und Trends im Jahrgang (Zeitreihe 1951/2000)

Die Übersicht der Trend- und Signifikanzwerte der Stationen in Tabelle 5.1 zeigt im gesamten Untersuchungsraum nicht nur bei den Jahreswerten, sondern auch in der innerjährlicher Verteilung von Trendvorzeichen und -stärke ein recht einheitliches Bild. Dieses Ergebnis lässt die Schlussfolgerung zu, dass trotz der bei einigen (nicht korrigierten) Stationen bestehenden Bedenken hinsichtlich homogener Messwerterfassung bzw. trotz der Unsicherheiten vorgenommener Zeitreihenergänzungen und -korrekturen das Trendverhalten der Sonnenscheindauer im Untersuchungsraum insgesamt korrekt wiedergegeben wird. Die vermutlichen Unsicherheiten bei einzelnen Stationsreihen dürften sich gegebenenfalls auf die Trendbeträge und die Höhe der Signifikanz auswirken, nicht jedoch auf die generellen Aussagen zum Trendverhalten der Sonnenscheindauer.

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Öhringen	276	0,1	0,1	-1,3	-0,8	-0,1	-0,8	-0,5	0,4	-1,1	-1,3	0,1	-0,3	-0,5
Mannheim	96	0,1	0,2	-1,3	-0,9	-0,6	-0,9	-0,5	0,6	-1,1	-0,9	0,4	0,0	-0,4
Karlsruhe	112	0,3	0,3	-1,0	-0,8	-0,4	-0,4	-0,3	0,8	-0,5	-0,8	0,5	-0,1	-0,2
Freiburg i. Br.	269	0,4	0,5	-0,6	-0,6	-0,3	0,0	-0,1	0,8	0,0	-0,7	0,5	0,0	0,0
Ulm	567	0,0	0,6	-0,8	-0,7	0,0	-0,1	-0,6	0,4	-1,1	-1,0	0,3	0,2	-0,2
Aulendorf	560	0,2	0,7	-0,7	-0,6	0,2	0,1	-0,4	0,3	-1,1	-1,0	0,0	0,2	-0,2
Stötten	734	0,2	0,3	-1,1	-0,6	0,2	-0,4	-0,2	0,7	-1,0	-1,4	0,3	-0,3	-0,3
Freudenstadt	797	0,6	0,6	-0,8	-0,8	-0,8	-0,6	-1,1	0,5	-1,0	-1,6	0,2	-0,4	-0,4
Feldberg/Schw.	1486	1,1	0,5	-0,7	-0,5	-0,1	-0,2	0,0	1,2	-0,3	-1,3	0,0	-0,7	-0,1
Hof	567	0,0	0,2	-1,0	-0,6	1,1	-0,7	-0,1	1,3	-0,7	-0,7	0,1	-0,3	-0,1
Coburg	322	0,1	0,2	-1,2	-1,1	0,2	-1,0	-0,7	0,7	-1,1	-0,9	0,0	0,1	-0,4
Bayreuth	330	0,1	-0,1	-1,2	-0,6	0,7	-0,6	0,1	1,5	-0,6	-0,7	0,1	0,0	-0,1
Bamberg	239	0,1	0,3	-1,2	-0,7	0,3	-0,6	-0,4	0,8	-0,7	-0,9	0,1	0,1	-0,2
Weiden	438	-0,4	0,1	-1,8	-1,1	0,2	-1,4	-0,6	0,7	-1,2	-1,1	-0,3	-0,2	-0,6
Nürnberg	314	0,2	0,5	-1,4	-0,9	0,1	-0,9	-0,6	0,6	-0,9	-1,1	0,3	-0,1	-0,4
Würzburg	268	0,3	0,3	-1,3	-1,1	-0,4	-1,3	-0,8	0,5	-0,8	-0,9	0,2	0,1	-0,4
Wormitz	464	0,0	0,1	-0,7	-0,8	-0,1	-0,8	-0,5	0,3	-1,0	-1,5	0,0	-0,1	-0,5
Weißenburg	422	0,0	0,2	-1,2	-0,9	0,1	-0,8	-1,0	0,0	-1,2	-1,6	-0,1	0,0	-0,5
Kösching	417	-0,2	0,6	-1,1	-0,7	0,7	-0,4	-0,7	0,5	-1,1	-1,1	0,1	0,2	-0,3
Metten	313	-0,4	0,1	-1,7	-1,1	0,4	-1,0	-0,6	0,7	-1,1	-1,1	-0,2	-0,1	-0,5
Weihenstephan	470	0,2	0,6	-0,9	-0,8	0,4	-0,6	-1,0	0,2	-1,0	-1,3	0,1	0,0	-0,4
München	527	0,4	0,8	-0,6	-0,6	0,5	-0,3	-0,4	0,5	-0,9	-1,3	0,3	0,3	-0,1
Hohenpeißenberg	977	0,6	0,6	-0,6	-0,6	0,2	-0,2	-0,2	0,1	-1,1	-1,4	0,1	-0,5	-0,3
Oberstdorf	810	0,6	0,4	-0,9	-0,5	0,3	0,1	0,1	0,4	-0,8	-0,9	-0,1	-0,2	-0,1
Wendelstein	1832	1,1	0,7	-0,8	-0,5	0,9	0,2	0,4	0,6	-0,6	-1,0	0,0	-0,2	0,1
Zugspitze	2960	1,2	0,9	-0,6	-0,3	0,8	0,2	0,2	0,2	-0,5	-0,7	0,0	-0,3	0,1

positive / negative Trends :  
Signifikanz S nach Mann-Kendall-Test

S < 80 % ;	95 % ≤ S < 99 %
80 % ≤ S < 90 % ;	99 % ≤ S < 99,9 %
90 % ≤ S < 95 % ;	99,9 % < S

Tabelle 5.1: Trends der mittleren täglichen Sonnenscheindauer [in h/50 Jahre], 1951/2000



Im Jahrgang der Sonnenscheindauer zeigen sich in der Untersuchungsperiode 1951/2000 flächendeckend starke und an den meisten Stationen signifikante Abnahmen in den Monaten März, April, September und Oktober. Im Juni sind signifikante Rückgänge der Sonnenscheindauer regional begrenzt im Norden von Baden-Württemberg und in Bayern mit Ausnahme des Alpengebietes zu verzeichnen. In diesem Monat treten die stärksten Abnahmen der Sonnenscheindauer insbesondere im Osten Bayerns (Weiden, Metten) und im gesamten Maingebiet auf. Der innerjährliche Schwerpunkt des Rückganges der Sonnenscheindauer fällt in die Monate März und Oktober, in denen an vielen Stationen eine Verminderung des Monatsmittels der täglichen Sonnenscheindauer von mehr als einer Stunde zu verzeichnen ist. In der monatlichen Summe der Sonnenscheinstunden ergibt sich an den betreffenden Stationen eine Verringerung von mehr als 30 bis über 55 Stunden, das sind – bezogen auf die durchschnittliche monatliche Sonnenscheindauer in diesen Monaten (s. Tabellen 4.1-a, 4.1-b) – Abnahmen um 25 % bis 45 %. Die Signifikanz dieser Trends überschreitet vor allem im März an vielen Stationen die 99 %-Schwelle, im Oktober die 95 %-Schwelle. Die hoch gelegenen Bergstationen Feldberg/Schw., Wendelstein und Zugspitze unterscheiden sich von den tiefer gelegenen Regionen durch deutlich geringere Trendbeträge und Signifikanzen. Die regionale Verteilung der Trends im März und im Oktober zeigen Abbildung 5.3 bzw. Abbildung 5.4.

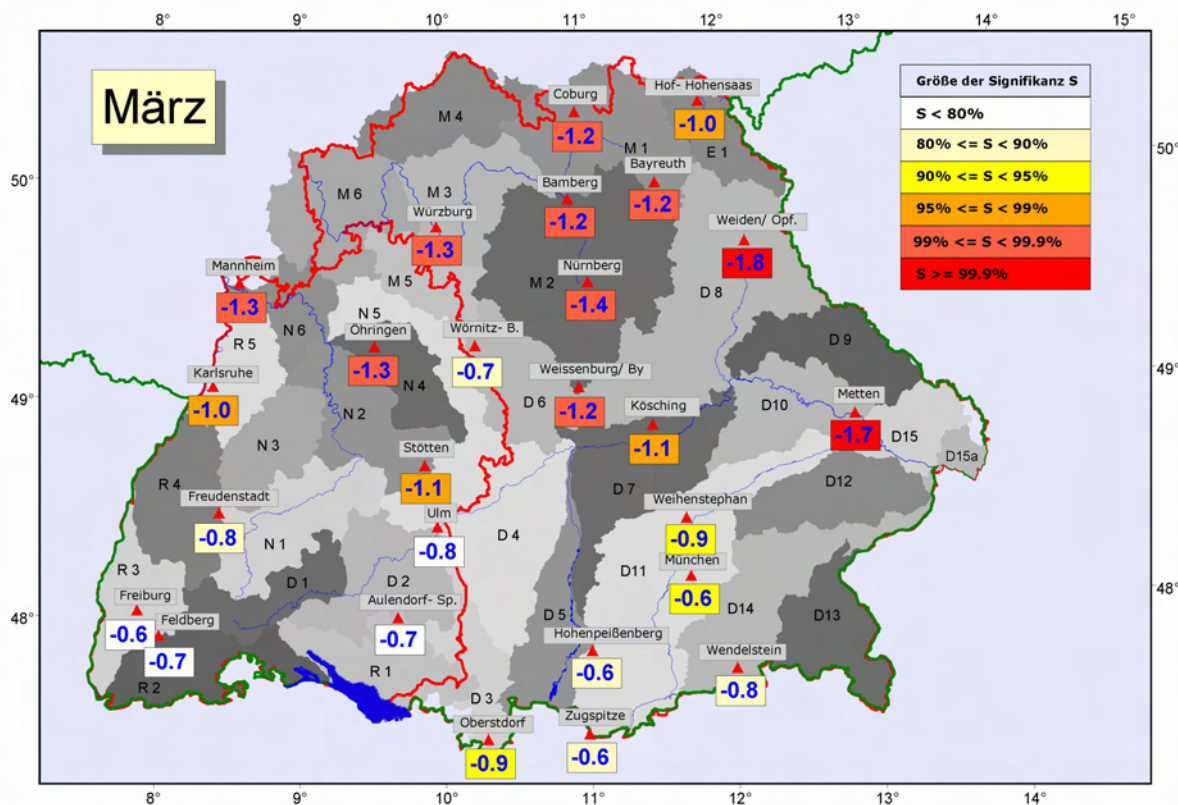


Abbildung 5.3: Trend [in h/50Jahre] des Monatsmittels der täglichen Sonnenscheindauer im März, Stationswerte 1951/2000

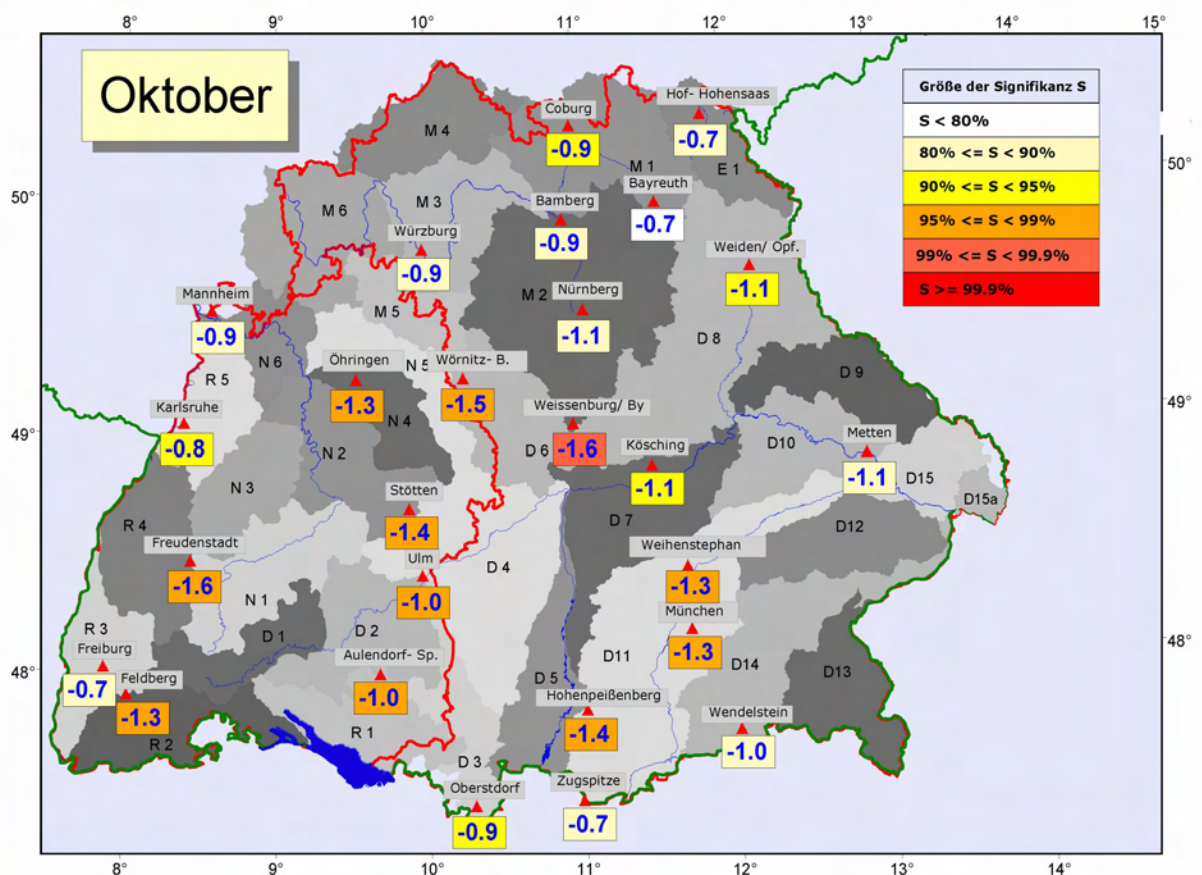


Abbildung 5.4: Trend [in h/50 Jahre] des Monatsmittels der täglichen Sonnenscheindauer im Oktober, Stationswerte 1951/2000

Bei den Monaten Mai, Juli und Dezember finden sich an nur wenigen Stationen signifikante Trendbefunde. Da die Signifikanzschwelle von 80 % meist nur wenig übertroffen wird, sind die Ergebnisse eher als zufällig zu bewerten.

In den Monaten Januar, Februar sowie im November treten regional begrenzt positive Trends der monatlichen Sonnenscheindauer auf, mit Beträgen, die sich zwischen 0,3 h und 0,7 h bewegen und an den hohen Bergstationen im Januar sogar auf mehr als 1 h belaufen. Die Signifikanzen bleiben überwiegend gering und übertreffen die 90 %-Schwelle nur wenig. Die vom Betrag her geringfügig erscheinenden Zunahmen der Sonnenscheindauer bedeuten bei der geringen durchschnittlichen Sonnenscheindauer in den betreffenden Monaten (s. Tabelle 4.1-a) eine beträchtliche prozentuale Zunahme im Bereich von etwa 20 % bis 30 %. Die überwiegende Anzahl der Stationen verzeichnen jedoch im Jahresabschnitt November bis Februar Zeitreihenänderungen der Sonnenscheindauer mit teils positiven, teils negativen Vorzeichen und ohne Signifikanz.





Eine flächendeckend ausgeprägte und regional hoch signifikante Zunahme der monatlichen Sonnenscheindauer ist im Jahresablauf ausschließlich für August zu verzeichnen. Die regionale Übersicht über Trendwerte und Signifikanzen wird in Abbildung 5.5 gegeben. Die stärkste Zunahme zwischen 0,6 h bis 1,5 h täglich (19 h bis 46 h bzw. 10 % bis 23 % monatlich) tritt bei den Stationen im Nordosten und Osten Bayerns auf bei Überschreitung der Signifikanzschwelle von wenigstens 95 % (Hof, Bayreuth >99 %). Auch bei den übrigen bayerischen Stationen gibt es eine Zunahme der Sonnenscheinstunden des August, jedoch mit wesentlich geringeren Beträgen und nur geringer oder ohne Signifikanz. In Baden-Württemberg zeigen alle Stationen signifikante positive Trends, teilweise mit Überschreitung der 95 %-Schwelle.

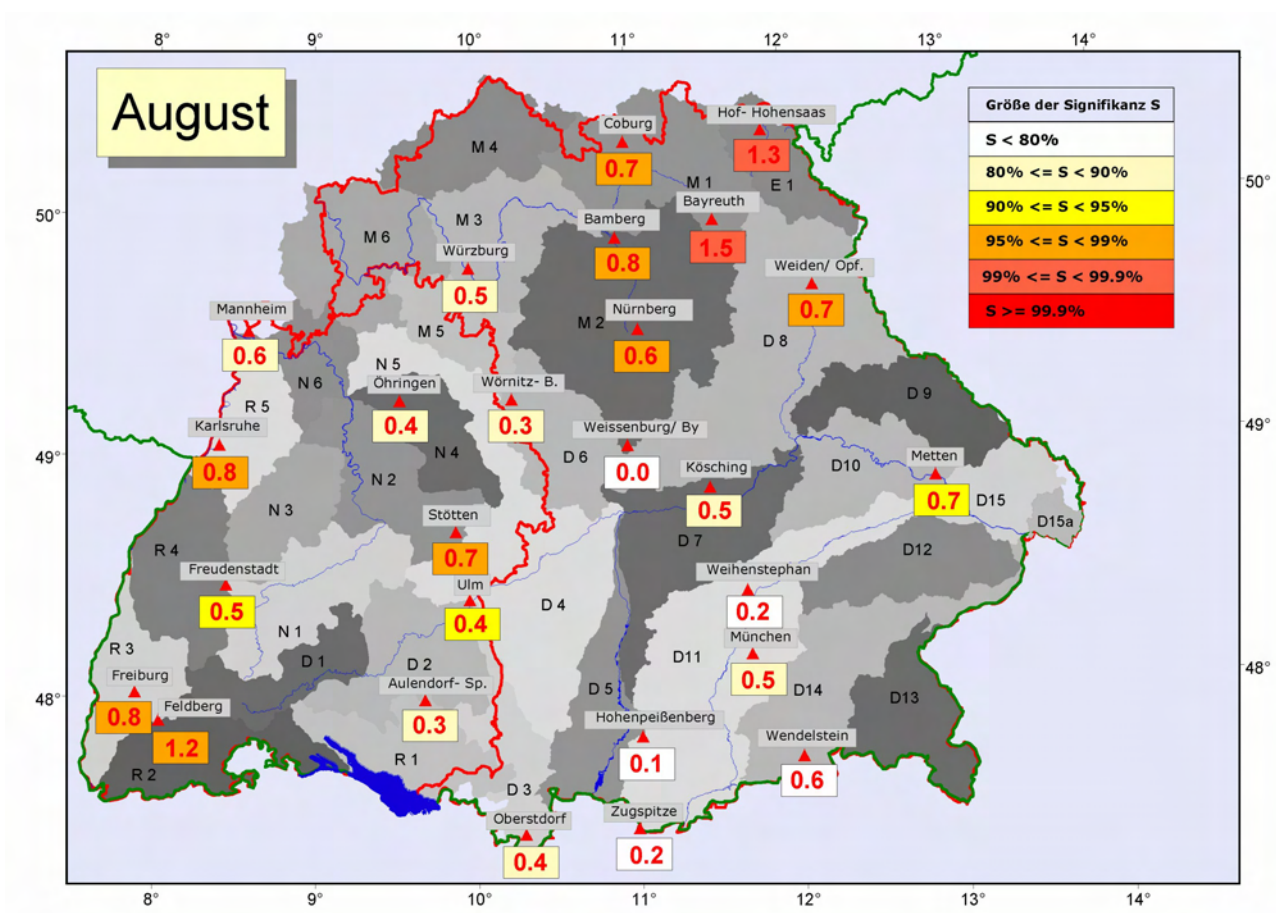


Abbildung 5.5: Trend [in h/50 Jahre] des Monatsmittels der täglichen Sonnenscheindauer im August, Stationswerte 1951/2000

### 5.3 Zeitreihenvergleich 1951/2000 und 1931/2000; weiterer Verlauf der Zeitreihen bis 2006

In Tabelle 5.2 werden von den Standorten Bamberg, Karlsruhe, München und Zugspitze, von denen Zeitreihen der Sonnenscheindauer ab 1931 aufbereitet werden konnten, die monatlichen und jährlichen Trends der 70-jährigen Reihe 1931/2000 den entsprechenden Trendwerten von 1951/2000 (s. Tabelle 5.1) gegenübergestellt. Die Angabe der Trendwerte erfolgt hier aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlich langen Reihen in der Dimension Sonnenscheinstunden pro Jahr (h/a).

#### 1951 - 2000

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Bamberg	239	0,002	0,006	-0,024	-0,014	0,006	-0,012	-0,008	0,016	-0,014	-0,018	0,002	0,002	-0,004
Karlsruhe	112	0,006	0,006	-0,020	-0,016	-0,008	-0,008	-0,006	0,016	-0,010	-0,016	0,010	-0,002	-0,004
München	527	0,008	0,016	-0,012	-0,012	0,010	-0,006	-0,008	0,010	-0,018	-0,026	0,006	0,006	-0,002
Zugspitze	2960	0,024	0,018	-0,012	-0,006	0,016	0,004	0,004	0,004	-0,010	-0,014	0,000	-0,006	0,002

#### 1931 - 2000

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Bamberg	239	-0,001	0,006	-0,024	-0,010	-0,003	-0,017	-0,013	0,000	-0,009	-0,006	0,000	-0,001	-0,006
Karlsruhe	112	0,001	-0,003	-0,026	-0,010	-0,007	-0,020	-0,011	0,003	-0,004	-0,004	0,003	0,000	-0,006
München	527	0,004	0,000	-0,019	-0,010	-0,003	-0,021	-0,014	-0,003	-0,013	-0,007	0,003	0,001	-0,007
Zugspitze	2960	0,010	0,001	-0,014	-0,004	0,003	-0,014	-0,007	-0,001	-0,004	0,000	-0,001	-0,009	-0,003

positive / negative Trends :  
Signifikanz S nach Mann-Kendall-Test

S < 80 % ;	95 % ≤ S < 99 %
80 % ≤ S < 90 % ;	99 % ≤ S < 99,9 %
90 % ≤ S < 95 % ;	99,9 % < S

Tabelle 5.2: Trends der mittleren täglichen Sonnenscheindauer in den Monaten und im Jahr, Stationswerte [in h/a] im Zeitreihenvergleich 1951/2000 und 1931/2000

Bei Vergleich der Trends in den Jahreswertreihen ist ein verstärkter Rückgang der Sonnenscheindauer bis zum Jahrhundertende festzustellen, wenn in die Zeitreihenbetrachtung die dreißiger und vierziger Jahre einbezogen werden. An allen vier untersuchten Stationen sind die Trendbeträge und ihre Signifikanzen für die 70-jährige Zeitreihe ab 1931 größer als für den Zeitabschnitt der zweiten Jahrhunderthälfte. Sogar bei der Station Zugspitze, für die sich in 1951/2000 eine nicht signifikante positive Tendenz berechnet, ergibt sich in der Zeitreihe 1931/2000 ein negativer Trend mit einer Signifikanz von 94 %. Die 99 %-Signifikanzschwelle wird in der Münchener Reihe überschritten, in der Karlsruhe und Bamberger Reihe nahezu erreicht.

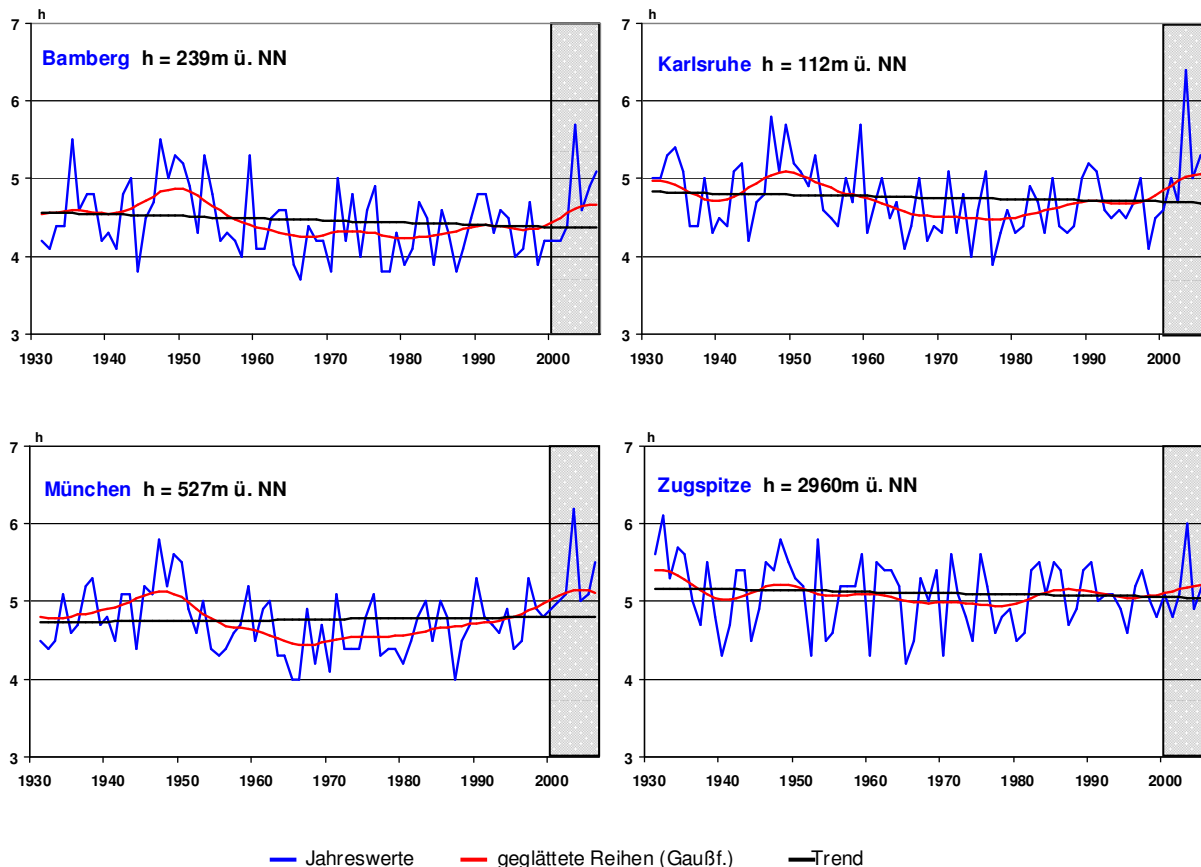


Abbildung 5.6: Jahreswertreihen der mittleren täglichen Sonnenscheindauer [in h],  
Zeitreihe 1931/2006, ausgewählte Stationen

In Abbildung 5.6 werden Jahreswertreihen und Trends der Sonnenscheindauer ab 1931 dargestellt, über die Untersuchungsperiode des KLIWA-Teilprojekts hinaus verlängert bis 2006. Die Zeitreihenverläufe verdeutlichen negative Trends bzw. die Trendverstärkung in 1931/2000 gegenüber 1951/2000. An den Stationen Karlsruhe und München sind im Zeitreihenabschnitt 1931 bis 1950 acht Jahre zu verzeichnen, die in der Rangfolge die höchsten jährlichen Sonnenscheindauern bis zum Ende des Jahrhunderts repräsentieren. Das mit deutlichem Abstand sonnenscheinreichste Jahr zwischen 1931 und 2000 war an diesen Stationen 1947. Weiterhin weisen – an den einzelnen Stationen unterschiedlich – die Jahre 1933 bis 1935, 1937 und 1938, 1942, 1943 und 1948 bis 1950 sehr hohe Sonnenscheindauerwerte auf, die außer im fünfziger Dezennium (1953, 1959) im weiteren Zeitreihenverlauf bis zum Ende des Jahrhunderts kaum noch erreicht werden. Die 50-jährige Periode 1951/2000 liefert somit keine ausreichenden Informationen zum Langzeitverhalten der Sonnenscheindauer in Süddeutschland, insbesondere nicht zu klimatisch möglichen Höchstwerten.

Im neuen Jahrtausend ist mit 2003 wieder ein extrem sonnenscheinreiches Jahr zu verzeichnen. In den Messreihen von Karlsruhe und München werden 2003 die Höchstwerte aus den vierziger Jahren des vorigen Jahrhunderts deutlich übertroffen. Für die Zeitreihenbewertung ist jedoch bedeutsam, dass 2003 ein einzeln auftretendes Extremjahr ist, während von 1947 bis 1950 vier aufeinander folgende Jahre mit erheblich überdurchschnittlicher Sonnenscheindauer vorliegen. Im Jahr 2006 ist die jährliche Sonnenscheindauer geringer als in den extrem sonnenscheinreichen Jahren zwischen 1931 und 1960; die Sonnenscheindauer im Juli 2006 ist jedoch an allen Stationen der Rekordwert für Juli in der gesamten Zeitreihe. Die Station Zugspitze verzeichnet mit den Jahren 1932 und 2003 zu Beginn und Ende der Zeitreihe extreme jährliche Sonnenscheindauern, welche die Höchstwerte der dazwischen liegenden Jahre erheblich übertreffen.

Der mit Zeitreihenbeginn 1931 langfristig zu verzeichnende Rückgang der Sonnenscheindauer, der für die Teilreihe 1931/2000 noch hohe Signifikanz aufwies (s. Tabelle 5.2), hat sich infolge der sonnenscheinreichen Jahre im neuen Jahrtausend, insbesondere durch 2003, abgeschwächt. Jedoch liegen auch bei den Zeitreihen 1931/2006 noch schwach signifikante Abnahmen der jährlichen Sonnenscheindauer vor, ausgenommen die Stationsreihe München, bei der eine Zunahme unterhalb des Signifikanzkriteriums vorliegt.

Im Jahresgang der Sonnenscheindauer zeigt sich seit 1931 ein recht beständiges Trendverhalten (s. Tabelle 5.2). Der innerjährliche Schwerpunkt des Rückganges der Sonnenscheindauer liegt bei allen Stationen im März. Weiterhin ist für die langen Zeitreihen, welche die sonnenscheinreichen dreißiger und vierziger Jahre des vorigen Jahrhunderts einbeziehen, ein teils hoch signifikanter negativer Trend der monatlichen Sonnenscheindauer des Juni, selbst noch bei Zeitreihenverlängerung bis 2006 zu verzeichnen. Die negativen Trends der Sonnenscheindauer im April und im September/Oktober zeigen wechselnde Signifikanz, je nach betrachteter Zeitreihe. Positive Trends konzentrieren sich im Wesentlichen auf den Januar und beschränkt auf die Zeitreihen ab 1951 auf den August.

Der hinsichtlich der Lufttemperaturen in Süddeutschland extreme Sommer Juni – August 2003 [2], [12] zeigt bei der Sonnenscheindauer überdurchschnittliche, aber keine ähnlich extremen Werte. Lediglich an der Station Karlsruhe ist 2003 mit durchschnittlich 9,9 Stunden Sonnenschein pro Tag im Jahresabschnitt Juni-August ein neuer Höchstwert nach 1949 (9,7 h/d) zu verzeichnen. An den anderen Stationen wird die Summe der Sonnenscheinstunden Juni-August 2003 in den vierziger Jahren teils mehrfach übertroffen. Bemerkenswert ist hingegen, dass 2003 nahezu alle Monate und teilweise erheblich überdurchschnittlich sonnenscheinreich waren und damit zu dem extremen Jahreswert führen.





## 5.4 Stabilität der Trends

### 5.4.1 Darstellung der Ergebnisse

Anhand der Untersuchungsmethode der so genannten vor- und rückwärts schreitenden Trends (vgl. Abschnitt 3.1.2) wurde die Stabilität der Trendbefunde im Verlauf der 70-jährigen bzw. 50-jährigen Stationsreihen der Jahres- und der Monatswerte der täglichen Sonnenscheindauern untersucht.

Die graphischen Darstellungen der Trendwerte und ihrer Signifikanz (z.B. Abbildungen 5.7 und 5.8) enthalten beim rückwärts schreitenden (auf das feste Zeitreihenende 2000 bezogenen) Trend auf der rechten Seite die Angaben für die Zeitreihe 1980/2000, dann - nach links rückschreitend – für 1979/2000, 1978/2000, usf. Auf der rechten Seite dieser Graphiken stehen folglich die Angaben für die kurzen, jüngsten Zeitreihen, und im linken Teil finden sich die den Tabellen 5.1 bzw. 5.2 entsprechenden Angaben für die Gesamtreihen 1951/2000 bzw. 1931/2000. Wegen des gleichen Zeitreihenendes 2000 bei den 70- und 50-jährigen Untersuchungszeiträumen sind deren rückwärts schreitend betrachteten Teilzeitreihen teilweise identisch, so dass die Trendwerte in einer Graphik zusammengestellt werden konnten. Die Graphiken der vorwärts schreitenden Trendbetrachtung (fester Zeitreihenanfang 1931 bzw. 1951, und deshalb zwei separate Graphiken) zeigen auf der linken Seite die Trends und Signifikanzen für die erste zwanzigjährige Reihe ab Zeitreihenbeginn, danach für die folgende 21-jährige Reihe usf. und am rechten Rand die Angaben für die 70- bzw. 50-jährigen Gesamtreihen der Tabellen 5.2 bzw. 5.1. Auf der linken Seite sind somit die Angaben für die kurzen, älteren Zeitreihen des Untersuchungszeitraumes zu finden.

Die Darstellung von Trendwerten für unterschiedlich lange Zeitreihen in einer Graphik erfordert eine vergleichbare Dimension der Trends in Stunden pro Jahr (h/a).

### 5.4.2 Trendstabilität in den Jahreswertreihen

Bei den Jahreswertreihen zeigen die Trends an den Stationen Bamberg, Karlsruhe und München ein sehr ähnliches Stabilitätsverhalten (Abbildung 5.7). Mit den Darstellungen der rückwärts schreitenden Trends für diese Stationen wird bestätigt, dass die hoch signifikanten negativen Trends der Zeitreihe 1931/2000 durch die Häufung überaus sonnenscheinreicher Jahre in den ersten zwei Jahrzehnten begründet sind. Hoch signifikante negative Trendwerte liegen stabil nur bei Zeitreihen vor, deren Beginn in den dreißiger und vierziger Jahren einsetzt. Die Jahreswertreihen ab 1950 bis zum Jahrhundertende weisen nur geringfügige, nicht signifikante Trendbeträge mit wechselndem Vorzeichen auf. An der Station Karlsruhe erreichen die

positiven Trends der ab Mitte der sechziger Jahre einsetzenden Jahreswertreihen zum Teil sogar leichte Signifikanz zwischen 80 % und 90 %. Die in Abbildung 5.6 gezeigten Zeitreihenverläufe der jährlichen Sonnenscheindauer machen dieses Trendverhalten erklärlich.

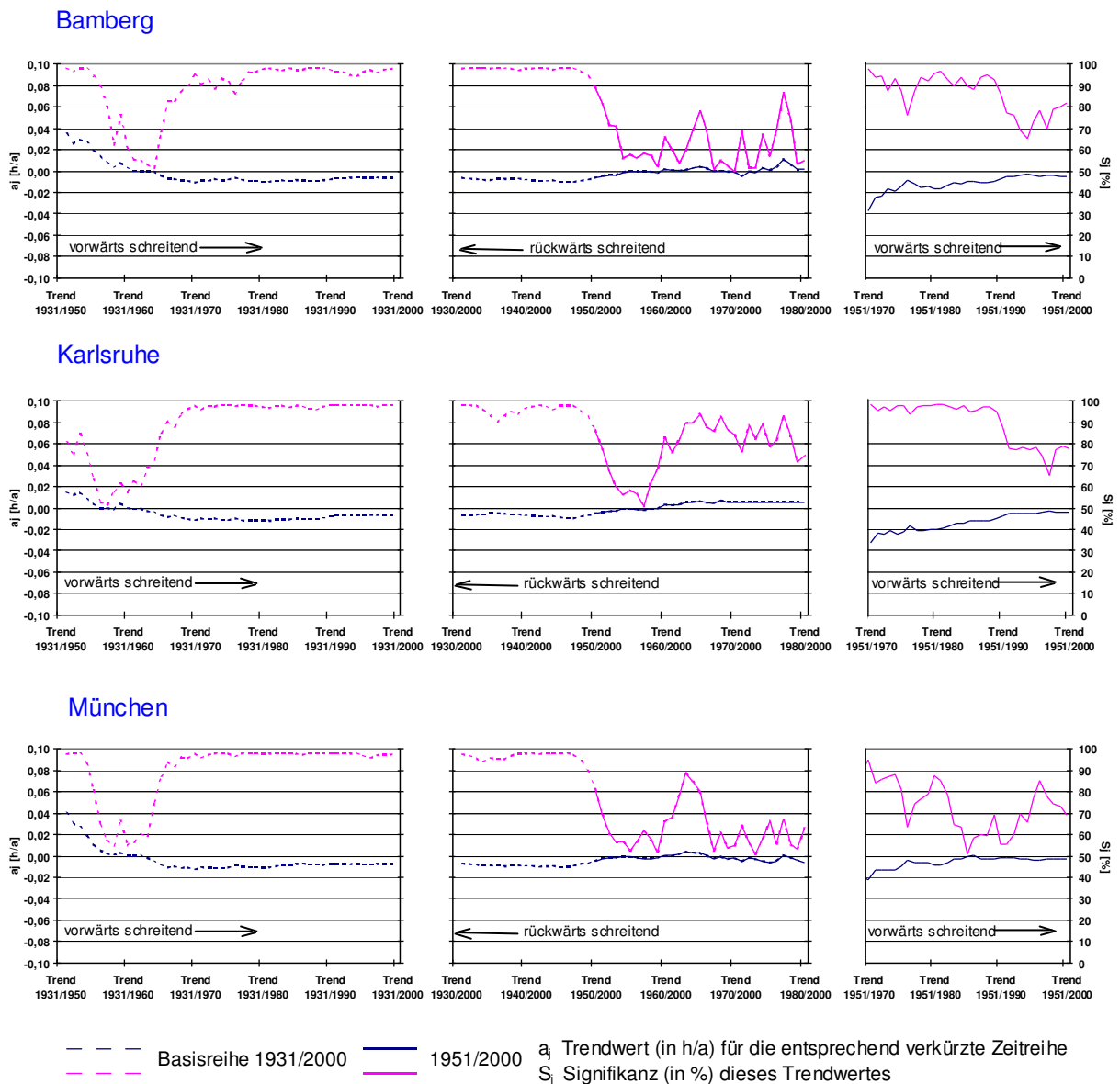


Abbildung 5.7: Vorwärts und rückwärts schreitende Trends [in h/a] der Jahreswertreihen der Sonnenscheindauer, Stationen Bamberg, Karlsruhe München

Die Darstellungen der vorwärts schreitenden Trends für die 70-jährigen Jahreswertreihen von Bamberg, Karlsruhe, München zeigen, dass ein negativer Trend mit Signifikanzen von mindestens 90 %, überwiegend >95 % stabil für alle Zeitreihen zwischen 1931/1965 und 1931/2000 besteht. Die vorwärts schreitenden Trends mit der 50-jährigen Zeitreihenbasis ab 1951 lassen hingegen von Station zu Station ein recht unterschiedliches Stabilitätsverhalten erkennen. Bei Stationen, die in den neunziger Jahren eine deutliche Zunahme der Sonnen-



scheindauer gegenüber den vorangehenden sonnenscheinärmeren Dezennien aufweisen (z.B. Bamberg, Karlsruhe) liegen signifikante negative Trends bei den Zeitreihen von etwa 1951/1970 bis 1951/1990 vor. Für die längeren Zeitreihen bis 1951/2000 nehmen die Trendbeträge deutlich ab und sind nicht mehr signifikant. Bei Stationen, an denen in den neunziger Jahren keine oder nur schwache Zunahmen der Sonnenscheindauer zu verzeichnen sind (Beispiel: München), treten bei allen Zeitreihen zwischen 1951/1970 bis 1951/2000 kaum signifikante Trendbefunde auf. Die meisten der fünfzigjährigen Stationsreihen lassen sich in ihrem Stabilitätsverhalten diesen beiden beschriebenen Mustern zuordnen. Durchgängig signifikante negative Trends von 1951/1970 bis 1951/2000 sind an folgenden Stationen zu verzeichnen: Mannheim, Öhringen; Würzburg, Wörnitz, Weißenburg, Kösching, Weihestephan, (Weiden und Metten ab 1951/1975). Wenige oder stark wechselnde Trendbefunde für die entsprechenden Zeitreihen liegen bei den Stationen Freiburg i.Br., Ulm, Aulendorf, Stötten, Freudenstadt; Hof, Coburg, Bayreuth, Nürnberg vor.

Abbildung 5.8 zeigt am Beispiel der Station Zugspitze das Stabilitätsverhalten der Trends der jährlichen Sonnenscheindauerreihen an den hohen Bergstationen. Aus der Graphik der rückwärts schreitenden Trends ist erkennbar, dass hier ein negativer Trends mit nennenswerter Signifikanz nur für die lange Zeitreihe 1931/2000 vorliegt; Ursache ist im Wesentlichen das an dieser Station extrem sonnenscheinreiche Jahr 1932 (vgl. Abbildung 5.6). Auf die Bedeutung dieses einzelnen extremen Jahres für die Trendaussagen der Station weist die Darstellung der vorwärts schreitenden Trends in den mit 1931 beginnenden Zeitreihen ebenfalls hin, die unabhängig von ihrer Länge signifikante Rückgänge der jährlichen Sonnenscheindauer verzeichnen. In der zweiten Jahrhunderthälfte – siehe rückwärts und vorwärts schreitende Trends für den Zeitraum ab 1951 bis 2000 – liegen keine signifikanten Zeitreihenänderungen vor, die Tendenzen weisen meist positive Vorzeichen auf.

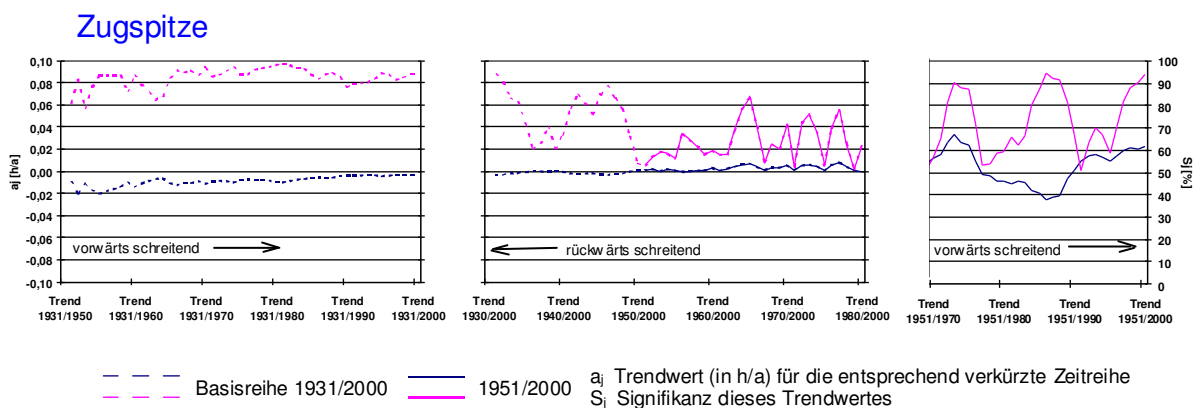


Abbildung 5.8: Vorwärts und rückwärts schreitende Trends [in h/a] der Jahreswertreihen der Sonnenscheindauer, Station Zugspitze

### 5.4.3 Trendstabilität in den Monatswertreihen

Das Stabilitätsverhalten der Trends in den Monatswertreihen der Sonnenscheindauer wird im Folgenden für die Monate März und Juni dargestellt, die wesentlichen Anteil an den Trends der Jahreswerte haben.

#### März

Abbildung 5.9 zeigt, dass die Märzmonate in den dreißiger und den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts in ihrem mittleren und extremen Verhalten erheblich sonnenscheinreicher waren als die Jahre nach 1960 bis zum Ende des Jahrhunderts.

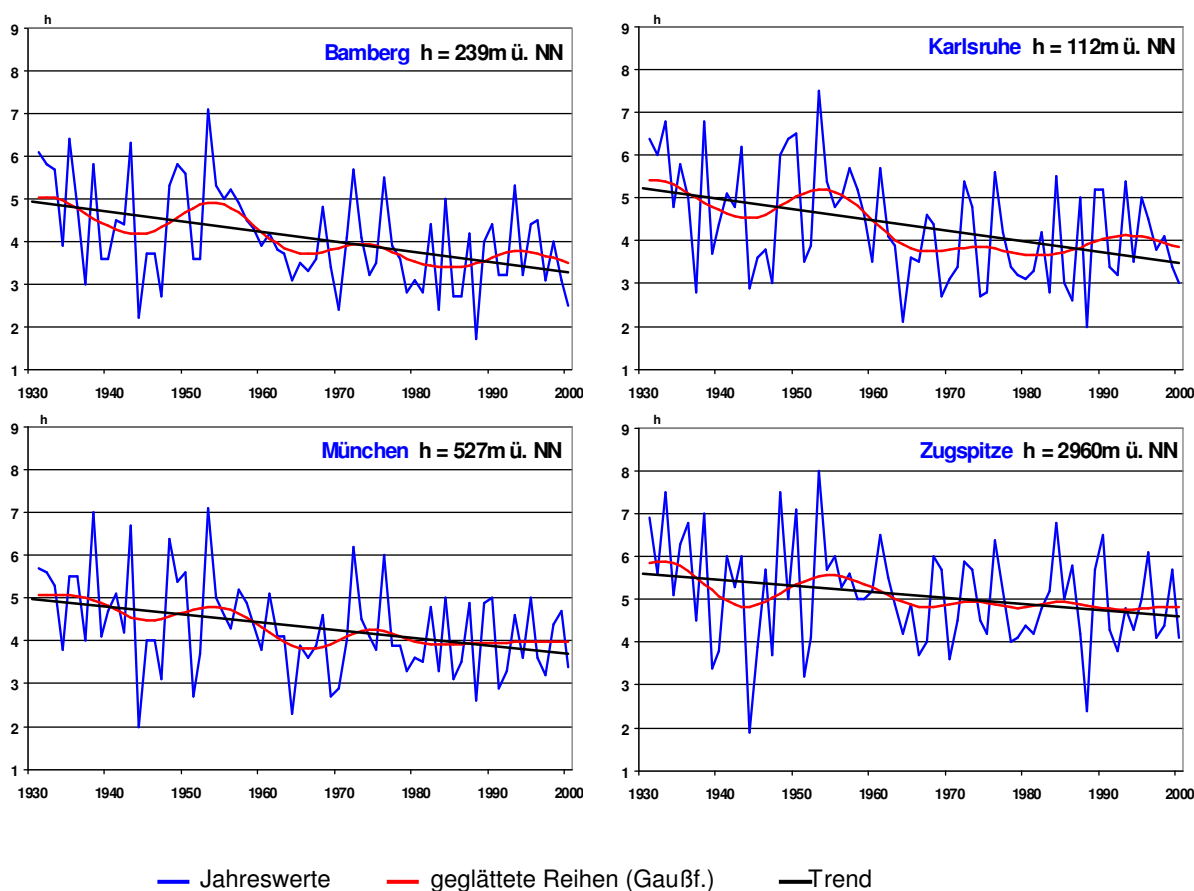
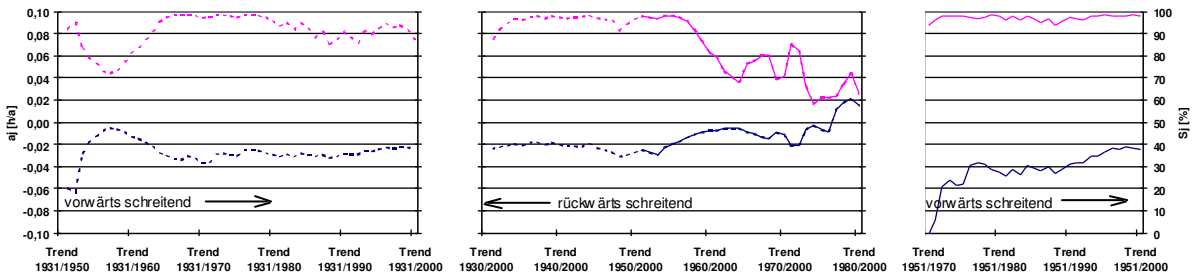


Abbildung 5.9: Monatswertreihen der mittleren täglichen Sonnenscheindauer [in h] im **MÄRZ**, Zeitreihe 1931/2000, ausgewählte Stationen

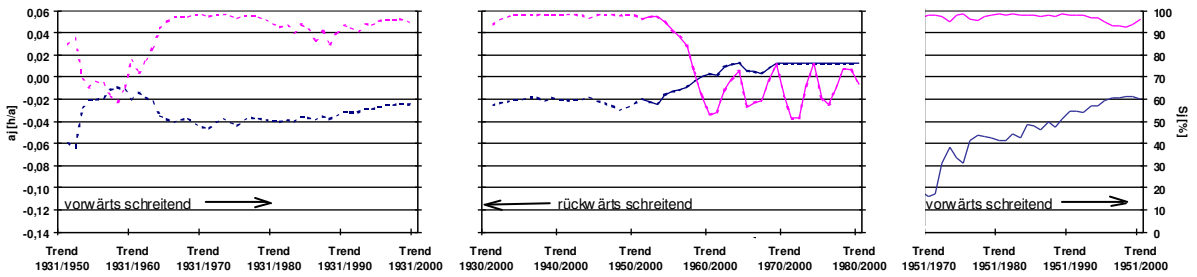
Die Zeitreihen der monatlichen Sonnenscheindauer an den Stationen Bamberg, Karlsruhe, München sowie an der Zugspitze zeigen einheitlich und über die 70- und die 50-jährige Untersuchungsperiode hinweg, signifikante negative Trends (s. Abbildung 5.10, vorwärts schreitende Trendgraphiken). Vom Betrag her handelt es sich um die stärksten Veränderungen im Jahresablauf.



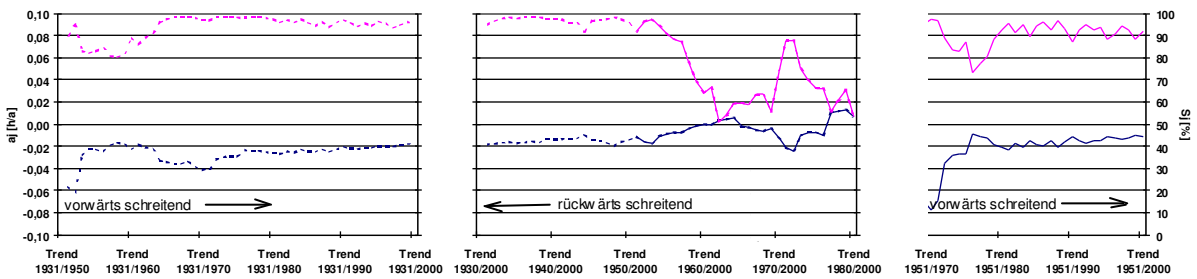
Bamberg



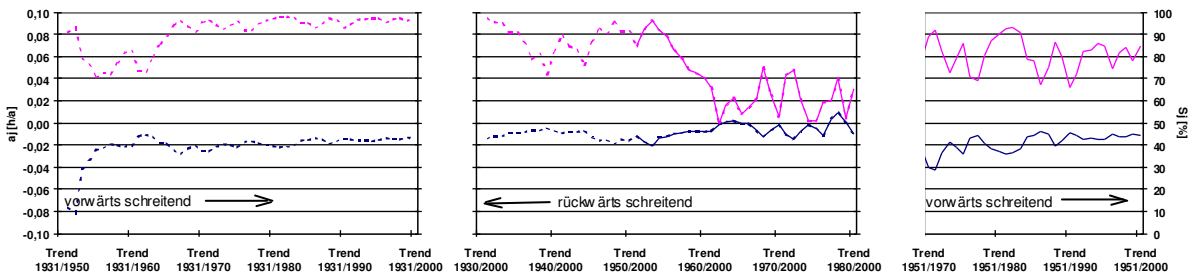
Karlsruhe



München



Zugspitze



--- Basisreihe 1931/2000    --- 1951/2000     $a_j$  Trendwert (in h/a) für die entsprechend verkürzte Zeitreihe  
 $S_j$  Signifikanz dieses Trendwertes

Abbildung 5.10: Vorwärts und rückwärts schreitende Trends [in h/a] der Monatswertreihen der Sonnenscheindauer, **MÄRZ** ausgewählte Stationen

In den Jahren ab 1960 sind die interannuellen Unterschiede in den Sonnenscheindauern der Märzmonate vergleichsweise gering. Deshalb ergeben sich bei Zugrundelegung der Zeitreihen von 1960/2000 bis 1980/2000 keine signifikanten Trendbefunde (s. rückwärts schreitende Trends). Die Stabilitätsuntersuchung der Trends an den Stationen mit nur 50-jährigen Zeitreihen erbrachte entsprechende Ergebnisse, so dass von einem flächendeckenden Zeitreihenverhalten ausgegangen werden kann.

### Juni

Für den Juni lässt sich feststellen, dass der Anfangszeitraum der Untersuchungsperiode, die Jahre zwischen 1931 und 1950 (an der Zugspitze nur die dreißiger Jahre) im Mittel erheblich sonnenscheinreicher waren als die zweite Jahrhunderthälfte (s. Abbildung 5.11)

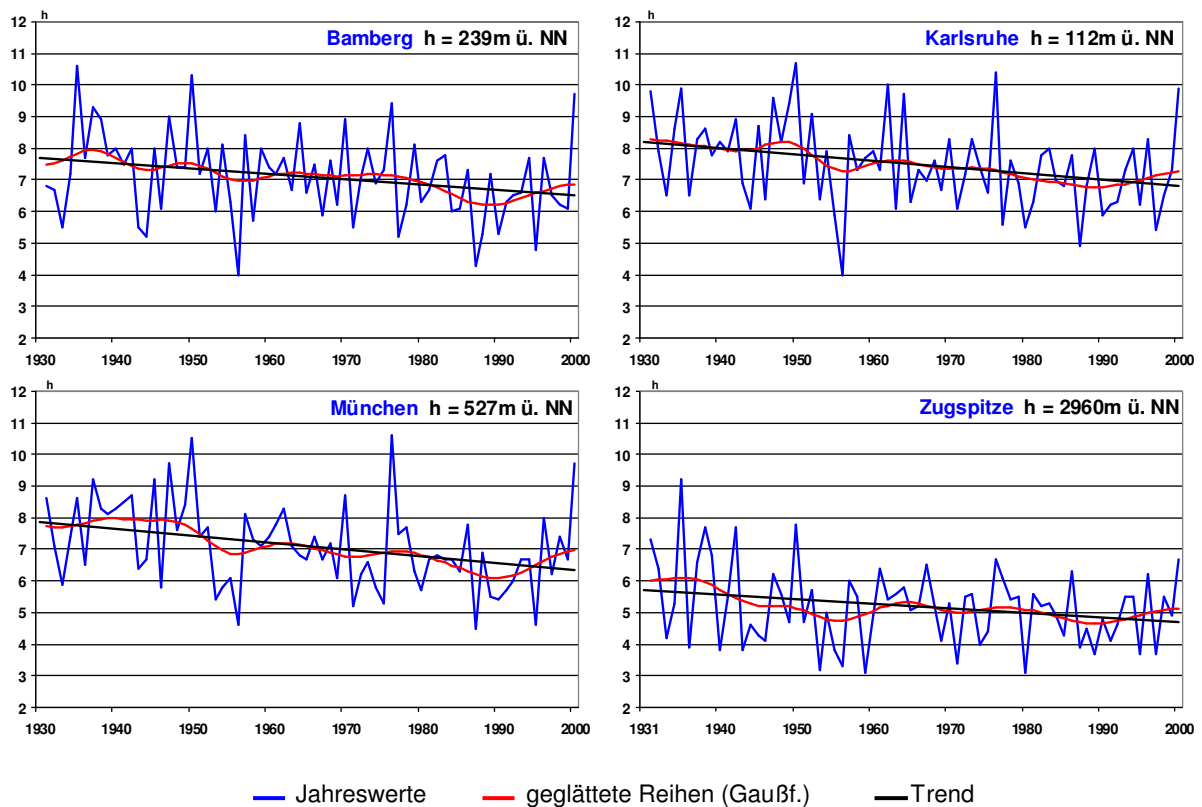
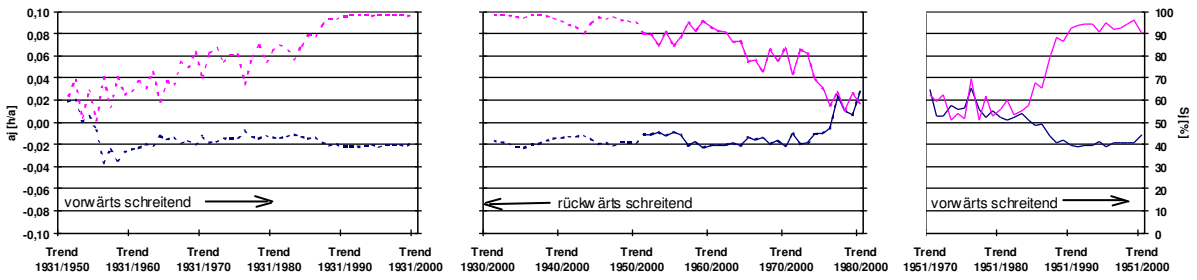


Abbildung 5.11: Monatswertreihen der mittleren täglichen Sonnenscheindauer [in h] im JUNI, Zeitreihe 1931/2000, ausgewählte Stationen

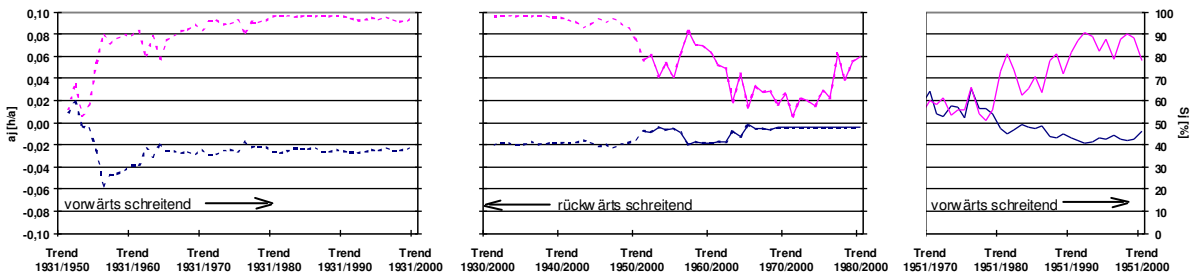
Die vorwärts schreitend dargestellten Trends der Abbildung 5.12 zeigen, dass signifikante negative Trends an den Stationen Karlsruhe, München, Zugspitze mit hoher Stabilität für die Zeitreihen ab 1931/1955 bis 1931/2000 bestehen. Bei Bamberg setzt Signifikanz erst ab Zeitreihen von 1931/1980 und folgende ein.



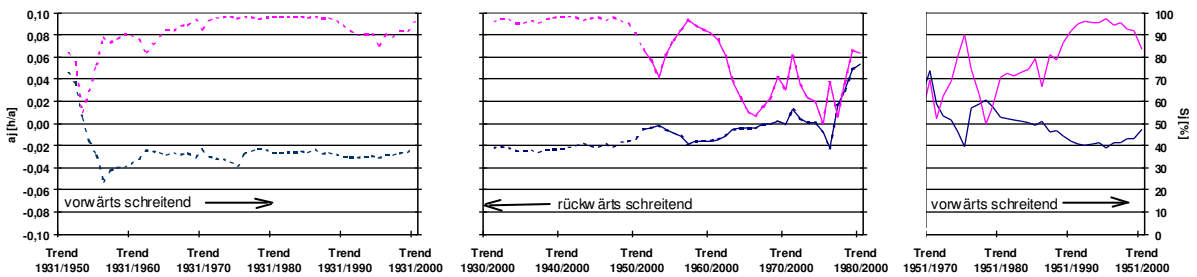
Bamberg



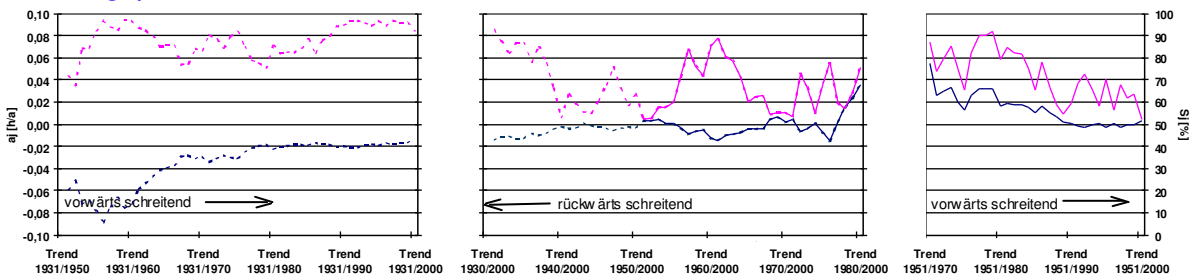
Karlsruhe



München



Zugspitze



--- --- Basisreihe 1931/2000     --- 1951/2000      $a_i$  Trendwert (in h/a) für die entsprechend verkürzte Zeitreihe  
--- --- Signifikanz (in %) dieses Trendwertes

Abbildung 5.12: Vorwärts und rückwärts schreitende Trends [in h/a] der Monatswertreihen der Sonnenscheindauer im JUNI ausgewählte Stationen

Die rückwärts schreitende Trendbetrachtung zeigt damit bei Karlsruhe und München für die Zeitreihen ab 1951/2000, bei der Zugspitze bereits ab 1940/2000 bis 1980/2000 keine stabilen Trends, während an der Station Bamberg Signifikanz erst bei Zeitreihen um 1970/2000 und folgende unterschritten wird. Entsprechend zeigen sich bei den vorwärts schreitenden Trends der 50-jährigen Untersuchungsperiode stabile Signifikanzbefunde zu den negativen Trends nur für Zeitreihen ab 1951/1990 (im Nordosten Bayerns ab 1951/1985) bis 1951/2000. Bei den hohen Bergstationen (Beispiel: Zugspitze) liegen in der 50-jährigen Reihe keine stabilen, signifikanten Trends vor.

Die Trendbefunde für den Juni weisen somit eine starke Abhängigkeit von der betrachteten Zeitreihe auf. Bis 1950 waren die Junimonate überwiegend sonnenscheinreich; in der gesamten zweiten Jahrhunderthälfte bewegen sich die Juniwerte der Sonnenscheindauer auf relativ niedrigem Niveau, von einigen Ausnahmen (z.B. 1976, 2000) abgesehen. Trendbetrachtungen auf der Grundlage der "nur" 50-jährigen Zeitreihen der Sonnenscheindauer liefern deshalb offensichtlich keine ausreichenden Informationen zum Langzeitverhalten dieser Größe im Juni. Diese Aussage trifft im Wesentlichen auch auf Jahreswertreihen zu, weil der Jahrestrend wesentlich von der Sonnenscheindauer des Juni und ihrem Trendverhalten beeinflusst wird (vgl. Tabelle 5.2).





## 6 Literatur

- [1] DVWK (1996): Berechnung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen  
DVWK-Merkblätter 238, 135 S.
- [2] KLIWA (2005a): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern  
KLIWA-Berichte, Heft 5, 76 S.
- [3] PETTIT, A.N. (1979): A Non-parametric Approach to the Change-point Problem  
Appl. Statist., 28, S.126-135
- [4] SCHÖNWIESE, C.-D. (1992): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, 2.Aufl.  
Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 230 S.
- [5] RAPP, J.; SCHÖNWIESE; C.-D. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperatur-trends in Deutschland 1891-1990  
Frankfurter Geowiss. Arb. Serie B, Bd. 5, 255 S.
- [6] WENDLING, U.; FUCHS, P.; MÜLLER-WESTERMEIER, G.,(1997): Modellierung des Zusammenhangs von Globalstrahlung, Sonnenscheindauer und Bewölkungsgrad als Beitrag zur Klimaüberwachung  
Deutscher Wetterdienst, Arbeitsergebnisse Nr. 45, 29 S.  
Offenbach a.M. 1997
- [7] MÜLLER-WESTERMEIER, G.; KREIS, A.; DITTMANN,E., (1999): Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland, Teil 1 Lufttemperatur, Niederschlagshöhe, Sonnenscheindauer  
Deutscher Wetterdienst, Offenbach a.M.
- [8] LIEPERT, B. et al. (2004): Can aerosols spin down the water cycle in a warmer and moister world?  
Geophysical Research Letters Vol. 31, No. 6
- [9] WILD, M. et al. (2004): Radiation, temperature and the global hydrological cycle  
Geophysical Research Letters Vol. 31
- [10] TREPTE,S.;WINKLER,P. (2002): Langfristige Veränderungen von relevanten meteorologischen Parametern mit Bezug zur solaren Strahlung am Hohenpeißenberg  
Deutscher Wetterdienst, Arbeitsergebnisse Nr. 73,  
Offenbach a. M., 23 S.
- [11] SCHÖNWIESE, C.-D.; STAEGER, T.; TRÖMEL, S.; JONAS, M. (2004): Statistisch-klimatologische Analyse des Hitzesommers 2003 in Deutschland.  
Klimastatusbericht 2003, Deutscher Wetterdienst, S. 123-132



## Anhang

### Ergebnistabellen für die Größe Globalstrahlung

Anlage 1-a: Mittlere Monats- und Jahreswerte der täglichen Globalstrahlung [in  $\text{J}/(\text{cm}^2 \text{ d})$ ], Stationen in Baden-Württemberg und Bayern, Zeitreihe 1951 bis 2000

Anlage 1-b: Mittlere Monats- und Jahressummen der Globalstrahlung [in  $\text{kJ}/\text{cm}^2$ ], Stationen in Baden-Württemberg und Bayern, Zeitreihe 1951 bis 2000

Anlage 2: Trends der mittleren täglichen Globalstrahlung in den Monaten und im Jahr, Stationswerte [in  $(\text{J}/\text{cm}^2)/50 \text{ Jahre}$ ], Zeitreihe 1951 bis 2000

Anlage 3: Trends der mittleren täglichen Globalstrahlung in den Monaten und im Jahr, Stationswerte [in  $(\text{J}/\text{cm}^2)/\text{a}$ ] im Zeitreihenvergleich 1951/2000 und 1931/2000



Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Öhringen	276	304	560	951	1427	1811	1942	1915	1653	1222	719	343	233	1090
Mannheim	96	280	535	935	1456	1833	1956	1908	1646	1195	673	323	215	1080
Karlsruhe	112	283	518	920	1399	1794	1948	1927	1659	1210	688	329	222	1075
Freiburg i. Br.	269	314	568	972	1430	1789	1987	1981	1714	1250	728	373	253	1113
Ulm	567	315	573	969	1421	1787	1936	1939	1656	1207	675	338	244	1088
Aulendorf	560	319	588	985	1415	1788	1934	1945	1668	1221	696	357	249	1097
Stötten	734	315	556	928	1355	1744	1888	1905	1610	1210	726	355	244	1070
Freudenstadt	797	322	560	929	1377	1722	1871	1897	1631	1223	743	376	251	1075
Feldberg/Schw.	1486	372	604	921	1314	1614	1751	1793	1555	1171	785	419	299	1050
Hof	567	280	538	901	1374	1764	1873	1795	1574	1155	692	308	209	1039
Coburg	322	263	516	883	1387	1775	1903	1820	1572	1127	652	293	199	1033
Bayreuth	330	272	524	901	1383	1775	1900	1829	1587	1152	675	302	206	1042
Bamberg	239	277	540	911	1389	1783	1907	1833	1587	1149	660	307	209	1046
Weiden	438	290	545	922	1396	1779	1874	1821	1606	1157	692	309	217	1051
Nürnberg	314	305	575	963	1449	1854	1992	1924	1667	1214	713	331	227	1101
Würzburg	268	277	537	918	1410	1790	1913	1863	1599	1149	655	309	209	1052
Wörrnitz	464	283	536	927	1408	1786	1916	1893	1648	1212	708	329	216	1072
Weißenburg	422	320	585	974	1435	1823	1955	1924	1674	1232	732	349	241	1104
Kösching	417	306	571	970	1436	1830	1965	1935	1671	1217	693	329	232	1096
Metten	313	313	577	975	1450	1851	1948	1930	1687	1206	706	327	237	1101
Weihenstephan	470	335	594	990	1424	1802	1910	1907	1654	1228	729	358	251	1099
München	527	339	592	981	1405	1772	1890	1892	1642	1228	733	363	254	1091
Hohenpeißenberg	977	473	738	1137	1482	1788	1899	1939	1707	1326	874	497	380	1187
Oberstdorf	810	395	654	1002	1331	1630	1712	1753	1525	1186	785	422	310	1059
Wendelstein	1832	511	763	1110	1365	1653	1693	1742	1568	1263	928	543	415	1130
Zugspitze	2960	568	868	1224	1478	1665	1649	1679	1544	1346	1019	619	470	1177

Anlage 1-a: Mittlere Monats- und Jahreswerte der täglichen Globalstrahlung [in J/cm<sup>2</sup>d], Stationen in Baden-Württemberg und Bayern, Zeitreihe 1951 bis 2000



Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Öhringen	276	9,4	15,8	29,5	42,8	56,1	58,3	59,4	51,2	36,7	22,3	10,3	7,2	399,0
Mannheim	96	8,7	15,1	29,0	43,7	56,8	58,7	59,1	51,0	35,9	20,9	9,7	6,7	395,2
Karlsruhe	112	8,8	14,6	28,5	42,0	55,6	58,4	59,7	51,4	36,3	21,3	9,9	6,9	393,5
Freiburg i. Br.	269	9,7	16,0	30,1	42,9	55,5	59,6	61,4	53,1	37,5	22,6	11,2	7,8	407,5
Ulm	567	9,8	16,2	30,0	42,6	55,4	58,1	60,1	51,3	36,2	20,9	10,1	7,6	398,4
Aulendorf	560	9,9	16,6	30,5	42,5	55,4	58,0	60,3	51,7	36,6	21,6	10,7	7,7	401,6
Stötten	734	9,8	15,7	28,8	40,7	54,1	56,6	59,1	49,9	36,3	22,5	10,7	7,6	391,6
Freudenstadt	797	10,0	15,8	28,8	41,3	53,4	56,1	58,8	50,6	36,7	23,0	11,3	7,8	393,6
Feldberg/Schw.	1486	11,5	17,1	28,6	39,4	50,0	52,5	55,6	48,2	35,1	24,3	12,6	9,3	384,2
Hof	567	8,7	15,2	27,9	41,2	54,7	56,2	55,6	48,8	34,7	21,5	9,2	6,5	380,2
Coburg	322	8,2	14,6	27,4	41,6	55,0	57,1	56,4	48,7	33,8	20,2	8,8	6,2	378,0
Bayreuth	330	8,4	14,8	27,9	41,5	55,0	57,0	56,7	49,2	34,6	20,9	9,1	6,4	381,5
Bamberg	239	8,6	15,3	28,2	41,7	55,3	57,2	56,8	49,2	34,5	20,5	9,2	6,5	382,9
Weiden	438	9,0	15,4	28,6	41,9	55,1	56,2	56,5	49,8	34,7	21,5	9,3	6,7	384,6
Nürnberg	314	9,5	16,2	29,9	43,5	57,5	59,8	59,6	51,7	36,4	22,1	9,9	7,0	403,1
Würzburg	268	8,6	15,2	28,5	42,3	55,5	57,4	57,8	49,6	34,5	20,3	9,3	6,5	385,2
Wormitz	464	8,8	15,1	28,7	42,2	55,4	57,5	58,7	51,1	36,4	21,9	9,9	6,7	392,4
Weißenburg	422	9,9	16,5	30,2	43,1	56,5	58,7	59,6	51,9	37,0	22,7	10,5	7,5	404,0
Kösching	417	9,5	16,1	30,1	43,1	56,7	59,0	60,0	51,8	36,5	21,5	9,9	7,2	401,3
Metten	313	9,7	16,3	30,2	43,5	57,4	58,4	59,8	52,3	36,2	21,9	9,8	7,3	402,9
Weihenstephan	470	10,4	16,8	30,7	42,7	55,9	57,3	59,1	51,3	36,8	22,6	10,7	7,8	402,1
München	527	10,5	16,7	30,4	42,2	54,9	56,7	58,7	50,9	36,8	22,7	10,9	7,9	399,3
Hohenpeißenberg	977	14,7	20,8	35,2	44,5	55,4	57,0	60,1	52,9	39,8	27,1	14,9	11,8	434,2
Oberstdorf	810	12,2	18,5	31,1	39,9	50,5	51,4	54,3	47,3	35,6	24,3	12,7	9,6	387,4
Wendelstein	1832	15,8	21,6	34,4	41,0	51,2	50,8	54,0	48,6	37,9	28,8	16,3	12,9	413,2
Zugspitze	2960	17,6	24,5	37,9	44,3	51,6	49,5	52,0	47,9	40,4	31,6	18,6	14,6	430,5

Anlage 1-b: Mittlere Monats- und Jahressummen der Globalstrahlung [in kJ/cm<sup>2</sup>],  
Stationen in Baden-Württemberg und Bayern, Zeitreihe 1951 bis 2000



Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Öhringen	276	6,4	9,1	-142,6	-105,5	-10,5	-119,6	-72,9	55,9	-142,2	-134,3	6,5	-15,0	-55,5
Mannheim	96	7,7	22,4	-137,0	-118,3	-80,9	-138,9	-84,4	83,0	-146,1	-98,1	20,9	-1,2	-56,0
Karlsruhe	112	17,0	25,7	-100,3	-93,8	51,4	54,8	-49,0	117,8	-69,9	-85,9	24,9	3,9	-27,6
Freiburg i. Br.	269	29,0	41,0	-58,7	-79,7	43,5	-5,8	-17,7	101,9	-7,9	-69,2	26,6	1,4	-7,3
Ulm	567	2,0	62,3	-89,2	-87,7	2,4	-13,1	-88,5	51,4	-137,1	-108,1	15,7	7,8	-32,5
Aulendorf	560	18,1	68,3	-73,6	-73,1	35,7	11,3	-63,0	43,1	-146,2	-106,8	-2,2	8,4	-23,8
Stätten	734	11,6	26,6	-128,0	-73,3	31,5	60,2	-29,8	98,8	-129,9	-138,2	17,4	-14,3	-32,7
Freudenstadt	797	35,3	49,1	-85,9	-110,4	-117,7	-90,3	-166,2	68,4	-120,7	-154,0	8,5	-18,4	-59,2
Felberg/Schw.	1486	65,2	30,5	-76,9	-63,2	-9,2	-25,2	-6,8	167,1	-51,6	-135,6	0,2	-31,2	-11,5
Hof	567	4,2	24,7	-108,2	-73,2	173,4	-105,3	-20,3	180,1	-95,1	-77,2	6,9	-12,3	-8,3
Coburg	322	8,3	20,1	-120,3	-140,7	39,3	-146,7	-100,1	94,3	-143,5	-91,0	-1,7	6,0	-48,0
Bayreuth	330	4,7	-7,8	-142,8	-74,8	109,3	-98,1	9,6	206,6	-81,6	-76,5	6,8	1,2	-11,4
Bamberg	239	7,9	33,6	-138,7	-97,4	47,1	-87,2	-60,0	109,4	-97,5	-91,3	4,9	1,1	-30,9
Weiden	438	-25,7	7,7	-208,7	-146,7	31,7	-213,2	-102,7	91,9	-157,6	-115,1	-16,7	-9,8	-71,9
Nürnberg	314	14,1	50,3	-154,4	-126,7	23,0	-142,5	-90,4	85,9	-121,3	-115,8	15,2	-3,8	-47,4
Würzburg	268	20,9	30,6	-136,2	-152,1	52,1	-201,3	-125,4	71,6	-105,0	-92,1	9,6	4,7	-60,6
Wormitz	464	1,6	9,3	-77,7	-101,9	-13,7	-123,8	-80,4	40,6	-130,9	-147,5	-1,1	5,1	-52,7
Weissenburg	422	4,4	22,4	-143,2	-118,5	20,8	-123,6	-147,4	7,3	-155,2	-166,0	-6,1	3,7	-67,8
Kösching	417	-14,1	60,0	-122,5	-100,4	106,8	57,5	-104,7	67,4	-145,5	-119,1	4,6	10,6	-34,8
Metten	313	-27,3	14,8	-205,1	-148,2	54,9	-165,7	-85,8	95,3	-147,0	-114,4	-12,1	6,7	-62,5
Weihenstephan	470	12,2	59,1	-101,9	-108,5	59,7	-87,8	-154,6	26,0	-129,1	-135,2	4,7	0,7	-46,8
München	527	35,0	78,1	-59,8	-69,6	94,5	35,3	-56,8	75,0	-122,0	-124,0	17,9	16,5	-12,9
Hohenpeissenberg	977	45,5	67,8	-92,8	-87,3	41,0	-29,8	-32,7	14,2	-155,1	-154,8	14,6	-39,8	-34,5
Oberstdorf	810	41,4	39,5	-106,2	-71,6	45,7	11,3	20,5	48,2	-103,9	-88,3	-9,3	-10,9	-15,4
Wendelstein	1832	91,9	81,0	-118,1	-76,8	153,0	31,0	53,0	90,8	-92,2	-111,4	2,3	-16,3	7,3
Zugspitze	2960	102,5	98,3	-77,4	-39,5	125,0	26,2	37,4	35,0	-81,4	-88,0	0,3	-20,9	9,4

positive / negative Trends :  
Signifikanz S nach Mann-Kendall-Test

S < 80 % ;	95 % ≤ S < 99 %
80 % ≤ S < 90 % ;	99 % ≤ S < 99,9 %
90 % ≤ S < 95 % ;	99,9 % < S

Anlage 2: Trends der mittleren täglichen Globalstrahlung in den Monaten und im Jahr, Stationswerte [in (J/cm<sup>2</sup>)/50 Jahre], Zeitreihe 1951 bis 2000





## 1951 - 2000

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MARZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Bamberg	239	0,158	0,672	-2,774	-1,948	0,942	-1,744	-1,200	2,188	-1,950	-1,826	0,098	0,022	-0,618
Karlsruhe	112	0,340	0,514	-2,006	-1,996	-1,028	-1,036	-0,980	2,356	-1,336	-1,718	0,498	-0,078	-0,552
München	527	0,700	1,562	-1,196	-1,392	1,890	-0,706	-1,136	1,500	-2,440	-2,480	0,358	0,330	-0,258
Zugspitze	2960	2,050	1,966	-1,548	-0,790	2,500	0,524	0,748	0,700	-1,628	-1,760	0,006	-0,418	0,188

## 1931 - 2000

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MARZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Bamberg	239	-0,061	0,450	-2,760	-1,341	-0,389	-2,640	-1,820	-0,134	-1,123	-0,617	-0,017	-0,094	-0,887
Karlsruhe	112	0,110	-0,186	-2,761	-1,146	-0,960	-3,124	-1,681	0,336	-0,659	-0,510	0,119	0,020	-0,871
München	527	0,371	-0,010	-2,159	-1,294	-0,171	-3,371	-1,974	-0,280	-1,686	-0,813	0,144	0,097	-0,926
Zugspitze	2960	0,871	0,173	-2,083	-0,604	0,483	-2,253	-1,164	-0,147	-0,789	-0,246	-0,180	-0,677	-0,553

positive / negative Trends :  
Signifikanz S nach Mann-Kendall-Test

S < 80 % ;	95 % ≤ S < 99 %
80 % ≤ S < 90 % ;	99 % ≤ S < 99,9 %
90 % ≤ S < 95 % ;	99,9 % < S

Anlage 3: Trends der mittleren täglichen Globalstrahlung in den Monaten und im Jahr,  
Stationswerte [in (J/cm<sup>2</sup>)/a] im Zeitreihenvergleich 1951/2000 und 1931/2000





**Teil 2:**  
**Langzeitverhalten**  
**der Verdunstung und der Klimatischen Wasserbilanz**  
**in Baden-Württemberg und Bayern**



## Inhaltsverzeichnis Teil 2

1	Einleitung	71
2	Datengrundlagen	73
2.1	Messreihen der Klimastationen	73
2.2	Berechnung und Regionalisierung der hydrometeorologischen Größen	75
2.2.1	Potentielle Verdunstung	75
2.2.2	Niederschlag und Klimatische Wasserbilanz	78
2.2.3	Tatsächliche Verdunstung (Muster-Hydrotop)	79
3	Statistische Grundlagen und Ergebnisdarstellung	81
3.1	Trendberechnung und Trendtest	81
3.2	Ergebnisdarstellung	83
4	Die hydroklimatischen Bedingungen in Baden-Württemberg und Bayern	85
4.1	Potentielle Verdunstung	85
4.2	Klimatische Wasserbilanz	88
4.3	Tatsächliche Verdunstung (Muster-Hydrotop Gras / lehmiger Sand)	94
5	Zeitreihenverhalten der Gebietsmittel der hydrometeorologischen Größen in Baden-Württemberg und Bayern, 1931/1997	99
5.1	Potentielle Verdunstung	99
5.1.1	Zeitreihenverhalten der Jahreswerte	99
5.1.2	Zeitreihenverhalten der potentiellen Verdunstung im Jahresgang	104
5.2	Klimatische Wasserbilanz	111
5.3	Tatsächliche Verdunstung (Muster-Hydrotop Gras / lehmiger Sand)	118
5.4	Die Untersuchungsperiode 1931/1997 in Bezug zum längerfristigen Zeitreihenverhalten 1891 bis 2006	123
6	Ausblick	129
7	Literatur	131
8	Anlagenverzeichnis	133



## 1 Einleitung

Als Folge des durch das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) prognostizierten globalen Temperaturanstieges ist nach derzeitiger Expertenmeinung eine Intensivierung des hydrologischen Kreislaufes mit Erhöhung der Niederschlags- und der Verdunstungsraten zu erwarten. Unter den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen werden im zeitlichen und Flächenmittel über Deutschland etwa 62 % des Niederschlages durch die Verdunstungsprozesse wieder in die Atmosphäre zurück geführt [1], [2].

Wesentliches Ziel des zwischen den Ländern Baden-Württemberg und Bayern sowie dem Deutschen Wetterdienst vereinbarten Kooperationsvorhabens KLIWA („Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“) ist die Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt dieser Länder. Als Bewertungsgrundlage für zukünftige hydroklimatische Bedingungen wurde durch den Deutschen Wetterdienst in einer Reihe von Teilprojekten das bisherige Zeitreihenverhalten hydroklimatischer Größen, u.a. der Verdunstung, auf der Grundlage einer flächendeckenden Aufbereitung und Regionalisierung verfügbarer, möglichst langer meteorologischer Messreihen analysiert. Die KLIWA-Teilprojekte zur Verdunstung legen den 67-jährigen Untersuchungszeitraum 1931/1997 zugrunde. Die Langzeituntersuchungen zur Verdunstung beziehen sich damit auf den gleichen Untersuchungszeitraum wie die Teilprojekte zum Gebietsniederschlag [3] und sie verwenden die gleiche regionale Auflösung (Rasterwerte und daraus berechnete Gebietsmittelwerte). Damit können einerseits die mit den Niederschlagsprojekten erstellten Rasterwertreihen als Modellinput genutzt und andererseits die Bilanzgrößen aus Niederschlag und Verdunstung einer entsprechenden Zeitreihenanalyse unterzogen werden. Von den Stationen Karlsruhe, Bamberg, München liegen Messreihen für den meteorologischen Dateninput seit 1891 vor. Auf der Grundlage dieser repräsentativen Stationen ist eine zeitlich aktualisierte Auswertung zum Langzeitverhalten von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz bis 2006 und eine Einordnung der Untersuchungsperiode 1931/1997 vorzunehmen.

Die Verdunstung von der Oberfläche der Erde wird nicht nur von den meteorologischen Bedingungen, sondern auch von einer ganzen Reihe nicht-meteorologischer Parameter der Landschaftsausstattung, insbesondere von der Flächennutzung bestimmt. Die so genannte tatsächliche Verdunstung bzw. ihr Gebietsmittelwert (Gebietsverdunstung) kann daher nicht flächendeckend und nicht kontinuierlich gemessen werden und ist durch Modelle zu ermitteln. Das Langzeitverhalten der Gebietsverdunstung wird einerseits durch die langfristigen Veränderungen der meteorologischen Bedingungen, andererseits durch trend- und sprunghafte Änderungen verdunstungsrelevanter Gebietseigenschaften bestimmt, die bei weiter zurücklie-





genden Jahrzehnten meist nicht ausreichend recherchierbar und quantifizierbar sind. Solche Gebietseinflüsse sind zum Beispiel Änderungen der Flächennutzung, Änderungen in den Anbau- und betriebswirtschaftlichen Bedingungen der Landwirtschaft, Waldschäden, wasserbauliche Maßnahmen.

Zielstellung der KLIWA-Teilprojekte zur Verdunstung ist die Separierung und Analyse des ausschließlich meteorologisch bedingten Anteils im Langzeitverhalten der Verdunstung von Vegetationsflächen in Baden-Württemberg und Bayern. Diese Untersuchungen werden flächendeckend anhand folgender abgeleiteter hydrometeorologischer Größen (Definitionen siehe Abschnitt 2.2) durchgeführt:

- potentielle Verdunstung
- klimatische Wasserbilanz
- tatsächliche Verdunstung eines definierten Muster-Hydrotops „Gras/lehmiger Sand“ (Hydrotopverdunstung)

Die Bearbeitung umfasste folgende Teilaufgaben:

- Auswahl geeigneter Berechnungsverfahren für die genannten Größen
- Prüfung und Ergänzung der Stationsreihen meteorologischer Messgrößen für den Modellinput
- Berechnung und Regionalisierung der Verdunstungs- und Bilanzgrößen
- Erstellung von monatlichen und jährlichen Gebietsmittelwertreihen der Verdunstungs- und Bilanzgrößen für die im KLIWA-Projekt abgestimmten Untersuchungsgebiete (s. Abbildung 2.1)
- Zeitreihenanalyse der monatlichen und jährlichen Gebietsmittelwerte
- Zusammenschau des Langzeitverhaltens der Verdunstungs- und Bilanzgrößen, der gegenseitigen Abhängigkeiten ihres Langzeitverhaltens einschließlich der Bezüge zum Langzeitverhalten von Lufttemperatur [4], Globalstrahlung (s. Teil 1 dieses Heftes) und Niederschlag [3] nach den Ergebnissen der entsprechenden KLIWA-Teilprojekte.

## 2 Datengrundlagen

### 2.1 Messreihen der Klimastationen

Aus dem Untersuchungsraum von Baden-Württemberg und Bayern liegen Messreihen des klimatologischen Messnetzes von insgesamt 354 Stationen vor. Abbildung 2.1 zeigt die Verteilung dieser Stationen und die im KLIWA-Projekt abgestimmten Untersuchungsgebiete. Die als Modellinput zur Berechnung der Verdunstung benötigten meteorologischen Größen (vgl. Abschnitt 2.2) gehören zum klimatologischen Standardmessprogramm.

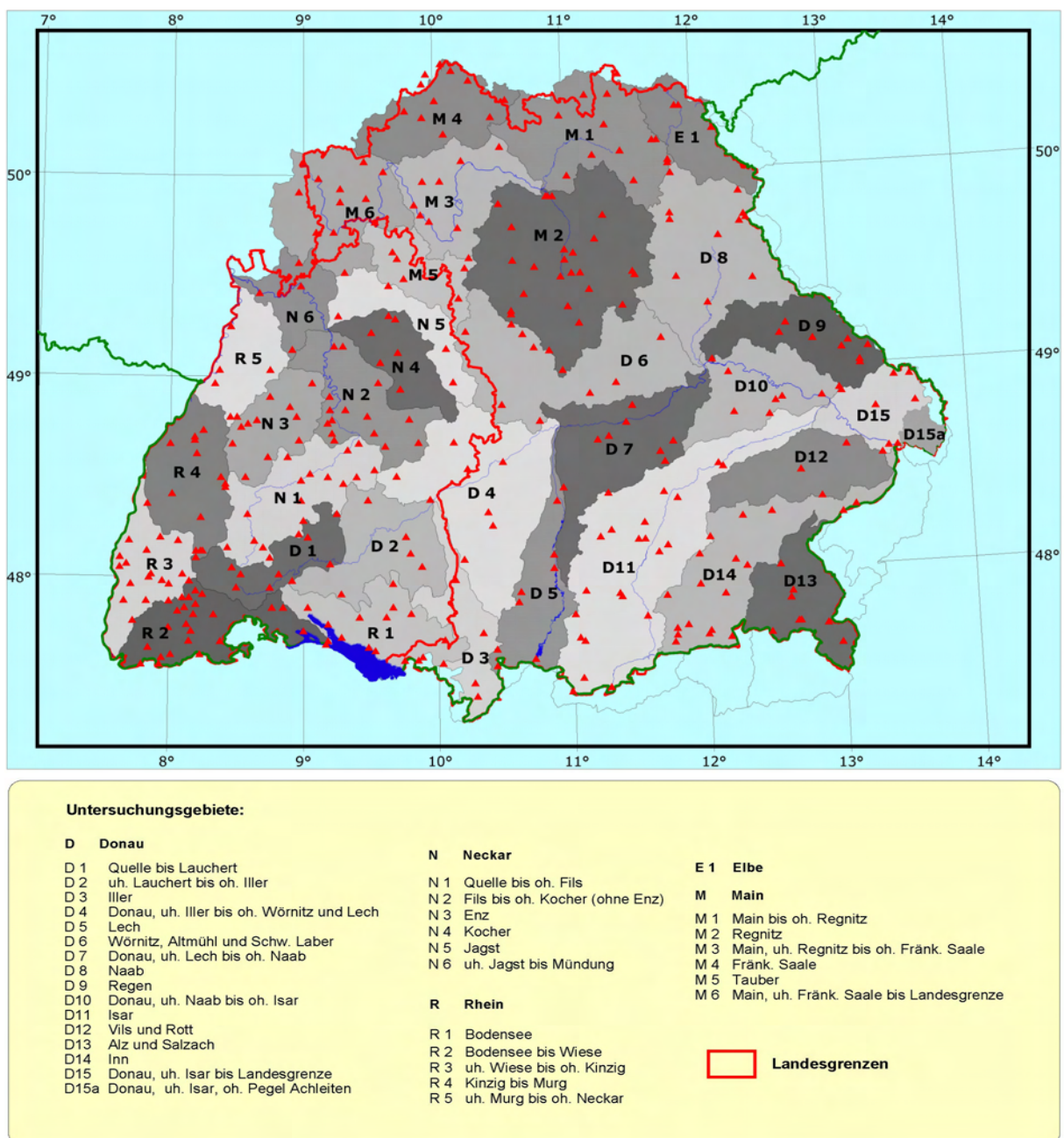


Abbildung 2.1: Klimastationen und Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg und Bayern



Die Untersuchungsgebiete von Baden-Württemberg und Bayern bzw. die hier auftretenden Bereiche der Geländehöhen werden durch die verfügbaren Stationen und ihre regionale Verteilung verdunstungsklimatisch in repräsentativer Weise erfasst. Dabei ist die Dichte der Stationen mit Messung der Sonnenscheindauer auf Grund der geringeren regionalen Variabilität dieser Größe geringer als die Dichte der Stationen mit Lufttemperatur und –feuchte-Messung. Eine Stationsliste einschließlich der Angabe der Koordinaten, der Höhenlage über NN und der Stationskennziffern findet sich als Anlage 2 im Anhang.

Von den in Abbildung 2.1 gezeigten Stationen stehen aber nicht über den gesamten Untersuchungszeitraum 1931/1997 geschlossene Messwertreihen der meteorologischen Größen zur Verfügung. Im Falle verkürzter bzw. lückenhafter Messreihen erfolgte eine Datenergänzung mit Hilfe jahreszeitlich differenzierter Regressionsbeziehungen zu vorhandenen Messreihen benachbarter Stationen. Für die Zeitspanne von 1951 bis 1997 sind mit 171 bis 250 Stationen Anzahl und regionale Verteilung verfügbarer Messreihen als ausreichend zu bewerten. In den Anfangsjahren der Untersuchungsperiode bis etwa 1935 und nachfolgend, bis in die Nachkriegszeit hinein, ist die Stationsanzahl sehr gering, so dass umfangreiche Ergänzungen der Messreihen erforderlich wurden. Die regionale Verteilung der in diesem Zeitreihenabschnitt vorhandenen Stationen ist insbesondere im Hinblick auf die Verteilung der Geländehöhen nicht repräsentativ. Die Auswirkungen dieser schwachen Datenbasis im Anfangszeitraum der Untersuchungsperiode beschränken sich im Wesentlichen auf zeitlich hoch aufgelöste Werte der abgeleiteten Verdunstungsgrößen (Tageswerte). Bei den für die Zeitreihenanalyse verwendeten Monats- und Jahreswertreihen ist von einer ausreichenden, die Trendaussagen nicht beeinflussenden Genauigkeit der Messdatenergänzungen auszugehen.

Von einigen Stationsstandorten aus dem Untersuchungsraum existieren lange Messreihen, die zum Teil bis zum Anfang des Jahrhunderts oder noch bis vor 1900 zurückgehen. Auch diese Messreihen weisen teilweise Lücken auf (insbesondere um 1945), einige enden in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts bzw. sind von Stationsverlegungen betroffen. Im Rahmen des Projektes HUK "Hydrometeorologische Untersuchungen zum Problem der Klimaveränderungen" [5] erfolgte für die Zeitreihe 1891/1997 eine Aufbereitung langer meteorologischer Messreihen ausgewählter Stationen in Deutschland, von denen die Stationen Karlsruhe, Bamberg und München im KLIWA-Untersuchungsraum gelegen sind. Die jetzt bis einschließlich 2006 verlängerten, insgesamt 116-jährigen Messreihen dieser Stationen können zu Zeitreihenvergleichen mit der für die flächendeckende Bearbeitung verwendeten 67-jährigen Reihe 1931/1997 des KLIWA-Teilprojektes herangezogen werden (s. Abschnitt 5.4).

## 2.2 Berechnung und Regionalisierung der hydrometeorologischen Größen

### 2.2.1 Potentielle Verdunstung

Nach DIN 4049-3 [6] ist die potentielle Verdunstung definiert als "Verdunstungshöhe von Oberflächen bei gegebenen meteorologischen Bedingungen und unbegrenzt verfügbarem Wasservorrat". Der Parameter potentielle Verdunstung ist eine Maßzahl für das in den Verdunstungsprozessen wirksame atmosphärische Energiedargebot und findet als abgeleitete meteorologische Größe vielfache Anwendung zur hydroklimatischen Standortbeschreibung und in der Wasserhaushaltsmodellierung. Intern wird in den Wasserhaushaltsmodellen berücksichtigt, dass das mögliche Maximum der Verdunstung nicht nur von atmosphärischen sondern auch von nicht-meteorologischen Standortfaktoren abhängig ist [2].

Im Fachgebiet der Verdunstungsforschung wurde im Laufe des letzten Jahrhunderts weltweit eine relativ große Anzahl von Schätzverfahren für die potentielle Verdunstung entwickelt, deren Berechnungsergebnisse sich bei Anwendung auf den gleichen Standort in Mittelwerten, Varianzen, Häufigkeitsverteilungen usw. teilweise erheblich unterscheiden können. Wegen der empirischen Ansätze in den Formeln und der Einbeziehung unterschiedlicher meteorologischer Größen ist auch die Sensitivität dieser Berechnungsverfahren gegenüber den meteorologischen Messgrößen und deren eventuellen klimatischen Änderungen unterschiedlich. Im deutschen Klimaraum bzw. in den für diesen Raum entwickelten Wasserhaushaltsmodellen haben sich in den letzten Jahrzehnten die folgenden Verfahren zur Abschätzung der potentiellen Verdunstung durchgesetzt und bewährt [2], [7]:

- PENMAN bzw. Gras-Referenzverdunstung (in Originalversion [8] PENMAN-MONTEITH)
- Gras-Referenzverdunstung (empirische Formelversion, wie z.B. im Hydrologischen Atlas von Deutschland HAD [1] verwendet)
- TURC – in verschiedenen Varianten, z.B. TURC/IVANOV, TURC/WENDLING
- HAUDE

Die Formeln von PENMAN bzw. PENMAN-MONTEITH stellen aufgrund ihrer physikalischen Betrachtungsweise des Verdunstungsprozesses die theoretisch ausgereiftesten Verfahren dar. Sie benötigen jedoch einen Dateninput, der insbesondere bei der Bearbeitung langer Zeitreihen und bei Regionalisierung der Werte nicht immer und nicht in der erforderlichen Datengüte zur Verfügung steht. Zum Beispiel stellt die Eingangsgröße Windgeschwindigkeit bei langen Zeitreihen eine Quelle für Inhomogenitäten dar (unzureichende Informationen über Windfeld relevante Veränderungen in der Umgebung der Messstelle, Änderungen der Messhöhe, Wechsel der Messgeräte, Umrechnung Windstärke in m/s, usw.), welche den Gewinn



an physikalischer Genauigkeit bei Anwendung dieser Formelansätze in Frage stellen kann. Aus diesen Daten bezogenen Gründen wurde im neuen Hydrologischen Atlas von Deutschland HAD [1] zur Regionalisierung der potentiellen Verdunstung eine empirische Version der Gras-Referenzverdunstung verwendet, welche mit den Eingangsgrößen Lufttemperatur und Globalstrahlung (Sonnenscheindauer) dem TURC-Ansatz entspricht.

Über Lufttemperatur und Globalstrahlung werden die wesentlichen Energiebilanzkomponenten erfasst, damit stellen der TURC-Ansatz und die empirische Gras-Referenzverdunstung abgerüstete PENMAN-Formeln dar. In historischen Stationsreihen sind die benötigten meteorologischen Messgrößen am ehesten verfügbar und sie sind mit einer vergleichsweise hohen Genauigkeit ergänz- und übertragbar.

Im KLIWA-Teilprojekt zur potentiellen Verdunstung wurden Stationsreihen nach dem Berechnungsverfahren TURC/IVANOV, Formeln (2.1), erstellt. Multipliziert mit spezifischen Pflanzenfaktoren ergibt sich aus (2.1) die maximale Pflanzenverdunstung als Modellinput zur Berechnung der tatsächlichen (realen) Verdunstung (s. Abschnitt 2.2.3). Der verwendete TURC-Ansatz zeigt generell eine gute Anpassung an die PENMAN-Verdunstung. In Abbildung 2.2 werden anhand einiger Stationen Trendverhalten und Jahresgang des TURC-Ansatzes (hier mit und ohne Pflanzenfaktor), der potentiellen Verdunstung nach PENMAN und nach Hydrologischem Atlas HAD gegenüber gestellt. Die regional unterschiedlichen Abweichungen zwischen der Gras-Referenzverdunstung des HAD und dem in KLIWA verwendeten Berechnungsverfahren ergeben sich infolge unterschiedlicher Berechnungsansätze für die Globalstrahlung. Während für den HAD deutschlandweit einheitliche Ångströmfaktoren verwendet wurden, erfolgte bei den KLIWA-Projekten eine regionalklimatische Anpassung dieser Faktoren (vgl. Teil 1 des vorliegenden Heftes, Abschnitt 3.4).

$$\text{PET} = (R_G + 209) \cdot \frac{0,00311 \cdot t_L}{t_L + 15} \quad \text{bei } t_L \geq 3^\circ\text{C}$$

und

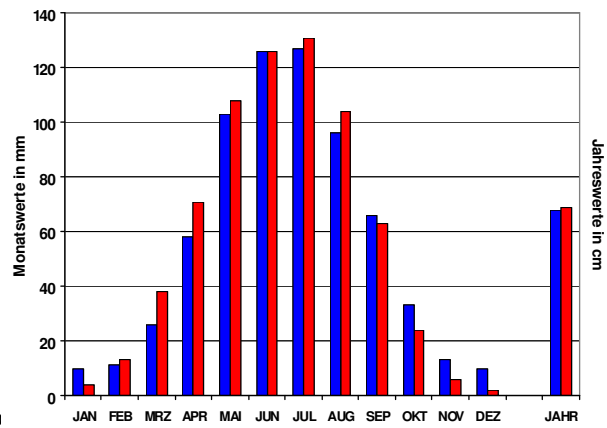
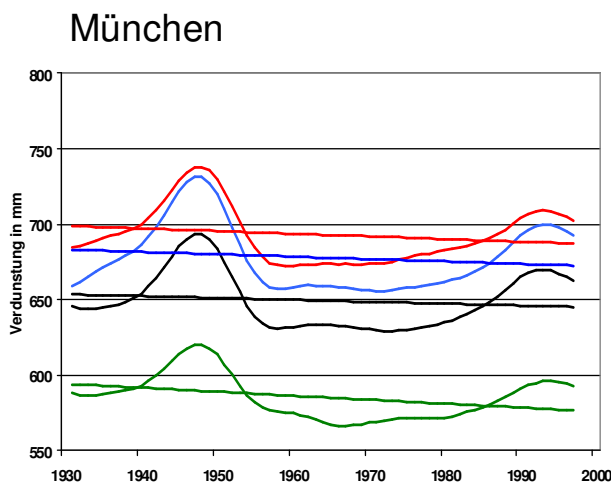
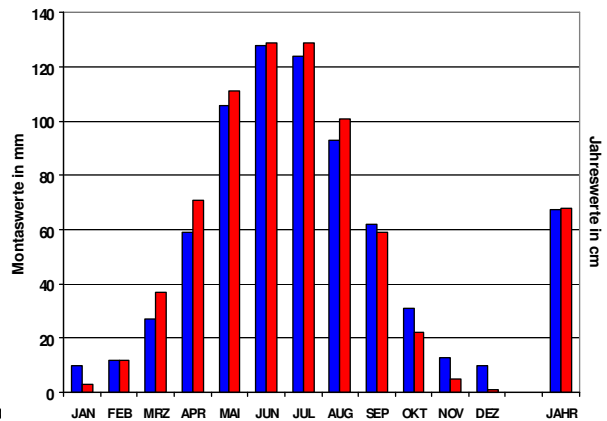
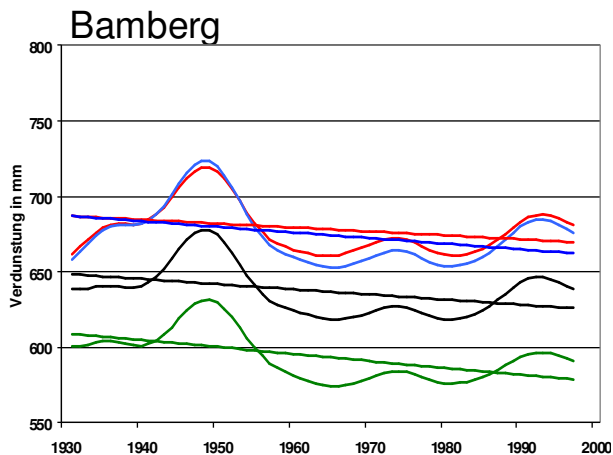
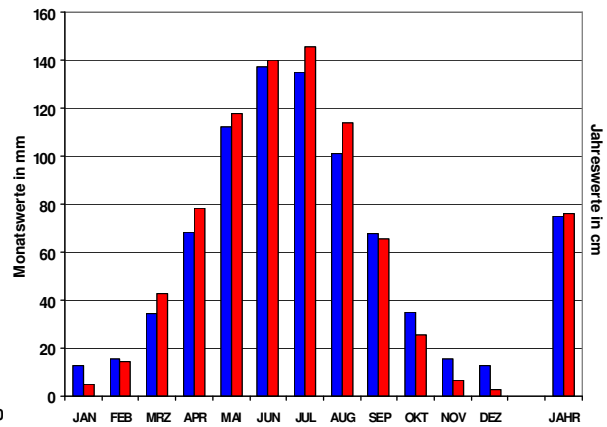
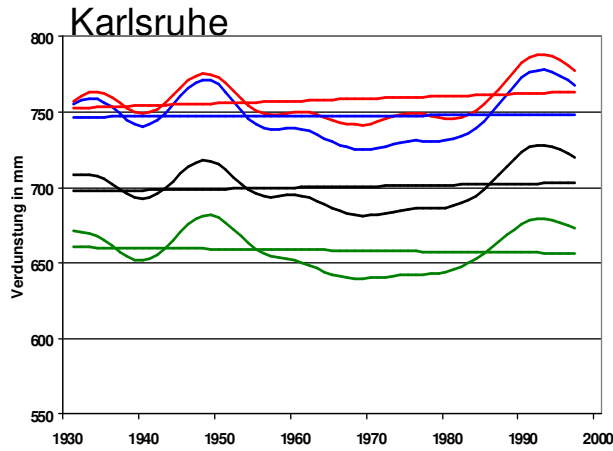
$$\text{PET} = 0,000036 \cdot (25 + t_L)^2 \cdot (100 - U) \quad \text{bei } t_L < 3^\circ\text{C}$$

(2.1)

mit    PET : potentielle Verdunstungshöhe in mm/d  
         $t_L$  : Lufttemperatur in °C  
        U    : relative Luftfeuchte in %  
         $R_G$  : Globalstrahlung in J/cm<sup>2</sup>, berechnet aus Messwerten der  
               Sonnenscheindauer

**Zeitreihen der jährlichen potentiellen Verdunstung (Gauß-Filter)**

**Mittlere Monats- und Jahreswerte der potentiellen Verdunstung 1931/1997**



- Penman
- PET<sub>B</sub> (KLIWA)
- PET (KLIWA)
- Gras-Referenzverdunstung (HAD)

- Penman
- PET<sub>B</sub> (KLIWA)

Abbildung 2.2: Vergleich des zeitlichen Verhaltens der potentiellen Verdunstung bei verschiedenen Berechnungsverfahren





Die Regionalisierung der Stationswertreihen der potentiellen Verdunstung PET erfolgte nach der Methode der Inversen Distanz(ge)wichtung [9] unter Einbeziehung der fünf, einem zu berechnenden Rasterfeld nächstgelegenen Stationen. Die Abhängigkeit der potentiellen Verdunstung von der Geländehöhe wurde durch regional und jahreszeitlich variable Korrekturfaktoren berücksichtigt, welche im Rahmen der Projektbearbeitung abgeleitet wurden.

### 2.2.2 Niederschlag und Klimatische Wasserbilanz

Die zur Berechnung der Klimatischen Wasserbilanz und der tatsächlichen Verdunstung benötigten Niederschlagshöhen wurden als monatliche Rasterwertreihen aus dem KLIWA-Teilprojekt zum Gebietsniederschlag übernommen. Die verfügbare Datenbasis der Niederschlagsmessreihen und das verwendete Regionalisierungsverfahren werden in der KLIWA-Publikation [3] zu diesem Teilprojekt ausführlich beschrieben. Die übernommenen Rasterwertreihen der Niederschlagshöhe wurden, da sie auf Messungen mit dem Hellmann-Niederschlagsmesser basieren, um den systematischen Messfehler dieses Gerätes nach dem Verfahren von RICHTER [10] tageweise korrigiert:

$$P_{\text{kor}} = P + b \cdot P^\varepsilon \quad (2.2)$$

mit  $P$  : Messwert des Hellmann- Gerätes

$P_{\text{kor}}$  : korrigierter Messwert

$b, \varepsilon$  : Parameter in Abhängigkeit von der Windexposition der Messstelle  
und von der Niederschlagsart

Die Klimatische Wasserbilanz KWB ist nach DIN 4049-3 [6] definiert als Differenz zwischen der Niederschlagshöhe und der potentiellen Verdunstungshöhe an einem betrachteten Ort für eine bestimmte Zeitspanne. Im Rahmen des KLIWA-Projektes wurde die Klimatische Wasserbilanz entsprechend aus den vorliegenden Rasterwertreihen des korrigierten Niederschlags [3] und der potentiellen Verdunstung (Abschnitt 2.2.1, Formel (2.1)) berechnet:

$$\text{KWB} = P_{\text{kor}} - \text{PET} \quad (2.3)$$

Betrag und Vorzeichen der Klimatischen Wasserbilanz kennzeichnen die Höhe der klimatisch bedingten Überschüsse bzw. Defizite im Wasserhaushalt und ihre regionale und zeitliche Verteilung. Bei Vergleich klimatischer Wasserbilanzen aus unterschiedlichen Literaturquellen muss beachtet werden, dass zur Ermittlung der KWB nach Formel (2.3) unterschiedliche Berechnungsverfahren für den Niederschlag (z.T. unkorrigierte Messwerte) und für die potentiell-

le Verdunstung eingesetzt werden, was in der Folge zu unterschiedlichen Werten in der Differenzgröße KWB führt.

### 2.2.3 Tatsächliche Verdunstung (Muster-Hydrotop)

Die Verdunstung und damit der Wasserhaushalt von Einzugsgebieten werden nicht nur durch die atmosphärischen Bedingungen (Energiedargebot, Sättigungsdefizit, Wasserverfügbarkeit durch Niederschläge u.a.) sondern in wesentlichem Maße von nicht-meteorologischen Gebietseigenschaften bestimmt. Erheblichen Einfluss auf die Höhe der Gebietsverdunstung hat die Flächennutzung. Bei Langzeitbetrachtungen ist von Flächennutzungsänderungen – beispielsweise zunehmende Versiegelungen und veränderte landwirtschaftliche Produktionsbedingungen – auszugehen, welche die meteorologisch bedingten Trendkomponenten der Gebietsverdunstung in unterschiedlicher Weise überlagern. Die Erhebung von belastbaren Informationen über das Langzeitverhalten der vielfältigen nicht-meteorologischen Parameter, die für die Gebietsverdunstung relevant sind, ist sehr aufwändig und müsste Gegenstand eines eigenständigen Projektes sein. Zielstellung des KLIWA-Teilprojektes zur tatsächlichen Verdunstung war die Ermittlung der ausschließlich meteorologisch – durch Änderungen im Niederschlags- und Energiedargebot – bedingten Trendkomponente im Langzeitverhalten der Vegetationsverdunstung. Hierfür bedarf es keiner Einbeziehung von Flächennutzungsparametern und deren Langzeitverhalten. Eine Untersuchung zum Langzeitverhalten der Verdunstung von Vegetationsflächen kann am Beispiel eines bezüglich Pflanzenbestand und Boden definierten "Muster-Hydrotops" durchgeführt werden. Im KLIWA-Projekt wurde als Musterhydrotop "Grasdecke auf einem Boden mittlerer Güte (lehmgiger Sand)" betrachtet. Die Vegetationsart Grasdecke ist wegen des ganzjährigen Bestandes (im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Saisonkulturen) bei weitgehender regionaler und interannueller Invarianz für die Interpretation langer Verdunstungszeitreihen geeignet. Zur exakten Beschreibung der untersuchten Verdunstungsgröße und zur begrifflichen Abgrenzung von der flächennutzungsabhängigen Gebietsverdunstung wird im Folgenden der Terminus Hydrotopverdunstung verwendet.

Die Berechnung der Zeitreihen der Hydrotopverdunstung "Gras /lehmgiger Sand" erfolgte mit dem Modell VEKOS (s. Anlage 1), und den Vorgaben

Bestand: ganzjährig bodendeckender Grasbestand, Wurzeltiefe maximal 10 dm

Boden: 14 mm/dm nutzbare Feldkapazität, ganzjährig ohne Grundwassereinfluss.

Als Modellinput dienten die potentielle Verdunstung und der korrigierte Niederschlag der entsprechenden KLIWA-Teilprojekte (s. Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2).





### 3 Statistische Grundlagen und Ergebnisdarstellung

#### 3.1 Trendberechnung und Trendtest

Die Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Verdunstungs- und Bilanzgrößen basieren auf der Annahme eines linearen Trends in der jeweils betrachteten Zeitreihe. Die Trendgerade einer Größe  $x$  (Verdunstung, Niederschlag, Bilanz) wird in ihrer Abhängigkeit von der Zeit  $t$  durch folgende Gl. (3.1) beschrieben.

$$x(t) = a + b \cdot t \quad (3.1)$$

Darin sind  $a$  und  $b$  die Koeffizienten der Trendgeraden, die nach der GAUSS'schen Methode der kleinsten Quadrate zu berechnen sind [11].

Der absolute Trend  $T$  der Größe  $x$  ergibt sich nach der linearen Beziehung (3.1) als Differenz zwischen dem Endwert  $x_n$  zum Zeitpunkt  $t_n$  und dem Anfangswert  $x_1$  zum Zeitpunkt  $t_1$  in der Dimension mm Niederschlags- bzw. Verdunstungs- oder Bilanzhöhe:

$$T = x_n - x_1 \quad (3.2)$$

Als relativer Trend  $rT$  wird der auf den Mittelwert  $MW$  der Größe  $x$  bezogene absolute Trendwert  $T$  bezeichnet; die Angabe erfolgt in %:

$$rT = (T / MW) \cdot 100 \quad (3.3)$$

mit  $MW = 0,5 \cdot (x_1 + x_2)$

Aus der Herleitung der Koeffizienten in (3.1) bzw. des Trends (3.2) folgt, dass Trendangaben ausschließlich für das jeweils bearbeitete Zeitintervall gültig sind. Trendangaben weisen somit in Abhängigkeit von der zugrunde gelegten Zeitreihe eine gewisse Zufälligkeit in der Aussage zum Langzeitverhalten der betreffenden Größe auf. Insbesondere durch einzelne, bezüglich der untersuchten Größe extreme Jahre, die – zufällig – zu Beginn oder Ende der bearbeiteten Reihe auftreten, können Trendergebnisse deutlich beeinflusst werden. Eine Methode, Zufälligkeiten in den Trendaussagen für vorgegebene Zeitreihen auszuschließen bzw. zu bewerten, ist die Prüfung der Stabilität der Trends in der Untersuchungsperiode, die anhand so genannter vor- und rückwärts schreitender Trends vorgenommen werden kann. Dabei wird untersucht, wie empfindlich ein Trend auf eine Veränderung des Untersuchungszeitraumes reagiert. Als besonders sicher und aussagefähig gilt die Trendaussage für eine lange Zeitreihe,



wenn sich ein Trendwert von hoher Signifikanz bei den Veränderungen des Bezugszeitraumes nur wenig ändert.

Beim rückwärts schreitenden Trend werden die Berechnungen für Teilreihen der gesamten Untersuchungsperiode durchgeführt, die bei festem Zeitreihenende jeweils am Zeitreihenanfang sukzessive um einen Wert verringert werden. Beim vorwärts schreitenden Trend wird bei festem Zeitreihenanfang jeweils am Ende der Teilreihen ein Wert hinzugenommen, bis die Gesamtreihe der Untersuchungsperiode erreicht ist. Als minimale Zeitreihenlänge wurde ein Zeitraum von 20 Jahren vorgegeben; die Ansetzung eines ausreichenden Mindestzeitraums ist erforderlich, damit die Trendaussagen noch sinnvoll bleiben.

Zur Bewertung der Signifikanz der nach (3.1), (3.2) berechneten Trends wurde das Testverfahren nach MANN-KENDALL eingesetzt. Der von MANN entwickelte Trendtest lautet nach [12]:

$$Q_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)}{\frac{1}{2} n(n-1)} = \frac{s}{\frac{1}{2} n(n-1)} \quad (3.4)$$

Darin ist  $n$  die Länge der untersuchten Zeitreihe und  $x_i, x_j$  sind die zu vergleichenden Datenelemente der Zeitreihe. Die Summierung erfolgt über alle möglichen, das heißt  $\frac{1}{2} n(n-1)$  Wertepaare  $(x_i, x_j)$ , für die  $i < j$  gilt.

Für  $n > 10$  ist die Testgröße  $Q_s$  näherungsweise normalverteilt mit der Varianz

$\sigma^2 = \frac{1}{18} (n(n-1)(2n+5))$  und dem Mittelwert  $\mu = 0$ . Damit ergibt sich die normierte Testgröße

$Q$  zu

$$Q = \frac{Q_s - \mu}{\sigma} = \frac{s}{\left[ \frac{1}{18} n(n-1)(2n+5) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.5)$$

Durch KENDALL erfolgte eine Modifizierung dieses Tests für den Fall identischer Zeitreihenwerte, der bei hier betrachteten Niederschlags-, Verdunstungs- und Bilanzgrößen eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt. In der vorliegenden Arbeit wurde daher die modifizierte Testgröße  $Q$  nach (3.6) verwendet, in der  $b_i$  die Anzahl identischer Zeitreihenwerte  $x_i$  ist.

$$Q = \frac{s}{\left[ \frac{1}{18} \left( n(n-1)(2n+5) - \sum_i b_i(b_i-1)(2b_i+5) \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.6)$$

Die Testgröße  $Q$  ist standardnormalverteilt und kann mit Hilfe der tabellierten Normalverteilung (z.B. in [11]) zur Signifikanzprüfung eingesetzt werden. Die Signifikanz  $S$  wird in % angegeben. Der Signifikanzwert  $S = 80\%$  wurde im Rahmen von KLIWA als unterster Schwellenwert für signifikante Zeitreihenänderungen festgelegt. Wird durch den Test ein Wert  $S < 80\%$  bestimmt, liegt kein signifikanter Trend vor bzw. ein Trend gilt als statistisch nicht nachweisbar. Bei Signifikanzbefunden von  $S > 80\%$  erfolgen in den Ergebnisdarstellungen graduelle Abstufungen mit Kennzeichnung von Überschreitungen der Schwellenwerte von  $90\%$ ,  $95\%$  und  $99\%$ .

### 3.2 Darstellung der Ergebnisse

Nach Regionalisierung der hier betrachteten hydrometeorologischen Größen (s. Abschnitt 2) wurden für die Trendanalyse Gebietsmittelwerte für die in Abbildung 2.1 gezeigten, innerhalb des KLIWA-Projektes abgestimmten Untersuchungsgebiete berechnet. Datengrundlage der Trendanalyse bildeten die Zeitreihen der jährlichen und der monatlichen Gebietsmittelwerte der Größen sowie ihre Halbjahreswertreihen für das hydrologische Winterhalbjahr November – April, bzw. Sommerhalbjahr Mai – Oktober.

Die Ergebnisse und ihre regionalen Unterschiede werden sowohl in Kartendarstellungen für das Gesamtgebiet als auch in Tabellenform mit drei Tabellenteilen dargestellt, welche jeweils die Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg, die Untersuchungsgebiete des Donaueinzugsgebietes und die Untersuchungsgebiete des Elbe- und Main-einzugsgebietes von Bayern umfassen. Das Taubergebiet (M 5) ist sowohl in den Tabellenteilen für Baden-Württemberg als auch für Bayern enthalten. Innerhalb der Tabellen werden die Untersuchungsgebiete nach ihrer mittleren Geländehöhe angeordnet, beginnend jeweils mit dem Gebiet der geringsten Geländehöhe in Baden-Württemberg und im bayerischen Main-/Elbe- bzw. Donaauraum. Diese Differenzierung der Tabellen soll die Erkennung regionaler und Geländehöhen-abhängiger Unterschiede im Trendverhalten erleichtern.

Ergebnisse zum Trendverhalten der Gebietsniederschläge werden nur insoweit präsentiert, wie sie zur Beschreibung und Interpretation der gegenseitigen Abhängigkeiten bzw. des Zusammenwirkens mit den Verdunstungs- und Bilanzgrößen erforderlich sind. Darüber hinaus ist auf die umfassende Darstellung der Analyseergebnisse zum Langzeitverhalten der Gebietsniederschläge im Heft 7 der KLIWA-Publikationen zu verweisen [3].



## 4 Die hydroklimatischen Bedingungen in Baden-Württemberg und Bayern

### 4.1 Potentielle Verdunstung

Abbildung 4.1 zeigt in Rasterfelddarstellung die regionale Verteilung der mittleren jährlichen potentiellen Verdunstungshöhe 1931/1997 in Baden-Württemberg und Bayern; in Tabelle 4.1 werden die Gebietsmittelwerte dieser Größe für die abgestimmten Untersuchungsgebiete angegeben. In beiden Darstellungsformen wird ersichtlich, dass die potentielle Verdunstung einerseits eine deutliche Abhängigkeit von der Geländehöhe und andererseits – bei vergleichbaren Höhenlagen – eine Abnahme von West und Südwest nach Ost und Nordost zeigt. Die Unterschiede in den mittleren Jahreswerten der potentiellen Verdunstung können in vergleichbarer Höhenlage zwischen West und Ost Werte bis ca. 60 mm erreichen (vgl. N3 Enz mit D8 Naab; R1/R2 Bodensee/Hochrhein mit E1 Elbe). Die Ursachen liegen sowohl bei den Lufttemperaturen [4] – mildere Winter im Westen, strengere Winter im Osten, als auch bei der Sonnenscheindauer/Globalstrahlung, die im Norden und Nordosten des süddeutschen Untersuchungsraumes am geringsten ist (s. Teil 1 des vorliegenden Berichtes).

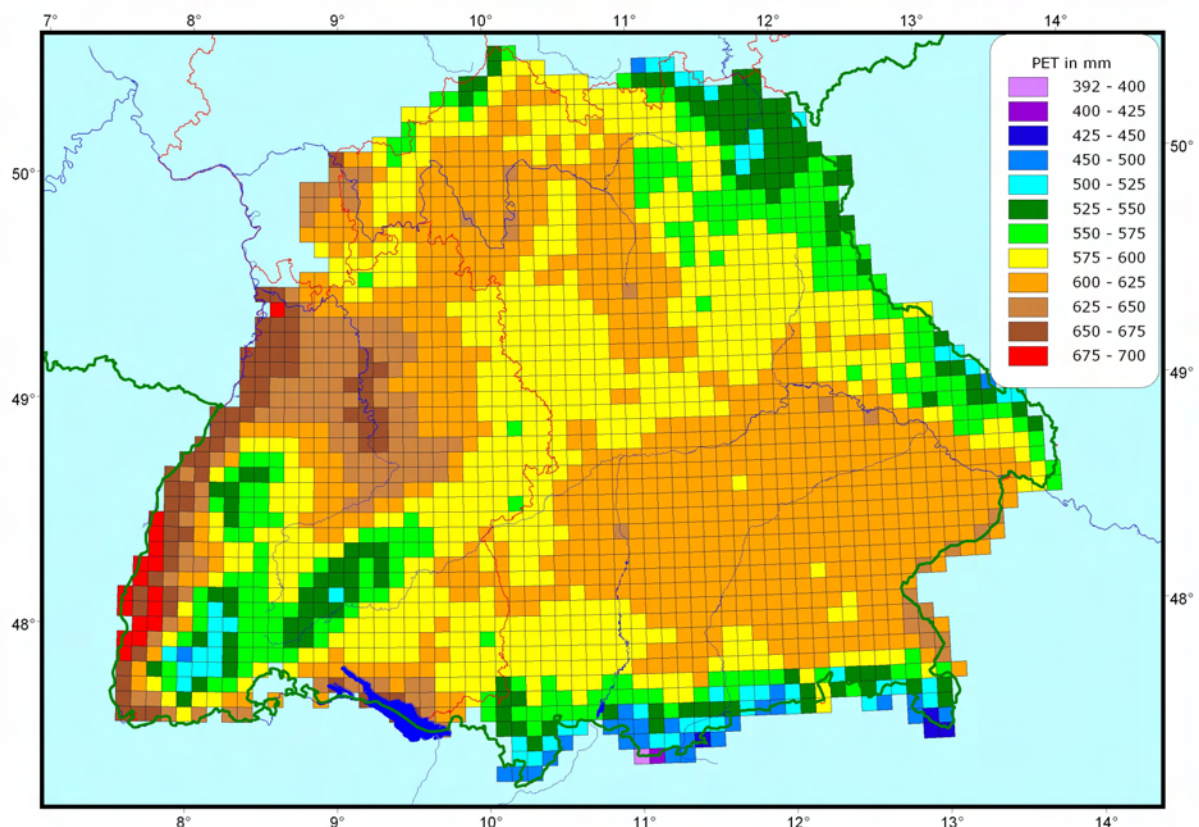


Abbildung 4.1: Mittlere regionale Verteilung der jährlichen potentiellen Verdunstung PET (in mm), Baden-Württemberg und Bayern 1931/1997



## Baden-Württemberg

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
R 5	196	12	14	31	58	91	106	114	97	65	34	15	12	649
N 6	282	11	13	29	55	89	104	111	95	63	33	14	11	628
M 5	345	10	12	26	52	85	99	107	94	62	31	13	10	601
N 2	373	12	14	29	54	88	103	112	96	64	34	15	12	633
N 5	396	10	11	26	51	86	101	109	93	62	31	13	10	603
N 4	396	10	12	27	52	87	102	110	94	63	32	13	10	612
R 3	409	12	14	30	55	88	106	114	97	65	34	15	12	642
R 4	452	11	13	27	52	85	102	110	94	63	32	14	11	614
N 3	477	11	13	26	50	84	100	109	93	62	32	14	11	605
N 1	559	10	12	25	49	82	99	108	92	62	32	14	11	596
R 1	567	9	11	26	51	85	101	110	95	64	32	12	10	606
D 2	625	9	11	24	48	82	99	108	93	62	31	12	9	588
R 2	692	9	11	23	46	79	98	107	91	61	31	13	10	579
D 1	790	8	10	20	41	75	94	103	88	59	29	11	8	546

## Bayern, Einzugsgebiet Donau

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
D10	415	8	10	24	53	90	104	111	95	63	31	11	8	608
D12	432	8	10	25	54	90	104	112	96	64	32	11	8	614
D7	444	9	10	25	53	88	103	112	96	64	32	11	8	611
D6	476	8	10	24	50	86	101	109	94	62	31	11	8	594
D8	494	8	9	22	48	85	100	106	91	59	29	10	8	575
D4	547	9	11	25	50	84	99	109	94	63	31	12	9	596
D15	551	8	9	22	49	87	101	108	93	61	30	10	7	585
D9	569	9	10	21	47	84	99	106	91	59	28	11	9	574
D15a	577	7	9	21	49	87	101	108	93	61	30	10	7	583
D14	590	10	11	24	50	85	100	108	93	63	32	12	9	597
D11	675	10	11	24	48	82	97	106	91	62	31	13	10	585
D13	785	10	11	22	45	80	96	105	90	60	30	13	10	572
D5	791	11	12	23	45	79	95	105	90	62	31	14	11	578
D3	872	11	12	22	42	76	92	103	89	61	30	14	11	563

## Bayern, Einzugsgebiete Main, Elbe

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
M3	276	11	13	27	54	89	103	109	93	61	31	14	11	616
M6	295	11	12	27	53	87	102	108	92	60	30	14	11	607
M5	345	10	12	26	52	85	99	107	94	62	31	13	10	601
M4	379	10	11	24	50	85	100	106	90	58	29	13	10	586
M2	392	9	11	24	51	87	102	108	93	61	30	12	9	597
M1	424	8	10	23	48	85	99	105	90	58	29	11	8	574
E1	583	7	8	19	42	80	96	101	87	56	27	9	7	539

Tabelle 4.1: Mittlere Monats- und Jahreswerte der potentiellen Verdunstung (in mm)

Gebietsmittelwerte, Zeitreihe 1931 / 1997

Im gesamten Mainraum ist wegen der geringeren Sonnenscheindauer die potentielle Verdunstung vergleichsweise niedrig: bei den in etwa 400 m mittlerer Geländehöhe gelegenen Gebieten M1, M2, M4 (Main mit Regnitz, Fränkische Saale) weisen die Gebietsmittel der jährlichen potentiellen Verdunstung etwa gleiche Werte auf wie in den Gebieten R2 (Hochrhein) und D2 (Donau oh. Lauchert bis Iller) mit ca. 600 m bis 700 m mittlerer Geländehöhe.

Darüber hinaus zeichnen sich thermisch begünstigte Regionen wie der Bodenseeraum oder die Gebiete N2 (Fils) und R3 (Rhein uh. Wiese bis oh. Kinzig) auch in der regionalen Verteilung bzw. den Gebietsmitteln der potentiellen Verdunstung durch erhöhte Werte ab. In den Hochlagen der Alpen ergibt die vergleichsweise hohe Sonnenscheindauer/Globalstrahlung eine zu tiefer gelegenen, wärmeren Gebieten relativ hohe potentielle Verdunstung. Bei den Gebietsmittelwerten der potentiellen Verdunstung in den Donauebenen Bayerns ist dadurch die Abnahme mit der Geländehöhe deutlich geringer ausgeprägt als in Baden-Württemberg.

Die regionale Spannweite der Gebietsmittelwerte der mittleren jährlichen potentiellen Verdunstung beträgt für die Untersuchungsperiode 110 mm, mit 649 mm im Gebiet R5 (Rhein uh. Murg bis oh. Neckar) und 539 mm in E1 (Elbe). Die regionale Variabilität ist damit größer als die zeitliche Variabilität, die bei Jahreswerten rund 7 % beträgt. Die höchsten Rasterwerte der mittleren jährlichen potentiellen Verdunstung finden sich in der Markgräfler und Offenburger Rheinebene (zu Gebieten R3 und R4) mit Werten zwischen 675 mm und 700 mm. Der geringste Rasterwert ist mit 392 mm im Wettersteingebirge (zu Gebiet D11) zu verzeichnen.

Die potentielle Verdunstung weist einen ausgeprägten Jahresgang mit einem Maximum im Juni/Juli und einem winterlichen Minimum mit nur geringen Unterschieden zwischen den monatlichen Summen von November bis Februar auf (s. Tabelle 4.1). Die monatlichen Summen des Juni oder Juli machen jeweils einen Anteil von etwa 17 % – 18 % des Jahreswertes der potentiellen Verdunstung aus, während die Summe des Jahresabschnittes November bis Februar nur einen Anteil von etwa 6% – 7 % hat. Diese Relation ist für die Auswirkung jahreszeitlich unterschiedlicher Trends auf den Trend der Jahreswerte der potentiellen Verdunstung von ausschlaggebender Bedeutung (s. Abschnitt 5).





## 4.2 Klimatische Wasserbilanz

Abbildung 4.2 zeigt in Rasterfelddarstellung die regionale Verteilung der mittleren jährlichen Klimatischen Wasserbilanz 1931/1997 in Baden-Württemberg und Bayern; Tabelle 4.2 enthält die Gebietsmittelwerte dieser Größe für die abgestimmten Untersuchungsgebiete. Alle Angaben beziehen sich auf das in den KLIWA-Teilprojekten eingesetzte Berechnungsverfahren (s. Abschnitt 2.2). In Tabelle 4.3 werden zum Vergleich die entsprechenden Gebietsmittelwerte der korrigierten Niederschlagshöhe angegeben.

Die regionale Verteilung der Klimatischen Wasserbilanz wird wesentlich durch die Niederschlagsverteilung bestimmt. So zeichnen sich in der Kartierung der mittleren Jahreswerte in Abbildung 4.2 die niederschlagsreichen Luv- und Gipfellagen der Gebirge mit hohen Bilanzwerten ab. Im Schwarzwald sind verbreitet Rasterwerte größer als 1000 mm zu verzeichnen,

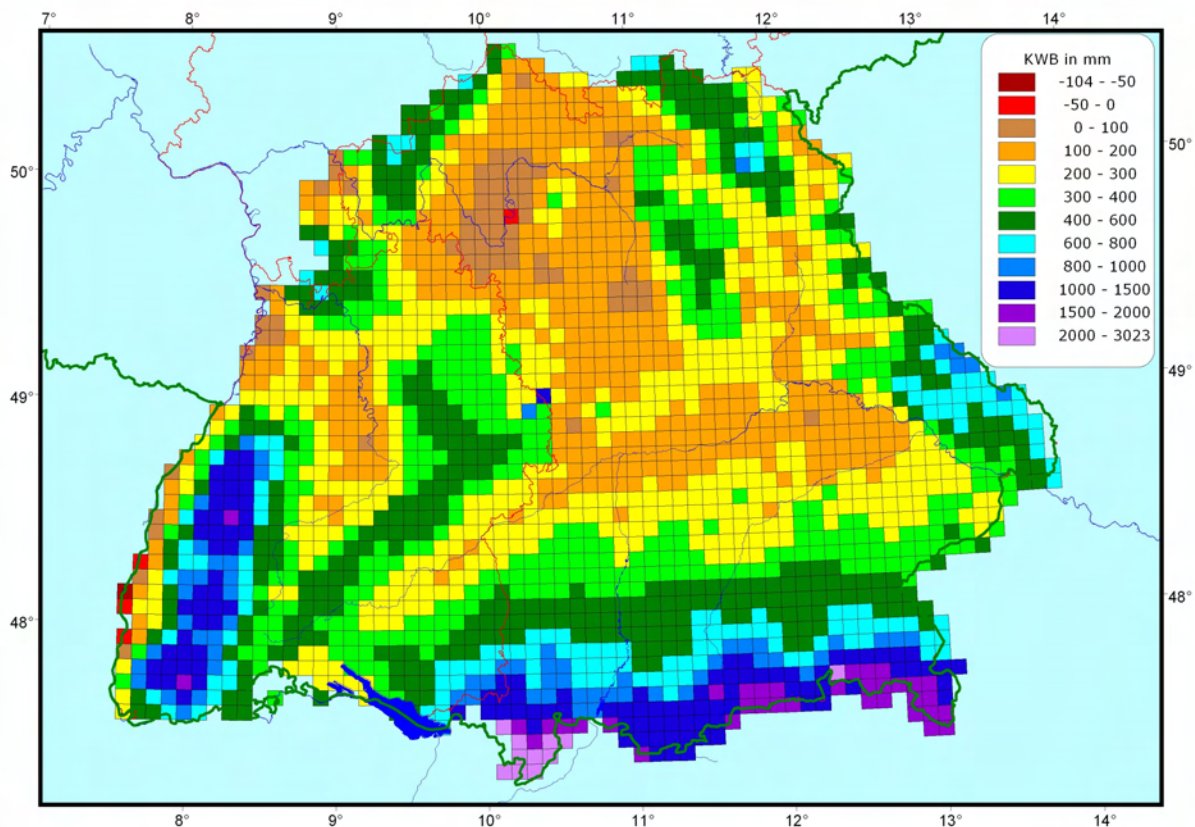


Abbildung 4.2: Mittlere regionale Verteilung der jährlichen Klimatischen Wasserbilanz KWB (in mm), Baden-Württemberg und Bayern 1931/1997

in den Gipfellagen der Alpen treten Rasterwerte größer 2000 mm mit einem Höchstwert von 3015 mm (Allgäuer Hochalpen, zu Gebiet D3) auf. Bei vergleichbaren Höhen und Expositionen des Geländes (vgl. West-/Ostalpen; Schwarzwald – Bayerischer Wald) ist als Merkmal zunehmender Kontinentalität des Klimas von West nach Ost eine Abnahme der Klimatischen Wasserbilanz – hauptsächlich infolge der Abnahme des Niederschlages in dieser Richtung zu verzeichnen.

In den Niederungen zwischen den Gebirgszügen – Oberrheintiefland, Neckar- und Tauberland, Täler von Donau und Naab und im Mittelfränkischen Becken – liegen die mittleren Jahreswerte der Klimatischen Wasserbilanz großräumig im Wertebereich von 0 bis +200 mm. Der Untersuchungsraum weist auch einige Rasterfelder auf, für die im vieljährigen Mittel die Bilanz aus den Jahreswerten von Niederschlag und potentieller Verdunstung negativ ist. Die höchsten Bilanzdefizite von bis zu –100 mm sind im Oberrheintiefland in der Markgräfler und der Offenburger Rheinebene (im Gebiet R3) zu verzeichnen. Ursachen der negativen Rasterwerte sind hier nicht nur die geringeren Niederschläge im Lee von Vogesen bzw. Haardt, sondern auch die hohe potentielle Verdunstung im Oberrheintiefland. Weiterhin ist, räumlich eng begrenzt, im Schweinfurter Becken (zu M3) die jährliche Klimatische Wasserbilanz als Folge der geringen Niederschläge im Mittel negativ.

Als Mittelwert für die KLIWA-Untersuchungsgebiete liegen die durchschnittlichen Jahreswerte der Klimatischen Wasserbilanz in der Untersuchungsperiode 1931/1997 durchweg im positiven Bereich (s. Tabelle 4.2). Der höchste Gebietsmittelwert der Klimatischen Wasserbilanz ist mit 1160 mm im Gebiet D3 (Iller), dem Gebiet des höchsten Gebietsniederschlages, zu verzeichnen. Der geringste Gebietsmittelwert der Klimatischen Wasserbilanz ergibt sich im Untersuchungsraum mit 97 mm für das Gebiet M3 (Main uh. Regnitz oh. Fränkische Saale), in dem auch die Gebietsniederschlagshöhe am geringsten ist (Tabelle 4.3). Gebietszeitreihen der Klimatischen Wasserbilanz, deren vieljährige Mittelwerte geringer als etwa 300 mm sind, weisen in niederschlagsärmeren Jahren negative Jahreswerte auf. Die größte Häufigkeit negativer jährlicher Bilanzen liegt im Gebiet M3 (Main uh. Regnitz oh. Fränkische Saale) mit 14 Jahren der 67-jährigen Reihe, gefolgt von M5 (Tauber) mit 11 und R5 (Rhein uh. Murg oh. Neckar) und D6 (Wörnitz, Altmühl, Schw. Laber) mit 7 bzw. 6 Jahren. Gebiete, in denen negative Jahreswerte der Klimatischen Wasserbilanz gar nicht oder nur sehr selten auftreten, sind in Baden-Württemberg D1 (Donau Quelle bis Lauchert) und R1 bis R4 (Hoch- und Oberrhein bis Murg) und in Bayern die Gebiete der Donauzuflüsse aus der Alpenregion D3 (Iller), D5 (Lech), D11 (Isar), D14 (Inn), D13 (Alz, Salzach) sowie das Gebiet Donau uh. Isar (D15).



## Baden-Württemberg

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
R 5	196	58	50	31	12	-4	-7	-25	-13	7	34	60	61	264
N 6	282	78	64	44	17	-5	-7	-17	-7	13	44	73	81	379
M 5	345	49	40	26	2	-15	-14	-28	-20	-4	25	44	53	158
N 2	373	58	50	35	17	4	7	-14	-2	10	31	57	58	311
N 5	396	67	57	39	14	-5	-4	-17	-8	5	35	60	70	314
N 4	396	71	61	42	19	0	3	-14	-4	8	38	64	72	360
R 3	409	72	62	45	29	21	16	-1	14	28	47	76	74	483
R 4	452	116	100	78	55	39	42	21	33	48	74	111	114	831
N 3	477	69	59	41	22	7	6	-18	-3	10	33	66	66	358
N 1	559	59	50	37	22	13	13	-12	4	13	31	57	56	343
R 1	567	72	64	46	37	34	40	32	37	38	49	73	73	595
D 2	625	49	42	28	19	12	17	2	9	15	30	50	50	323
R 2	692	114	95	71	45	29	28	8	30	37	64	103	112	736
D 1	790	73	62	47	34	23	25	4	19	21	41	68	72	489

## Bayern, Einzugsgebiet Donau

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
D10	415	54	45	28	2	-14	-5	-7	-3	3	29	50	58	240
D12	432	51	44	29	7	-3	6	3	6	4	28	50	55	280
D7	444	44	39	23	3	-5	2	-6	-3	4	25	45	48	219
D6	476	52	44	28	7	-9	-6	-14	-10	0	27	48	55	223
D8	494	60	50	34	7	-12	-8	-10	-6	5	32	53	66	271
D4	547	51	44	29	16	9	19	3	6	14	30	52	52	325
D15	551	84	73	52	22	7	15	17	18	18	45	72	93	516
D9	569	72	59	45	20	4	13	13	14	15	42	61	78	436
D15a	577	83	73	55	26	15	23	27	24	20	48	73	90	557
D14	590	72	64	56	42	40	58	58	53	37	49	73	74	676
D11	675	63	56	47	38	39	54	51	47	35	45	63	63	601
D13	785	104	92	92	80	80	104	109	101	71	78	100	106	1117
D5	791	73	67	61	54	58	79	72	68	54	55	74	72	787
D3	872	109	100	91	84	85	109	103	100	82	82	106	109	1160

## Bayern, Einzugsgebiete Main, Elbe

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
M3	276	44	34	19	-4	-26	-24	-32	-22	-6	22	42	50	97
M6	295	68	55	38	14	-10	-12	-19	-8	9	41	64	75	317
M5	345	49	40	26	2	-15	-14	-28	-20	-4	25	44	53	158
M4	379	68	53	36	11	-14	-14	-19	-9	5	37	61	76	291
M2	392	56	45	32	6	-15	-13	-17	-15	1	30	50	61	222
M1	424	67	52	36	13	-12	-9	-14	-8	8	36	59	75	304
E1	583	64	52	39	18	-6	-7	-6	1	8	36	58	70	328

Tabelle 4.2: Mittlere Monats- und Jahreswerte der Klimatischen Wasserbilanz (in mm)  
Gebietsmittelwerte, Zeitreihe 1931 / 1997

**Baden-Württemberg**

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
R 5	196	70	64	62	70	87	99	89	84	72	68	75	73	913
N 6	282	89	77	73	72	84	97	95	88	76	77	87	92	1007
M 5	345	59	52	52	54	70	85	79	74	58	56	57	63	759
N 2	373	70	64	64	71	92	110	98	94	74	65	72	70	944
N 5	396	77	68	65	65	81	97	92	86	67	66	73	80	917
N 4	396	81	73	69	71	87	105	96	90	71	70	77	82	972
R 3	409	84	76	75	84	109	122	113	111	93	81	91	86	1125
R 4	452	127	113	105	107	124	144	131	127	111	106	125	125	1445
N 3	477	80	72	67	72	91	106	91	90	72	65	80	77	963
N 1	559	69	62	62	71	95	112	96	96	75	63	71	67	939
R 1	567	81	75	72	88	119	141	142	132	102	81	85	83	1201
D 2	625	58	53	52	67	94	116	110	102	77	61	62	59	911
R 2	692	123	106	94	91	108	126	115	121	98	95	116	122	1315
D 1	790	81	72	67	75	98	119	107	107	80	70	79	80	1035

**Bayern, Einzugsgebiet Donau**

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
D10	415	62	55	52	55	76	99	104	92	66	60	61	66	848
D12	432	59	54	54	61	87	110	115	102	68	60	61	63	894
D7	444	53	49	48	56	83	105	106	93	68	57	56	56	830
D6	476	60	54	52	57	77	95	96	84	62	58	59	63	817
D8	494	68	59	56	55	73	92	96	85	64	61	63	74	846
D4	547	60	55	54	66	93	118	112	100	77	61	64	61	921
D15	551	92	82	74	71	94	116	125	111	79	75	82	100	1101
D9	569	81	69	66	67	88	112	119	105	74	70	72	87	1010
D15a	577	90	82	76	75	102	124	135	117	81	78	83	97	1140
D14	590	82	75	80	92	125	158	166	146	100	81	85	83	1273
D11	675	73	67	71	86	121	151	157	138	97	76	76	73	1186
D13	785	114	103	114	125	160	200	214	191	131	108	113	116	1689
D5	791	84	79	84	99	137	174	177	158	116	86	88	83	1365
D3	872	120	112	113	126	161	201	206	189	143	112	120	120	1723

**Bayern, Einzugsgebiete Main, Elbe**

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
M3	276	55	47	46	50	63	79	77	71	55	53	56	61	713
M6	295	79	67	65	67	77	90	90	85	69	71	78	86	924
M5	345	59	52	52	54	70	85	79	74	58	56	57	63	759
M4	379	78	64	60	61	71	86	87	81	63	66	74	86	877
M2	392	65	56	56	57	73	89	91	78	62	60	62	70	819
M1	424	75	62	59	61	73	90	91	83	66	65	70	83	878
E1	583	71	60	58	60	75	89	95	88	64	63	67	77	867

Tabelle 4.3: Mittlere Monats- und Jahreswerte der korrigierten Niederschlagshöhe (in mm)  
Gebietsmittelwerte, Zeitreihe 1931 / 1997



Abbildung 4.3 zeigt anhand einiger ausgewählter Untersuchungsgebiete typische Jahrgänge der Klimatischen Wasserbilanz im Untersuchungsraum. In Baden-Württemberg und im nördlichen, östlichen und mittleren Bayern (Elbe-, Main-Gebiete und D4, D6 - D10, D12, D15) liegt im mittleren Jahrgang das Maximum der Klimatischen Wasserbilanz im Dezember / Januar und das Minimum im Juli bzw. Mai (im Osten Bayerns: D8, D9, D10, D12, D15). Im Sommerhalbjahr sind verbreitet durchschnittlich negative Monatswerte der Klimatischen Wasserbilanz zu verzeichnen. Bei den meisten Gebieten umfasst dieser Zeitraum die Monate Mai bis August, in den niederschlagsarmen Gebieten M3 und M5 auch die Monate April bzw. September. In den niederschlagsreicheren Gebieten liegen auch im Juli die Mittelwerte der Klimatischen Wasserbilanz im leicht positiven Bereich (D1, D2, R1, R2, D4), bzw. die im Mittel negativen Bilanzwerte bleiben auf Juli/August (N2, N3, N4) oder auf ausschließlich Juli (N1, R3) beschränkt.

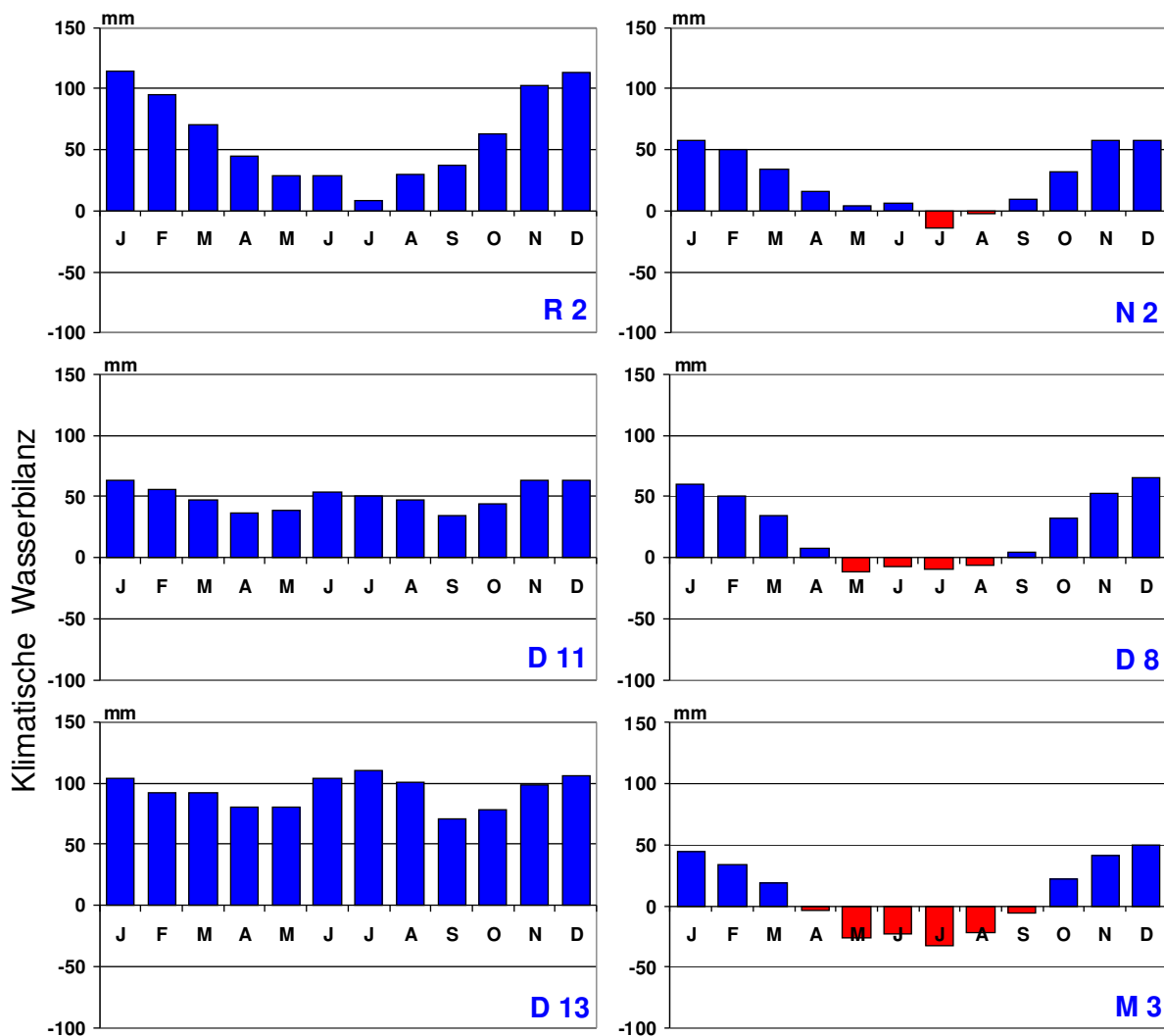


Abbildung 4.3: Mittlerer Jahrgang der Klimatischen Wasserbilanz (in mm) 1931/1997  
ausgewählte Untersuchungsgebiete

Die Gebiete südlich der Donau vom Lech bis zur östlichen Landesgrenze zeigen einen Jahresgang der Klimatischen Wasserbilanz, der sich von dem zuvor beschriebenen des übrigen süddeutschen Raumes maßgeblich unterscheidet (Abbildung 4.3, Beispielgebiete D11, D13). Die Sommerniederschläge sind hier so hoch (vgl. Tabelle 4.3), dass sie die potentielle Verdunstung im Mittel übertreffen und die Durchschnittswerte der Klimatischen Wasserbilanz in allen Monaten des Sommerhalbjahres und damit ganzjährig im positiven Bereich bleiben. Der mittlere Jahresgang der Klimatischen Wasserbilanz bildet somit eine Doppelwelle mit einem Maximum im Winter (Dezember/Januar) und im Sommer (Juni/Juli). In den Gebieten D5 (Lech) und D13 (Alz, Salzach) liegt das Hauptmaximum im Sommer. Die Minima sind im April / Mai und im September zu verzeichnen.

In Abbildung 4.4 wird am Beispiel von typischen Untersuchungsgebieten aufgezeigt, dass die Zeitreihe der Klimatischen Wasserbilanz überwiegend durch die hohe zeitliche Variabilität des Niederschlages bestimmt wird. Der Variabilitätskoeffizient (Streuung dividiert durch Mittelwert) bewegt sich bei den jährlichen Gebietsniederschlagssummen im Bereich von rd.12 % (Gebiete südlich der Donau) bis etwa 17 % am Mittleren und Unteren Main; für die meisten Gebiete ergibt sich eine Variabilität bei 15 % bis 16 %. Die Jahreswertreihen der potentiellen Verdunstung hingegen zeigen nur eine Variabilität um 7 % (s. Abschnitt 4.1).

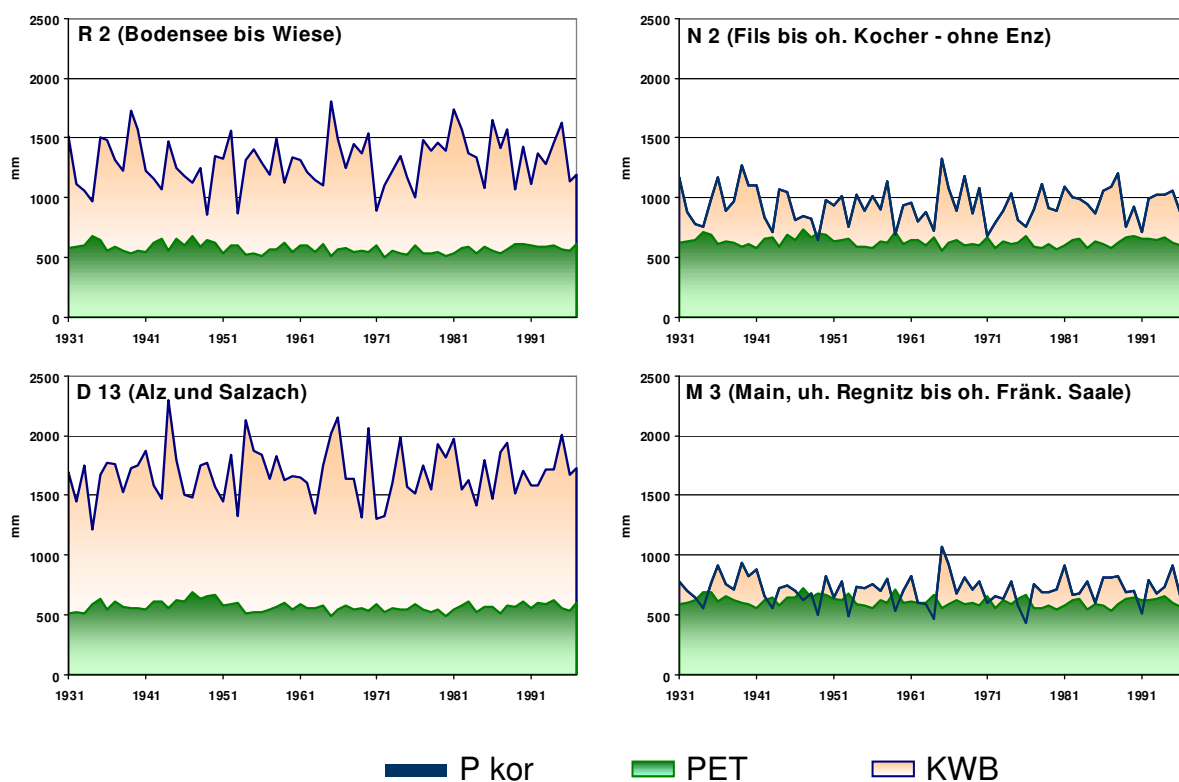


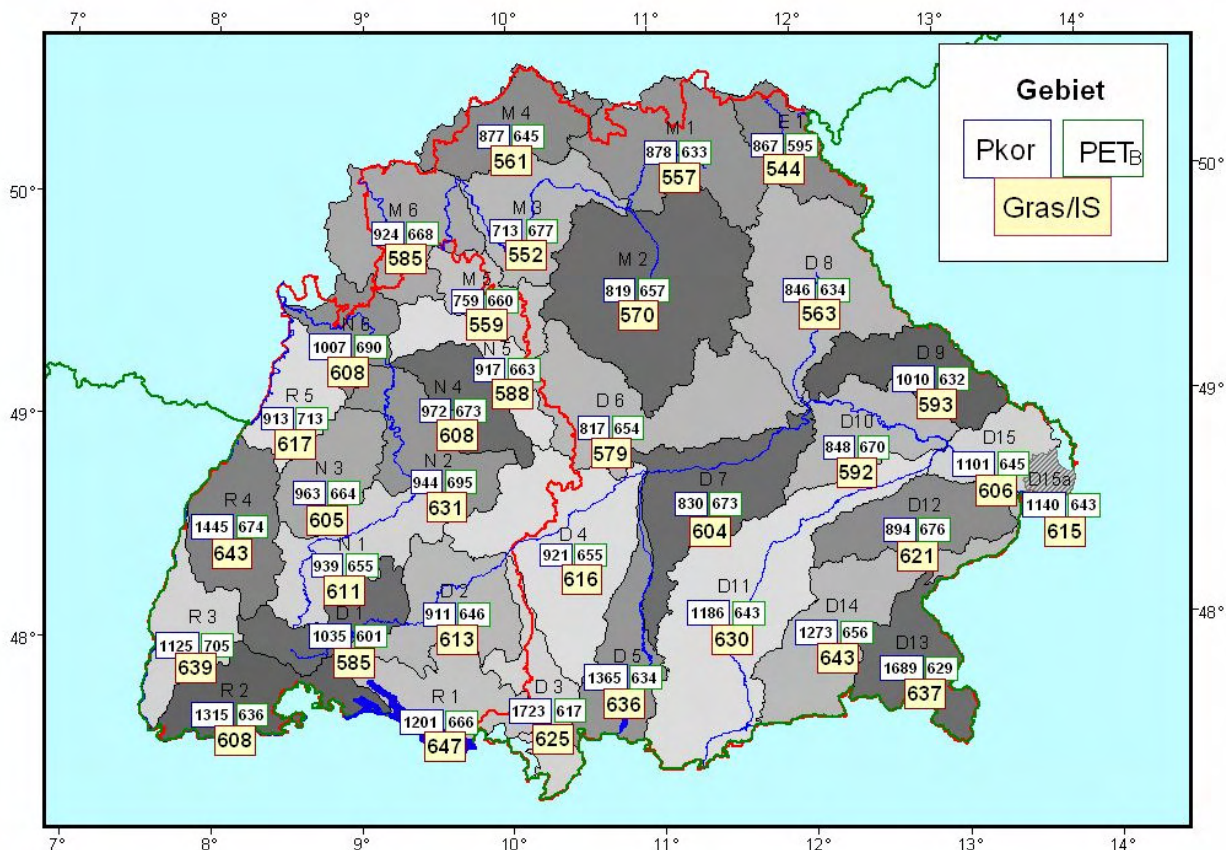
Abbildung 4.4: Jahreswertreihen korrigierter Niederschlag, potentielle Verdunstung, Klimatische Wasserbilanz (jeweils in mm) 1931/1997, ausgewählte Gebiete





### 4.3 Tatsächliche Verdunstung (Muster-Hydrotop Gras / lehmiger Sand)

In Abbildung 4.5 werden die mittleren Jahreswerte 1931/1997 von den Gebietsmittelwerten der tatsächlichen Verdunstung des definierten Hydrotops Grasbestand auf lehmigem Sand in ihrer regionalen Verteilung dargestellt. Weiterhin werden die Gebietswerte der beeinflussenden hydrometeorologischen Größen korrigierter Niederschlag und potentielle Verdunstung des Bestandes (s. Abschnitt 2.2.1) angegeben. Die regionale Verteilung der tatsächlichen Verdunstung des Musterhydrotops spiegelt die hydroklimatischen Bedingungen wider, die bei anderen Pflanzenbeständen, beispielsweise Wald oder landwirtschaftlichen Nutzflächen, zu einer qualitativ entsprechenden regionalen Verteilung der Verdunstung führen. In der Anlage 1 werden im Zusammenhang mit der Beschreibung des Berechnungsmodells der tatsächlichen Verdunstung ergänzende Auswertungen zum Einfluss von Boden- und Bestandsart auf das Zeitreihenverhalten und die regionale Verteilung der tatsächlichen Verdunstung bereitgestellt.



Die tatsächliche Verdunstung als Komponente der Wärmehaushalts- und der Wasserhaushaltsgleichung wird meteorologisch durch die für den Verdunstungsprozess verfügbare Energie (Parameter: potentielle Verdunstung) und die verfügbare Wassermenge (aus Niederschlag, korrigiert) gesteuert. Die Abhängigkeit der tatsächlichen Verdunstung von den hydroklimatischen Bedingungen stellt sich dabei wie folgt dar:

- bei ausreichend verfügbarer Energie wird die tatsächliche Verdunstung durch die verfügbare Wassermenge begrenzt;
- bei ausreichend verfügbarem Wasser wird die tatsächliche Verdunstung durch die verfügbare Energie begrenzt.

Durch Beschränkung der regionalen Betrachtung auf ein einzelnes Musterhydrotop entfällt die Abhängigkeit der Energie- bzw. Wasserverfügbarkeit (bzw. -bedarf) von Bestands- und Bodenparametern, so dass ausschließlich die hydroklimatischen Bedingungen (und deren Änderungen, s. Abschnitt 5.3) dargestellt werden.

Im süddeutschen Untersuchungsraum sind die geringsten tatsächlichen Verdunstungshöhen im Norden – in der gesamten Elbe-/Mainregion – und im Osten (D8 Naab) zu verzeichnen. Ursachen sind hauptsächlich die geringe potentielle Verdunstung in diesen Gebieten, aber auch die geringen Niederschläge. Der niedrigste mittlere Jahreswert der tatsächlichen Verdunstung wird für das Gebiet E1 (Elbe) berechnet, das auch die geringste potentielle Verdunstung aufweist. Im Gebiet M3 (Main uh. Regnitz oh. Fränk. Saale), dessen potentielle Verdunstung gegenüber E1 wesentlich höher ist, liegt jedoch aufgrund der geringeren Niederschläge die tatsächliche Verdunstung unter der Voraussetzung vergleichbarer Standortbedingungen hinsichtlich Boden und Pflanzendecke nur wenig höher als im Gebiet E1.

Die hydroklimatischen Bedingungen für Höchstwerte der tatsächlichen Verdunstung sind in denjenigen Gebieten gegeben, die bei hoher potentieller Verdunstung hohe Niederschläge verzeichnen; im Untersuchungsraum sind dies die Gebiete R1 (Bodensee) und R4 (Rhein uh. Kinzig, oh. Murg). Im benachbarten Gebiet R5 (Rhein uh. Murg, oh. Neckar), das die höchste potentielle Verdunstung des Untersuchungsraumes aufweist, sind durch die abschirmende Wirkung des Haardt die Niederschläge gegenüber R4 im Mittel um 37 % vermindert. Die Folge der geringeren Niederschläge und damit der im Verlauf der Vegetationsperiode auftretenden Bodenfeuchtedefizite ist eine Reduktion der tatsächlichen gegenüber der potentiellen Verdunstung von 13 % im vieljährigen Mittel.

Weiterhin wird die Höhe des Jahreswertes der tatsächlichen Verdunstung wesentlich von der innerjährlichen Verteilung der Niederschläge bestimmt. In den Gebieten der Alpenregion und des Vorlandes (D3, D5, D11, D14, D13) sind aufgrund der hohen Niederschläge während der





## Baden-Württemberg

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
R 5	196	12	14	35	63	98	107	97	75	55	34	15	12	617
N 6	282	11	13	33	61	97	106	97	76	56	33	14	11	608
M 5	345	10	12	29	57	92	99	89	69	50	29	13	10	559
N 2	373	12	14	33	60	97	111	104	81	58	34	15	12	631
N 5	396	10	12	29	57	94	105	96	76	54	32	13	10	588
N 4	396	10	12	31	58	96	108	101	79	57	33	13	10	608
R 3	409	12	14	33	60	97	112	106	83	60	35	15	12	639
R 4	452	11	13	31	58	97	114	111	87	61	35	14	11	643
N 3	477	11	12	30	56	94	109	101	78	56	33	14	11	605
N 1	559	10	12	29	55	93	110	105	81	58	33	14	11	611
R 1	567	9	11	29	58	97	115	114	93	64	35	12	10	647
D 2	625	9	10	27	54	94	111	108	86	60	33	12	9	613
R 2	692	9	11	27	52	91	110	107	85	60	34	12	10	608
D 1	790	8	10	24	48	88	108	106	84	58	32	11	8	585

## Bayern, Einzugsgebiet Donau

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
D10	415	8	10	27	58	96	106	100	81	56	31	11	8	592
D12	432	8	10	28	59	98	111	108	87	60	33	11	8	621
D7	444	9	10	28	58	96	108	103	83	58	32	11	8	604
D6	476	8	10	27	56	94	105	98	78	54	30	11	8	579
D8	494	8	9	25	53	93	103	95	77	53	29	10	8	563
D4	547	9	11	28	56	94	110	108	86	60	33	12	9	616
D15	551	8	9	25	55	96	110	107	87	59	32	10	8	606
D9	569	9	10	25	53	94	108	104	84	57	30	11	8	593
D15a	577	7	9	25	56	97	112	110	89	60	33	10	7	615
D14	590	9	11	28	56	97	114	115	93	64	35	12	9	643
D11	675	10	11	28	55	94	111	111	90	62	35	13	10	630
D13	785	10	11	26	53	94	114	116	94	62	34	13	10	637
D5	791	11	12	27	52	93	112	114	92	63	35	14	11	636
D3	872	11	12	26	50	91	110	113	92	61	34	14	11	625

## Bayern, Einzugsgebiete Main, Elbe

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
M3	276	11	13	30	58	92	96	84	66	48	29	14	11	552
M6	295	11	12	31	59	95	103	93	73	52	31	14	11	585
M5	345	10	12	29	57	92	99	89	69	50	29	13	10	559
M4	379	10	11	28	56	93	100	90	71	50	29	13	10	561
M2	392	9	11	28	56	94	103	93	73	52	30	12	9	570
M1	424	8	10	26	54	93	102	92	73	51	29	11	8	557
E1	583	7	8	22	49	90	102	94	76	52	28	9	7	544

Tabelle 4.4: Mittlere Monats- und Jahreswerte der tatsächlichen Verdunstung (in mm)  
Hydrotop Gras / lehmiger Sand, Gebietsmittelwerte, Zeitreihe 1931 / 1997

Vegetationsperiode, insbesondere von Juni bis August (vgl. Tabelle 4.3) nahezu potentielle Verdunstungshöhen der Vegetationsdecke zu verzeichnen. Für die Gebietsmittelwerte der tatsächlichen Verdunstung des Musterhydrotops wird hier ein Jahreswert berechnet, der größer ist als beispielsweise die Verdunstung dieses Hydrotops im Gebiet R5 (Rhein uh. Murg oh. Neckar), obwohl dort die potentielle Verdunstung um ca. 80 mm höher ist als in den genannten Alpen- und Vorlandgebieten.

Der mittlere Jahresgang der tatsächlichen Verdunstung des Musterhydrotops (s. Tabelle 4.4 und Abbildung 4.6) spiegelt ebenfalls charakteristische Muster der Energie- und Wasserverfügbarkeit unter den hydroklimatischen Bedingungen Süddeutschlands wider. Das innerjährliche Maximum ist in den Untersuchungsgebieten Baden-Württembergs und im Main-/Elberaum Bayerns im Mittel für den Monat Juni zu verzeichnen. Während die potentielle Verdunstung im mittleren Jahresgang im Juni und Juli etwa gleich hoch ist, weist die tatsächliche Verdunstung

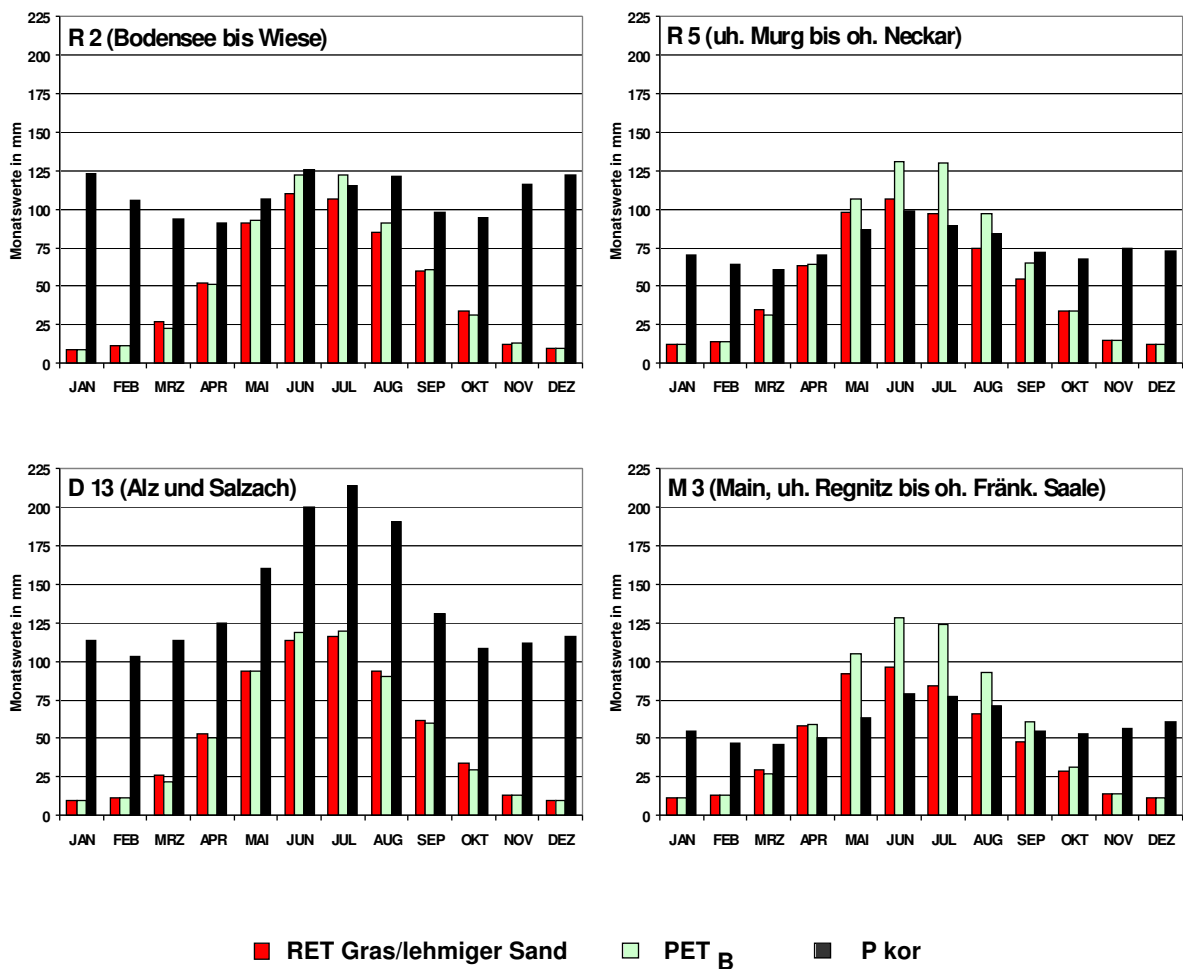


Abbildung 4.6: Mittlerer Jahresgang von korrig. Niederschlag, potentieller und tatsächlicher Verdunstung des Musterhydrotops Gras / lehmgiger Sand  
Gebietsmittelwerte 1931/1997, ausgewählte Untersuchungsgebiete



im Juli einen deutlichen Rückgang gegenüber dem Vormonat auf. In den niederschlagsärmeren Gebieten, beispielsweise M3, oder in R5, dem Gebiet mit hoher potentieller Verdunstung, ist die Reduktion der tatsächlichen gegenüber der potentiellen Verdunstung am stärksten ausgeprägt. Diese Reduktion ist eine Folge der bei nicht ausreichenden Niederschlägen während der Vegetationszeit im Juli bereits stark beanspruchten Bodenwasservorräte. Anders zeigen die Gebiete im Donaauraum Bayerns aufgrund der hohen Juli-Niederschläge in diesem Monat im Mittel nur wenig geringere tatsächliche Verdunstung als im Juni. In den Alpengebieten (D3, D5, D11, D14, D13) sind die tatsächlichen Verdunstungssummen des Juli sogar größer als diejenigen des Juni.

## 5 Zeitreihenverhalten der Gebietsmittel der hydrometeorologischen Größen in Baden-Württemberg und Bayern, 1931/1997

### 5.1 Potentielle Verdunstung

#### 5.1.1 Zeitreihenverhalten der Jahreswerte

Abbildung 5.1 zeigt auf der Grundlage der Gebietsmittelwerte die regionale Trend-Verteilung der Jahreswerte der potentiellen Verdunstung. Auffallend ist, dass im 67-jährigen Untersuchungszeitraum nahezu flächendeckend ein Rückgang der potentiellen Verdunstung vorliegt, der aber in einem großen Teil des Untersuchungsgebietes noch nicht Signifikanz erreicht.

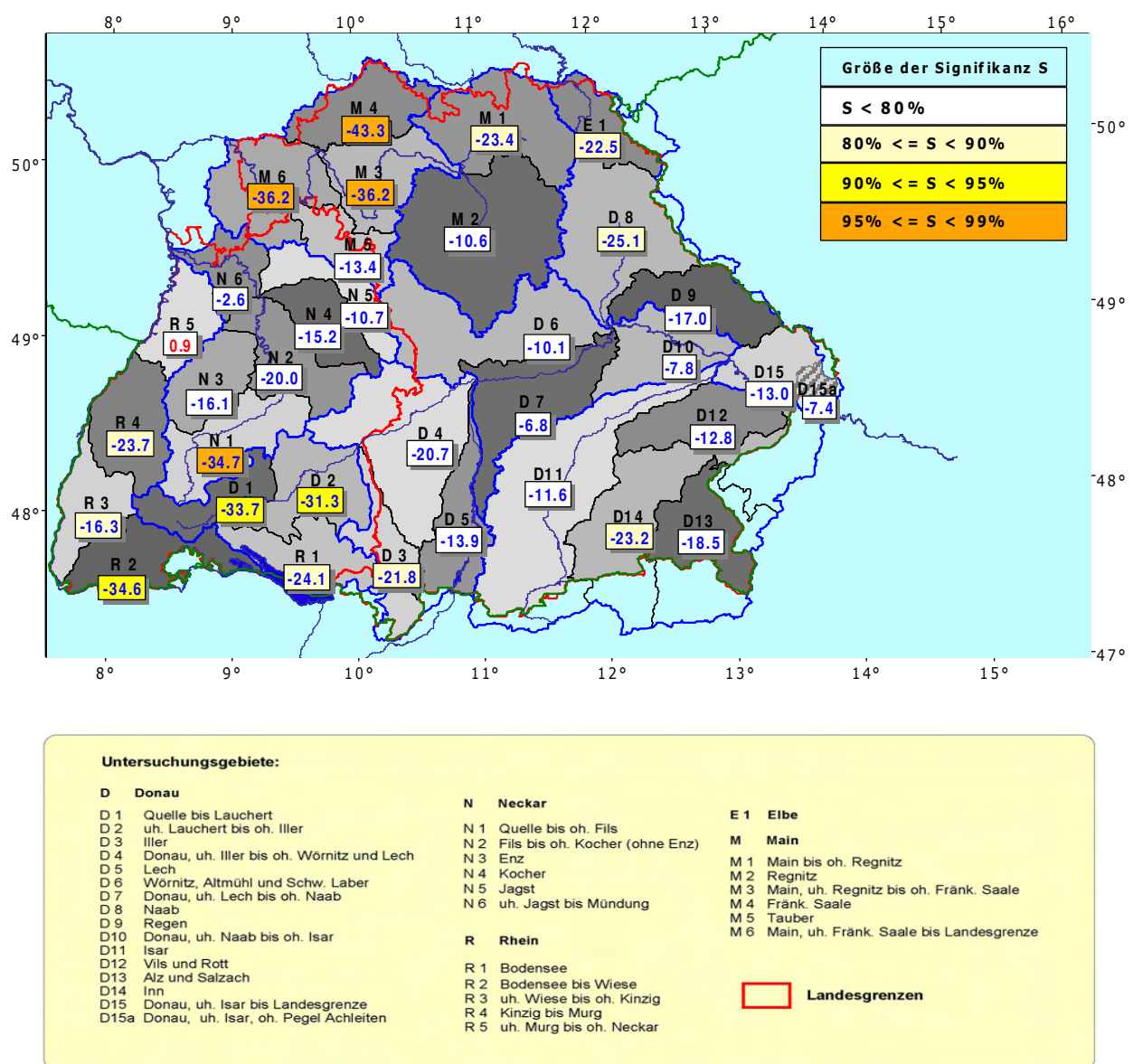


Abbildung 5.1: Trends der Jahreswerte der potentiellen Verdunstung in Süddeutschland  
Gebietsmittelwerte in mm/67 Jahre, Zeitreihe 1931/1997



In Baden-Württemberg liegen Signifikanzbefunde im Wesentlichen für die Gebiete in der südlichen Landeshälfte mit mittleren Gebietshöhen ab etwa 500 m vor. Die Abnahmen der jährlichen potentiellen Verdunstungshöhen bewegen sich hier zwischen etwa 30 mm und 35 mm, entsprechend 5 % bis 6 %. Die höchste Signifikanz wird im Gebiet N1 (Neckar bis oh. Fils) mit Übertreffen der 95 %-Schwelle erreicht; bei den weiteren Gebieten liegen die Signifikanzen zwischen 90 % und 95 % oder 80 % und 90 %. In Bayern sind die stärksten Abnahmen der jährlichen potentiellen Verdunstung und die höchsten Signifikanzen am Mittleren und Unteren Main unterhalb der Regnitz zu verzeichnen. Die Gebiete M3, M6 und das Gebiet der Fränkischen Saale (M4) weisen Abnahmen der Jahreswerte bei ca. 36 mm bis 43 mm (6 % bis 8 %) mit Signifikanzen größer 95 % auf. Für Oberen Main (M1) und benachbartes Naabgebiet (D8) ergeben sich nur noch schwache Anzeichen von Signifikanz. Das gesamte Donauegebiet bleibt ohne starke Signifikanzbefunde; es zeichnet sich aber eine Abhängigkeit der Trendbeträge von der Höhenlage durch stärkere Rückgänge der potentiellen Verdunstung in den hoch gelegenen Alpengebieten ab.

Der in Abbildung 5.2 dargestellte Zeitreihenverlauf der jährlichen potentiellen Verdunstungshöhen verdeutlicht anhand von vier Gebieten die Befunde negativer Trends bzw. nicht signifikanter Tendenzen. In Baden-Württemberg und im Mainraum sind im vorigen Jahrhundert Mitte des dreißiger Dezenniums einige Jahre mit überdurchschnittlich hoher potentieller Verdunstung zu verzeichnen. Danach ist die Jahresfolge zwischen 1945 und 1950 (gebietsweise bis 1951) im gesamten süddeutschen Untersuchungsraum durch extrem hohe potentielle Verdunstung charakterisiert. Ausgehend von den über hundertjährigen Stationsreihen von Karlsruhe, Bamberg und München (vgl. Abschnitt 5.4) ist anzunehmen, dass durch die KLIWA-Untersuchungsperiode auch in den Untersuchungsgebieten mit 1947 der Höchstwert des vorigen Jahrhunderts erfasst wird. Ab Anfang des fünfziger bis gegen Ende des achtziger Dezenniums gibt es eine relativ lang anhaltende Periode mit überwiegend geringen Jahreswerten der potentiellen Verdunstung. Am Ende der Untersuchungsperiode tritt ab 1989 wieder ein Zeitreihenabschnitt mit hoher potentieller Verdunstung auf, in dem aber die Höchstwerte aus den Jahren von 1945 bis 1950 nicht wieder erreicht werden.

Die im Rahmen des KLIWA-Projektes durchgeführten Langzeituntersuchungen zur Lufttemperatur [4] und zur Globalstrahlung bzw. Sonnenscheindauer (s. Teil 1 des vorliegenden Heftes) im süddeutschen Untersuchungsraum zeigen für diese beiden Einflussgrößen der potentiellen Verdunstung ein entsprechendes Zeitreihenverhalten. Die extreme Periode von 1945 bis 1950 und gebietsweise auch einige Jahre im dreißiger Dezennium zeichnen sich durch überdurchschnittlich, teils extreme sonnenscheinreiche und warme Witterung aus, welche zu den Höchstwerten der potentiellen Verdunstung in der Untersuchungsperiode führt. In den Jahren

zwischen 1950 und Ende des Jahrhunderts zeigen Globalstrahlung/Sonnenscheindauer und Lufttemperatur gegensätzliches Zeitreihenverhalten. Da in der potentiellen Verdunstung der Einfluss der Globalstrahlung gegenüber der Lufttemperatur dominiert, zeigt die potentielle Verdunstung entsprechend der Globalstrahlung einen Rückgang, der aber infolge der zunehmenden Lufttemperaturen, insbesondere durch deren Höchstwerte in den neunziger Jahren, abgeschwächt wird.

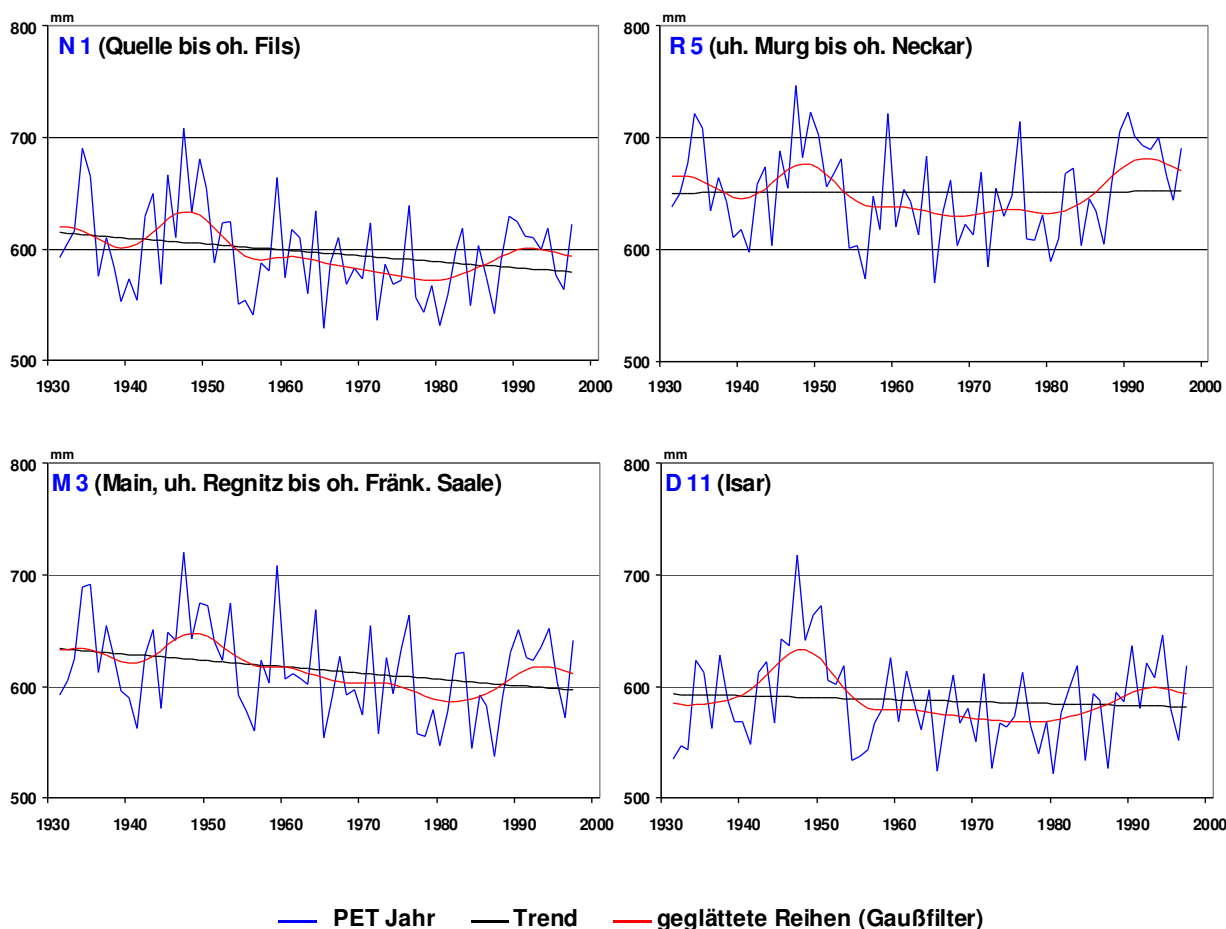


Abbildung 5.2: Jahreswertreihen und Trends der potentiellen Verdunstung (in mm),  
Gebietsmittelwerte ausgewählter Gebiete, 1931/1997

Mit der Methode der so genannten vorwärts und rückwärts schreitenden Trends (s. Abschnitt 3.1) wurde die Stabilität der Zeitreihenbefunde im Verlauf der 67-jährigen Gebietswertreihen 1931/1997 und zusätzlich für den Zeitraum ab 1951 untersucht. Durch die Stabilitätsprüfung ist festzustellen, wie empfindlich der Zeitreihentrend auf die Veränderung des Untersuchungszeitraumes reagiert. Als besonders sicher und aussagefähig ist ein Trendbefund zu werten, der sich bei Veränderungen des Bezugszeitraumes nur wenig ändert.



Abbildung 5.3 zeigt die Untersuchungsergebnisse der Trendstabilität für die in Abbildung 5.2 gezeigten Gebietswertreihen der jährlichen potentiellen Verdunstung. Die graphischen Darstellungen der Trendwerte (in mm pro Jahr) und ihrer Signifikanz enthalten beim rückwärts schreitenden (auf das feste Zeitreihenende 1997 bezogenen) Trend auf der rechten Seite die Angaben für die jüngste 20-jährige Zeitreihe 1978/1997, dann – nach links rückschreitend – für 1977/1997, 1976/1997, usf. Am linken Rand der rückschreitenden Darstellung finden sich die der Tabelle 5.1 entsprechenden Angaben für die Untersuchungsperiode 1931/1997. Wegen des gleichen Zeitreihenendes 1997 bei den 1931 bzw. 1951 beginnenden Untersuchungszeiträumen sind deren rückwärts schreitend betrachtete Teilzeitreihen teilweise identisch, so dass die Trendwerte in einer Graphik zusammengefasst werden können. Die Graphiken der vorwärts schreitenden Trendbetrachtung (fester Zeitreihenanfang 1931 bzw. 1951, und deshalb zwei separate Graphiken) zeigen auf der linken Seite die Trendangaben für die erste 20-jährige Reihe ab Beginn der Untersuchungsperiode, danach für die folgende 21-jährige Reihe usf. Am rechten Rand stehen die Angaben für 67-jährige Gesamtreihe (entsprechend Tabelle 5.1) bzw. die Reihe 1951/1997.

Wie schon die weitgehend ähnlichen Zeitreihenverläufe der potentiellen Verdunstung in Abbildung 5.2 vermuten lassen, weist bei den in Abbildung 5.3 beispielhaft dargestellten Untersuchungsgebieten wie im gesamten süddeutschen Untersuchungsraum das Trendverhalten unter Voraussetzung veränderlicher Zeitreihenabschnitte wesentliche gemeinsame Merkmale auf. Für Zeitreihen ab 1931 zeigt die vorwärts schreitende Trendauswertung (linke Graphiken) bis etwa Anfang der fünfziger Jahre positive Trends, die auf die hohe bis extreme potentielle Verdunstung von 1945 bis 1951 zurückzuführen sind. Zeitreihen, die ab 1931 über die Mitte der fünfziger Jahre hinausgehen, weisen bis Ende der achtziger Jahre sich verstärkende negative Trends, ab etwa 1931/70 ff. mit hoher Signifikanz auf. Die überdurchschnittlich hohe potentielle Verdunstung der neunziger Jahre führt in Zeitreihen, die diese Jahre einbeziehen, zur Abschwächung des negativen Trends. Am Beispiel der Gebiete R5 und D11 ist zu erkennen, dass hier die Zunahme der potentiellen Verdunstung in den neunziger Jahren so groß ist, dass die mit Bezug 1931 weiter bestehenden negativen Trends nicht mehr signifikant sind. Werden als Untersuchungsperiode Zeitreihen ab 1951 gewählt (rechte Graphiken), ergeben sich erst mit der hohen potentiellen Verdunstung in den neunziger Jahren positive Trends.

Die rückwärts schreitende Trendauswertung (mittlere Graphiken) belegt die Bedeutung der hohen potentiellen Verdunstung in den dreißiger und vierziger Jahren für die Trendbefunde der Zeitreihen bis 1997. Negative Trends liegen nur vor, wenn diese beiden Dezennien in die Zeitreihenbetrachtung eingeschlossen sind. Für Untersuchungsperioden ab 1951 ergeben sich zunehmend positive signifikante Trends.

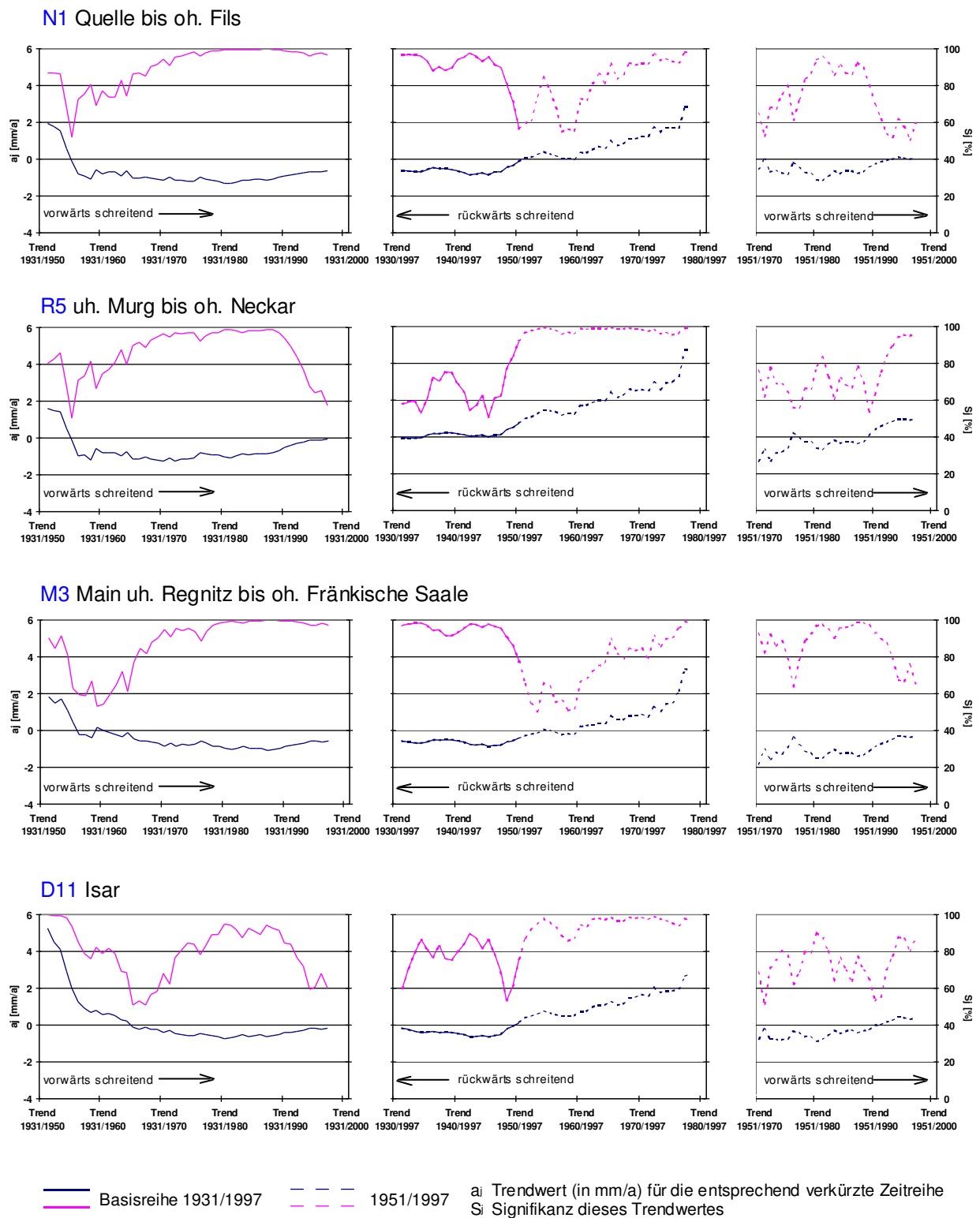


Abbildung 5.3: Trendverhalten der Jahreswerte der potentiellen Verdunstung in Abhängigkeit von der Bezugszeitreihe (vorwärts- / rückwärts schreitende Trendauswertung), ausgewählte Untersuchungsgebiete





### 5.1.2 Zeitreihenverhalten der potentiellen Verdunstung im Jahresgang

Im Jahresgang der potentiellen Verdunstung (s. Tabelle 5.1) zeigt sich im gesamten süddeutschen Untersuchungsraum ein in den Grundzügen einheitliches, markantes Trendverhalten: Der Jahresabschnitt März bis September ist überwiegend durch Rückgang, der Jahresabschnitt Oktober/November bis Februar überwiegend durch Zunahme der potentiellen Verdunstung charakterisiert.

Die Rückgänge in den Monaten März, April, Mai und Juli erreichen aber nur bei wenigen Gebieten die Signifikanzschwelle von 90 %. Gebietsweise sind in diesen Monaten auch Zunahmen zu verzeichnen, die ebenso ohne oder von nur geringer Signifikanz sind, so im März und Mai im Donauraum, im August fast flächendeckend. Schwerpunkt der Zeitreihenänderung der potentiellen Verdunstung ist der Juni mit hochsignifikanten negativen Trends; in diesem Monat liegen die Abnahmen je nach Gebiet zwischen 11 % und 17 % des durchschnittlichen Monatswertes und die Signifikanzschwelle von 99 % wird bei fast allen Gebieten übertroffen. Die stärksten Rückgänge sind in den hochgelegenen Gebieten zu verzeichnen, nur im Mainraum weisen die Gebiete in geringerer Geländehöhe die höchsten Trendbeträge auf. Weiterer Schwerpunkt eines flächendeckenden Rückgangs der potentiellen Verdunstung ist der September, allerdings mit deutlich geringeren absoluten und prozentualen Trendwerten und Signifikanzen als im Juni. In Baden-Württemberg bleiben die Abnahmen bei den Gebieten geringerer Geländehöhe überwiegend ohne Signifikanz, ab Gebietshöhen größer 500 m liegen Signifikanzen zwischen 80 % und 90 % vor. In Bayern wird die 90 % Signifikanzschwelle bei fast allen Untersuchungsgebieten erreicht. Der Jahresabschnitt negativer Trends der potentiellen Verdunstung setzt sich im Mainraum gebietsweise bis in den November fort: am Mittleren / Unteren Main und Fränkischer Saale (M3, M6, M4) sind im November Abnahmen der monatlichen potentiellen Verdunstung mit Signifikanzen größer 95 % zu verzeichnen.

Abgesehen von diesen wenigen Gebieten mit negativen Trends im November ist der gesamte Jahresabschnitt von November bis Februar (im Donauraum bis März) durch Zunahmen der potentiellen Verdunstung gekennzeichnet. Bezüglich der flächenmäßigen Ausdehnung hochsignifikanter positiver Trends liegt der Schwerpunkt im Dezember. Die Abhängigkeit der Trends von der Geländehöhe zeigt regional gegensätzliche Befunde. In Baden-Württemberg werden die stärksten Zunahmen in den tiefer gelegenen Gebieten im Nordwesten verzeichnet (R5: Rhein uh. Murg bis Neckar und N6: Neckar uh. Jagst), und sie halten dort von November bis Februar an. In den Gebieten mit mittleren Geländehöhen größer 500 m sind die Zunahmen der potentiellen Verdunstung nur schwach ausgeprägt; Signifikanzbefunde bleiben auf Dezember beschränkt und liegen bei nur 80 % - 90 %. In Bayern sind hingegen die stärksten



### Baden-Württemberg

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
R 5	196	2,8	4,1	-0,4	-1,7	-2,4	-13,4	0,3	4,2	-2,1	1,4	3,2	4,9	0,9
N 6	282	2,2	3,6	-0,7	-1,6	-1,7	-13,8	0,1	4,7	-2,0	0,9	2,1	3,7	-2,6
M 5	345	1,7	1,8	-0,6	-3,4	-0,7	-14,2	-1,6	3,3	-2,8	0,0	0,7	2,4	-13,4
N 2	373	1,0	1,3	-2,7	-4,6	-2,0	-13,9	-1,3	1,9	-3,6	0,8	0,7	2,5	-20,0
N 5	396	1,6	2,3	-0,8	-3,3	0,0	-14,0	-0,8	3,0	-2,9	0,5	1,2	2,6	-10,7
N 4	396	1,1	1,4	-2,1	-4,0	-0,6	-13,7	-0,5	2,5	-3,0	0,6	0,8	2,2	-15,2
R 3	409	0,8	2,0	-1,7	-5,4	-5,8	-14,0	0,3	2,9	-1,6	2,0	1,2	3,0	-16,3
R 4	452	1,4	2,4	-2,0	-5,2	-6,5	-16,8	-3,1	1,4	-2,7	2,2	1,6	3,4	-23,7
N 3	477	1,8	2,2	-1,2	-4,6	-3,9	-14,7	-1,9	1,9	-2,8	2,0	1,8	3,5	-16,1
N 1	559	0,4	1,0	-2,3	-7,1	-5,9	-16,6	-4,2	0,2	-4,0	1,4	0,4	1,9	-34,7
R 1	567	0,3	0,7	-0,3	-7,2	-2,7	-12,2	-0,2	1,0	-4,3	0,2	-0,5	1,1	-24,1
D 2	625	-0,1	0,5	-1,7	-7,3	-3,4	-14,1	-2,2	0,4	-4,3	0,1	-0,4	1,1	-31,3
R 2	692	0,1	1,0	-1,6	-7,8	-7,1	-16,2	-2,8	0,2	-3,5	1,5	0,2	1,4	-34,6
D 1	790	0,6	1,4	-1,5	-7,7	-6,2	-16,5	-3,5	0,2	-3,7	1,4	0,3	1,5	-33,7

### Bayern, Einzugsgebiet Donau

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
D10	415	1,2	2,0	2,8	-4,4	3,2	-11,0	0,8	2,4	-4,6	-1,4	0,5	0,7	-7,8
D12	432	1,2	1,5	2,1	-5,1	3,0	-12,4	-0,3	1,1	-5,0	-0,7	0,2	1,5	-12,8
D7	444	1,0	1,3	2,1	-4,2	4,3	-11,7	-0,4	2,5	-4,1	-0,1	0,4	2,1	-6,8
D6	476	0,9	1,9	2,2	-4,1	3,6	-12,6	-1,1	1,4	-4,3	-0,9	1,1	1,7	-10,1
D8	494	0,5	1,5	0,4	-5,5	-0,2	-15,3	-2,5	1,3	-4,9	-0,5	-0,2	0,3	-25,1
D4	547	0,8	0,9	0,3	-6,1	0,1	-13,4	-1,6	1,4	-5,0	-0,3	0,1	2,2	-20,7
D15	551	1,0	2,2	2,4	-4,5	2,6	-11,9	-0,2	0,3	-6,0	-0,4	1,0	0,7	-13,0
D9	569	0,7	1,2	1,1	-5,5	1,1	-12,8	-0,5	2,5	-4,6	-0,5	0,1	0,2	-17,0
D15a	577	1,2	2,2	3,3	-4,0	3,6	-11,3	0,6	0,8	-5,6	0,1	1,2	0,5	-7,4
D14	590	1,9	1,7	1,3	-7,3	0,0	-16,0	-3,6	-0,9	-5,5	2,0	0,9	2,3	-23,2
D11	675	2,4	1,5	0,8	-6,3	1,6	-13,7	-1,4	2,1	-4,3	1,9	1,0	2,8	-11,6
D13	785	3,1	2,8	0,8	-9,3	-0,2	-15,5	-2,7	-0,7	-4,6	2,6	2,1	3,1	-18,5
D5	791	2,4	1,2	0,3	-7,1	-0,3	-14,8	-1,7	2,1	-3,7	3,3	1,0	3,5	-13,9
D3	872	1,5	1,2	0,4	-7,9	-2,3	-15,0	-2,6	1,1	-4,1	3,1	0,5	2,3	-21,8

### Bayern, Einzugsgebiete Main,Elbe

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
M3	276	0,5	0,9	-2,6	-5,2	-2,6	-15,9	-4,6	0,0	-4,5	-1,3	-1,7	0,8	-36,2
M6	295	0,5	1,4	-2,4	-5,0	-4,1	-17,6	-4,9	1,2	-3,9	-1,0	-1,8	1,3	-36,2
M5	345	1,7	1,8	-0,6	-3,4	-0,7	-14,2	-1,6	3,3	-2,8	0,0	0,7	2,4	-13,4
M4	379	0,3	1,1	-2,4	-6,3	-3,5	-16,3	-5,1	-1,6	-5,6	-2,2	-1,8	0,0	-43,3
M2	392	1,6	2,2	-0,5	-4,1	2,0	-12,3	-0,6	1,8	-3,7	-0,2	1,0	2,2	-10,6
M1	424	1,3	1,2	-2,3	-5,1	-0,4	-13,8	-2,0	1,1	-4,7	-0,4	0,2	1,3	-23,4
E1	583	1,2	1,6	-0,9	-5,7	-0,4	-14,8	-2,7	1,6	-4,3	0,6	0,4	0,9	-22,5

Gebietsmittelwerte in mm/67 Jahre,  
Zeitreihe 1931 bis 1997  
positive / negative Trends :  
Signifikanz S nach Mann-Kendall-Test

S < 80 % ;	95 % ≤ S < 99 %
80 % ≤ S < 90 % ;	99 % ≤ S < 99,9 %
90 % ≤ S < 95 % ;	99,9 % ≤ S

Tabelle 5.1: Trends der potentiellen Verdunstung in den Untersuchungsgebieten von Baden-Württemberg und Bayern



Zunahmen der potentiellen Verdunstung in den hoch gelegenen Gebieten, d.h. in der Alpenregion von Iller bis Alz/Salzach (D3, D5, D11, D14, D13) zu verzeichnen. Bei diesen Gebieten liegen bereits ab Oktober und anhaltend bis Januar signifikante positive Trends vor, während sich bei den übrigen Untersuchungsgebieten Bayerns die Signifikanzbefunde im Wesentlichen auf den Dezember beschränken.

Die Abbildung 5.4 zeigt die Zeitreihenverläufe der monatlichen potentiellen Verdunstung im Juni am Beispiel einiger Untersuchungsgebiete. Die Gebietswertreihen für Juni weisen, ausgehend von den Höchstwerten in den beiden ersten Dezennien der Untersuchungsperiode und zu Anfang der fünfziger Jahre, einen kontinuierlichen Rückgang der potentiellen Verdunstung auf. Dieses Zeitreihenverhalten liegt auch bei Globalstrahlung bzw. Sonnenscheindauer vor (s. Teil 1 des vorliegenden Heftes) und zeigt den dominierenden Einfluss der Globalstrahlung auf die Höhe der potentiellen Verdunstung im Sommer. Bei den Monatsmitteltemperaturen des Juni treten hingegen keine tendenziellen Änderungen auf [4]. Die für die gleichen Gebiete in Abbildung 5.5 dargestellte vorwärts und rückwärts schreitende Trendauswertung belegt die Stabilität des Trends: Alle Zeitreihen, welche die dreißiger und vierziger Jahre einschließen, weisen bis 1997 hoch signifikante negative Trends auf (linke Graphik). Ohne Berücksichtigung dieser beiden Dezennien (s. Graphiken für Bezugsreihe 1951/1997) liegen mit dem Betrachtungszeitraum wechselnde und meist nicht das Signifikanzniveau erreichende Trends vor.

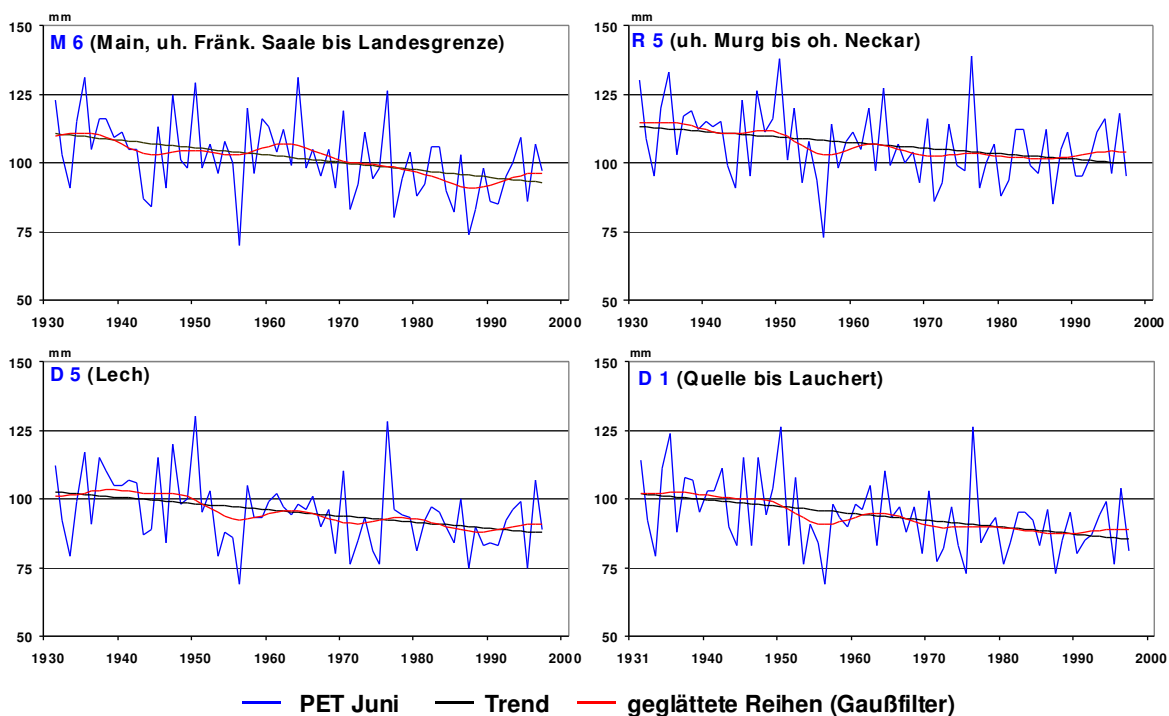


Abbildung 5.4: Monatswertreihen und Trends der potentiellen Verdunstung im JUNI, Gebietsmittelwerte (in mm) ausgewählter Gebiete, 1931/1997

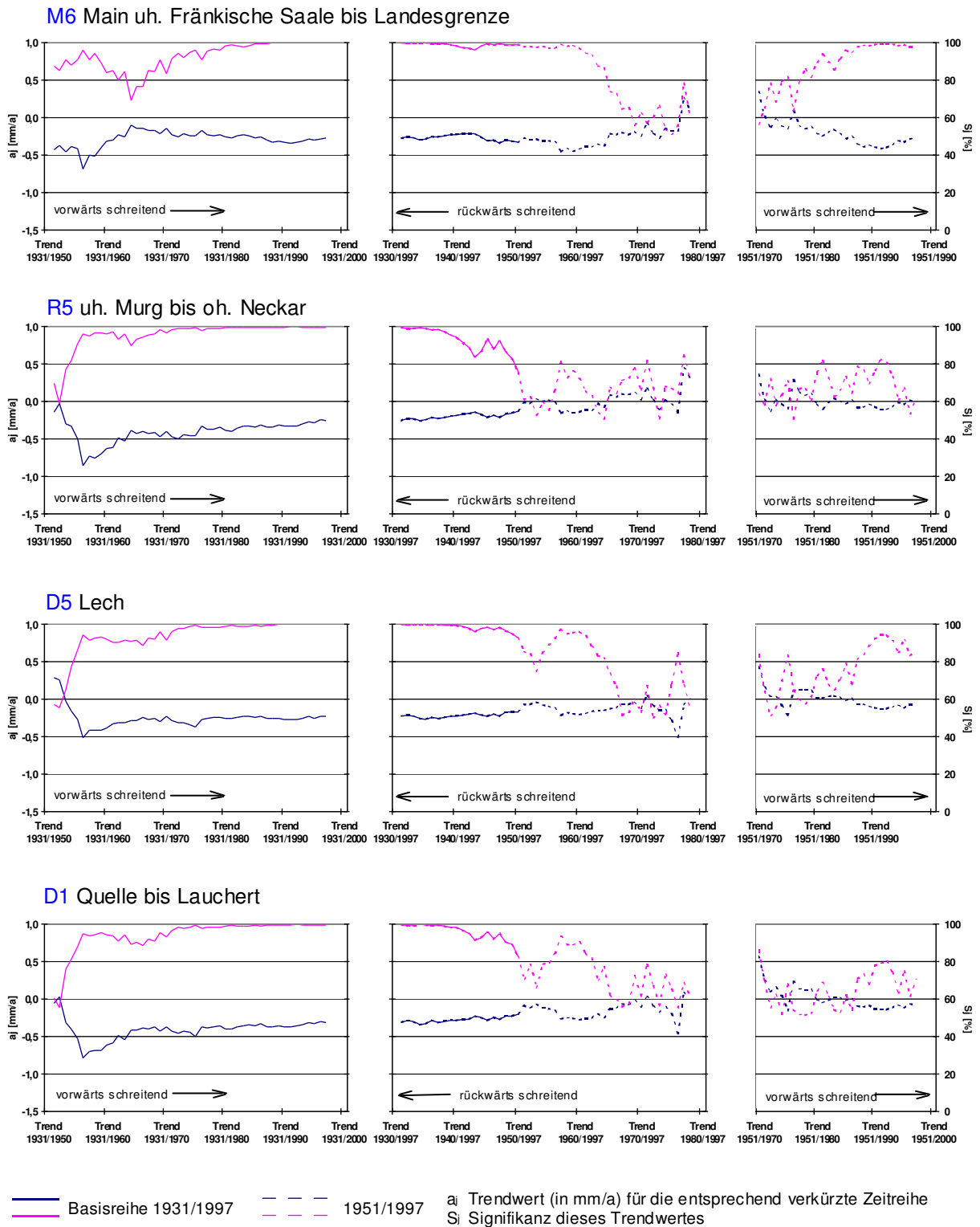


Abbildung 5.5: Trendverhalten der potentiellen Verdunstung im JUNI in Abhängigkeit von der Bezugszeitreihe (vorwärts- / rückwärts schreitende Trendauswertung), ausgewählte Untersuchungsgebiete



In den Monatswertreihen der potentiellen Verdunstung des Dezember tritt hingegen eine permanente Zunahme in der Untersuchungsperiode auf (s. Abbildung 5.6). Die Zunahme betrifft sowohl die Mittelwerte der Dezennien als auch deren in Einzeljahren zu verzeichnenden Maxima oder Minima. Die Haupteinflussgröße der potentiellen Verdunstung im Winter, die Lufttemperatur, zeigt entsprechendes Zeitreihenverhalten der Monatsmitteltemperaturen im Dezember [4].

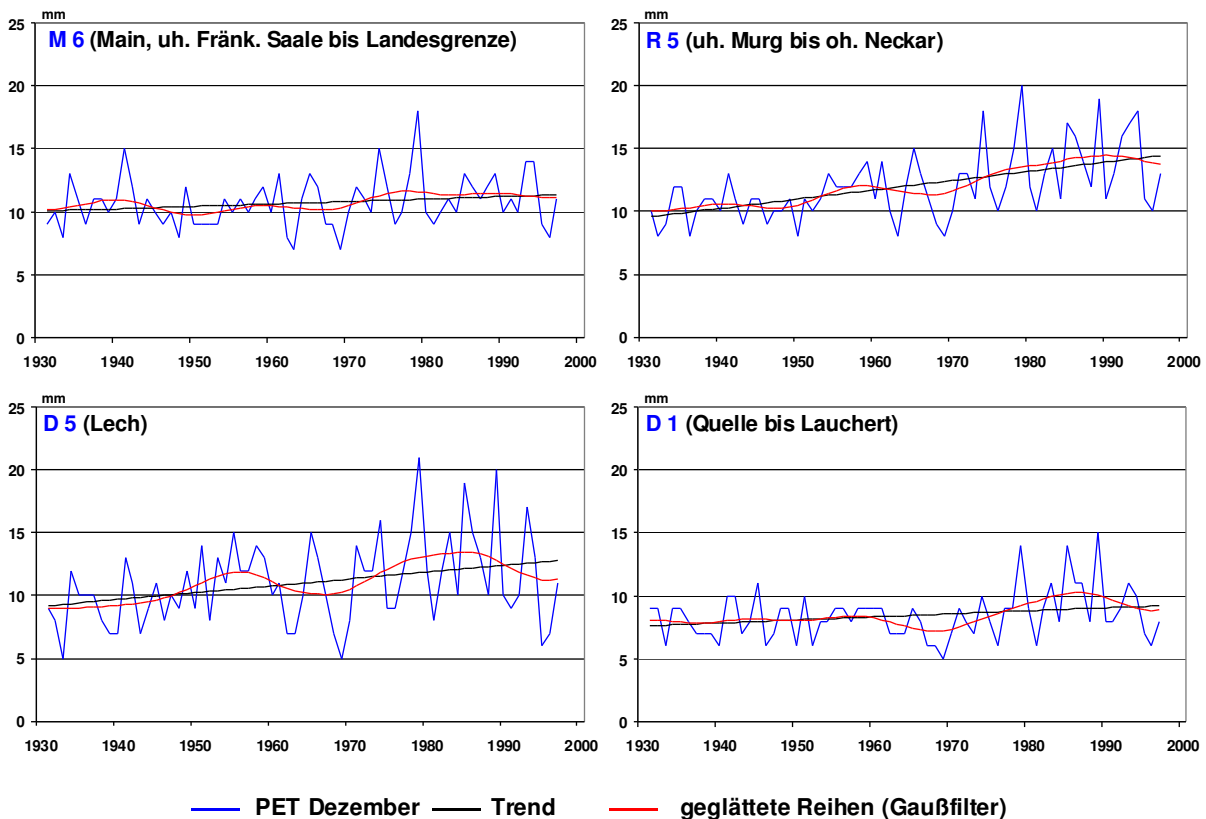
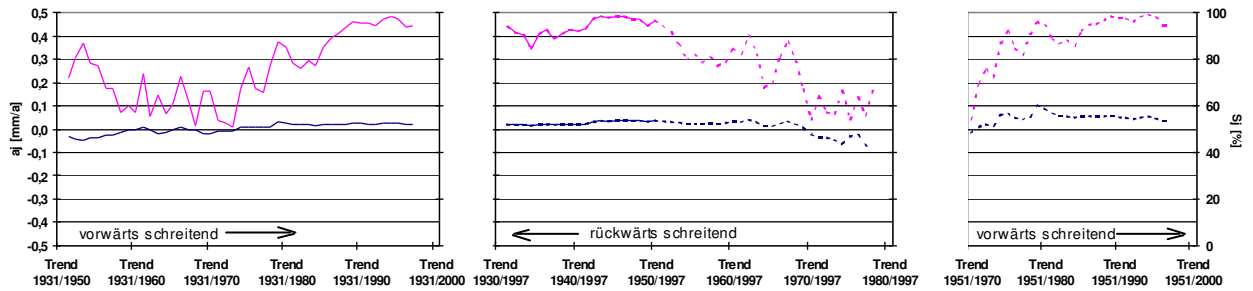


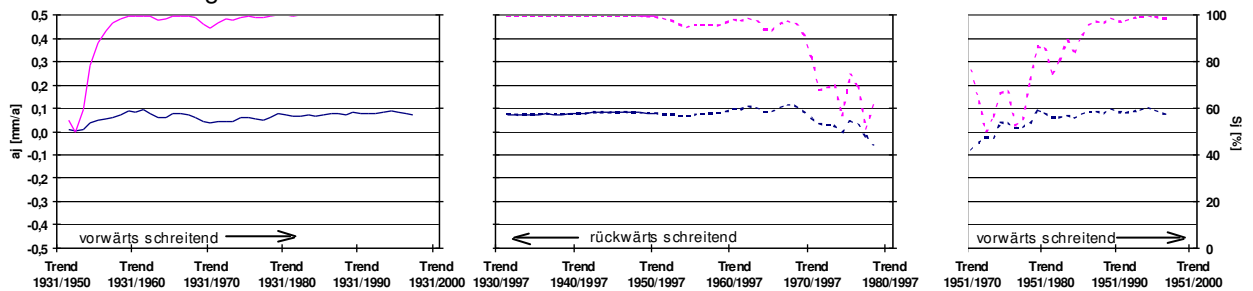
Abbildung 5.6: Monatswertreihen und Trends der potentiellen Verdunstung im **DEZEMBER**, Gebietsmittelwerte (in mm) ausgewählter Gebiete, 1931/1997

Die vorwärts-/ rückwärts schreitende Trendbetrachtung der Dezemberwerte der potentiellen Verdunstung (s. Abbildung 5.7) belegt die erhöhten Dezemberwerte in der zweiten Jahrhunderthälfte bei wechselnden Trend- und Signifikanzwerten. Die hoch signifikanten und zeitlich stabilen Trends der Untersuchungsperiode bis 1997 ergeben sich durch Einbeziehung der dreißiger und vierziger Jahre in die Langzeitbetrachtung, weil die potentielle Verdunstung in den Dezembermonaten dieser Dezennien im Mittel deutlich geringer war als in den Jahren der zweiten Jahrhunderthälfte. Der Einfluss der ab Mitte der achtziger Jahre erhöhten Dezemberwerte auf die Signifikanz der Trendbefunde wird am Beispiel der Gebiete M6 und D1 aufgezeigt (linke Graphiken).

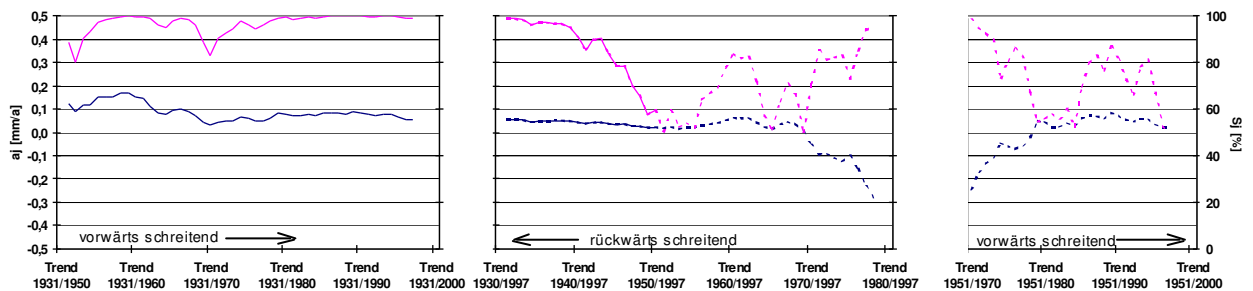
**M6** Main uh. Fränkische Saale bis Landesgrenze



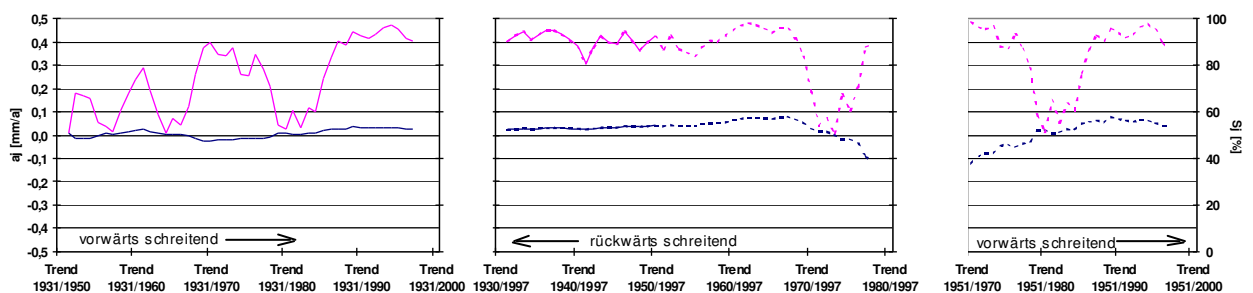
**R5** uh. Murg bis oh. Neckar



**D5** Lech



**D1** Quelle bis Lauchert



— Basisreihe 1931/1997   
 - - - 1951/1997   
 a<sub>i</sub> Trendwert (in mm/a) für die entsprechend verkürzte Zeitreihe  
 S<sub>i</sub> Signifikanz dieses Trendwertes

Abbildung 5.7: Trendverhalten der potentiellen Verdunstung im **DEZEMBER** in Abhängigkeit von der Bezugszeitreihe (vorwärts- / rückwärts schreitende Trendauswertung), ausgewählte Untersuchungsgebiete



Die Zunahmen der potentiellen Verdunstung in den Wintermonaten, insbesondere die hoch signifikanten Änderungen im Dezember, entsprechen bei den geringen Verdunstungshöhen dieses Jahresabschnittes hohen relativen Trends. Beispielweise belaufen sich im Dezember die Zunahmen von etwa 2 mm bis 5 mm auf etwa 20 % bis 40 % der monatlichen Durchschnittswerte der potentiellen Verdunstung in den betreffenden Gebieten (vgl. Tabellen 5.1 und 4.1). Die Auswirkung dieser Zunahmen auf den Trend der Jahreswerte der potentiellen Verdunstung ist jedoch im Vergleich zu den vom Betrage her bedeutend größeren Abnahmen im Sommerhalbjahr von untergeordneter Bedeutung. Die negativen Trends zwischen etwa 10 mm und 17 mm im Juni liegen im Bereich von rd. 10 % bis 15 % der mittleren potentiellen Verdunstung im Juni. Allein die Trendbeträge des Juni entsprechen aber rd. 2-3 % der mittleren Jahreswerte der potentiellen Verdunstung (Tabelle 4.1), somit wird der Trend der Jahreswertreihen der potentiellen Verdunstung wesentlich durch die Veränderungen im Juni bzw. im Sommerhalbjahr bestimmt.

## 5.2 Klimatische Wasserbilanz

Die regionale Übersicht über die Trends der Klimatischen Wasserbilanz in Abbildung 5.8 zeigt, dass die Jahreswerte nahezu flächendeckend zugenommen haben, jedoch ohne oder mit meist nur geringer Signifikanz. Der 90 %-Schwellenwert wird nur bei sieben der 34 Untersuchungsgebiete überschritten, darunter wird in drei Gebieten auch die 95 %-Schwelle erreicht (N1, N3: Neckar bis oh. Fils und Enz; D12: Vils u. Rott).

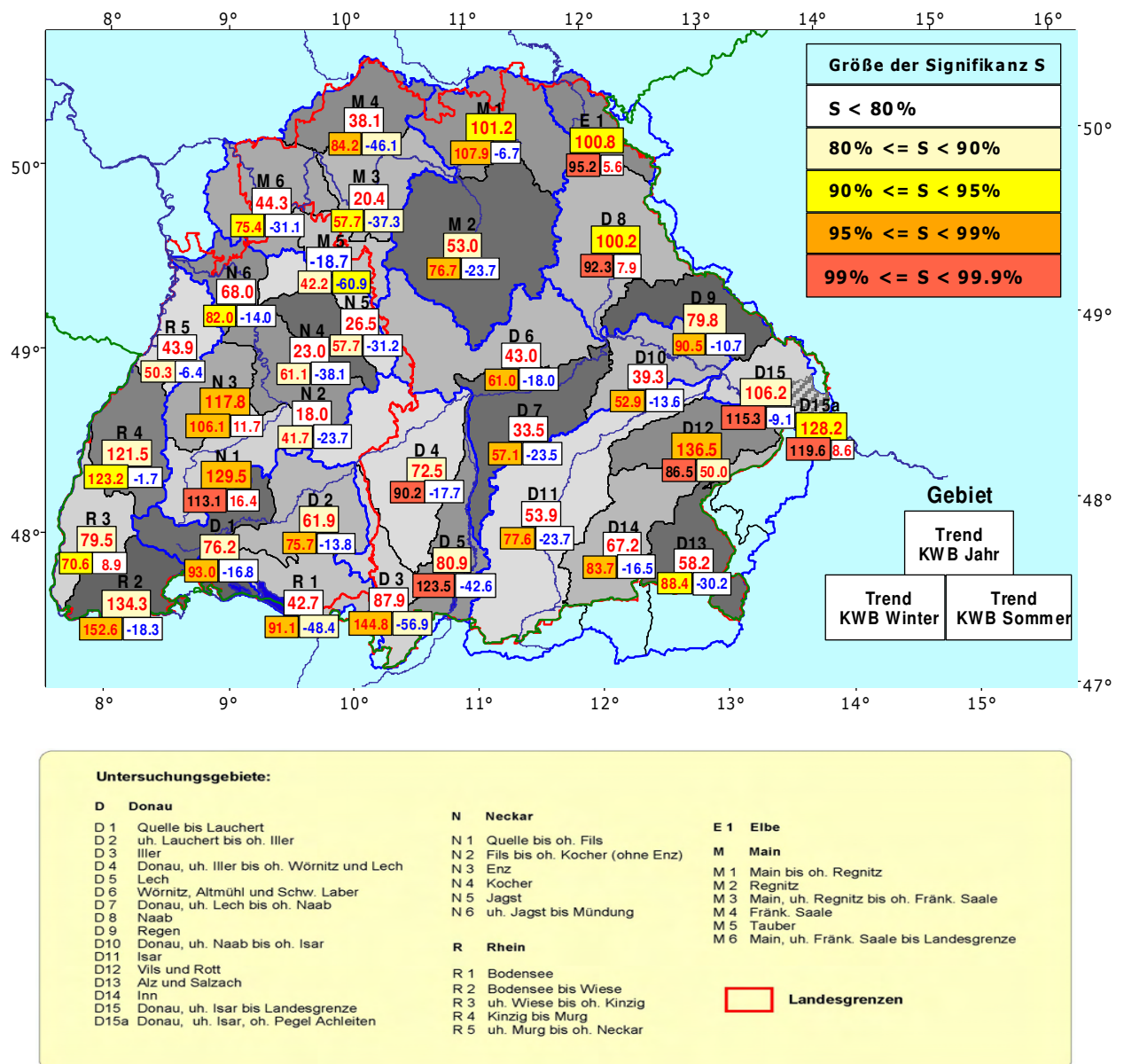


Abbildung 5.8: Trends der Jahres- und Halbjahreswerte der Klimatischen Wasserbilanz in Süddeutschland, Gebietsmittelwerte in mm/67 Jahre, Zeitreihe 1931/1997





Die für Winter- und Sommerhalbjahr angegebenen Trends machen aber deutlich, dass die Zeitreihenänderungen der Klimatischen Wasserbilanz zur Hauptsache in einer innerjährlichen Umverteilung mit gegenläufigen Änderungen in den Halbjahren bestehen. Die Klimatischen Wasserbilanzen in der Summe über das Winterhalbjahr (November – April) weisen flächendeckend signifikante Zunahmen auf. Die Signifikanzen bleiben nur im Nordwesten des Untersuchungsraumes, am Unteren Main und Neckar bei etwa 90 % vergleichsweise gering. In den übrigen Gebieten wird die 95 %-Schwelle, davon in acht Gebieten die 99 %-Schwelle übertroffen.

In den Zeitreihen der Klimatischen Wasserbilanz des Sommerhalbjahres (Mai – Oktober) liegen hingegen kaum Signifikanzbefunde vor, die Tendenzen sind dabei überwiegend negativ. Infolge des Rückganges der Bilanzsummen im Sommerhalbjahr sind in den betreffenden Gebieten die Zeitreihenänderungen der Jahreswerte hinsichtlich Betrag und Signifikanz geringer als im Winterhalbjahr.

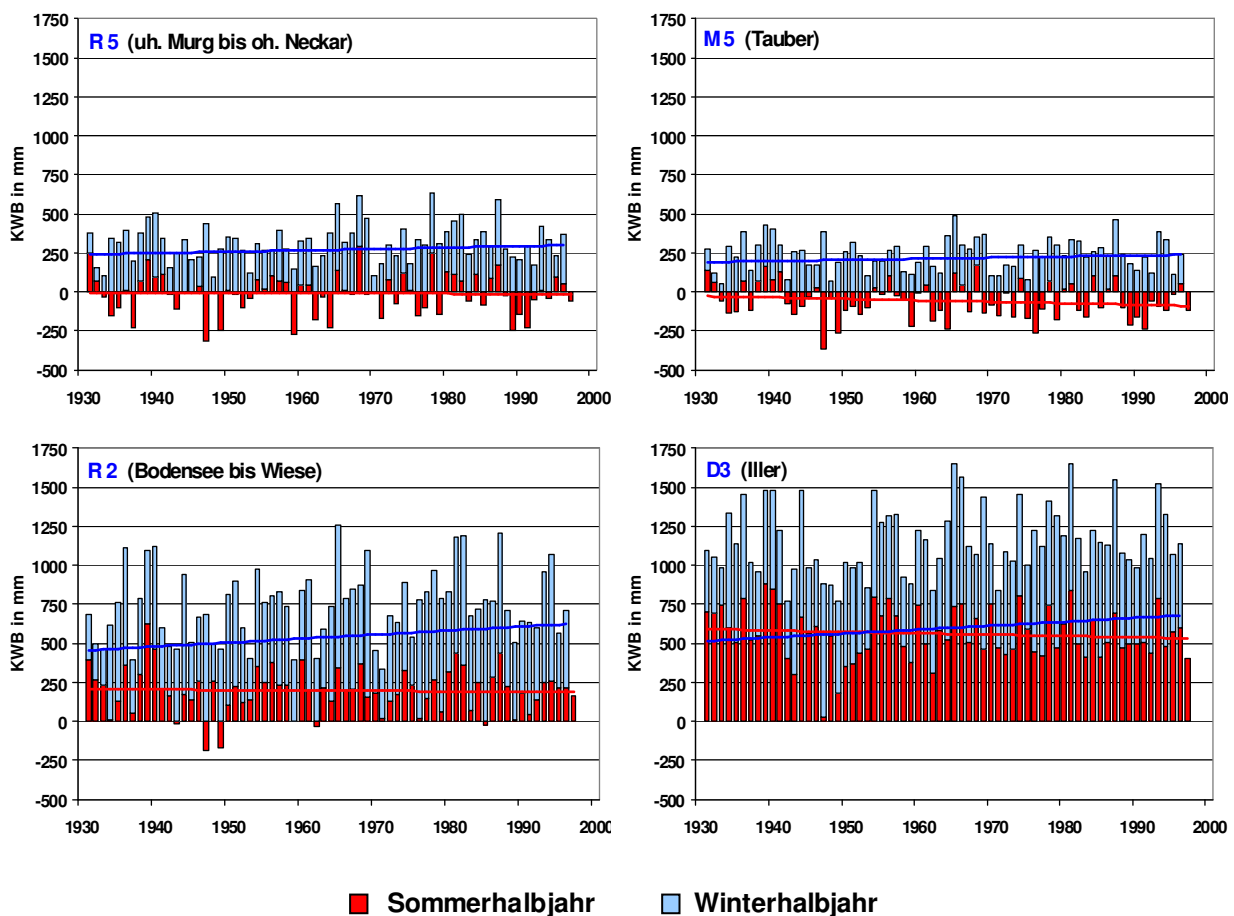


Abbildung 5.9: Zeitreihen und Trends der Halbjahreswerte der Klimatischen Wasserbilanz (in mm), Gebietsmittelwerte ausgewählter Gebiete, 1931/1997

In Abbildung 5.9 werden die Zeitreihenverläufe der Halbjahreswerte mit ihren gegenläufigen Trends am Beispiel einiger typischer Untersuchungsgebiete mit geringer und hoher Klimatischer Wasserbilanz dargestellt. Mit R 2 (Hochrhein) und D 3 (Iller) werden die Untersuchungsgebiete mit den stärksten Zunahmen der Winterhalbjahressumme der Klimatischen Wasserbilanz im süddeutschen Untersuchungsraum dargestellt. In D 3 ist gleichzeitig der nach M 5 (Tauber) stärkste Rückgang der Sommerhalbjahreswerte zu verzeichnen. Im Taubergebiet M 5 ist der negative Trend der Sommerhalbjahreswerte größer als der positive Trend der Winterhalbjahreswerte, hingegen tritt im Gebiet R 5 (Rhein, uh. Murg oh. Neckar) nur ein geringer Rückgang der Klimatischen Wasserbilanz des Sommerhalbjahres auf.

Die Klimatische Wasserbilanz zeigt insbesondere mit den gegensätzlichen Änderungen im Sommer- und Winterhalbjahr ein entsprechendes Zeitreihenverhalten wie die Gebietsniederschläge [3], weil die zeitlichen Schwankungen der Klimatischen Wasserbilanz maßgeblich auf die Variabilität des Niederschlags zurückzuführen sind (vgl. Abschnitt 4.2, Abbildung 4.4). Im Jahresabschnitt November bis Februar sind die Größenordnung der potentiellen Verdunstung und damit ihre absoluten Trendbeträge zu gering, um starke Änderungen des Niederschlags in der Bilanz merklich zu modifizieren. Im Sommerhalbjahr, in dessen Monaten teilweise hohe Trends der potentiellen Verdunstung aber nur geringe und kaum signifikante Änderungen des Niederschlags vorliegen, wird das Trendverhalten der Klimatischen Wasserbilanz durch die potentielle Verdunstung stärker beeinflusst. In Abbildung 5.10 wird das innerjährliche Trendverhalten dieser drei Größen graphisch gegenübergestellt, so dass die Folgen der Trends von Niederschlag und von potentieller Verdunstung in der resultierenden Klimatischen Wasserbilanz erkennbar werden. In den Teilgraphiken der drei Größen werden durch den Linienzug die monatlichen Flächenmittelwerte der Trends für Baden-Württemberg und Bayern dargestellt, gewichtet berechnet aus den Gebietsmittelwerten der Untersuchungsgebiete entsprechend ihrer Flächengröße. Die Trends der einzelnen Untersuchungsgebiete sind durch Punkte eingetragen und spiegeln die regionale Schwankungsbreite der Trends wider. Die Ordinatenmaßstäbe sind in den Teilgraphiken für Niederschlag und Klimatische Wasserbilanz identisch, in der Graphik der potentiellen Verdunstung demgegenüber fünffach überhöht, um die vergleichsweise geringen Trendbeträge visualisieren zu können. In den nachfolgenden Tabellen 5.2 und 5.3 werden die monatlichen Trends der Klimatischen Wasserbilanz und der Gebietsniederschlagshöhen einschließlich der Signifikanzangaben zusammengestellt; weiterhin ist auf die Trendtabelle der potentiellen Verdunstung zu verweisen (Tabelle 5.1 im Abschnitt 5.1).



Das innerjährliche Trendverhalten der Klimatischen Wasserbilanz weist im gesamten Untersuchungsraum von Baden-Württemberg und Bayern neben einigen regional begrenzten Besonderheiten markante gemeinsame Merkmale auf. Im Winterhalbjahr zeigen sich in den Monaten November, Dezember und März bei der Klimatischen Wasserbilanz starke Zunahmen, die im Wesentlichen auf die positiven Niederschlagstrends zurückzuführen sind und ebenso wie diese überwiegend hoch signifikant sind. Die gleichzeitigen Zunahmen der potentiellen Verdunstung im November / Dezember schwächen in der Bilanzgröße die Niederschlagszunahmen nur wenig ab; im März ergibt sich in Baden-Württemberg und im Mainraum Bayerns eine leichte Verstärkung der positiven Bilanzrends infolge der negativen Trends der potentiellen Verdunstung. Im April ist bei meist geringfügigen Änderungen des Niederschlags die Zunahme der Klimatischen Wasserbilanz hauptsächlich auf den Rückgang der potentiellen Verdunstung zurückzuführen.

Der Mai zeigt in Baden-Württemberg gebietsweise eine aus gegenläufigen Trends von Niederschlag (Zunahme) und potentieller Verdunstung (Rückgang) resultierende Zunahme der Klimatischen Wasserbilanz; in Bayern dominiert bei nur geringer Änderung der potentiellen Verdunstung der Rückgang des Niederschlags, was zu negativen Trends der Klimatischen Wasserbilanz führt. Im Juni sind kaum Änderungen der monatlichen Niederschlagshöhe zu verzeichnen – die flächendeckend hoch signifikanten Rückgänge der potentiellen Verdunstung führen damit zu einem positiven Trend der Klimatischen Wasserbilanz; dessen Signifikanz ist aufgrund der größeren zeitlichen Variabilität der Klimatischen Wasserbilanz geringer als bei der potentiellen Verdunstung. Der Jahresabschnitt Juli bis September ist in Baden-Württemberg durch Rückgang der monatlichen Niederschläge mit Schwerpunkt im August, in den höher gelegenen südlichen Landesteilen im September, charakterisiert. Im Juli und September werden in der Bilanz die geringeren Niederschläge durch einen gleichzeitigen Rückgang der potentiellen Verdunstung etwas abgeschwächt, im August infolge der Zunahmen der potentiellen Verdunstung weiter verstärkt. Im Oktober liegen bei allen drei Größen in Baden-Württemberg keine maßgeblichen Zeitreihenänderungen vor.

In Bayern zeigt sich der Jahresabschnitt Juli bis Oktober mit überwiegend negativen Niederschlagstrends bei großen regionalen Unterschieden von Trendbetrag und –signifikanz, besonders im August. Im Trendverhalten der Klimatischen Wasserbilanz dominiert in diesen Monaten der Einfluss der Niederschlagstrends, weil selbst die signifikanten Änderungen der potentiellen Verdunstung dem Betrage nach meist geringer sind als die des Niederschlages.

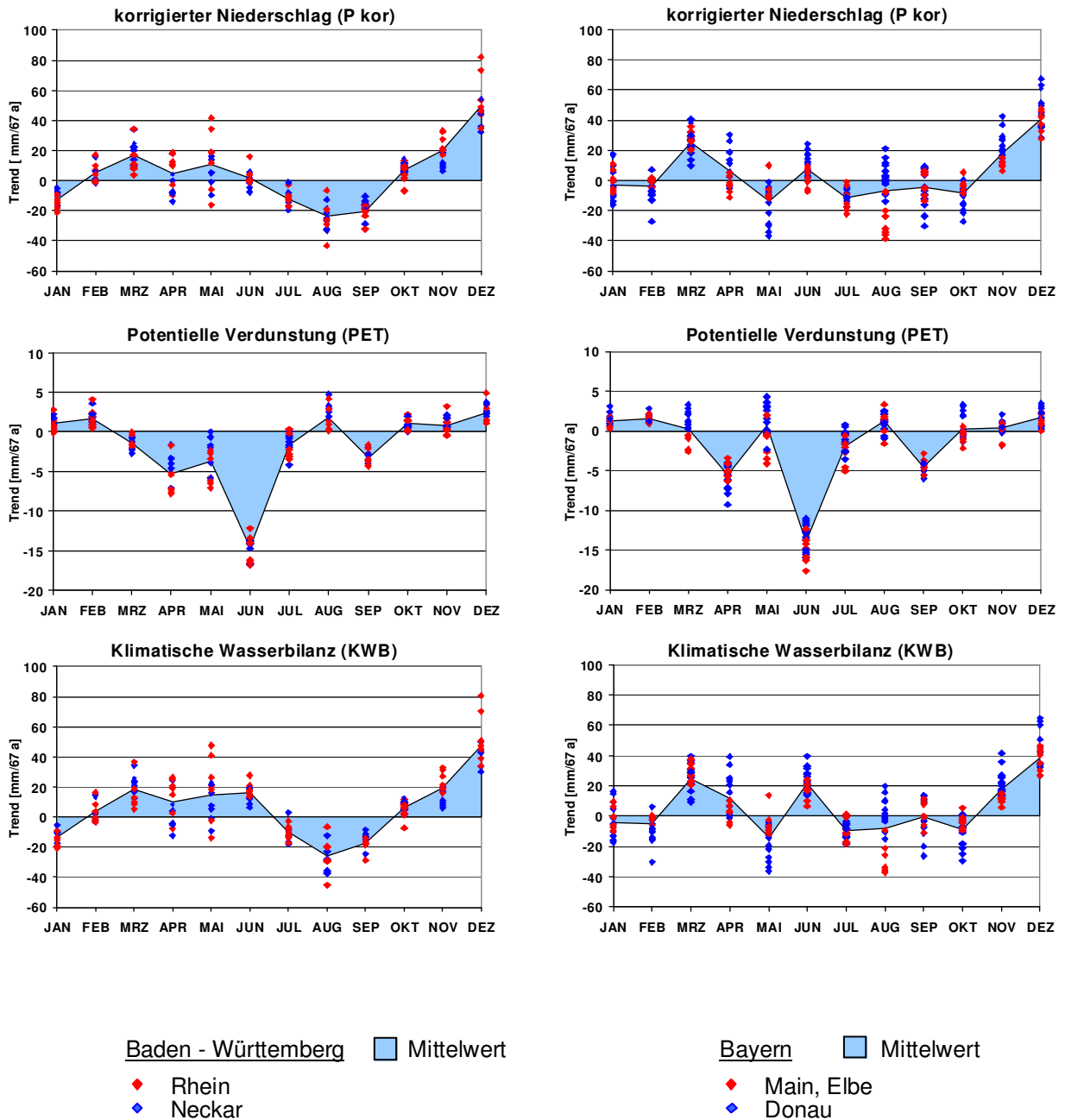


Abbildung 5.10: Monatliche Trends (in mm/67 Jahre) von Niederschlag (korr.), potentieller Verdunstung und Klimatischer Wasserbilanz in den Untersuchungsgebieten und im Flächenmittel von Baden-Württemberg und Bayern, Zeitreihe 1931 /1997



### Baden-Württemberg

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
R 5	196	-19,3	3,0	17,2	-7,9	21,0	13,2	-3,0	-36,9	-12,7	12,0	18,3	39,0	43,9
N 6	282	-10,0	2,3	34,8	-12,2	15,6	19,5	-8,3	-37,5	-8,3	5,0	16,7	50,3	68,0
M 5	345	-9,9	-0,6	20,8	-4,0	-8,9	6,7	-18,0	-35,3	-10,7	5,3	5,8	30,2	-18,7
N 2	373	-17,7	-2,9	12,9	4,7	7,4	12,3	-12,8	-23,3	-13,4	6,0	11,1	33,4	18,0
N 5	396	-9,6	-1,7	23,1	-5,0	-0,8	12,7	-11,8	-27,9	-12,9	9,5	7,4	43,4	26,5
N 4	396	-10,7	-2,1	24,4	-4,2	5,7	9,0	-16,5	-29,2	-15,2	8,2	9,5	44,3	23,0
R 3	409	-18,8	-2,3	9,9	15,2	47,5	13,4	-12,1	-28,8	-17,3	6,1	16,0	50,5	79,5
R 4	452	-13,9	-3,5	36,5	2,6	41,0	20,7	-13,6	-44,7	-14,3	9,2	31,5	70,0	121,5
N 3	477	-9,9	13,1	26,0	8,7	23,2	20,1	-8,8	-20,0	-16,0	13,1	17,6	50,5	117,8
N 1	559	-5,4	14,8	16,4	24,9	22,1	18,7	2,9	-12,8	-24,6	10,1	19,7	42,7	129,5
R 1	567	-21,4	-0,7	8,9	26,1	-13,4	28,0	-17,1	-20,1	-18,9	-6,9	32,9	45,3	42,7
D 2	625	-14,2	3,7	5,6	25,2	-2,3	18,2	-7,7	-7,0	-16,5	1,5	21,5	33,9	61,9
R 2	692	-9,3	16,3	18,7	18,9	26,1	15,5	-10,0	-28,5	-28,5	8,1	27,3	80,8	134,3
D 1	790	-15,5	8,3	12,6	20,4	18,2	17,3	-7,0	-19,4	-28,4	2,5	19,9	47,4	76,2

### Bayern, Einzugsgebiet Donau

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
D10	415	-7,7	-9,4	20,8	0,5	-12,3	13,8	-18,2	1,0	9,8	-7,8	14,1	34,6	39,3
D12	432	-1,7	-5,2	25,5	10,6	-3,9	33,3	-4,6	20,2	13,1	-8,1	22,7	34,7	136,5
D7	444	-10,3	-2,2	11,3	15,5	-19,1	18,4	-13,2	-1,6	-0,1	-7,9	16,5	26,4	33,5
D6	476	-4,9	-2,5	16,0	6,7	-7,8	17,4	-11,0	-15,3	-2,3	1,0	10,8	34,8	43,0
D8	494	9,3	-1,3	26,0	2,7	-5,7	26,1	-5,8	-10,5	8,5	-4,7	12,6	42,9	100,2
D4	547	-5,4	6,2	9,2	25,1	-10,9	15,2	-8,8	-2,3	-11,3	0,4	20,5	34,7	72,5
D15	551	15,0	-16,0	35,6	-1,1	-14,3	21,7	-14,2	-3,2	11,2	-10,5	21,8	59,9	106,2
D9	569	4,7	-10,9	28,2	0,4	-12,6	15,0	-17,0	-0,5	13,9	-9,6	16,9	51,1	79,8
D15a	577	16,0	-14,9	37,3	0,9	-10,9	23,5	-12,0	2,0	13,1	-7,1	17,6	62,7	128,2
D14	590	-12,7	-14,3	30,5	20,6	-21,7	28,3	-13,6	15,9	-3,8	-21,5	26,3	33,4	67,2
D11	675	-16,3	-10,4	21,2	24,7	-30,4	27,9	-4,6	9,5	-7,8	-18,3	26,0	32,4	53,9
D13	785	-13,0	-30,2	39,4	22,9	-33,8	39,7	-9,1	10,7	-7,9	-29,9	27,2	42,0	58,2
D5	791	-16,3	-1,2	21,9	37,3	-36,5	31,8	-3,7	4,0	-19,9	-18,3	35,9	45,9	80,9
D3	872	-17,5	-8,0	29,5	34,0	-27,5	32,7	-8,2	-3,1	-26,2	-24,6	41,9	64,9	87,9

### Bayern, Einzugsgebiete Main, Elbe

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
M3	276	-6,1	-1,4	23,1	3,6	-7,0	17,4	-11,0	-33,9	-0,4	-2,4	11,6	27,0	20,4
M6	295	-7,4	-0,5	38,0	-6,1	14,0	16,7	-17,3	-37,1	-6,2	-1,2	11,0	40,3	44,3
M5	345	-9,9	-0,6	20,8	-4,0	-8,9	6,7	-18,0	-35,3	-10,7	5,3	5,8	30,2	-18,7
M4	379	-0,8	-5,9	34,4	2,6	-2,6	10,2	-12,2	-37,0	-0,1	-4,2	11,6	42,4	38,1
M2	392	-0,5	-1,4	27,0	7,1	-11,7	17,5	-8,8	-25,5	7,8	-3,0	9,4	35,0	53,0
M1	424	5,9	0,7	31,5	10,2	-11,0	21,4	1,0	-21,0	11,0	-8,0	15,0	44,7	101,2
E1	583	9,7	-2,5	26,5	2,9	-9,2	24,2	-0,6	-9,3	9,7	-9,1	12,0	46,7	100,8

Gebietsmittelwerte in mm/67 Jahre,  
Zeitreihe 1931 bis 1997  
positive / negative Trends :  
Signifikanz S nach Mann-Kendall-Test

S < 80 % ;	95 % ≤ S < 99 %
80 % ≤ S < 90 % ;	99 % ≤ S < 99,9 %
90 % ≤ S < 95 % ;	99,9 % < S

Tabelle 5.2: Trends der Klimatischen Wasserbilanz in den Untersuchungsgebieten von Baden-Württemberg und Bayern



### Baden-Württemberg

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
R 5	196	-16,5	7,1	16,8	-9,6	18,6	-0,2	-2,7	-32,7	-14,8	13,4	21,5	43,9	44,8
N 6	282	-7,8	5,9	34,1	-13,8	13,9	5,7	-8,2	-32,8	-10,3	5,9	18,8	54,0	65,4
M 5	345	-8,2	1,2	20,2	-7,4	-9,6	-7,5	-19,6	-32,0	-13,5	5,3	6,5	32,6	-32,1
N 2	373	-16,7	-1,6	10,2	0,1	5,4	-1,6	-14,1	-21,4	-17,0	6,8	11,8	35,9	-2,0
N 5	396	-8,0	0,6	22,3	-8,3	-0,8	-1,3	-12,6	-24,9	-15,8	10,0	8,6	46,0	15,8
N 4	396	-9,6	-0,7	22,3	-8,2	5,1	-4,7	-17,0	-26,7	-18,2	8,8	10,3	46,5	7,8
R 3	409	-18,0	-0,3	8,2	9,8	41,7	-0,6	-11,8	-25,9	-18,9	8,1	17,2	53,5	63,2
R 4	452	-12,5	-1,1	34,5	-2,6	34,5	3,9	-16,7	-43,3	-17,0	11,4	33,1	73,4	97,8
N 3	477	-8,1	15,3	24,8	4,1	19,3	5,4	-10,7	-18,1	-18,8	15,1	19,4	54,0	101,7
N 1	559	-5,0	15,8	14,1	17,8	16,2	2,1	-1,3	-12,6	-28,6	11,5	20,1	44,6	94,8
R 1	567	-21,1	0,0	8,6	18,9	-16,1	15,8	-17,3	-19,1	-23,2	-6,7	32,4	46,4	18,6
D 2	625	-14,3	4,2	3,9	17,9	-5,7	4,1	-9,9	-6,6	-20,8	1,6	21,1	35,0	30,6
R 2	692	-9,2	17,3	17,1	11,1	19,0	-0,7	-12,8	-29,3	-32,0	9,6	27,5	82,2	99,7
D 1	790	-14,9	9,7	11,1	12,7	12,0	0,8	-10,5	-19,2	-32,1	3,9	20,2	48,9	42,5

### Bayern, Einzugsgebiet Donau

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
D10	415	-6,5	-7,4	23,6	-3,9	-9,1	2,8	-17,4	3,4	5,2	-9,2	14,6	35,3	31,5
D12	432	-0,5	-3,7	27,6	5,5	-0,9	20,9	-4,9	21,3	8,1	-8,8	22,9	36,2	123,7
D7	444	-9,3	-0,9	13,4	11,3	-14,8	6,7	-13,6	0,9	-4,2	-8,0	16,9	28,5	26,7
D6	476	-4,0	-0,6	18,2	2,6	-4,2	4,8	-12,1	-13,9	-6,6	0,1	11,9	36,5	32,9
D8	494	9,8	0,2	26,4	-2,8	-5,9	10,8	-8,3	-9,2	3,6	-5,2	12,4	43,2	75,1
D4	547	-4,6	7,1	9,5	19,0	-10,8	1,8	-10,4	-0,9	-16,3	0,1	20,6	36,9	51,8
D15	551	16,0	-13,8	38,0	-5,6	-11,7	9,8	-14,4	-2,9	5,2	-10,9	22,8	60,6	93,2
D9	569	5,4	-9,7	29,3	-5,1	-11,5	2,2	-17,5	2,0	9,3	-10,1	17,0	51,3	62,8
D15a	577	17,2	-12,7	40,6	-3,1	-7,3	12,2	-11,4	2,8	7,5	-7,0	18,8	63,2	120,8
D14	590	-10,8	-12,6	31,8	13,3	-21,7	12,3	-17,2	15,0	-9,3	-19,5	27,2	35,7	44,0
D11	675	-13,9	-8,9	22,0	18,4	-28,8	14,2	-6,0	11,6	-12,1	-16,4	27,0	35,2	42,3
D13	785	-9,9	-27,4	40,2	13,6	-34,0	24,2	-11,8	10,0	-12,5	-27,3	29,3	45,1	39,7
D5	791	-13,9	0,0	22,2	30,2	-36,8	17,0	-5,4	6,1	-23,6	-15,0	36,9	49,4	67,0
D3	872	-16,0	-6,8	29,9	26,1	-29,8	17,7	-10,8	-2,0	-30,3	-21,5	42,4	67,2	66,1

### Bayern, Einzugsgebiete Main, Elbe

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
M3	276	-5,6	-0,5	20,5	-1,6	-9,6	1,5	-15,6	-33,9	-4,9	-3,7	9,9	27,8	-15,8
M6	295	-6,9	0,9	35,6	-11,1	9,9	-0,9	-22,2	-35,9	-10,1	-2,2	9,2	41,6	8,1
M5	345	-8,2	1,2	20,2	-7,4	-9,6	-7,5	-19,6	-32,0	-13,5	5,3	6,5	32,6	-32,1
M4	379	-0,5	-4,8	32,0	-3,7	-6,1	-6,1	-17,3	-38,6	-5,7	-6,4	9,8	42,4	-5,2
M2	392	1,1	0,8	26,5	3,0	-9,7	5,2	-9,4	-23,7	4,1	-3,2	10,4	37,2	42,4
M1	424	7,2	1,9	29,2	5,1	-11,4	7,6	-1,0	-19,9	6,3	-8,4	15,2	46,0	77,8
E1	583	10,9	-0,9	25,6	-2,8	-9,6	9,4	-3,3	-7,7	5,4	-8,5	12,4	47,6	78,3

Gebietsmittelwerte in mm/67 Jahre,  
Zeitreihe 1931 bis 1997  
positive / negative Trends :  
Signifikanz S nach Mann-Kendall-Test

S < 80 % ;	95 % ≤ S < 99 %
80 % ≤ S < 90 % ;	99 % ≤ S < 99,9 %
90 % ≤ S < 95 % ;	99,9 % < S

Tabelle 5.3: Trends der korrigierten Niederschlagshöhe in den Untersuchungsgebieten von Baden-Württemberg und Bayern





Die stärksten Rückgänge der Hydrotopverdunstung von etwa 5 % bis 7 % des Durchschnittswertes und die höchsten Signifikanzen sind in den Gebieten am Mittleren und Unteren Main und der Tauber zu verzeichnen. In diesen Gebieten liegen auch die stärksten Rückgänge der potentiellen Verdunstung (vgl. Abschnitt 5.1) sowie Rückgänge des Niederschlags (ohne Signifikanz) vor. Bei allen anderen Untersuchungsgebieten bewegen sich die Änderungsbeträge in den Zeitreihen der Hydrotopverdunstung überwiegend bei 1 % bis 2 %, und die Signifikanzen erreichen kaum 90 %.

Die Darstellung der monatlichen Trendwerte der tatsächlichen Verdunstung des Muster-Hydrotops in Abbildung 5.12 zeigt, dass sich die überwiegend geringen und nicht signifikanten Änderungen der Jahreswerte aufgrund von teils negativen, teils positiven monatlichen Trends im Jahresablauf ergeben. Die Abnahmen der tatsächlichen Verdunstung treten dabei im Wesentlichen in den Monaten der Vegetationsperiode auf, die Zunahmen fast flächendeckend und teilweise mit hoher Signifikanz im Jahresabschnitt November bis Februar.

Abbildung 5.12 verdeutlicht weiterhin die Verknüpfung des innerjährlichen Trendverhaltens der tatsächlichen Verdunstung mit den Zeitreihenänderungen des Niederschlages und der potentiellen Verdunstung. Durch den Linienzug werden die Flächenmittelwerte der Trends für Baden-Württemberg bzw. Bayern, durch die Punkte die Gebietsmittel für die einzelnen Untersuchungsgebiete angegeben, so dass auch der zum Teil große regionale Schwankungsbereich in den beiden Ländern erkennbar wird. Die Teilgraphiken für potentielle und tatsächliche Verdunstung haben den gleichen Ordinatenmaßstab, der gegenüber dem Maßstab der Niederschlagstrends aus Gründen der Darstellbarkeit um den Faktor fünf überhöht ist. Die in der Abbildung 5.12 dargestellten Trendwerte der tatsächlichen Verdunstung und ihre Signifikanzen sind der nachfolgenden Tabelle 5.4 zu entnehmen.

Die unterste Teilgraphik in Abbildung 5.12 gibt den innerjährlichen Trendverlauf der Bilanzgröße aus korrigierter Niederschlagshöhe und der tatsächlichen Verdunstung des hier betrachteten Muster-Hydrotops Grasdecke auf lehmigem Sand an. Die Bilanzgröße ist eine Schätzung der Sickerung aus der Wurzelzone und damit des Inputs der Grundwasserneubildung für dieses Hydrotop. Die Maßstäbe der Teilgraphiken für Bilanz und für Niederschlag sind wegen der vergleichbaren Größenordnung ihrer Trends gleich.

Im Jahresabschnitt November bis Februar entspricht das Trendverhalten der tatsächlichen Verdunstung im Wesentlichen dem der potentiellen Verdunstung, da außerhalb der Vegetationszeit der Niederschlag kaum Einfluss auf die Pflanzenverdunstung nimmt.



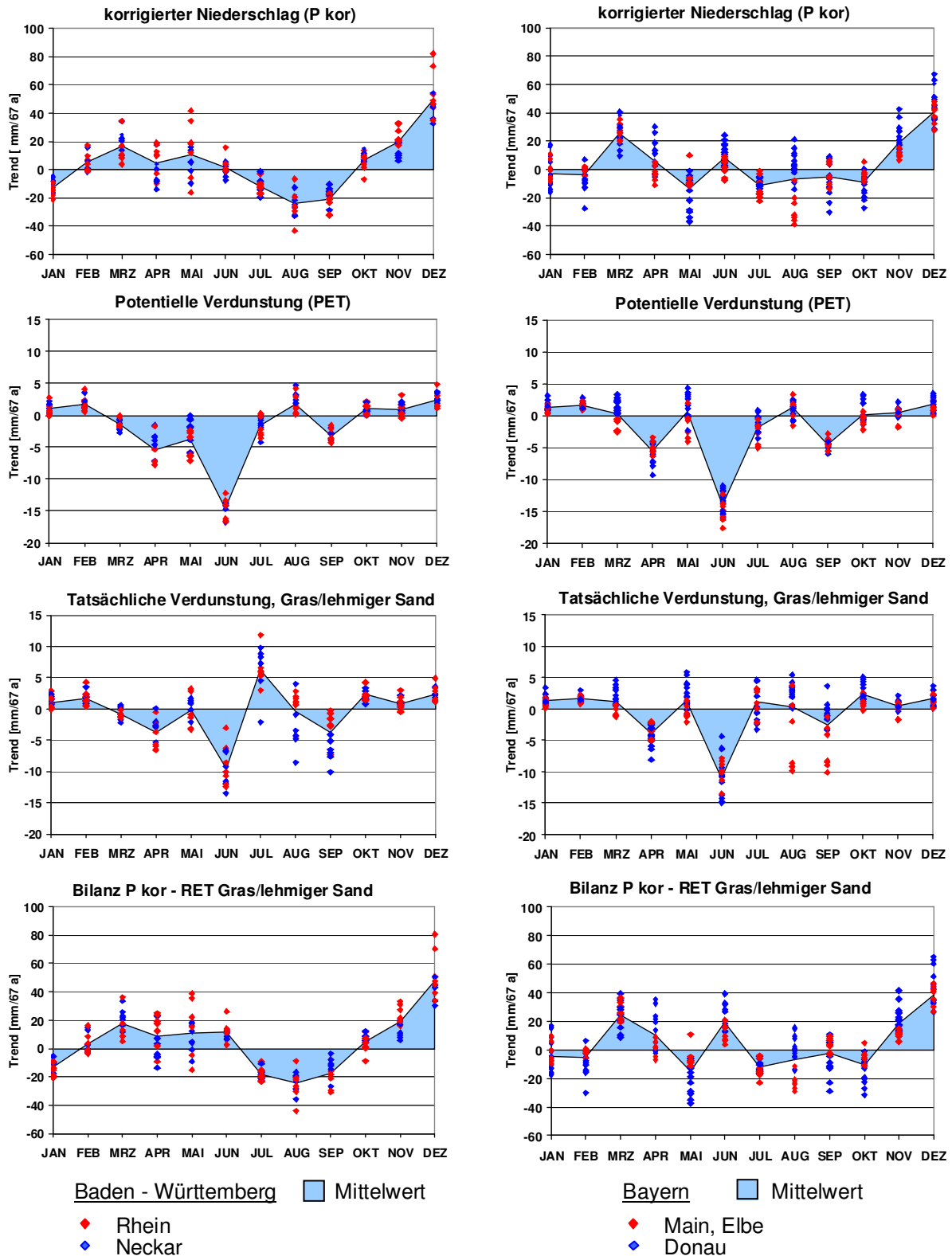


Abbildung 5.12: Monatliche Trends (in mm/67 Jahre) von Niederschlag (korr.), potentieller Verdunstung, tatsächlicher Verdunstung (Hydrotop: Gras/lehmgiger Sand), Bilanz (korr. Niederschlag minus tatsächliche Verdunstung) Gebietwerte und Flächenmittel von Baden-Württemberg und Bayern, Zeitreihe 1931/1997

Ebenso spiegeln sich die hohen positiven Niederschlagstrends des März nicht im Trendverhalten der tatsächlichen Verdunstung wider, weil mit Ausgang des Winters und zu Beginn der Vegetationsperiode in der Regel ohnehin ein ausreichender Bodenwasservorrat in der Wurzelzone für die Pflanzenverdunstung verfügbar ist. Im März, und in abgeschwächtem Maße auch noch im April wird daher das Zeitreihenverhalten der tatsächlichen Verdunstung überwiegend durch die potentielle Verdunstung bestimmt. Deren negative Trends – im März in Baden-Württemberg, im April im gesamten Untersuchungsraum – führen trotz positiver Niederschlagstrends zu Rückgängen der monatlichen tatsächlichen Verdunstung. Die bei der potentiellen Verdunstung zu verzeichnenden regionalen Trendunterschiede, beispielsweise die Zunahme der Trendbeträge mit der Höhenlage der Gebiete (vgl. Tabelle 5.1) finden sich entsprechend auch bei den Trends der tatsächlichen Verdunstung.

Im Sommerhalbjahr sind positive Trends der tatsächlichen Verdunstung, ausgenommen im Oktober, nur regional begrenzt zu verzeichnen; sofern Signifikanz vorliegt, wird die 90 %-Schwelle kaum erreicht. Markant sind die im gesamten Untersuchungsraum auftretenden und gebietsweise hoch signifikanten negativen Trends im Juni. Sie gehen auf die ebenfalls in den meisten Gebieten hoch signifikanten Abnahmen der potentiellen Verdunstung zurück (vgl. Abschnitt 5.1), sind im Betrag aber abgeschwächt. Weiterhin sind negative Trends der tatsächlichen Verdunstung im August und mit gebietsweise hoher Signifikanz über 95 % und 99 % im September zu verzeichnen. Sie treten fast in allen Untersuchungsgebieten Baden-Württembergs und im Mainraum Bayerns auf und sind im Wesentlichen eine Folge der negativen Niederschlagstrends in diesen Monaten.

Infolge der Koppelung mit dem Bodenwasservorrat ist die tatsächliche Verdunstung im Sommerhalbjahr nicht ausschließlich von Niederschlag und potentieller Verdunstung des aktuellen Monats, sondern auch von der Witterung der vorangegangenen Monate abhängig. Diese Abhängigkeit spiegelt sich auch im Trendverhalten wider: so sind beispielsweise im Juli gebietsweise signifikante Zunahmen der tatsächlichen Verdunstung zu verzeichnen, obwohl bei den Juli-Niederschlägen und bei der potentiellen Verdunstung in diesem Monat keine Zeitreihenänderungen vorliegen. Diese Zunahmen der tatsächlichen Verdunstung ergeben sich aufgrund eines erhöhten Bodenwasservorrates im Juli infolge der Rückgänge der Verdunstung in den Vormonaten (März, April, Juni).

Der innerjährliche Trendverlauf der Bilanz aus Niederschlag und tatsächlicher Verdunstung (unterste Teilgraphik von Abbildung 5.12) macht deutlich, dass die Zeitreihenänderungen der Sickerungsraten überwiegend durch die Änderung des Niederschlages bestimmt werden.



### Baden-Württemberg

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
R 5	196	2,9	4,3	0,4	-0,5	2,8	-6,3	6,6	-4,4	-7,4	1,3	3,0	4,9	8,5
N 6	282	2,4	3,5	0,5	0,1	1,7	-6,8	8,3	-4,2	-7,0	1,7	2,1	3,6	5,9
M 5	345	1,7	1,8	0,6	-2,0	-2,1	-13,5	-2,1	-8,6	-10,1	0,8	0,7	2,3	-30,5
N 2	373	0,8	1,1	-1,8	-2,9	0,9	-10,1	7,3	-0,9	-5,1	1,6	0,7	2,4	-5,9
N 5	396	1,5	1,9	0,1	-2,3	-0,1	-11,9	4,5	-4,8	-7,6	1,5	1,1	2,4	-13,6
N 4	396	1,0	1,3	-1,2	-2,7	1,0	-11,6	6,0	-3,5	-6,5	2,0	0,9	2,2	-11,0
R 3	409	0,8	2,0	-0,8	-2,5	3,2	-3,0	11,8	1,2	-0,2	4,3	1,2	2,8	20,9
R 4	452	1,7	2,4	-1,4	-3,7	-0,9	-8,6	6,1	0,6	-0,7	4,2	1,9	3,3	4,9
N 3	477	2,0	2,3	-0,8	-2,7	1,3	-6,6	9,8	0,7	-4,1	3,3	2,1	3,4	10,7
N 1	559	0,6	0,8	-2,2	-5,3	-1,3	-9,2	8,9	4,0	-1,6	2,8	0,4	1,8	-0,3
R 1	567	0,2	0,5	-0,1	-5,9	-1,3	-10,7	3,0	2,8	-1,6	2,0	-0,4	1,1	-10,5
D 2	625	0,1	0,5	-1,2	-5,7	-0,9	-10,1	5,3	2,0	-2,8	1,5	-0,5	1,1	-10,7
R 2	692	0,0	1,3	-0,8	-6,4	-3,3	-12,1	5,9	1,0	-1,5	2,3	0,3	1,4	-11,9
D 1	790	0,3	1,3	-1,3	-6,6	-3,1	-12,5	5,5	1,7	-2,5	2,3	0,7	1,6	-12,7

### Bayern, Einzugsgebiet Donau

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
D10	415	1,3	2,0	3,8	-3,0	2,6	-9,8	-1,8	2,0	0,7	0,8	0,5	0,7	-0,2
D12	432	1,1	1,5	3,4	-3,1	5,4	-6,2	4,6	5,4	3,6	2,1	0,3	1,5	19,7
D7	444	1,1	1,3	2,9	-2,5	4,0	-11,7	2,9	3,0	-0,1	1,2	0,7	2,1	4,9
D6	476	0,9	2,0	3,0	-2,5	3,4	-10,6	4,4	0,6	-3,4	1,4	1,0	1,7	2,1
D8	494	0,4	1,4	1,1	-4,1	-0,1	-9,4	2,0	4,2	-1,2	2,0	-0,4	0,2	-3,8
D4	547	1,1	0,9	0,6	-4,3	2,0	-10,7	4,6	3,3	-3,2	1,5	0,3	2,1	-1,9
D15	551	0,8	2,2	3,4	-3,1	3,9	-6,4	0,3	1,9	-1,1	1,7	1,2	0,5	5,2
D9	569	0,5	1,1	1,6	-4,4	0,9	-10,8	-3,3	2,7	-1,0	1,6	0,4	0,1	-10,5
D15a	577	0,6	2,2	4,5	-2,6	5,8	-4,4	2,0	2,4	-1,7	1,5	1,1	0,4	11,7
D14	590	1,9	1,8	2,1	-5,9	1,2	-14,3	-2,5	0,1	-0,7	3,3	0,9	2,2	-10,0
D11	675	2,3	1,4	1,4	-4,7	1,9	-13,7	0,0	3,5	0,1	3,9	1,3	3,0	0,3
D13	785	3,4	2,9	0,8	-8,1	0,8	-14,8	-2,2	0,2	-1,6	4,3	2,1	2,9	-9,2
D5	791	2,4	1,1	0,5	-5,1	0,7	-14,8	-0,7	3,7	-1,0	4,7	1,1	3,6	-3,7
D3	872	1,6	1,2	0,7	-6,4	-0,9	-14,9	-0,6	3,0	-1,0	5,1	0,7	2,2	-9,2

### Bayern, Einzugsgebiete Main, Elbe

Gebiet	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
M3	276	0,5	0,8	-1,1	-3,2	-1,3	-8,2	0,1	-9,2	-9,0	0,4	-1,7	0,9	-31,2
M6	295	0,6	1,6	-0,8	-3,6	-1,0	-7,9	0,9	-9,2	-8,4	1,2	-1,8	1,3	-27,1
M5	345	1,7	1,8	0,6	-2,0	-2,1	-13,5	-2,1	-8,6	-10,1	0,8	0,7	2,3	-30,5
M4	379	0,1	1,0	-1,1	-4,9	-1,1	-10,1	-2,2	-9,9	-8,3	-0,2	-1,7	0,1	-38,3
M2	392	1,6	2,2	0,6	-2,3	1,3	-9,9	3,2	-2,0	-4,1	2,5	1,0	2,2	-3,8
M1	424	1,3	1,4	-1,2	-3,4	0,4	-8,9	3,1	0,5	-3,0	2,4	0,1	1,2	-6,1
E1	583	1,4	2,0	0,0	-5,0	-0,7	-11,3	2,7	3,7	-1,3	2,6	0,5	1,2	-4,2

Gebietsmittelwerte in mm/67 Jahre,  
Zeitreihe 1931 bis 1997  
**positive** / **negative** Trends :  
Signifikanz S nach Mann-Kendall-Test

S < 80 % ;	95 % ≤ S < 99 %
80 % ≤ S < 90 % ;	99 % ≤ S < 99,9 %
90 % ≤ S < 95 % ;	<b>99,9 % &lt; S</b>

Tabelle 5.4: Trends der tatsächlichen Verdunstung, **Hydrotop: Grasdecke/lehmgiger Sand** in den Untersuchungsgebieten von Baden-Württemberg und Bayern

#### 5.4 Die Untersuchungsperiode 1931/1997 in Bezug zum längerfristigen Zeitreihenverhalten 1891 bis 2006

Auf der Grundlage der verfügbaren langen meteorologischen Messreihen an den Standorten Bamberg, Karlsruhe und München wurden Zeitreihen des korrigierten Niederschlags, der potentiellen Verdunstung und der aus beiden Größen berechneten Klimatischen Wasserbilanz für die 116-jährige Zeitreihe 1891/2006 erstellt, so dass auch die aktuellen und teilweise extremen Witterungsperioden des neuen Jahrhunderts (z.B. Hitzesommer 2003, Trockenperiode 2006) in die Langzeitauswertung eingehen. Das in den wesentlichen Grundzügen ähnliche Zeitreihenverhalten der hydrometeorologischen Größen an den drei bearbeiteten Stationen lässt die Schlussfolgerung auf repräsentative qualitative Darstellung der langfristigen klimatischen Veränderungen im süddeutschen Untersuchungsraum zu. In Tabelle 5.5 werden für die Größen korrigierte Niederschlagshöhe, potentielle Verdunstung und Klimatische Wasserbilanz die Trendwerte und -signifikanzen der KLIWA-Untersuchungsperiode 1931/1997 den Langzeitwerten der 116-jährigen Reihe gegenübergestellt. Zur Vergleichbarkeit erfolgen die Trendangaben in mm/Jahr; bei dem hier vorausgesetzten linearen Trend haben beispielsweise die Novemberriederschläge an der Station München im Zeitraum 1891 bis 2006 um 29 mm zugenommen, davon im 67-jährigen Zeitraum 1931/1997 um 19 mm.

Bei den jährlichen Niederschlagshöhen wird das langfristige Trendverhalten seit 1891 durch die KLIWA-Untersuchungsperiode 1931/1997 in guter Näherung wiedergegeben. An der Station Bamberg liegen in beiden betrachteten Zeitreihen keine signifikanten Änderungen vor, in München und Karlsruhe sind die Zunahmen in beiden Zeitreihen etwa gleich groß; maßgebliche Signifikanz mit Erreichen des 95 %-Schwellenwertes ist nur bei der 116-jährigen Münchener Reihe zu verzeichnen. Die Klimatische Wasserbilanz, deren Schwankungsverhalten überwiegend durch den Niederschlag bestimmt wird (s. Abschnitt 4.2), zeigt sowohl in der Untersuchungsperiode 1931/1997 als auch im Langzeitverhalten seit 1891 keine signifikanten Änderungen der Jahreswerte.

Im innerjährlichen Trendverhalten sind bei Niederschlag und Klimatischer Wasserbilanz generelle Befunde für die Untersuchungsperiode 1931/1997 schon in der 116-jährigen Reihe 1891/2006 angelegt. Es sind dies vor allem die Zunahmen im November/Dezember und die Abnahmen im August/September; in den übrigen Monaten liegen wenige Signifikanzbefunde vor, welche die 90 %-Schwelle erreichen. Für März ist in 1931/1997 eine verstärkte Zunahme der Klimatischen Wasserbilanz infolge höherer Niederschläge und geringerer potentieller Verdunstung gegenüber der langen Referenzreihe zu verzeichnen.



### Niederschlag

1891 - 2006

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Bamberg	239	-0,025	0,032	0,093	-0,011	0,033	-0,004	-0,060	-0,146	-0,001	0,025	0,096	0,051	0,081
Karlsruhe	112	0,056	0,143	0,009	-0,046	0,200	0,059	-0,025	-0,194	-0,213	0,040	0,109	0,076	0,215
München	527	-0,064	0,118	0,139	-0,074	0,097	0,038	-0,059	0,150	-0,138	0,068	0,249	0,102	0,628

1931 - 1997

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Bamberg	239	-0,151	-0,073	0,291	-0,064	-0,193	0,054	-0,133	-0,327	0,010	-0,212	0,064	0,296	-0,436
Karlsruhe	112	-0,266	0,075	0,161	-0,225	0,278	0,061	-0,131	-0,600	-0,301	0,215	0,267	0,642	0,172
München	527	-0,161	-0,045	0,330	0,242	-0,403	0,079	0,049	0,131	-0,266	-0,161	0,284	0,543	0,624

### Potentielle Verdunstung

1891 - 2006

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Bamberg	239	0,016	-0,002	0,005	0,035	0,047	0,041	0,085	0,054	0,037	0,016	-0,009	0,013	0,341
Karlsruhe	112	0,003	0,010	0,017	0,009	0,025	0,026	0,053	0,035	0,023	0,028	0,000	0,007	0,237
München	527	0,015	-0,009	0,032	0,053	0,101	0,063	0,063	0,062	0,023	0,034	0,002	0,010	0,449

1931 - 1997

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Bamberg	239	0,037	0,028	-0,069	-0,085	-0,009	-0,163	-0,030	0,004	-0,084	-0,028	0,006	0,048	-0,343
Karlsruhe	112	0,009	0,039	-0,027	-0,019	-0,018	-0,185	0,004	0,076	-0,010	0,019	0,003	0,052	-0,058
München	527	0,048	0,018	0,018	-0,061	0,037	-0,194	-0,019	0,060	-0,054	0,027	0,025	0,076	-0,019

### Klimatische Wasserbilanz

1891 - 2006

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Bamberg	239	-0,042	0,034	0,088	-0,047	-0,015	-0,045	-0,146	-0,200	-0,039	0,009	0,104	0,038	-0,259
Karlsruhe	112	0,053	0,132	-0,008	-0,055	0,176	0,034	-0,078	-0,229	-0,237	0,011	0,109	0,069	-0,022
München	527	-0,079	0,127	0,108	-0,127	-0,003	-0,025	-0,122	0,088	-0,161	0,034	0,247	0,091	0,178

1931 - 1997

Station	Höhe m ü. NN	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
Bamberg	239	-0,188	-0,101	0,360	0,021	-0,184	0,216	-0,103	-0,331	0,094	-0,184	0,058	0,248	-0,093
Karlsruhe	112	-0,275	0,036	-0,190	-0,206	0,296	0,246	-0,136	-0,676	-0,293	0,196	0,264	0,590	0,230
München	527	-0,209	-0,061	0,312	0,303	-0,440	0,273	0,069	0,072	-0,212	-0,190	0,258	0,467	0,643

positive / negative Trends in mm/a  
 Signifikanz S nach Mann-Kendall-Test

S < 80 % ;	95 % ≤ S < 99 %
80 % ≤ S < 90 % ;	99 % ≤ S < 99,9 %
90 % ≤ S < 95 % ;	99,9 % < S

Tabelle 5.5: Trends der korrigierten Niederschlagshöhe, der potentiellen Verdunstung und der Klimatischen Wasserbilanz, Stationswerte [in mm/a] im Zeitreihenvergleich 1891/2006 und 1931/1997

Insgesamt ist bereits langfristig in der Reihe 1891/2006 eine innerjährliche Umverteilung des Niederschlags und der Klimatischen Wasserbilanz mit Zunahmen der Winterhalbjahressummen und Abnahmen der Sommerhalbjahressummen festzustellen. In der Untersuchungsperiode 1931/1997 ist diese Umverteilung jedoch etwas stärker ausgeprägt; unter den drei bearbeiteten Stationen sind die Trendunterschiede beider Zeitreihen in München am stärksten.

Anders als bei Niederschlag und Klimatischer Wasserbilanz ist bei der potentiellen Verdunstung keine adäquate Widergabe des längerfristigen Trendverhaltens durch die mit 67 Jahren immerhin recht lange KLIWA-Untersuchungsperiode 1931/1997 zu verzeichnen. Die Jahreswertreihen der potentiellen Verdunstung weisen für 1891/2006 mit hoher Signifikanz Zunahmen auf, die sich aus Zunahmen unterschiedlicher Signifikanz in nahezu allen Monaten des Jahresablaufes ergeben. Innerjähriger Schwerpunkt der positiven Trendbefunde sind Juli, August und Oktober, in München insbesondere auch Mai und April. Die Untersuchungsperiode 1931/1997 ist im Langzeitverhalten der potentiellen Verdunstung ein besonderer Zeitreihenausschnitt, der durch rückläufige Tendenzen der Jahreswerte infolge hoch signifikanter negativer Trends im Juni und weiteren Abnahmen im Jahresabschnitt März bis September charakterisiert ist. Dieses Zeitreihenverhalten der potentiellen Verdunstung ergibt sich mit regionalen Differenzierungen flächendeckend und ist Folge eines entsprechenden Zeitreihenverhaltens der Sonnenscheindauer (vgl. Abschnitt 5.1 und Teil 1 des vorliegenden Berichtes). Die in der KLIWA-Reihe 1931/1997 auftretenden hoch signifikanten positiven Trends der potentiellen Verdunstung in den Wintermonaten sind im Langzeitverhalten 1891/2006 nur in erheblich abgeschwächter Form zu finden.

Abbildung 5.13 zeigt am Beispiel der Jahreswertreihen von München den negativen Trend von potentieller Verdunstung und Sonnenscheindauer in 1931/1997, während in den 116-jährigen Reihen seit 1891 insgesamt Zunahmen vorliegen. Die Zeitreihenverläufe lassen erkennen, dass die fünfzigjährige Zeitreihe 1951/2000 ebenfalls keinen ausreichend repräsentativen Zeitreihenabschnitt darstellt, weil die zuvor in den vierziger und dreißiger Jahren aufgetretenen Höchstwerte des Jahrhunderts nicht mit erfasst werden. Im Langzeitverhalten der Jahresmitteltemperatur weist die Teilreihe 1931/1997 ebenso wie die gesamte Reihe 1891/2006 einen signifikanten positiven Trend auf. Deutlich wird auch die zunehmende Erwärmung seit den 1990-er Jahren.

Die über die Untersuchungsperiode 1931/1997 bis 2006 hinausgehende Zeitreihenbetrachtung zeigt, dass der seit dem letzten Dezennium des vorigen Jahrhunderts zu verzeichnende Wiederanstieg von Sonnenscheindauer und potentieller Verdunstung anhält. Für 2003 sind die bisher höchsten Jahreswerte beider Größen seit 1891 zu verzeichnen; bezogen auf den

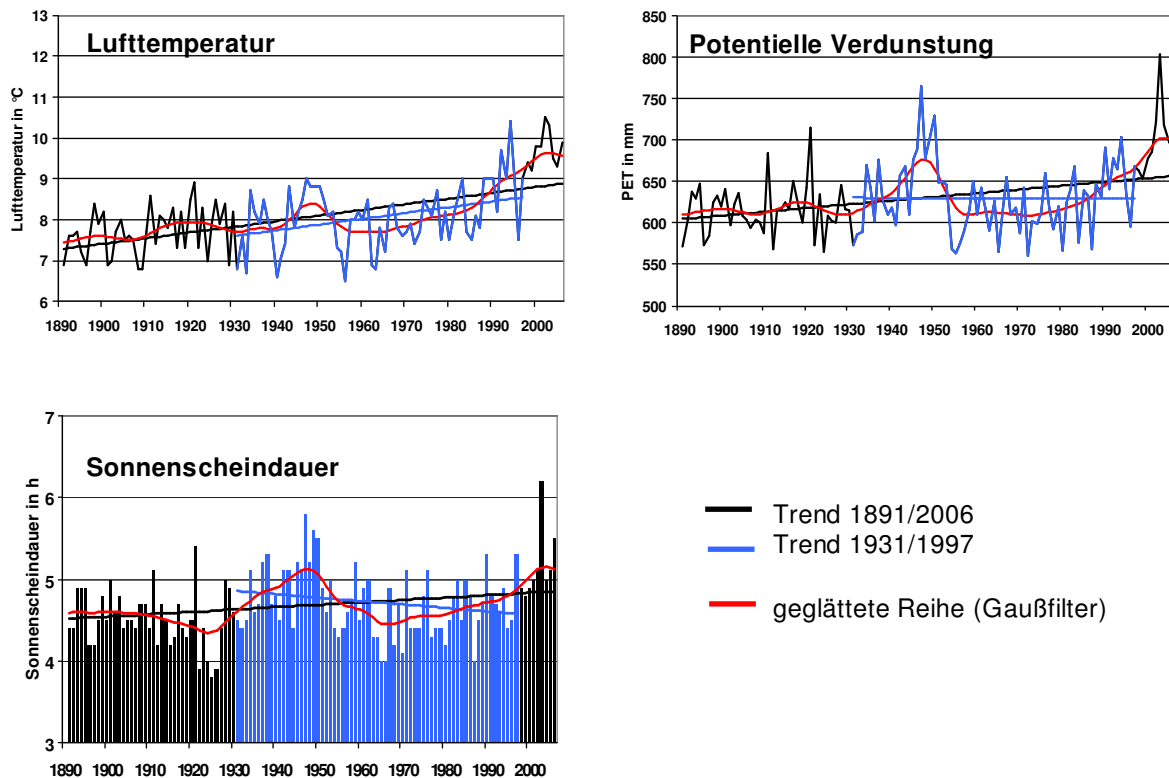


Abbildung 5.13: Langzeitverhalten der Jahreswerte von Lufttemperatur (in °C), mittlerer täglicher Sonnenscheindauer (in h), potentieller Verdunstung (mm), **MÜNCHEN**, 1891 bis 2006

Jahresabschnitt Juni-August (meteorologische Sommerperiode) liegen die Rekordwerte jedoch nach wie vor in den vierziger Jahren des vorigen Jahrhunderts (Ausnahme Karlsruhe 2003).

Das in Abbildung 5.14 am Beispiel der Stationsreihen von München dargestellte Langzeitverhalten von Niederschlag und Klimatischer Wasserbilanz veranschaulicht anhand der Zeitreihen der Winter- und Sommerhalbjahressummen das jahreszeitlich gegensätzliche Trendverhalten. In der KLIWA-Untersuchungsperiode 1931/1997 sind diese gegensätzlichen Trends stärker ausgeprägt als in der 116-jährigen Gesamtreihe.

Die Münchener Zeitreihen in den Abbildungen 5.13 und 5.14 sowie entsprechende Auswertungen für die Stationen Bamberg und Karlsruhe bieten auch eine niederschlags-/verdunstungsklimatische Einordnung der extremen Jahre im neuen Jahrhundert. In diesen letzten sechs Jahren der 116-jährigen Reihen sind gegenüber den Extremen des vorigen Jahrhunderts nur die Jahreswerte von Sonnenscheindauer und potentieller Verdunstung 2003 (Karlsruhe und München) sowie der negative Jahreswert der Klimatischen Wasserbilanz 2003 in-

München herausragend. Bei den Halbjahreswerten der Klimatischen Wasserbilanz werden an allen drei betrachteten Stationen die bisherigen Extreme seit 2001 im vorigen Jahrhundert deutlich und teils mehrfach übertroffen. Einzig bei den Jahresmitteltemperaturen ist ein anhaltender Anstieg der Mittel- und Extremwerte gegenüber dem vorigen Jahrhundert zu verzeichnen.

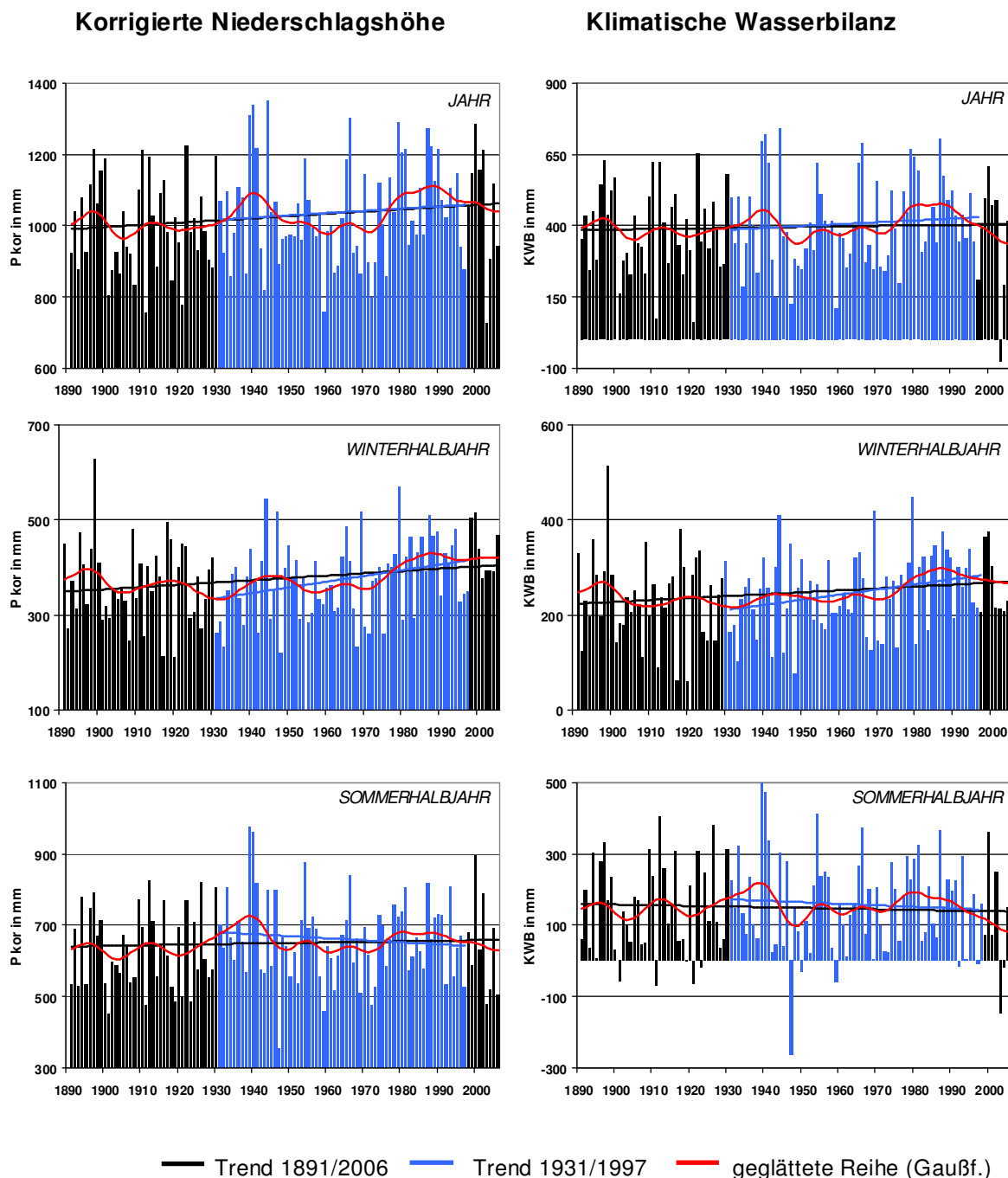


Abbildung 5.14: Langzeitverhalten der Jahres- und Halbjahreswerte von Niederschlag (kor.) und Klimatischer Wasserbilanz  
**MÜNCHEN**, 1891 bis 2006





## 6 Ausblick

Die im Rahmen der KLIWA-Teilprojekte zu Gebietsniederschlag, Lufttemperatur, Sonnenscheindauer / Globalstrahlung und Verdunstung gewonnenen Ergebnisse zeigen in ihrer Gesamtschau die komplexen Zusammenhänge im Zeitreihenverhalten dieser in Wasserhaushaltsprozessen wirksamen hydrometeorologischen Größen.

Ein markanter Befund für die KLIWA-Untersuchungsperiode 1931/1997 ist unter Anderem, dass bei signifikanter Zunahme der Jahresmitteltemperaturen die potentielle Verdunstung im Jahreswert einen Rückgang zeigt, der auf die Abnahme von Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung zurückzuführen ist. Einzelne Untersuchungsergebnisse legen die Vermutung nahe, dass die Rückgänge der Sonnenscheindauer und in der Folge der Globalstrahlung und der potentiellen Verdunstung durch zunehmende Luftfeuchte und/oder Bewölkung bedingt sind. Entsprechende Hinweise auf diesen Aspekt der klimatischen Veränderungen finden sich auch in der Literatur. Eine den bisherigen KLIWA-Untersuchungen zu den einzelnen hydrometeorologischen Größen entsprechende, regional wie zeitlich differenzierte und flächendeckende Abklärung für den süddeutschen Untersuchungsraum steht noch aus.

Ein weiterer wesentlicher Befund sind die maßgeblichen Trendunterschiede zwischen der KLIWA-Untersuchungsperiode 1931/1997 und den längerfristigen Zeitreihen seit 1891 bis aktuell 2006, die anhand einzelner, repräsentativer Stationen mit verfügbaren langen meteorologischen Beobachtungsreihen nachweisbar sind. Die Untersuchungsperiode 1931/1997 ist unter dem Aspekt der gegenwärtigen klimatischen Veränderungen bezüglich des Trendverhaltens von Sonnenscheindauer, Globalstrahlung und potentieller Verdunstung nicht ausreichend aussagekräftig. Für die Bewertung der im Untersuchungsraum klimatisch möglichen Höchstwerte dieser Größen und ihres Andauerverhaltens sind die in der KLIWA Untersuchungsperiode erfassten Jahre vom Beginn des dreißiger bis etwa Mitte des fünfziger Dezenniums, insbesondere der Zeitreihenabschnitt von 1945 bis 1951, unabdingbar.

Infolge der seit den 1990er Jahren besonders auch im Sommer wieder zunehmenden Sonnenscheindauer und Globalstrahlung hat sich bei den bis aktuell 2006 betrachteten Zeitreihen eine Abschwächung des negativen Trends der potentiellen Verdunstung bzw. eine Umkehr zu positiven Trends eingestellt. Die bisherige Extremperiode der potentiellen Verdunstung in den Jahren zwischen 1945 und 1951 wird mit den Jahren nach 2000 sowohl hinsichtlich einzelner Extremwerte (2003: Jahreswert, 2006: Monatssumme Juli) als auch im mehrjährigen Mittel bereits übertroffen – die weitere Entwicklung ist von Interesse.



## 7 Literatur

- [1] HAD (2000 – 2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland, herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin
- [2] ATV-DVWK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden Merkblatt ATV-DVWK-M 504, Hennef, 144 S.
- [3] KLIWA (2005a): Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern KLIWA-Berichte, H. 7, 160 S.
- [4] KLIWA (2005b): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern KLIWA-Berichte, Heft 5, 76 S.
- [5] BLÜMEL, K., KLÄMT, A., MALITZ, G., MATTHÄUS, H., RACHNER, M., RICHTER, D., (2001): Hydrometeorologische Untersuchungen zum Problem der Klimaveränderungen. Berichte d. Deutschen Wetterdienstes, H. 219, Offenbach a. M., 371 S.
- [6] DIN 4049-3 (1994): Hydrologie: Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Teil 3 Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag Berlin, 80 S.
- [7] DVWK (1996): Berechnung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, H. 238, Bonn, 135 S.
- [8] ALLEN, R.G., SMITH, M., PEREIRA, L.S., PERRIER, A. (1994): An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration ICID Bulletin, Vol.43, No. 2, 35-93
- [9] BILL, R. (1999): Grundlagen der Geoinformationssysteme, Bd. 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen; 2.Aufl. Herbert Wichmann Verlag Heidelberg, 475 S.
- [10] RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann- Niederschlagsmessers, Berichte d. Deutschen Wetterdienstes, H.194, 93 S.
- [11] SCHÖNWIESE, C.-D. (1992): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, 2.Aufl. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 230 S.
- [12] RAPP, J.; SCHÖNWIESE, C.-D. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990 Frankfurter Geowiss. Arb. Serie B, Bd. 5, 255 S.





## **8 Anlagenverzeichnis**

Anlage 1: Berechnung der tatsächlichen Verdunstung mit VEKOS

Anlage 2: Stationsliste



## Anlage1: Berechnung der tatsächlichen Verdunstung mit VEKOS

VEKOS [1], [2] ist ein Modellpaket mit Teilmodellen zur Berechnung der korrigierten Niederschlagshöhe und der tatsächlichen Verdunstung von Vegetationsflächen, versiegelten Flächen und von Gewässerflächen. Mithilfe der Teilmodelle kann die Gebietsverdunstung in Abhängigkeit von der Flächennutzung des Gebietes berechnet werden. Im KLIWA-Teilprojekt zum Langzeitverhalten der tatsächlichen Verdunstung wurde das Teilmodell für Vegetationsflächen genutzt, dessen Modellaufbau für eine Hydrotop-Einheit in Abbildung A-1 gezeigt wird. Eine Hydrotop-Einheit wird definiert durch ihre Bodenart (bzw. deren nutzbare Feldkapazität  $n_{FK}$ ) und die Art ihres Pflanzenbestandes (differenziert nach Nadel-, Laubwald und verschiedenen landwirtschaftlichen Fruchtarten) sowie durch verdunstungsrelevante meteorologische Größen (Niederschlagshöhe, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer), die repräsentativ für die betreffende Fläche sind.

Im KLIWA-Teilprojekt tatsächliche Verdunstung waren die Berechnungseinheiten durch die im Gesamtprojekt abgestimmten Rasterflächen sowie die definierten Eigenschaften des festgelegten Muster-Hydrotops (Bodenart bzw. nutzbare Feldkapazität / Grasdecke) vorgegeben. Aus den entsprechenden KLIWA-Teilprojekten standen für die Rasterflächen repräsentative Wertereihen der korrigierten Niederschlags- und potentiellen Verdunstungshöhen zur Verfügung, die in dieser Modellebene als meteorologischer Dateninput eingesetzt wurden (anstatt der in der Standardversion – Abbildung A-1 angegeben einzelnen meteorologischen Messgrößen).

Die tatsächliche Verdunstung eines Pflanzenbestandes  $RET$  wird in VEKOS durch Reduktion aus der für die Bestandsart spezifischen, potentiellen (maximalen) Verdunstung  $PET_B$  (s. Bericht, Teil 2, Abschnitt 2.2.1) in Abhängigkeit vom aktuellen Bodenwasservorrat  $W$  berechnet:

$$PET_B = f \cdot PET_{Turc/Ivanov}$$

$$RET = R(W) \cdot PET_B$$

Die Reduktionsfunktion  $R(W)$  genügt folgenden Bedingungen:

$$R = a - b / W \quad \text{und}$$

$$R = 0, \quad \text{wenn } W = PWP$$

$$R = 1, \quad \text{wenn } W = FK.$$

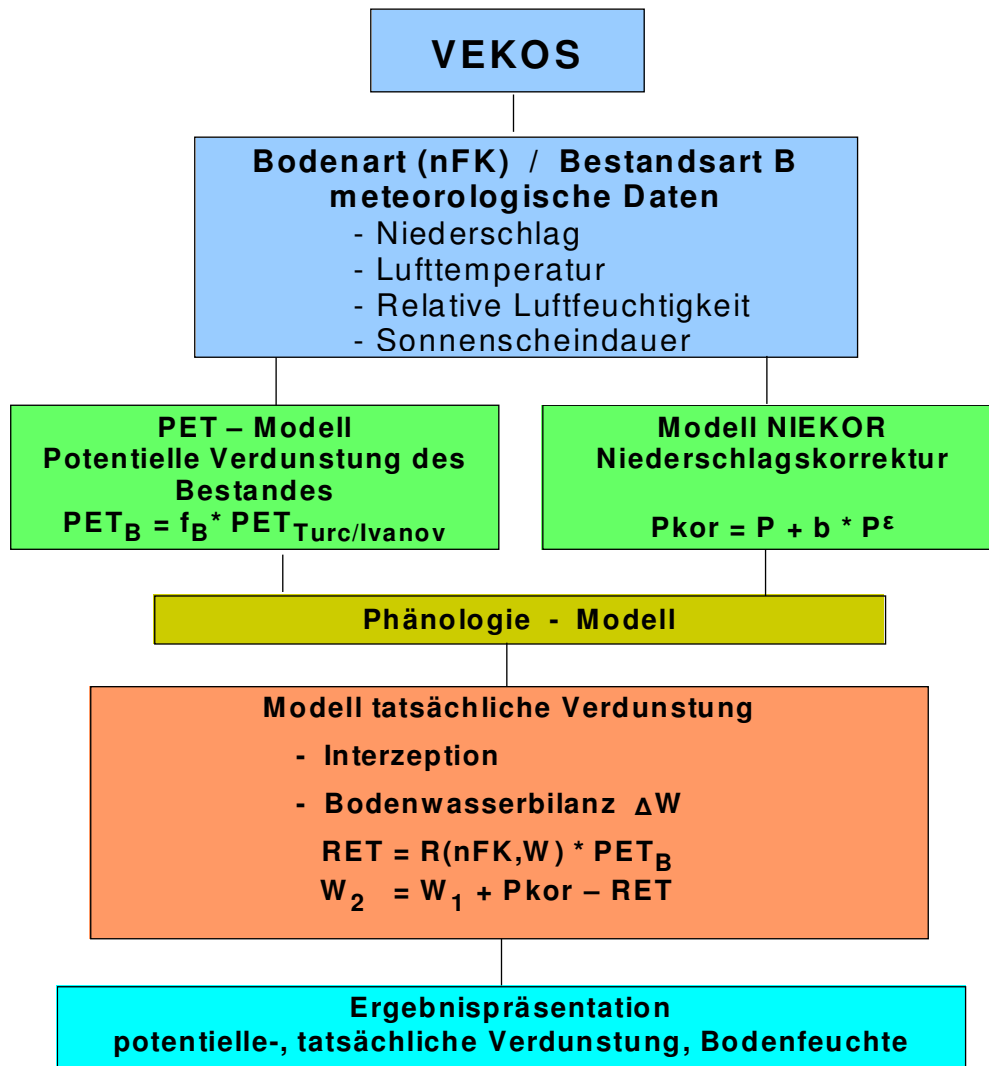
Darin sind  $FK$  bzw.  $PWP$  der Bodenwassergehalt bei Feldkapazität bzw. am Permanenzwelkepunkt. Die Koeffizienten  $a$  und  $b$  sind von den Bodenparametern abhängig; ihr Zahlenwert ergibt sich aus den Randbedingungen für  $R=0$  und  $R=1$ .





Abbildung A-1

### Berechnung der tatsächlichen Verdunstung RET Modell VEKOS – Hydrotop : Vegetationsfläche



Der Bodenwassergehalt  $W$  wird nach Berücksichtigung des Interzeptionsverlustes iterativ aus der Wasserhaushaltsgleichung der verdunstungsbeeinflussten Bodenzone (Wurzelzone) im Bereich der nutzbaren Feldkapazität bilanziert:

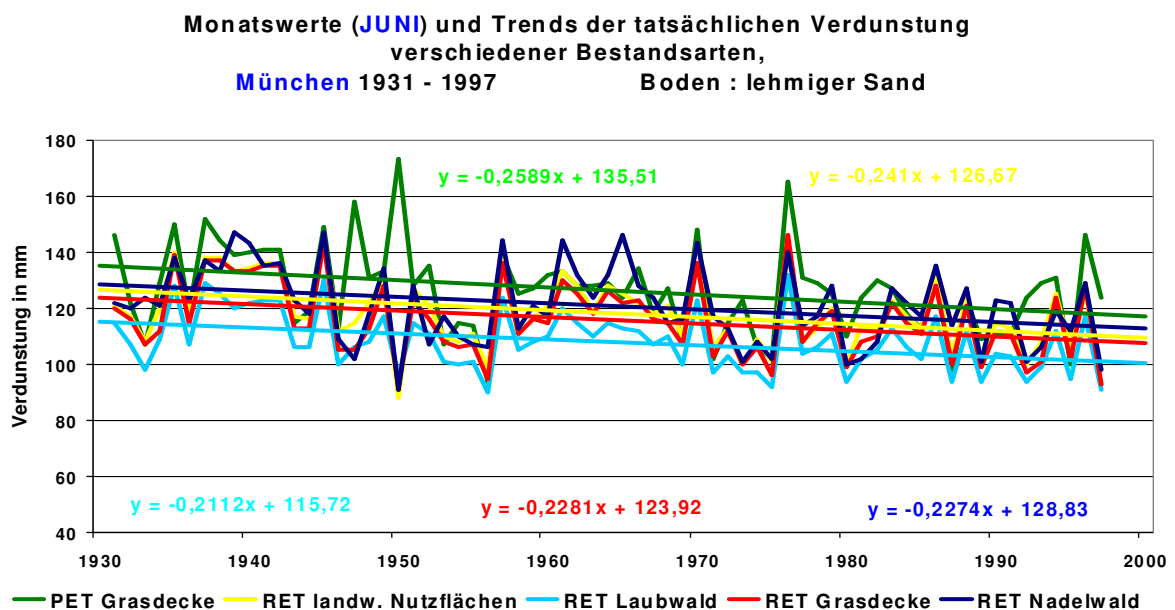
$$W_2 = W_1 + P_{kor} - RET$$

Falls der bilanzierte Bodenfeuchtewert  $W_2$  am Ende des Berechnungsintervalls die Feldkapazität des betrachteten Bodens überschreitet, wird Sickerung des "überschüssigen" Bodenwassers aus der Wurzelzone angenommen und als Startwert der Bodenfeuchte  $W_1$  im folgenden Zeitschritt Feldkapazität angesetzt.

Mit den Abbildungen A-2 bzw. A-3 wird anhand beispielhafter Berechnungsergebnisse für Stationsreihen von München veranschaulicht, dass sich für andere Pflanzenbestände bzw. andere Bodenarten (Parameter FK, PWP) ein qualitativ entsprechendes Langzeitverhalten ergibt wie bei dem im KLIWA-Teilprojekt untersuchten Muster-Hydrotop Gras / lehmiger Sand.

Abbildung A-2 zeigt im Vergleich die Zeitreihen und Trends der tatsächlichen Verdunstung im Juni von verschiedenen Bestandsarten, gleiche Bodenbedingungen – lehmiger Sand, vorausgesetzt. Der Vergleich wird anhand der Monatswertereihen Juni durchgeführt, weil die starken Trends in diesem Monat eine anschauliche graphische Darstellung des Trendverhaltens der einzelnen Bestandsarten ergeben. Der Rückgang der tatsächlichen Verdunstung im Juni wird durch die im Hauptteil des Berichtes beschriebenen, flächendeckend zu verzeichnenden negativen Trends der potentiellen Verdunstung bedingt. Die Differenzen zwischen potentieller und tatsächlicher Verdunstung sind in München aufgrund der durchschnittlich hohen Niederschläge im Sommer vergleichsweise gering.

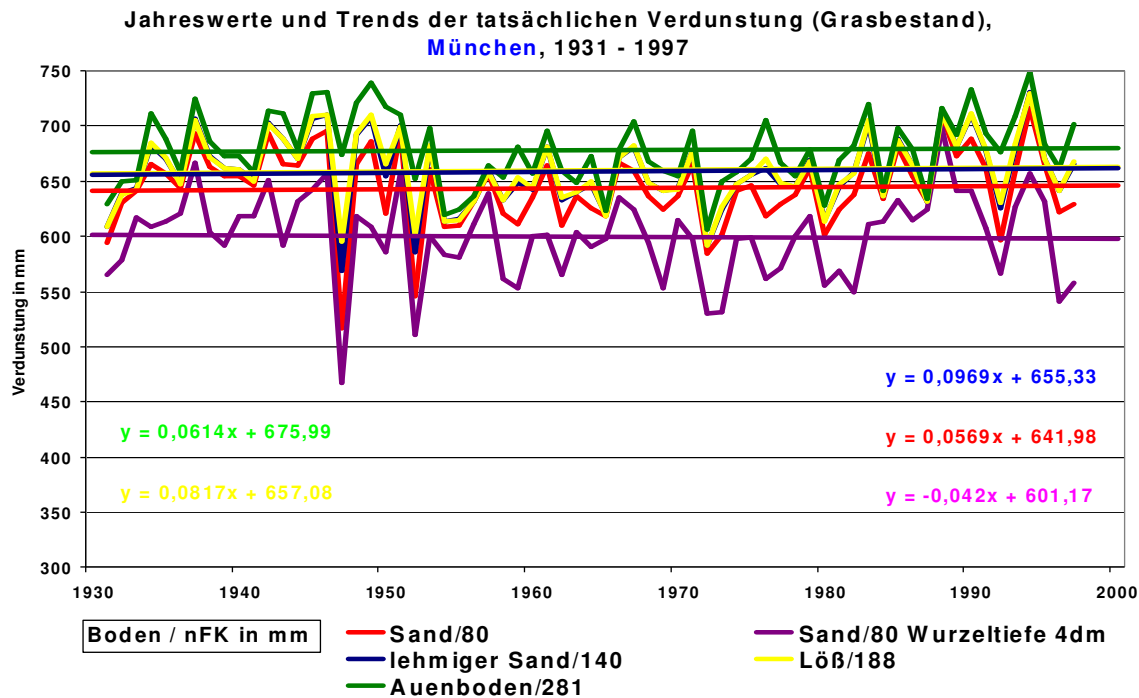
### Abbildung A-2



In Abbildung A-3 werden anhand der Münchener Stationsdaten die Jahreswertreihen und Trends der tatsächlichen Verdunstung eines Grasbestandes unter Voraussetzung verschiedener Böden verglichen. Betrachtet wird ein im süddeutschen Untersuchungsraum auftretendes breites Spektrum vom Sandboden geringer nutzbarer Feldkapazität (nFK) und geringer Durchwurzelungstiefe bis zu Löß und Auenböden hoher nutzbarer Feldkapazität.



Abbildung A-3



Die Speicherkapazität des Bodens für Niederschlagswasser beeinflusst die Höhe der Verdunstung von Pflanzenbeständen. Bei hohem Bodenwasservorrat und niederschlagsreicher Witterung sind die Unterschiede in den Verdunstungshöhen auf Bodenstandorten verschiedener Speicherkapazität relativ gering. Bei länger anhaltenden, niederschlagsarmen Witterungsperioden – insbesondere, wenn sie in der Hauptwachstumsphase des Pflanzenbestandes auftreten – ist auf Böden mit geringer Speicherkapazität der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat schneller verbraucht und die Pflanzen schränken ihre Transpiration eher ein als auf Böden hoher Speicherkapazität. Unter gleichen klimatischen Standortbedingungen sind die durchschnittlichen jährlichen und monatlichen (im Sommerhalbjahr) Verdunstungshöhen eines Pflanzenbestandes auf einem Boden geringer Speicherkapazität deshalb geringer als auf einem Boden hoher Speicherkapazität.

Der Zeitreihenvergleich in Abbildung A-3 zeigt, dass die Speicherkapazität des Bodens den Mittelwert der tatsächlichen Verdunstung des Pflanzenbestandes erheblich beeinflusst, im Trendverhalten der Verdunstungsreihen der unterschiedlichen Böden jedoch keine gravierenden Unterschiede bestehen.

#### Literatur

- [1] ATV-DVWK (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden  
ATV-DVWK-Regelwerk, Merkblatt M504, 144 S.
- [2] KLÄMT, A. [1988] : Konzipierung eines nutzerorientierten Modells zur Berechnung aktueller Monatssummen der Gebietsverdunstung unter Berücksichtigung der Art der Landnutzung.  
Acta Hydrophys., 32, 237-250

Klima-kennziffer	Station	geographische Länge dezimal	geographische Breite dezimal	Höhe m ü. NN
<b>D1 Donau, Quelle bis Lauchert</b>				
02739	VILLINGEN-SCHWENNINGEN	8,46667	48,05000	720
02740	DUERRHEIM,BAD	8,53333	48,01667	692
02755	ALBSTADT-EBINGEN	9,03333	48,20000	712
02756	TROCHTELFINGEN	9,25000	48,31667	700
02760	SIGMARINGEN-LAIZ	9,20000	48,06667	580
02780	DONAUESCHINGEN	8,50000	47,95000	677
02926	ALBSTADT-ONSTMETTINGEN	9,00000	48,28333	794
02932	TUTTLINGEN	8,81667	48,01667	648
02933	TUTTLINGEN-MOEHRINGEN	8,75000	47,95000	675
02934	NEUHAUSEN OB ECK (BW)	8,91667	47,98333	793
<b>D2 Donau, uh. Lauchert bis oh. Iller</b>				
02730	ULM (WST)	9,95000	48,38333	567
02753	MUENSINGEN-APFELSTETTEN	9,48333	48,38333	750
02765	BIBERACH/RISS	9,80000	48,11667	534
02786	PFULLENDORF-BRUNNHAUSEN	9,28333	47,91667	638
02885	OCHSENHAUSEN-MITTELBUCH	9,88333	48,05000	626
02960	SCHEMMERHOFEN-INGERKING.	9,76667	48,20000	519
<b>D3 Donau, Iller</b>				
04135	MEMMINGEN	10,13333	47,98333	610
04137	KEMPTEN (WST)	10,33333	47,71667	705
04144	OBERSTDORF (WST)	10,28333	47,40000	810
04146	FISCHEN,KR.OBERALLGAEU	10,26667	47,46667	757
<b>D4 Donau, uh. Iller bis oh. Wörnitz und Lech</b>				
02729	LAICHINGEN	9,70000	48,50000	747
04102	HEIDENHEIM/BRENTZ	10,13333	48,66667	500
04103	DILLINGEN/DONAU	10,50000	48,56667	420
04104	NIEDERSTOTZINGEN	10,23333	48,53333	451
04129	NEUBURG/KAMMEL-LANGENHAS	10,38333	48,31667	495
04130	KRUMBACH-EDENHAUSEN	10,41667	48,25000	520
04132	BOOS	10,20000	48,08333	588
<b>D5 Donau, Lech</b>				
04125	LANDSBERG/LECH	10,86667	48,03333	602
04126	KAUFERING	10,86667	48,10000	585
04127	AUGSBURG (ST.STEPHAN)	10,90000	48,36667	490
04142	HINDELANG-UNTERJ.(AKKST)	10,43333	47,55000	1053
04147	OY-MITTELBERG	10,43333	47,63333	1010
04148	LEINAU	10,61667	47,91667	663
04149	KAUFBEUREN	10,60000	47,86667	716
04151	SCHWANGAU-HORN	10,71667	47,58333	792



Klima- kennziffer	Station	geographische Länge dezimal	geographische Breite dezimal	Höhe m ü. NN
<b>D6 Donau, Wörnitz, Altmühl und Schw. Laber</b>				
04069	GUNZENHAUSEN(ALTMUEHLS.)	10,75000	49,13333	413
04079	PARSBERG/OPF.	11,71667	49,16667	516
04095	TRIEDORF	10,66667	49,20000	430
04097	WOERNITZ-BOTTENWEILER	10,23333	49,21667	464
04098	ANSBACH-CLAFFHEIM	10,58333	49,25000	481
04105	NOERDLINGEN	10,50000	48,85000	425
04107	KAISHEIM-NEUHOF	10,78333	48,76667	516
04108	EICHSTAETT	11,16667	48,90000	397
04113	BOEHMING	11,36667	48,95000	379
<b>D7 Donau, uh. Lech bis oh. Naab</b>				
04109	KOESCHING	11,48333	48,83333	417
04111	INGOLSTADT	11,43333	48,75000	367
04114	KARLSHULD	11,30000	48,68333	374
04115	HUELL	11,68333	48,60000	438
04116	ALTOMUENSTER-PIPINSRIED	11,28333	48,40000	500
04128	AUGSBURG-MUEHLH. (WST)	10,95000	48,43333	462
04184	AU/HALLERTAU-GUENZENHSN.	11,71667	48,55000	483
04185	MAINBURG	11,78333	48,65000	431
04362	KOENIGSMOOS-UNTERMAXFELD	11,21667	48,66667	378
<b>D8 Donau, Naab</b>				
04029	FICHEL.B./OFR-HUETTSTADL	11,83333	49,98333	659
04073	ESCHENBACH/OPF.	11,81667	49,75000	470
04074	SPEINSHART/OPF.	11,81667	49,78333	424
04075	AMBERG-UNTERAMMERSRIECHT	11,85000	49,46667	383
04476	TIRSCHENREUTH	12,35000	49,88333	515
04479	ALTGLASHUETTE	12,38333	49,76667	750
04480	SILBERHUETTE	12,40000	49,75000	819
04481	WEIDEN/OPF. (WST)	12,18333	49,66667	438
04482	ETTMANNSDORF	12,08333	49,33333	355
04483	SCHWANDORF	12,08333	49,33333	356
04484	OBERVIECHTACH	12,43333	49,45000	595
04725	FLOSSENBUERG	12,35000	49,73333	695
<b>D9 Donau, Regen</b>				
04488	CHAM	12,66667	49,21667	396
04489	GROSSER ARBER (WST)	13,13333	49,11667	1437
04490	BODENMAIS (AKKST)	13,08333	49,08333	648
04491	GROSSER FALKENSTEIN(WST)	13,28333	49,08333	1307
04492	ZWIESEL	13,21667	49,01667	575
04493	ZWIESELBERG	13,21667	49,00000	615
04494	HOELLENSTEIN-KRAFTWERK	12,86667	49,13333	403
04499	REGENSBURG (WST)	12,10000	49,05000	366
04710	SCHORNDORF-KNOEBLING	12,61667	49,16667	399



Klima-kennziffer	Station	geographische Länge dezimal	geographische Breite dezimal	Höhe m ü. NN
<b>D10 Donau, uh. Naab bis oh. Isar</b>				
04500	LEIBLFING	12,51667	48,76667	365
04501	MALLERSDORF/NDB.	12,25000	48,78333	410
04502	AITERHOFEN	12,61667	48,85000	339
04505	STRAUBING (WST)	12,56667	48,83333	350
04509	METTEN	12,91667	48,85000	313
04511	RUSEL-IRLMOOS	13,05000	48,88333	797
04563	NEUTRAUBLING	12,21667	48,98333	332
<b>D11 Donau, Isar</b>				
04117	WEIHENSTEPHAN (AMBF)	11,70000	48,40000	470
04119	MUENCHEN-RIEM (FLUGWEWA)	11,71667	48,13333	527
04123	PUCH,KR.FUERSTENFELDBR.	11,21667	48,18333	550
04124	MUENCHEN-STADT	11,55000	48,16667	515
04131	MAISACH-GERNLINDEN	11,30000	48,21667	509
04155	ZUGSPITZE (WST)	10,98333	47,41667	2960
04156	GARMISCH-PARTENK. (AWST)	11,06667	47,48333	719
04157	MITTENWALD	11,26667	47,43333	920
04160	KOHLGRUB,BAD	11,05000	47,68333	850
04161	HOHENPEISSENBERG (OBS)	11,01667	47,80000	977
04164	RAISTING	11,10000	47,91667	553
04165	AMMERLAND	11,35000	47,90000	630
04166	ATTENKAM	11,36667	47,88333	672
04168	KOHLGRUB,BAD (ROSSHOF)	11,08333	47,66667	734
04169	TOELZ,BAD	11,55000	47,78333	640
04187	OBERSCHLEISSHEIM	11,55000	48,25000	484
04189	SCHWAIGERMOOS	11,80000	48,36667	444
04190	ERDINGER MOOS (FLUGWEWA)	11,80000	48,36667	446
04199	MUENCHEN-BOT.GARTEN	11,50000	48,16667	515
04365	MUENCHEN-PERLACH	11,65000	48,10000	542
04503	LANDSHUT	12,11667	48,53333	393
04506	KUMHAUSEN	12,15000	48,51667	436
<b>D12 Donau, Vils und Rott</b>				
04519	ALDERSBACH	13,08333	48,60000	325
04522	EIBERG	12,88333	48,35000	470
04524	FALKENBERG,KR.ROTTAL-INN	12,73333	48,48333	472
04890	FUERSTENZELL (WST)	13,35000	48,55000	476
<b>D13 Donau, Alz und Salzach</b>				
04530	TRAUNSTEIN-AXDORF	12,61667	47,85000	635
04531	TROSTBERG	12,55000	48,01667	487
04532	GEISSING	12,63333	47,88333	610
04535	REICHENHALL,BAD	12,88333	47,71667	470
04536	SCHOENAU A.KOE.SEE AKKST	12,98333	47,61667	616
04540	REIT I.WINKL	12,46667	47,68333	690
04541	RAUSCHBERG B.RUHPOLDING	12,68333	47,73333	1640
04543	RUHPOLDING	12,66667	47,73333	692

Anlage 2: Stationsliste (Fortsetzung)



Klima- kennziffer	Station	geographische Länge dezimal	geographische Breite dezimal	Höhe m ü. NN
<b>D14 Donau, Inn</b>				
04170	BRUCKMUEHL-OBERWALL	11,95000	47,93333	549
04171	EBERSBERG	11,95000	48,08333	572
04172	HOLZKIRCHEN	11,70000	47,88333	685
04175	TEGERNSEE	11,76667	47,71667	838
04176	ROTTACH-EGERN	11,76667	47,68333	747
04179	KREUTH (KKST)	11,75000	47,65000	776
04181	SCHLIERSEE	11,85000	47,73333	780
04520	ERING	13,13333	48,30000	340
04521	SIMBACH/INN	13,03333	48,26667	360
04526	MITTBACH/OBB.	12,03333	48,16667	621
04527	OBERTAUFKIRCHEN	12,28333	48,26667	455
04528	MUEHLDORF/INN (WST)	12,50000	48,28333	405
04529	WASSERBURG/INN	12,21667	48,05000	443
04544	ROSENHEIM	12,13333	47,88333	444
04546	BAYRISCHZELL	12,00000	47,68333	789
04548	WENDELSTEIN (WST)	12,01667	47,70000	1832
04549	OBERAUDORF	12,16667	47,66667	480
04553	AMERANG-PFAFFING	12,30000	48,01667	515
<b>D15 Donau, uh. Isar bis Landesgrenze</b>				
04510	HAUSSTEIN	13,06667	48,86667	648
04512	SALDENBURG-ENTSCHEINREUTH	13,31667	48,78333	457
04513	MAUTH-FINSTERAU	13,58333	48,93333	1004
04514	GRAINET-REHBERG	13,61667	48,80000	655
04515	WALDHAEUSER (NAT.PARK)	13,46667	48,93333	940
04517	PASSAU-OBERHAUS (WST)	13,46667	48,58333	409
04518	PASSAU-MAIERHOF	13,40000	48,58333	301
<b>E1 Elbe</b>				
04026	HOF (STADT)	11,91667	50,31667	474
04027	HOF-HOHENSAAS (WST)	11,88333	50,31667	567
04475	SELB/OFR.-WILDENAU	12,16667	50,20000	611
<b>M1 Main bis oh. Regnitz</b>				
03263	LEHESTEN/THUER.WALD	11,45000	50,48333	640
04031	HORLACHEN	11,70000	50,15000	586
04033	OCHSENKOPF	11,81667	50,03333	1019
04035	TEUSCHNITZ-WICKENDORF	11,36667	50,38333	568
04036	KRONACH	11,33333	50,23333	306
04037	STAMMBACH-QUERENBACH	11,73333	50,15000	598
04039	WEISMAIN	11,23333	50,08333	317
04040	COBURG (WST)	10,98333	50,28333	322
04041	SCHESSLITZ	11,03333	49,98333	317
04042	KULMBACH	11,45000	50,10000	330
04070	BAYREUTH	11,55000	49,95000	330
04246	SONNEBERG-NEUFANG (AWST)	11,18333	50,38333	626
04310	BISCHOFSGRUEN (KKST)	11,81667	50,05000	675





Klima-kennziffer	Station	geographische Länge dezimal	geographische Breite dezimal	Höhe m ü. NN
<b>M2 Main, Regnitz</b>				
04008	BERG/OPF.	11,43333	49,33333	421
04058	EBRACH	10,50000	49,85000	333
04060	BURGHASLACH	10,60000	49,73333	310
04062	BAMBERG-ALTENBURG	10,86667	49,88333	382
04063	BAMBERG-STERNWARTE	10,88333	49,88333	282
04064	BAMBERG (WST)	10,91667	49,88333	239
04067	PFOFELD-LANGLAU	10,86667	49,11667	435
04068	GOESSWEINSTEIN	11,30000	49,78333	437
04071	SCHWABACH	11,01667	49,33333	343
04072	UTTENREUTH	11,06667	49,60000	291
04076	POMMELSBRUNN	11,51667	49,50000	368
04078	NUERNBERG-FISCHBACH	11,18333	49,41667	341
04081	NUERNBERG-KRA.(FLUGWEWA)	11,05000	49,50000	314
04083	WEISENBURG/BAY. (WST)	10,96667	49,01667	422
04084	ROTH B. NUERNBERG	11,10000	49,25000	340
04085	NUERNBERG-BUCHENBUEHL	11,11667	49,50000	335
04086	FUERTH/BAYERN	10,96667	49,48333	313
04087	ERLANGEN	11,00000	49,61667	270
04088	ERLANGEN-BRUCK	11,00000	49,56667	280
04089	HAGENBUECHACH	10,76667	49,53333	384
04090	NEUSTADT/AISCH	10,60000	49,56667	315
04092	GRAEFENBERG-KASBERG	11,23333	49,66667	506
04094	ANSBACH-HENNENBACH	10,58333	49,31667	417
04096	ANSBACH (WST)	10,58333	49,30000	413
04305	POMMELSBRUNN-MITTELBURG	11,53333	49,48333	530
04334	DIETENHOFEN	10,68333	49,40000	386
<b>M3 Main, uh. Regnitz bis oh. Fränk. Saale</b>				
02673	WUERZBURG (KLAERWERK)	9,90000	49,80000	170
02674	WUERZBURG (WST)	9,96667	49,76667	268
02820	ARNSTEIN-MUEDESHEIM	9,91667	49,96667	215
02825	THUENGENSHEIM-STAUSTUFE	9,85000	49,85000	165
04012	WEIGENHEIM-REUSCH	10,26667	49,58333	309
04045	HOFHEIM/UFR.	10,51667	50,13333	262
04054	SCHWEINFURT	10,21667	50,06667	240
04055	WERNECK-MUEHLHAUSEN	10,05000	49,96667	216
04057	KITZINGEN	10,18333	49,73333	188
<b>M4 Main, Fränk. Saale</b>				
02536	BRUECKENAU,BAD	9,78333	50,31667	310
02625	WASSERKUPPE (WST)	9,95000	50,50000	921
02628	GERODA-PLATZ	9,91667	50,28333	550
02629	SANDBERG-KILIANSHOF	10,01667	50,36667	555
02801	GERSFELD (PKST)	9,91667	50,45000	530
04046	KOENIGSHOFEN,BAD	10,45000	50,28333	288
04048	FLADUNGEN	10,15000	50,51667	415
04050	STOCKHEIM	10,28333	50,46667	305
04052	KISSINGEN,BAD (WST)	10,08333	50,20000	262
04238	FRANKENHEIM/RHOEN	10,06667	50,55000	754
04248	HINDFELD	10,56667	50,36667	300

Anlage 2: Stationsliste (Fortsetzung)





Klima- kennziffer	Station	geographische Länge dezimal	geographische Breite dezimal	Höhe m ü. NN
<b>M5 Main, Tauber</b>				
02678	LAUDA-KOEN.-GERLACHSHEIM	9,71667	49,58333	199
02679	MERGENTHEIM,BAD-NEUNKIR.	9,76667	49,48333	250
02832	TAUBERBISCH.-DITTIGHEIM	9,68333	49,61667	179
04091	UFFENHEIM	10,23333	49,53333	340
04093	ROTHENBURG O.D.TAUBER	10,18333	49,38333	406
<b>M6 Main, uh. Fränk. Saale bis Landesgrenze</b>				
02508	MICHELSTADT-VIELBR.(WST)	9,10000	49,71667	453
02533	ESCHAU-HOBBACH	9,28333	49,86667	198
02538	MILTENBERG	9,23333	49,71667	127
02540	HESSENTHAL	9,28333	49,93333	287
02546	FRAMMERSBACH	9,46667	50,06667	245
02547	BISCHBRUNN	9,48333	49,88333	412
02564	SCHAAFHEIM-SCHLIERBACH	8,96667	49,91667	155
02638	KAHL/MAIN	9,00000	50,06667	107
02667	BEERFELDEN	8,96667	49,56667	450
02669	ASCHAFFENBURG	9,11667	49,98333	110
02671	LOHR/M.-STEINBACH	9,61667	50,01667	161
02677	WERTHEIM-EICHEL	9,55000	49,76667	140
02685	BUCHEN,KR.NECKAR-ODW.	9,31667	49,51667	350
<b>N1 Neckar, Quelle bis oh. Fils</b>				
02717	LENNINGEN-SCHOPFLOCH	9,53333	48,53333	758
02718	KIRCHHEIM/TECK (A)	9,41667	48,66667	289
02726	NUERTINGEN-OBERENSINGEN	9,33333	48,63333	280
02738	KOENIGSFELD/SCHW.	8,43333	48,15000	754
02748	TUEBINGEN (SCHLOSS)	9,05000	48,51667	370
02749	URACH,BAD	9,40000	48,50000	471
02751	FREUDENSTADT (WST)	8,41667	48,45000	797
02754	HECHINGEN	8,98333	48,38333	520
02757	ROTTWEIL	8,63333	48,18333	588
02758	KLIPPENECK (AWST)	8,75000	48,10000	973
02759	ENINGEN (OB.LINDENHOF)	9,30000	48,46667	705
02868	REUTLINGEN-BETZINGEN	9,18333	48,50000	360
02920	HERRENBERG	8,88333	48,60000	431
02923	ROTTENBURG-KIEBINGEN	8,98333	48,48333	336
02924	OBERNDORF/NECKAR-AISTAIG	8,58333	48,31667	464
02928	ALBSTADT-LAUTLINGEN	8,96667	48,21667	698
02935	WELLENDINGEN	8,70000	48,15000	655



Klima-kennziffer	Station	geographische Länge dezimal	geographische Breite dezimal	Höhe m ü. NN
<b>N2 Neckar, Fils bis oh. Kocher (ohne Enz)</b>				
02511	WEINSBERG	9,30000	49,15000	219
02689	HEILBRONN	9,23333	49,15000	167
02714	LUDWIGSBURG	9,20000	48,90000	287
02715	STUTTGART (NECKARTAL)	9,21667	48,78333	223
02716	STUTTGART-HOHENHEIM	9,21667	48,71667	401
02720	STUTTGART (WA)	9,18333	48,76667	286
02721	MURRHARDT	9,56667	48,96667	344
02727	SCHWAEB.GMUEND-STRASSDF.	9,80000	48,78333	415
02728	STOETTEN (WST)	9,86667	48,66667	734
02743	STUTTGART(SCHNAR.AWST)	9,20000	48,83333	314
02746	STUTTGART-ECH.(FLUGWEWA)	9,23333	48,68333	371
02865	EBERSBACH/FILS	9,53333	48,71667	300
02874	BOLL,BAD (KKST)	9,61667	48,65000	425
02893	WINTERBACH	9,48333	48,80000	280
02910	WAIBLINGEN	9,31667	48,83333	224
<b>N3 Neckar, Enz</b>				
02708	WILDBAD,BAD-SOMMERBERG	8,53333	48,75000	740
02709	WILDBAD,BAD-CALMBACH	8,58333	48,76667	400
02711	PFORZHEIM-EUTINGEN	8,75000	48,90000	246
02712	RUTESHEIM	8,95000	48,80000	449
02734	ENZKLOESTERLE	8,46667	48,66667	600
02741	SCHOEMBERG,KR.CALW	8,65000	48,78333	635
02745	NAGOLD-PFRONDORF	8,73333	48,60000	430
02855	SACHSENHEIM	9,06667	48,96667	248
02908	WALDACHTAL-LUETZENHARDT	8,56667	48,50000	595
02913	BOEBLINGEN	8,96667	48,68333	445
02917	WEISSACH	8,90000	48,85000	455
<b>N4 Neckar, Kocher</b>				
02509	INGELFINGEN	9,65000	49,30000	209
02681	KUENZELSAU	9,70000	49,28333	222
02684	OEHRINGEN (WST)	9,51667	49,21667	276
02699	MAINHARDT-WUERTTEMBERG.HOF	9,58333	49,06667	473
02723	GSCHWEND,KR.OSTALB	9,73333	48,93333	492
02724	SCHWAEB.HALL-TEURERSHOF	9,71667	49,11667	365
<b>N5 Neckar, Jagst</b>				
02515	BOXBERG-SEEHOF	9,65000	49,45000	373
02687	NEUDENAU	9,26667	49,30000	210
04099	CRAILSHEIM-INGERSHEIM	10,08333	49,13333	417
04100	ELLWANGEN/JAGST	10,13333	48,96667	443
<b>N6 Neckar, uh. Jagst bis Mündung</b>				
02680	EBERBACH/NECKAR	8,98333	49,45000	178
02691	EPPINGEN	8,91667	49,13333	210
02693	HEIDELBERG	8,66667	49,41667	110



Klima- kennziffer	Station	geographische Länge dezimal	geographische Breite dezimal	Höhe m ü. NN
<b>R1 Rhein, Bodensee</b>				
02764	AULENDORF-SPIEGLER	9,66667	47,96667	560
02787	UEBERLINGEN/BODENSEE	9,18333	47,76667	490
02789	MEERSBURG	9,28333	47,70000	460
02791	WEINGARTEN,KR.RAVENSBURG	9,61667	47,80000	440
02793	FRIEDRICHSHAFEN	9,48333	47,65000	394
02796	LINDENBERG/ALLGAEU	9,88333	47,60000	760
02797	SCHEIDEGG (AKKST)	9,85000	47,58333	778
02798	STOCKACH	9,03333	47,85000	475
02947	WOLFEGG (AKKST)	9,80000	47,81667	677
02966	BAINDT	9,66667	47,85000	467
02967	DEGGENHAUSERTAL-AZENW.	9,41667	47,80000	708
02980	ERISKIRCH-MARIABRUNN	9,53333	47,63333	408
02991	SIGMARZELL-ZEISERTSWEI.	9,75000	47,58333	507
04138	ISNY	10,05000	47,68333	712
04140	OBERSTAUFEN-KALZHOFEN	10,03333	47,56667	800
<b>R2 Rhein, Bodensee bis Wiese</b>				
02325	TODTMOOS	8,00000	47,75000	855
02328	RHEINFELDEN	7,80000	47,56667	287
02329	SCHOPFHEIM	7,85000	47,65000	400
02331	JUNGHOLZ (KUEHMOOS)	7,95000	47,60000	728
02338	SAECKINGEN,BAD	7,93333	47,56667	355
02761	BONNDORF/SCHW.	8,33333	47,81667	875
02766	FRIEDENWEILER	8,25000	47,91667	928
02767	TITISEE-N.-TITIS.(AKKST)	8,15000	47,90000	846
02768	HOTTINGEN	8,01667	47,61667	712
02769	WUTOESCHINGEN-OFTERINGEN	8,38333	47,68333	398
02770	WALDAU-JOSTAL	8,15000	47,98333	1005
02772	TITISEE-N.-LANGENORDNACH	8,20000	47,93333	870
02773	LENZKIRCH	8,20000	47,86667	818
02774	SANKT BLASIEN-MENZENSCHW	8,06667	47,83333	885
02775	SCHLUCHSEE	8,18333	47,81667	963
02776	SANKT BLASIEN	8,13333	47,76667	795
02777	HOECHENSCHWAND (AKKST)	8,16667	47,73333	1008
02778	WALDSHUT	8,23333	47,61667	330
02783	AACH,KR.KONSTANZ	8,85000	47,85000	478
02784	RADOLFZELL	9,00000	47,73333	400
02785	ENGEN	8,76667	47,85000	533
02790	KONSTANZ/STADT	9,16667	47,66667	398
02795	KONSTANZ (WST)	9,18333	47,68333	443
02799	REMETSCHWIEL	8,15000	47,68333	760
02939	FELDBERG/SCHW.-ALTGLASH.	8,11667	47,85000	962



Klima-kennziffer	Station	geographische Länge dezimal	geographische Breite dezimal	Höhe m ü. NN
<b>R3 Rhein, uh. Wiese bis oh. Kinzig</b>				
02303	LAHR (WST)	7,83333	48,36667	155
02304	EMMENDINGEN-MUNDINGEN	7,83333	48,13333	203
02305	VOGTSBURG-OBERROTWEIL	7,63333	48,10000	223
02306	LILIENTAL BEI IHRINGEN	7,68333	48,06667	284
02310	FREIBURG I.BR.-HERDERN	7,86667	48,01667	255
02311	FREIBURG I.BR.	7,85000	48,00000	269
02313	STEGEN	7,95000	47,98333	363
02314	SCHALLSTADT-MENGEN	7,71667	47,96667	215
02315	BUCHENBACH	8,00000	47,96667	445
02318	FREIAMT-OTTOSCHWANDEN	7,93333	48,20000	481
02320	FELDBERG/SCHW. (WST)	8,00000	47,88333	1486
02323	MALSBURG-M.-FRIEDRICHSH.	7,73333	47,78333	852
02326	ESCHBACH	7,66667	47,88333	234
02336	MUENSTERTAL-OBERM.-TAL	7,83333	47,88333	545
02352	WEISWEIL-WALDECKHOF	7,70000	48,18333	173
02355	IHRINGEN	7,63333	48,05000	193
02771	HINTERZARTEN	8,10000	47,90000	883
02781	SANKT MAERGEN	8,10000	48,01667	896
02930	ELZACH	8,06667	48,18333	360
<b>R4 Rhein, Kinzig bis Murg</b>				
02316	RHEINAU-MEMPRECHTSHOFEN	8,00000	48,66667	131
02701	BADEN-BADEN-GEROLDSAU	8,25000	48,73333	240
02702	BUEHLERTAL	8,18333	48,70000	190
02705	HORNISGRINDE	8,20000	48,61667	1122
02731	GENGEBACH	8,01667	48,41667	186
02735	SCHONACH	8,20000	48,13333	904
02736	WOLFACH	8,23333	48,30000	265
02737	TRIBERG	8,23333	48,13333	683
02750	FREUDENSTADT (KURGARTEN)	8,41667	48,46667	736
02752	BAIERSBRONN	8,38333	48,50000	573
02903	BUEHLERTAL-OBERTAL	8,18333	48,68333	478
02915	SCHOENWALD/SCHW. (KKST)	8,20000	48,10000	1021
02931	TRIBERG (KURPARK)	8,25000	48,13333	700
<b>R5 Rhein, uh. Murg bis oh. Neckar</b>				
02696	PHILIPPSBURG (KKW)	8,45000	49,25000	100
02697	KNITTLINGEN	8,75000	49,03333	200
02698	KARLSRUHE (WST)	8,36667	49,03333	112
02706	HERRENALB,BAD	8,45000	48,80000	350
02707	DOBEL	8,50000	48,80000	717
02710	RHEINSTETTEN-FORCHHEIM	8,33333	48,96667	116