

PIK Report

No. 85

ORTS- UND ZEITDISKRETE ERMITTLUNG
DER SICKERWASSERMENGE
IM LAND BRANDENBURG
AUF DER BASIS FLÄCHENDECKENDER
WASSERHAUSHALTSBERECHNUNGEN

Werner Lahmer, Bernd Pfützner



POTSDAM INSTITUTE
FOR
CLIMATE IMPACT RESEARCH (PIK)

Autoren:

Dr. Werner Lahmer*

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

PF 60 12 03, D-14412 Potsdam

Tel.: +49-331-288-2524

Fax: +49-331-288-2695

E-mail: Werner.Lahmer@pik-potsdam.de

*(Ansprechpartner)

Dr. Bernd Pfützner

Büro für Angewandte Hydrologie

Wollankstraße 117

D-13187 Berlin

E-mail: Bernd.Pfuetzner@bah-berlin.de

Herausgeber:

Dr. F.-W. Gerstengarbe

Technische Ausführung:

U. Werner

POTSDAM-INSTITUT
FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG
Telegrafenberg
Postfach 60 12 03, 14412 Potsdam
GERMANY

Tel.: +49 (331) 288-2500

Fax: +49 (331) 288-2600

E-mail-Adresse: pik@pik-potsdam.de

Summary

During the last years, numerous groundwater logging stations in Brandenburg indicate a considerable decrease of groundwater table depth. Variations of percolation due to changes of the driving meteorological conditions (decrease in precipitation and/or increase of temperature) are supposed to be the reason for this decrease.

In order to study the complex system behaviour including meteorological, landuse and soil type conditions, simulation runs using a high resolution precipitation-runoff model were carried out for the State of Brandenburg (30.000 km²). Water balance calculations with a daily time step were performed for the period 1961-1998 on the basis of 57.836 spatial units, which result from the GIS-based combination of various digital maps. For the simulation runs, these units were spatially aggregated into 1.599 hydrotopes and 15 hydrotope classes.

Comprehensive analyses of various time series as well as spatially distributed results reveal tendencies influencing the regional water cycle in general and percolation in particular. Percolation was statistically analysed for different periods and temporal aggregations (annual, winter, summer, quarterly and monthly values). The results of the spatially distributed trend analyses indicate considerable changes of water balance components in Brandenburg in the period 1961-1998. Though only the increase of mean daily temperature by about 1°C turns out to be statistically significant, 75% of the total area of Brandenburg show a decrease in percolation. For almost 5% of the area this decrease is statistically significant.

Differentiating the observed trends with respect to the 15 hydrotope classes used for the simulation runs shows that only areas characterized by a shallow groundwater table contribute to this decrease. The basic reasons for the percolation trend are decreasing precipitation sums and increasing mean daily temperatures. The period 1991-1998 characterized by many hot summers contributes considerably to this behaviour.

The application of the high resolution GIS-based modelling approach shows that this concept represents an effective way to study trends in various water balance components. Thus, it is a basic element in integrated studies heading for an improved water management and a more sustainable water use, as e.g. stimulated by the European Water Directive.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Veranlassung und Zielstellung	7
2	Grundlagendaten	9
2.1	Räumliche Grundlagendaten	9
2.2	Zeitliche Grundlagendaten	11
3	Angewendete Methodik	15
3.1	Das hydrologische Modellierungssystem ArcEGMO	15
3.2	Methoden der räumlichen Aggregation und Disaggregation	16
3.3	Verarbeitung der meteorologischen Eingangsvariablen	17
3.4	Kalibrierung und Validierung des Modells	17
4	Flächendeckende Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen	21
4.1	Jahressummen 1961-1998	22
4.2	Mittlere Jahres-, Sommer- und Wintersummen 1961-1998	23
4.3	Mittlere Monatssummen 1961-1998	27
4.4	Mittelwerte der Sickerwasserbildung für Dekaden	29
4.5	Innerjährliche Verschiebungen der Sickerwassermenge	30
5	Zeitliche Entwicklung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen	31
5.1	Zeitliche Entwicklung von Jahreswerten	31
5.2	Zeitliche Entwicklung von Halbjahreswerten	36
6	Trendanalysen der Sickerwassermenge	37
6.1	Begriffe und Definitionen	37
6.1.1	Der Trendbegriff	37
6.1.2	Linearer Trend	38
6.1.3	Gleitmittel	38
6.1.4	Statistische Signifikanz von Trends	39
6.2	Trends in den Jahres-, Sommer- und Wintersummen	40
6.3	Trends in den Monatssummen	45
6.4	Flächendifferenzierte Darstellung der Trends	46
6.4.1	Räumliche Verteilung des Korrelationskoeffizienten	48
6.4.2	Absoluter Trend der Sickerwassermenge	49
6.4.3	Sensitive Teilflächen	53
7	Vorschläge für ergänzende Untersuchungen	54
7.1	Erhöhung der räumlichen Auflösung	55
7.2	Aufgaben des Flusseinzugsgebietsmanagements	55
8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	55
9	Literatur	59
	Überblick über die Abbildungen	62
	Überblick über die Tabellen	64

1 Veranlassung und Zielstellung

Den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen liegt ein Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg (LUA) an das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) vom Mai 2001 zu Grunde, nach der die Sickerwassermenge im Land Brandenburg für den Zeitbereich 1961-1998 in orts- und zeitdiskreter Form ermittelt werden sollte. Die Untersuchungen basieren z. T. auf den im Rahmen des Beitrages „Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg“ (LAHMER et al. 2001b) zum Projekt des LUA „Stabilisierung und Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes in Brandenburg“ verwendeten Daten.

Hintergrund der vorliegenden Studie ist die Tatsache, dass zahlreiche Grundwassermessstellen in Brandenburg sinkende Grundwasserstände aufweisen. Diese Beobachtung basiert auf einer am Landesumweltamt Brandenburg (LUA) durchgeführten Auswertung von etwa 1.000 solcher Messstellen. Langjährige Ganglinien des Grundwasserstandes zeigen überwiegend einen schwachen Abfall, der oft anthropogen bedingt ist (z. B. Einstellung der Rieselfeldbewirtschaftung). Es werden aber auch Absenkungen beobachtet, die keine direkte anthropogene Ursache haben. Anstiege des Grundwasserstandes in bestimmten Regionen scheinen dagegen überwiegend anthropogen bedingt zu sein, z. B. durch die Einstellung der Entwässerung von Tagebauen oder eine Steuerung des Grundwasserstandes durch Schöpfwerke. Der Grundwasserstand stabilisiert sich in den 90-er Jahren landesweit auf einem Niveau, das unter dem vor 1970 liegt. Da Methoden der linearen Regression lediglich einen rein formalen (statistischen) Zusammenhang liefern, gestaltet sich eine Prognose schwierig, und von einer Extrapolation des Trends sollte Abstand genommen werden, solange die kausalen Zusammenhänge nicht geklärt sind.

Im Rahmen des Projektes „Stabilisierung und Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes in Brandenburg“ wird am LUA ein Konzept zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes erarbeitet, wobei eine der notwendigen Grundlagen eine detaillierte Situationsanalyse der langfristigen Veränderungen des Grundwassers im oberen Grundwasserleiter ist. Da die natürliche Ursache einer Änderung des Grundwasserspiegels in einer Variation der gebildeten Sickerwassermenge liegt, die wiederum von zahlreichen Parametern abhängt (unter anderem von Niederschlag, Flächennutzung, Flurabstand, Bodentyp und Temperatur), bieten sich zur wissenschaftlichen Untersetzung der erläuterten Grundwasserproblematik flächendeckende Untersuchungen der Sickerwassermenge an.

Die Zielstellung der am PIK durchgeführten Arbeiten bestand deshalb zum einen in einer Erweiterung der für die Periode 1961-1990 zuvor erzielten Ergebnisse (LAHMER et al. 2001b) um die Periode 1991-1998, zum anderen in ergänzenden Analysen für die Gesamtperiode 1961-1998. Der Schwerpunkt der Untersuchungen wurde auf die flächendeckende Berechnung der Sickerwasserbildung sowie auf die Abbildung der Trends für diese Wasserhaushaltsgröße gelegt. Dazu wurden mit Hilfe eines geeigneten hydrologischen Modells Simulationsrechnungen durchgeführt und analysiert. Die Berechnungen konnten wegen der gegenüber LAHMER et al. (2001b) geänderten meteorologischen Datenbasis nicht auf den Zeitraum 1991-1998 beschränkt werden, da die Konsistenz der Trendanalysen über den Gesamtzeitraum 1961-1998 sicherzustellen war.

Für die Untersuchungen konnte auf die am PIK bereits vorhandene, umfangreiche räumliche Datenbasis für das Land Brandenburg zurückgegriffen werden, die im Rahmen der Vorgängerstudie verwendet wurde. Dem gegenüber erforderte die zeitliche Ausdehnung der Arbeiten auf die 90-er Jahre eine Überarbeitung und Ergänzung der meteorologischen Datenbasis. Insgesamt 77 meteorologische Zeitreihen des DWD konnten im Rahmen der Modellierungsarbeiten für den Zeitraum 1961-1998 verwendet werden (siehe Kapitel 2.2).

Nach Überprüfung und Aufbereitung dieser Zeitreihendaten sowie der Anpassung des Modellierungssystems an die erweiterte Datenbasis und an die besonderen Anforderungen des Auftraggebers wurden flächendeckende Simulationsrechnungen in Tagesschrittweite für das Land Brandenburg durchgeführt.

Diese lieferten flächen- und zeitdiskrete Werte verschiedener Wasserhaushaltsgrößen wie der Verdunstung, der Sickerwasserbildung, der Oberflächenabflussbildung und des Gebietsabflusses (siehe Kapitel 4). Der Hauptzielstellung der Arbeiten entsprechend wurde anschließend insbesondere die berechnete Sickerwasserbildung systematisch analysiert (siehe Kapitel 6).

Im vorliegenden Ergebnisbericht werden alle wesentlichen methodischen Aspekte dargestellt und die projektrelevanten Ergebnisse der durchgeführten Modellierungsarbeiten und Analysen zusammengefasst und interpretiert. Nach einer Beschreibung der verwendeten räumlichen (Kapitel 2.1) und zeitlichen Grundlagendaten (Kapitel 2.2) samt ihrer GIS-Codierung (z. B. Landnutzungs- und Flurabstandsklassen) werden die angewendeten Verfahren und Methoden (Kapitel 3) einschließlich der verwendeten Software (Kapitel 3.1) jeweils unter Verweis auf detailliertere Literatur kurz beschrieben. Der Darstellung der erzielten Ergebnisse (Kapitel 4 bis 6) schließen sich Vorschläge für mögliche ergänzende Untersuchungen an, die auf den Erfahrungen des Projektbearbeiters bei der Bearbeitung verschiedener wissenschaftlicher Projekte basieren und u.a. Aspekte eines umfassenden Flusseinzugsgebietsmanagements beinhalten (Kapitel 7).

Über einen Unterauftrag wurde das Büro für Angewandte Hydrologie (BAH), das bereits an der Bearbeitung der Studie „Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg“ beteiligt war, in die Projektarbeiten eingebunden. Die Mitwirkung des BAH bestand in der Anpassung des Modellierungssystems ArcEGMO an die vorliegende Aufgabenstellung, in einer beratenden Begleitung während der gesamten Projektlaufzeit sowie in der Erstellung eines Auswerteprogramms, das die Übertragung der Ergebnisse von Trendanalysen in die Fläche erleichtert.

Bereits an dieser Stelle sei auf folgende allgemeine Aspekte hingewiesen:

1. Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Simulationsrechnungen und die ermittelten Ergebnisse schließen immer auch die Fläche des Landes Berlin mit ein. Dies war notwendig, da Brandenburg und Berlin eine hydrologische Einheit bilden und eine Betrachtung des Gesamttraumes ohne das Territorium Berlins nicht sinnvoll gewesen wäre. Dies auch angesichts der Tatsache, dass Berlin einen besonders hohen Beitrag versiegelter urbaner Flächen zum Gesamtgebiet beisteuert. Wenn in diesem Bericht vom „Land Brandenburg“ gesprochen wird, ist deshalb stets das gesamte Untersuchungsgebiet unter Einschluss der Landesfläche Berlins gemeint.
2. Die erzielten Ergebnisse sind für das gesamte Land Brandenburg relevant, lassen aber i. a. keine detaillierten lokalen Aussagen zu, da der Schwerpunkt dieser Studie auf der Abbildung der Trends der Sickerwasserbildung und nicht auf einer flächenscharfen Darstellung dieser Wasserhaushaltsgröße lag. Für regionale oder lokale Betrachtungen müssten zum einen räumlich höher aufgelöste Karten, zum anderen auch eine größere Anzahl meteorologischer Stationen (insbesondere Niederschlagsstationen) verwendet werden, um der kleinskaligen Heterogenität regionaler Teilräume bei den Simulationsrechnungen Rechnung zu tragen (siehe auch Kapitel 7.1).
3. Einige der im vorliegenden Bericht dargestellten Ergebnisse gehen bewusst über den vom Auftragnehmer geforderten Leistungsumfang hinaus. Diese sollen das Verständnis der abgeleiteten Ergebnisse erleichtern und vertiefen und eine geschlossene Darstellung der Gesamthematik sicher stellen, da sich viele Ergebnisse nur im größeren Zusammenhang der zusätzlich durchgeführten Analysen richtig werten lassen. Dies betrifft insbesondere die in den Kapiteln 4 und 5 diskutierten Ergebnisse für die klimatischen Eingangsgrößen und die neben der Sickerwasserbildung berechneten anderen Wasserhaushaltsgrößen. Daneben wurden im Rahmen der Trendanalysen der Sickerwassermenge (Kapitel 6) zahlreiche Detailuntersuchungen durchgeführt, welche die in Form und Umfang innovativen flächendifferenzierten Analysen sinnvoll ergänzen.
4. Wenn in diesem Bericht von „Trend“ gesprochen wird, so handelt es sich stets um eine statistisch signifikante zeitliche Änderung einer Größe.

5. Für alle über diesen Bericht hinausgehenden Einzelheiten zur Datenaufbereitung, zum verwendeten Simulationssystem und zur Durchführung der Simulationsrechnungen sei auf die bereits genannte Studie LAHMER et al. (2001b) sowie auf die dort zitierte Literatur verwiesen.

2 Grundlagen

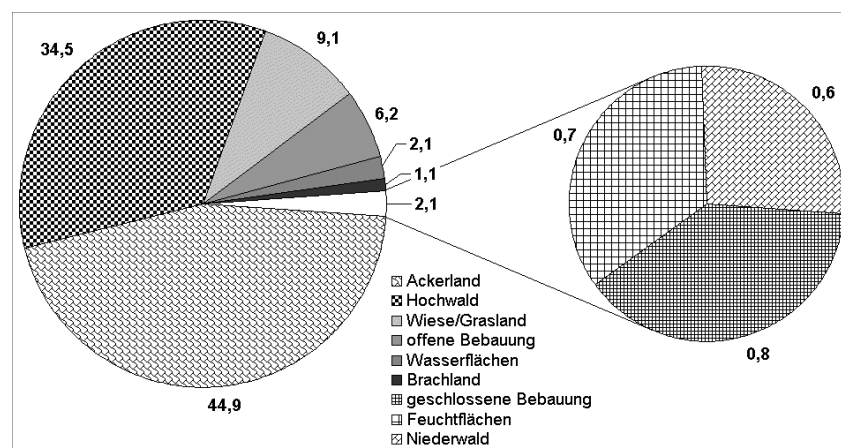
2.1 Räumliche Grundlagendaten

Für großräumige Betrachtungen wie in der vorliegenden Studie müssen die Datengrundlagen für die Modellierung flächendeckend zur Verfügung stehen, und zwar in einer zur Verwendung in einem Geographischen Informationssystem (GIS) aufbereiteten Form. Darüber hinaus müssen sie in Bezug auf Detailliertheit und Auflösung den besonderen Anforderungen an die mesoskalige Modellierung gerecht werden. **Tab. 2.1** gibt einen Überblick über die für die Modellierungsarbeiten im Land Brandenburg verwendeten räumlichen Grundlagendaten. Darstellungen dieser Karten sind in LAHMER et al. (2001b) enthalten. Da dort ausführlich auf die Aufbereitung der Einzelkarten eingegangen wird, sollen an dieser Stelle lediglich einige wichtige Kennwerte dieser Karten benannt werden.

Tab. 2.1 Überblick über die für das Land Brandenburg zur Berechnung der Sickerwassermenge verwendeten räumlichen Grundlagendaten.

Karte	Beschreibung	Quelle	Anmerkungen
Landnutzung	CORINE	Stat. Bundesamt Wiesbaden Statistik zur Bodenbedeckung (CORINE-Projekt)	Polygon
Bodenarten	Bodenübersichtskarte 1:1000000 (BUEK1000)	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	Polygon
Digitales Höhenmodell (DHM)		Landesvermessungsamt Brandenburg	Raster, 50 x 50 m
Grundwasserflurabstand		WASY GmbH, Berlin	Raster, 250 x 250 m, überarbeitet
Teileinzugsgebiete	oberirdische Einzugsgebiete, TK 25	Landesumweltamt Brandenburg (LUA)	Polygon

Die Daten zur Landnutzung entstammen einem vom Statistischen Bundesamt im Auftrag des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) für die Bundesrepublik Deutschland aufgebauten Datenbestand, der auf der Auswertung von Satellitenbildern aus den Jahren 1989 bis 1992



basiert (STATISTISCHES BUNDESAMT 1997). Die Methodik zur Erhebung der Daten geht auf das inzwischen ausgelaufene Programm CORINE (Coordination of Information on the Environment) der Europäischen Gemeinschaft zurück. Dem Vektordatenbestand liegt ein Erhebungsmaßstab von 1: 100.000 mit einer Erfassungsgrenze von 25 ha (bzw. 100 m Breite bei linearen Objekten) zu Grunde.

Abb. 2.1 Flächenanteile der aggregierten CORINE-Landnutzungsklassen an der Gesamtfläche des Landes Brandenburg.

Die CORINE-Landnutzungskarte wurde unter Berücksichtigung der hydrologischen Eigenschaften der zu Grunde liegenden Landnutzungstypen räumlich voraggregiert und die insgesamt 31 für das Untersuchungsgebiet ausgewiesenen Landnutzungsklassen zu 9 übergeordneten Klassen zusammengefasst. Entsprechend **Abb. 2.1** wird die Landnutzung des Untersuchungsraumes zu fast 45 % von Ackerland dominiert. Wald, Wiese und offene Bebauung stellen mit etwa 35 %, 9 % und 6 % die nächstwichtigsten Landnutzungstypen dar. Hydrologisch relevante Eigenschaften der unterschiedlichen Landnutzungsklassen wurden über eine entsprechende Tabelle bei der GIS-gestützten Modellierung berücksichtigt. Auf die weitergehende räumliche Aggregation der Landnutzungsklassen im Rahmen der Modellierung wird in Kapitel 3.2 näher eingegangen.

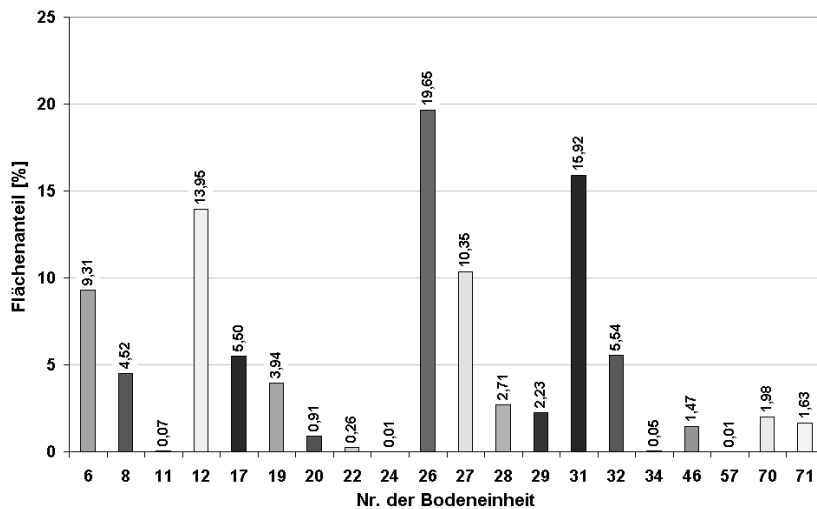


Abb. 2.2 Flächenanteile der 20 im Land Brandenburg vorkommenden Bodeneinheiten an der Landesfläche.

Informationen zu Bodenart und bodenspezifischen Parametern (wie z. B. Anzahl und Mächtigkeit der Bodenschichten, permanenter Welkepunkt, Lagerungsdichte, Feldkapazität und Gesamtporenvolumen) wurde bei der Modellierung über zwei Tabellen Rechnung getragen.

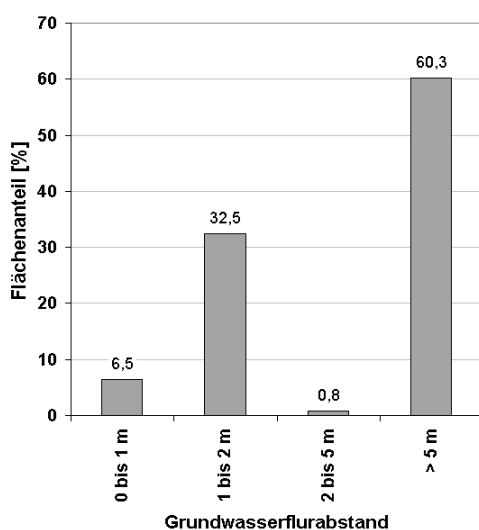


Abb. 2.3 Flächenanteile der vier im Land Brandenburg definierten Grundwasserflurabstandsklassen an der Gesamtfläche.

Die unterschiedlichen im Untersuchungsgebiet auftretenden Böden wurden über die *Bodenübersichtskarte* BUEK1000 (M 1:1.000.000) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bei der Modellierung berücksichtigt. Von den insgesamt 71 in Gesamtdeutschland auftretenden Bodeneinheiten kommen im Untersuchungsraum lediglich 20 vor. Die Flächenanteile an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes sind in **Abb. 2.2** dargestellt. Zur genauen Bezeichnung und Einordnung

der Bodeneinheiten sei auf das Begleitheft zur BUEK1000 verwiesen. Informationen zu Bodenart und bodenspezifischen Parametern (wie z. B. Anzahl und Mächtigkeit der Bodenschichten, permanenter Welkepunkt, Lagerungsdichte, Feldkapazität und Gesamtporenvolumen) wurde bei der Modellierung über zwei Tabellen Rechnung getragen.

Die Topographie des Untersuchungsraumes floss über ein im Rasterformat verfügbares Digitales Höhenmodell (DHM) des Landesvermessungsamtes Brandenburg mit einer horizontalen Auflösung von 50 x 50 m in die Modellierung ein (siehe auch Abb. 6.10). Die aus dem DHM abgeleitete Hangneigung spielt bei der Beschreibung lateraler Prozesse insbesondere im Süden und Südwesten von Brandenburg eine nicht unbedeutende Rolle. Auf der Basis des DHM wurden den Elementarflächen (siehe Kapitel 3.2) Hangneigungen in Form von 6 Gefälleklassen zugewiesen.

Zur Ableitung der Karte des mittleren Grundwasserflurabstands (siehe auch Abb. 6.10) wurden nach einem in LAHMER et al. (2001b) detaillierter beschriebenen Verfahren u. a. Isolinienplänen der Fa. WASY für die Geländehöhen (M 1:200.000) und für die Grundwasseroberfläche (M 1:500.000) verwendet. Um auch für die grundwassernahen Gebiete (Niedermoor- und Auenstandorte)

befriedigende Werte für die Grundwasserflurabstände zu erhalten, wurden Zusatzinformationen der digitalen Karte der Mittelmaßstäbigen landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK) und der Karte der Gewässer des Landes Brandenburg (M 1:50.000) genutzt. Die auf diese Weise entstandene Karte der mittleren Grundwasserflurabstände ist in LAHMER et al. (2001b), S. 22 wiedergegeben. Für die Verwendung in ArcEGMO wurden die Grundwasserflurabstände in vier Klassen eingeteilt, die den Anforderungen der mesoskaligen hydrologischen Modellierung gerecht werden. Die Flächenanteile dieser vier Klassen an der Gesamtfläche des Untersuchungsraumes sind in **Abb. 2.3** dargestellt. Danach weisen etwa 6,5 % der Landesfläche Brandenburgs Grundwasserflurabstände von weniger als 1 m auf. Gerade diese Gebiete besonders hoher Verdunstung (Zehrflächen) konnten durch die Überarbeitung räumlich erheblich besser aufgelöst werden.

Die vom LUA zur Verfügung gestellte Karte der oberirdischen Einzugsgebiete weist insgesamt 196 Teileinzugsgebiete aus, deren Größe allerdings sehr unterschiedlich ist (zwischen 0,02 und 2.092 km², siehe auch Abb. 2.4). Wie bereits erwähnt, wurde auch die Fläche des Landes Berlin in die Berechnungen einbezogen, da diese wegen des hohen Bebauungsgrades und des relativ hohen Anteils freier Wasserflächen für den Wasserhaushalt überregionale Bedeutung hat.

Im Rahmen der Datenaufbereitung wurden diese Karten mit dem GIS Arc/Info™ zur sogn. Elementarflächenkarte verschnitten. Zu Einzelheiten der räumlichen Disaggregation und Aggregation sei auf Kapitel 3.2 verwiesen.

2.2 Zeitliche Grundlagendaten

Für die mit hoher zeitlich Auflösung (Tagesschrittweite) durchgeführten Wasserhaushaltsberechnungen werden neben geeigneten räumlichen Karten auch verschiedene meteorologische Variablen (Niederschlag und zur Berechnung der Verdunstung notwendige Größen) benötigt. Bei einem Berechnungszeitraum von knapp 40 Jahren können die räumlichen Verteilungen dieser Variablen nicht für jeden Zeitschritt vorgehalten, sondern müssen zur Laufzeit des Modells (online) erzeugt werden.

Da die Meteorologie als wesentliche Triebkraft hydrologischer Prozesse eine entscheidende Rolle bei der Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen auf der hier betrachteten räumlichen Skala spielt (LAHMER und BECKER 1998a/b, LAHMER et al. 1999d, LAHMER and PFÜTZNER 2000, LAHMER et al. 2000c), ist insbesondere auf eine ausreichende Dichte meteorologischer Stationen zu achten. Die Frage, welche Stationsdichte als „ausreichend“ zu betrachten ist, hängt dabei u. a. von der Gebietsgröße, dem Geländere relief, der räumlichen Verteilung der Messstationen, der Länge des betrachteten Zeitraums und den regionalen Klimaverhältnissen (dem regionalen Niederschlagsklima, d. h. den dominierenden Niederschlagstypen) ab. So nimmt der Fehler des aus Stationsdaten ermittelten Gebietsniederschlags für tägliche Niederschlagshöhen mit zunehmender Stationsdichte ab (oder mit der Größe der durchschnittlich von einer Station repräsentierten Fläche zu). Wegen der glatter werdenden räumlichen Verteilung der Niederschlagshöhe werden dem gegenüber für monatliche Gebietsniederschläge erheblich weniger Stationen benötigt, um zu vergleichbar genauen Aussagen zu kommen.

Für die im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten, flächendeckenden Wasserhaushaltsberechnungen war es deshalb wichtig, die Zeitreihen möglichst vieler Klima- und Niederschlagsstationen bei den Simulationsrechnungen zu berücksichtigen, um zu belastbaren Aussagen der berechneten Wasserhaushaltsgrößen (u. a. der Sickerwassermenge) zu kommen. Darüber hinaus war ein Interpolationsverfahren zu verwenden, das die vorhandenen Messdaten verschiedener Klimavariablen möglichst realitätsnah in die Fläche überträgt und für den Untersuchungszeitraum 1961-1998 eine effektive Berechnung der Wasserhaushaltsgrößen (vertretbare Rechenzeiten) zulässt (siehe auch Kapitel 3.3).

Um diesem Anspruch gerecht zu werden, wurden folgende Kriterien bei der Auswahl der meteorologischen Stationen zu Grunde gelegt:

- Überdeckung des Zeitraums 1961 bis 1998 für alle an Niederschlags- und Klimahauptstationen gemessenen meteorologischen Zeitreihen
- Für Klimahauptstationen die Verfügbarkeit aller benötigten Klimavariablen: tägliche Niederschlagshöhe sowie zur Berechnung der potenziellen Verdunstung nach dem Verfahren von Turc/Ivanov (TURC 1961) benötigte Tageswerte von mittlerer Tagestemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Sonnenscheindauer
- Vorhandensein möglichst geringer Datenlücken (Fehlstellen) für diese Klimagrößen
- Räumliche Relevanz für das Untersuchungsgebiet.

Da für die Modellierung des Gesamtgebietes zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung noch keine auf Konsistenz überprüften meteorologischen Zeitreihen des DWD für die Periode 1961-2000 vorlagen, musste der Untersuchungszeitraum auf die Periode 1961-1998 beschränkt werden. Unter Beachtung der o. g. Kriterien wurden auf Basis von Analysen aller in Frage kommender Zeitreihen schließlich 23 Klima- und 54 Niederschlagsstationen für die Modellierung ausgewählt, die für diesen Zeitbereich verwendet werden konnten (siehe **Abb. 2.4**).



Abb. 2.4 Überblick über die 23 Klima- und 54 Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die für den Zeitbereich 1961-1998 Tagesreihen der erforderlichen Klimavariablen liefern und für die Simulationsrechnungen mit ArcEGMO im Land Brandenburg verwendet wurden. Die Strukturierung des Untersuchungsraumes in 196 Teileinzugsgebiete ist ebenfalls angegeben.

Bei der Stationsauswahl wurden alle Klimahauptstationen verworfen, die für eine oder mehrere der benötigten Variablen Datenlücken von mehr als 5 % aufwiesen. Im Sinne der Sicherstellung einer möglichst umfassenden zeitlichen Datenbasis konnten jedoch Klimastationen als reine „Niederschlagsstationen“ mit verwendet werden, sofern deren Niederschlagsmessreihe in der benötigten Qualität vorlag

(siehe z. B. Station 3300 in Tab. 2.2). Bei der Endauswahl aller geeigneten Stationen wurden abschließend all jene Stationen verworfen, die aufgrund ihrer geographischen Lage zu keinem zusätzlichen Informationsgewinn bei der Modellierung geführt hätten (z. B. zu enge geographische Nähe oder zu großer Abstand vom Untersuchungsgebiet). Dennoch wurden bei der Auswahl auch außerhalb der Landesgrenzen Brandenburgs befindliche Stationen berücksichtigt. Dieses Vorgehen trägt sowohl der Forderung nach einer möglichst hohen Stationsdichte als auch den Anforderungen des für die räumliche Interpolation aller Klimagrößen verwendeten Interpolationsverfahrens („erweitertes Quadrantenverfahren“, siehe Kapitel 3.3) Rechnung.

Wie Abb. 2.4 zeigt, kamen für die vorliegenden Untersuchungen - verglichen mit den in Lahmer et al. (2001b) durchgeführten Wasserhaushaltsberechnungen - zwar erheblich mehr Stationen zum Einsatz, doch ist deren räumliche Verteilung im Gebiet sehr inhomogen. Einer relativ hohen Stationsdichte in den südlichen und nordöstlichen Landesteilen steht dabei eine vergleichsweise geringe meteorologische Informationsdichte in den westlichen Landesteilen Brandenburgs gegenüber. Angesichts der Tatsache, dass die geringere Stationsdichte stark mit einer geringer ausgeprägten Topographie korreliert (siehe Abbildung 2.10 in Lahmer et al. 2001b oder Abb. 6.10), ist dieser Umstand allerdings nicht als gravierend zu betrachten. **Tab. 2.2** enthält Einzelheiten zu den für die Modellierung des Untersuchungsgebietes ausgewählten 77 meteorologischen Zeitreihen des DWD.

Tab. 2.2 Überblick über die für die Modellierung des Landes Brandenburg verwendeten meteorologischen Zeitreihen des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

Legende: Nr. = Stationsnummer

kli = Klimastation mit Zeitreihen des Niederschlags, der mittleren Tagestemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Sonnenscheindauer

pt = Niederschlagsstation mit Zeitreihe des Niederschlags

DTD = zeitliche Auflösung der Zeitreihe in Stunden

x/y-Koord. = Gauß-Krüger Koordinaten der Station

Höhe = Höhe der Station in m über NN

hom = „homogenisiert“ (siehe Text)

Anfang/Ende = verfügbare Periode der Zeitreihe

VS = Vollständigkeit der Zeitreihe in %

Nr.	Typ	DTD [h]	Stationsname	x-Koord. [GK]	y-Koord. [GK]	Höhe [mNN]	hom	Anfang	Ende	VS [%]
3035	kli	24	UECKERMUENDE	4636528,0	5959464,5	1	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3038	kli	24	SCHWERIN	4459008,0	5946525,0	59	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3040	kli	24	GOLDBERG	4506619,5	5940787,0	58	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3044	kli	24	WAREN	4544434,0	5932088,5	70	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3050	kli	24	MARNITZ	4495336,0	5909625,5	81	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3058	kli	24	ANGERMUENDE	4634157,5	5879223,5	56	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3169	kli	24	GARDELEGEN	4459277,5	5820775,0	47	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3177	kli	24	MAGDEBURG	4471236,0	5776184,5	79	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3196	kli	24	HALLE-KROELLWITZ	4496530,0	5709352,0	96	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3316	kli	24	BERLIN-TEMP	4595125,0	5815964,5	48	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3326	kli	24	ZEHDENICK	4590664,0	5872642,0	46	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3330	kli	24	NEURUPPIN	4555172,5	5863203,0	38	nein	01.01.61	31.12.98	99,18
3336	kli	24	MUENCHEBERG	4643878,5	5822718,5	62	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3342	kli	24	POTSDAM	4572851,5	5805567,5	81	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3346	kli	24	LINDENBERG	4644856,5	5789346,0	98	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3352	kli	24	WITTENBERG	4544754,0	5749600,0	105	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3358	kli	24	COTTBUS	4660083,0	5740821,5	69	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3360	kli	24	DOBERLUG-KIRCHHAIN	4609339,0	5724995,5	97	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3366	kli	24	TORGAU	4569309,5	5716499,5	80	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3375	kli	24	LEIPZIG	4529276,0	5687186,0	141	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3380	kli	24	GOERLITZ	4706281,0	5674554,5	238	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3386	kli	24	DRESDEN-KLOTZ	4624583,0	5667473,5	222	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3901	kli	24	LUECHOW	4441558,0	5871031,0	17	ja	01.01.61	31.12.98	100,00
3300	pt	24	Berlin-Buch	4601549,0	5833901,5	60	nein	01.01.61	31.12.98	98,24
13035	pt	24	Haselberg	4637207,0	5842567,5	107	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
13065	pt	24	Eberswalde	4621301,0	5856617,0	45	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
13075	pt	24	Schiffmuehle-Neutornow	4639526,0	5855994,0	3	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
16005	pt	24	Friedrichswalde	4614035,5	5878704,5	79	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
21005	pt	24	Prenzlau	4628045,5	5906891,5	50	nein	01.01.61	31.12.98	100,00

21215	pt	24	Penkun	4649980,0	5909759,0	20	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
21220	pt	24	Grambow	4654876,0	5923280,5	39	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
21305	pt	24	Goeritz	4627686,5	5920243,5	37	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
23230	pt	24	Caprin	4579900,0	5913633,0	100	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
23265	pt	24	Penzlin	4572950,5	5932442,5	55	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
41324	pt	24	Obersteina	4576874,5	5674328,0	185	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
41357	pt	24	Belgern	4577797,0	5705496,0	120	nein	01.01.61	31.12.98	99,78
41360	pt	24	Koszdorf	4585400,0	5707843,0	87	nein	01.01.61	31.12.98	99,55
41442	pt	24	Luga	4664046,5	5681939,5	155	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
41451	pt	24	Hoyerswerda	4656452,5	5701741,0	135	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
41466	pt	24	Peickwitz	4637559,5	5705648,0	102	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
41469	pt	24	Ruhland	4629975,0	5703222,5	98	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
41503	pt	24	Pulsnitz	4639828,5	5673430,0	280	nein	01.01.61	31.12.98	90,55
41515	pt	24	Hirschfeld	4612722,5	5697247,0	105	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
41527	pt	24	Radeburg	4620848,0	5677400,0	153	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
41560	pt	24	Uebigau	4590062,0	5719051,0	84	nein	01.01.61	31.12.98	99,78
41603	pt	24	Elsterwerda	4606298,0	5704898,5	91	nein	01.01.61	31.12.98	99,78
41630	pt	24	Herzberg_Elster	4585025,5	5730091,5	81	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
41636	pt	24	Hohenbucko	4601458,5	5738185,5	131	nein	01.01.61	31.12.98	86,62
41648	pt	24	Schoenewalde	4584800,5	5743440,5	79	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
41660	pt	24	Annaburg	4571153,5	5733215,0	75	nein	01.01.61	31.12.98	98,03
41663	pt	24	Bethau	4569157,5	5727624,0	78	nein	01.01.61	31.12.98	99,35
46003	pt	24	Mirow	4554701,0	5904373,0	59	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
46006	pt	24	Fuerstenberg_Havel	4576839,5	5896887,0	53	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
46015	pt	24	Bredereiche	4583657,0	5889211,0	54	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
46110	pt	24	Loewenberg_Mark	4577375,0	5863507,0	56	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
46145	pt	24	Velten	4579795,0	5839062,0	36	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
46224	pt	24	Lohsa	4668455,5	5696557,0	125	nein	01.01.61	31.12.98	99,34
46251	pt	24	Klitten	4681101,5	5693649,0	132	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
46272	pt	24	Haehnichen	4699818,0	5696575,0	155	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
46310	pt	24	Spremberg	4664948,0	5718710,0	96	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
46370	pt	24	Drebkau	4654247,5	5728392,5	87	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
46403	pt	24	Burg_Spreewald	4648190,0	5746024,0	55	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
46415	pt	24	Lieberose	4659374,0	5763068,0	58	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
46424	pt	24	Hartmannsdor	4624677,5	5803267,5	37	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
46436	pt	24	Fuerstlich_Drehna	4625613,0	5738730,5	77	nein	01.01.61	31.12.98	98,91
46460	pt	24	Beeskow	4653911,0	5784051,5	43	nein	01.01.61	31.12.98	98,67
46514	pt	24	Schoeneiche_Berlin	4614148,5	5816370,0	40	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
46603	pt	24	Kemnitz	4605412,5	5747169,5	108	nein	01.01.61	31.12.98	95,19
46606	pt	24	Dahme	4598479,5	5749254,5	86	nein	01.01.61	31.12.98	99,99
46609	pt	24	Maerkisch-Buchholz	4621215,5	5777579,5	42	nein	01.01.61	31.12.98	98,22
46615	pt	24	Petkus	4594075,0	5763637,0	145	nein	01.01.61	31.12.98	99,79
46630	pt	24	Storkow	4633152,0	5792357,0	39	nein	01.01.61	31.12.98	97,58
47003	pt	24	Danna-Eckmannsdorf	4561802,0	5763133,0	113	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
47006	pt	24	Jueteborg	4572102,0	5763271,5	80	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
47009	pt	24	Luckenwalde	4580199,0	5772297,5	50	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
47042	pt	24	Treuenbrietzen	4560294,0	5774241,5	59	nein	01.01.61	31.12.98	100,00
47340	pt	24	Nauen	4558913,0	5832087,5	35	nein	01.01.61	31.12.98	100,00

Bei den mit „hom = ja“ gekennzeichneten Zeitreihen handelt es sich um Zeitreihen von Klimahauptstationen, die durch Experten der Abteilung „Klimasysteme“ des PIK „homogenisiert“ wurden. Darunter sind zwei Verfahrensschritte zu verstehen, deren Ziel in einer Korrektur und inhaltlichen Ergänzung der vom DWD zur Verfügung gestellten Klimadaten besteht. In einem ersten Schritt wurde signifikanten Veränderungen von Klimavariablen (außer Niederschlag), die sich aus einer örtlichen Verlegung von Klimahauptstationen ergeben, durch eine Anpassung an Variablen benachbarter Stationen Rechnung getragen. In einem zweiten Schritt wurden Fehlwerte in den Zeitreihen von Klimahauptstationen über eine Anpassung an entsprechende Werte benachbarter Stationen aufgefüllt. Dieses Auffüllen erfolgte nur für solche Stationen, an denen die entsprechende Variable keine zu große Datenlücken aufwies (die Zeitreihe an der Station 3330 entspricht z. B. nicht dieser Anforderung). Alle so behandelten, "homogenisierten" Zeitreihen sind deshalb vollständig und in sich konsistent. Die in Tab. 2.2 angegebene Vollständigkeit (VS) wurde bei der Aufbereitung der Zeitreihen für die Verwendung in ArcEGMO mit Hilfe eines dazu vom Projektbearbeiter erstellten Programms anhand der über eine entsprechende Kennung ausgewiesenen Fehlstellen in den Zeitreihen berechnet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die für die Berechnung der Sickerwassermenge in Brandenburg ausgewählten 77 meteorologischen Zeitreihen die unter den bereits erwähnten Randbedin-

gungen der Projektbearbeitung höchstmögliche Informationsdichte liefern. Insbesondere die Verwendung der „homogenisierten“ Zeitreihen erhöht den Umfang der meteorologischen Eingangsinformationen erheblich und führt deshalb zu belastbaren Modellierungsergebnissen. Im Rahmen der Simulationsrechnungen wurden die meteorologischen Punktdaten für jeden Simulationszeitschritt (Tag) auf die für die Berechnung der Wasserhaushaltsgrößen gewählten Bezugsflächen interpoliert. Einzelheiten zu diesem Regionalisierungsverfahren finden sich in Kapitel 3.3.

3 Angewendete Methodik

In Kapitel 3.1 soll zunächst das für die Durchführung der Berechnung der Sickerwassermenge eingesetzte Modellierungssystem ArcEGMO kurz vorgestellt werden. Nach einem Überblick über die bei der flächendeckenden hydrologischen Modellierung angewandten Methoden der räumlichen Disaggregation (Bildung sog. „Elementarflächen“) und Aggregation (Bildung von „Hydrotopen“ und „Hydrotopklassen“) in Kapitel 3.2 und einigen Anmerkungen zur Verarbeitung der meteorologischen Eingangsgrößen (Kapitel 3.3) soll in Kapitel 3.4 schließlich auf die Kalibrierung und Validierung des hydrologischen Modells in ausgewählten, für das Land Brandenburg repräsentativen Teileinzugsgebieten eingegangen werden.

3.1 Das hydrologische Modellierungssystem ArcEGMO

Um die Sickerwasserbildung für ein Gebiet wie Brandenburg sinnvoll zu ermitteln, ist der Einsatz eines Wasserhaushaltsmodells notwendig, das für meso- bis makroskalige Gebiete (Flächengrößen von einigen 100 bis zu einigen 10.000 km²) belastbare Ergebnisse liefert. Die flächendeckende, zeitlich und räumlich hoch aufgelöste hydrologische Modellierung einer Landflächeneinheit von der Größe Brandenburgs erfordert dabei eine der zeitlichen und räumlichen Skala angemessene Herangehensweise, bei der die Aggregation detaillierter räumlicher Informationen im Rahmen der Datenaufbereitung (siehe Kapitel 2.1) und geeignete räumliche Aggregationsverfahren bei der Durchführung der Simulationsrechnungen (siehe Kapitel 3.2) eine besondere Rolle spielen. Um den Wasserhaushalt einer Landschaft oder eines Flussgebietes in seiner Vielfalt und Dynamik beschreiben zu können, kommen insbesondere solche Modellansätze in Frage, die die räumlichen Variabilitäten hinreichend genau erfassen können und deren Parameter physikalisch interpretierbar sind.

Für die hier durchgeführten Arbeiten wurde das hydrologische Modellierungssystem ArcEGMO (PFÜTZNER et al. 1998, PFÜTZNER 2002, BECKER et al. 2002) eingesetzt, das für hydrologische Einzugsgebiete sowie beliebig geformte Landschaftseinheiten die Modellierung aller maßgeblichen Prozesse des Landschaftswasserhaushaltes ermöglicht und sich aus verschiedenen Gründen für solche Studien eignet. Dazu gehören neben der Anbindung an das Geographische Informationssystem (GIS) Arc/Info™ die Verwendung allgemein verfügbare Karten, eine variable Untergliederung (Disaggregation) des Einzugsgebietes in beliebige Flächeneinheiten sowie die zeitliche Aggregation aller Ergebnisgrößen zu (mittleren) Monats-, Halbjahres- und Jahressummen. Im Gegensatz zu den meisten Modellen erfolgt die Modellierung nicht raster- sondern polygonbasiert, woraus sich zum einen eine bessere Anpassung an die Heterogenität des Untersuchungsgebietes ergibt, zum anderen bestimmte Fragestellungen problemorientierter bearbeitet werden können.

Das Modell wurde u. a. im Rahmen des DFG-Projektes „Regionalisierung in der Hydrologie“ (LAHMER et. al. 1999c, BECKER und LAHMER 1999) und des BMBF-Projektes „Auswirkungen der Landnutzung auf den Wasser- und Stoffhaushalt der Elbe und ihres Einzugsgebietes“ (BMBF 1995, BECKER und LAHMER 2003) sowie dessen Teilprojekt „Wasser- und Stoffrückhalt im Tiefland des Elbeeinzugsgebietes - WaStor“ (BORK 1997, QUAST und STEIDL 2002) in mehreren Teileinzugsgebieten der Elbe angewendet (LAHMER und BECKER 1998b/c, LAHMER 2000, LAHMER et al. 2000a). In diesem Zusammenhang wurden auch ausgiebige Studien zur Sensitivität des Modells gegenüber ver-

schiedenen Eingangsparametern und zum Skalenverhalten durchgeführt (LAHMER et al. 1999b/d, LAHMER and PFÜTZNER 2000, LAHMER et al. 2000c). Darüber hinaus wurde ArcEGMO auch für Untersuchungen zur Auswirkung von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt (BECKER et al. 1996, LAHMER 2002, LAHMER 2003a, LAHMER and BRONSTERT 2003, BRONSTERT et al. 2003) und auf die Hochwasserentstehung (LAHMER et al. 2000b) sowie im Rahmen der bereits mehrfach erwähnten Studie „Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg“ (LAHMER et al. 2001b) verwendet. Auch stellt es ein wesentliches Hilfsmittel bei den im Rahmen der Projekte „GLOWA-Elbe“ sowie „Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel“ (LAHMER und BRONSTERT 2002, LAHMER et al. 2003, www.havelmanagement.de) des BMBF durchgeführten Untersuchungen dar. Für eine ausführlichere Beschreibung des Modellierungssystems sei auf die oben erwähnte Literatur verwiesen. Weitere Informationen sind unter www.arcegmo.de auch im Internet verfügbar.

3.2 Methoden der räumlichen Aggregation und Disaggregation

Grundlage für Modellierungen mit ArcEGMO ist die sog. „Elementarflächenkarte“, die sich aus der GIS-Verschneidung der in Kapitel 2.1 beschriebenen digitalen räumlichen Grundlagenkarten ergibt und für das Land Brandenburg insgesamt 57.836 Elementarflächen (EFL) enthält (siehe Abbildung 4.3 in LAHMER et al. 2001b). Diese können bezüglich ihrer hydrologischen Eigenschaften als homogen angesehen werden und bilden die kleinsten Modellierungseinheiten im Rahmen des hier beschriebenen Modellierungsansatzes. Insbesondere für meso- bis makroskalige Untersuchungen sind im Hinblick auf eine effektive Projektbearbeitung jedoch häufig räumliche Aggregationen erforderlich, um die Anzahl der zu modellierenden Flächeneinheiten - und damit auch die Rechenzeiten - zu reduzieren (siehe u. a. LAHMER und BECKER 1998a/b, LAHMER et al. 1999c, LAHMER and PFÜTZNER 2000, LAHMER et al. 2000c).

Dabei wird während des Simulationslaufes eine Aggregierungsmethodik angewendet, bei der die quasi-homogenen Elementarflächen zu sog. „Hydrotopen“ und „Hydrotopklassen“ zusammengefasst werden. Diese Klassifizierung erfolgt skalenabhängig entsprechend der Dominanz der hydrologisch relevanten Prozesse (Verdunstungs- und Abflussbildungspotenzial), die über Flächeneigenschaften wie Morphologie, Bodentyp, Grundwasserflurabstand, Vegetation und Landnutzung definiert werden kann. Die durch das Modellierungssystem unterstützte Bildung von Hydrotopklassen ist äußerst flexibel sowohl im Hinblick auf die Anzahl der Klassen als auch auf die Definition jeder einzelnen Klasse.

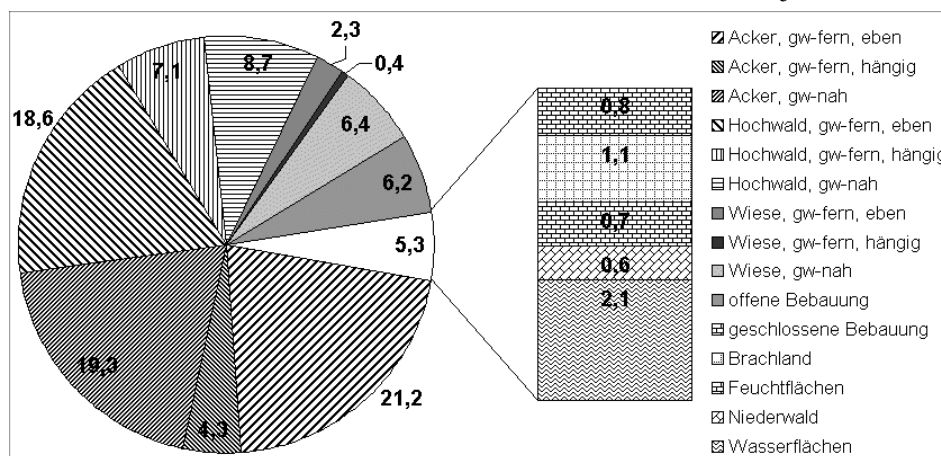


Abb. 3.1 Flächenanteile der für die Simulationsrechnungen verwendeten 15 Hydrotopklassen an der Gesamtfläche des Landes Brandenburg.

Im Falle Brandenburgs lieferten statistische Analysen der EFL-Karte eine dem Untersuchungsgebiet angemessene Unterteilung in insgesamt 15 Hydrotopklassen, deren Flächenanteile an der Gesamtfläche des

Untersuchungsraumes in Abb. 3.1 dargestellt sind

(vgl. auch Abb. 4.4 in LAHMER et al. 2001b). Einige hydrologisch besonders sensible Flächen wie z.B. urbane Flächen (offene und geschlossene Bebauung) sowie Feucht- und Wasserflächen werden als eigene Hydrotopklassen behandelt. Zur Ausweisung anderer Hydrotopklassen wurden neben dem Land-

nutzungstyp als weitere Kriterien der Grundwasserflurabstand und das aus dem DHM abgeleitete Gefälle verwendet. Nach Abb. 3.1 stellen grundwasserferne, ebene und grundwassernahe Ackerflächen mit einem Flächenanteil von 21,2 % bzw. 19,3 % die dominanten Hydrotopklassen im Land Brandenburg dar, gefolgt von Hochwald auf grundwasserfernen, ebenen (18,6 %) sowie grundwassernahen Standorten (8,7 %).

Durch die räumliche Aggregation ergeben sich für das Untersuchungsgebiet insgesamt 1.599 georeferenzierte *Hydrotope*, die eine räumlich hinreichend hoch aufgelöste Berechnung der Sickerwassermenge bei vertretbaren Rechenzeiten ermöglichen. Einen Eindruck von der Heterogenität des räumlichen Musters bei der Unterteilung des Untersuchungsgebietes in diese Hydrotope vermittelt Abbildung 4.5 in LAHMER et al. (2001b).

3.3 Verarbeitung der meteorologischen Eingangsvariablen

Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, können die räumlichen Verteilungen der für die Simulationsrechnungen verwendeten meteorologischen Variablen bei einer Simulationszeitschrittweite von einem Tag und einem Berechnungszeitraum von knapp 40 Jahren nicht für jeden Zeitschritt vorgehalten werden. Sie werden deshalb zur Laufzeit des Modells generiert. Dies geschieht mit einem der räumlichen Skala angepassten Algorithmus, der auf der einen Seite eine möglichst realitätsnahe räumliche Verteilung von Niederschlag, Temperatur etc. sicherstellt, andererseits den Zeitaufwand für die Simulationsläufe in einem akzeptablen Rahmen hält.

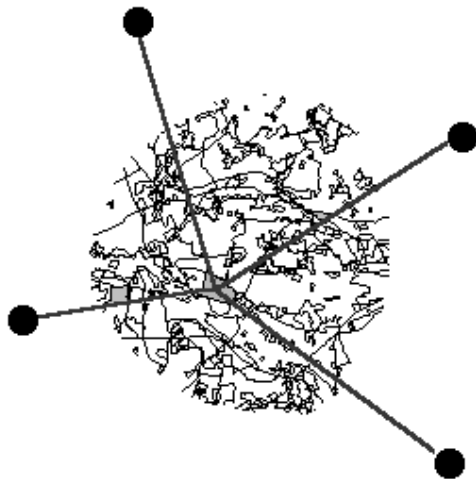


Abb. 3.2 Schematische Darstellung des in ArcEGMO verwendeten Standardverfahrens zur Übertragung meteorologischer Punktdaten in die Fläche ("erweitertes Quadrantenverfahren").

Bei dem in ArcEGMO integrierten Verfahren zur Flächenübertragung handelt es sich um ein sogen. „erweitertes Quadrantenverfahren“, das in **Abb. 3.2** schematisch dargestellt ist (siehe auch BECKER et al. 2002, PFÜTZNER 2002). Bei diesem Verfahren werden zunächst die für jede Einzelfläche (je nach Modellierungsansatz Elementarfläche, Hydrotop oder Teileinzugsgebiet) relevanten Stationen nach dem Quadrantenverfahren ausgewählt (die jeweils nächstliegende Station in jedem der vier Quadranten). Anschließend werden die an den so ausgewählten Stationen gemessenen Werte jeder Variable linear entfernungsgewichtet auf die Bezugsfläche übertragen. Darüber hinaus können weitere Abhängigkeiten (z. B. von Höhe, Exposition oder Gefälle) berücksichtigt werden. Diese Art der Flächenübertragung erfolgt sowohl für die an Klimahaupt- als auch für die an Niederschlagsstationen bereit gestellten Klimagrößen.

3.4 Kalibrierung und Validierung des Modells

Niederschlags-Abflussmodell werden gewöhnlich an der integrierten Messgröße „Gebietsabfluss“ kalibriert und validiert. Da es sich beim Untersuchungsgebiet aber um eine „beliebige“ Landschaftseinheit und nicht um ein Einzugsgebiet handelt, muss das Modell vor seiner Anwendung an die Gebietseigenschaften angepasst werden. Dies geschieht durch eine separate Modellierung geeigneter Einzugsgebiete im Untersuchungsraum. Voraussetzung für die Übertragung des kalibrierten Modells auf das Gesamtgebiet ist die Verwendung einer identischen räumlichen Datenbasis sowie identischer meteorologischer Eingangsgrößen.

Für die Modellkalibrierung kommen grundsätzlich nur Gebiete in Frage, die gering anthropogen beeinflusst sind. In der vorliegenden Untersuchung wurde das Einzugsgebiet der Oberen Dahme (Gebiets-

größe 536 km²) ausgewählt, das bereits im Rahmen einer vom PIK für das Land Brandenburg durchgeführten Pilotstudie zu den Auswirkungen von Klimaänderungen als typisches Einzugsgebiet verwendet wurde (BECKER et al. 1996). Daneben wurde auch das im Nordosten Brandenburgs gelegene Einzugsgebiet der Stepenitz (Gebietsgröße 575 km²) für die Modellanpassung genutzt, wo im Rahmen des Forschungsvorhabens "Dynamische skalenübergreifende Modellierung des Wasser- und Stoffhaushaltes in Gebieten des pleistozänen Tieflandes - Modellgebiet Stepenitz" umfangreiche Szenarioanalysen zu den Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den regionalen Wasserhaushalt durchgeführt wurden (LAHMER und BECKER 1998c, LAHMER und BECKER 1999, LAHMER et al. 1999a/b, LAHMER et al. 2001a/c, QUAST und STEIDL 2002). Die Lage beider Teileinzugsgebiete ist in **Abb. 3.3** dargestellt.

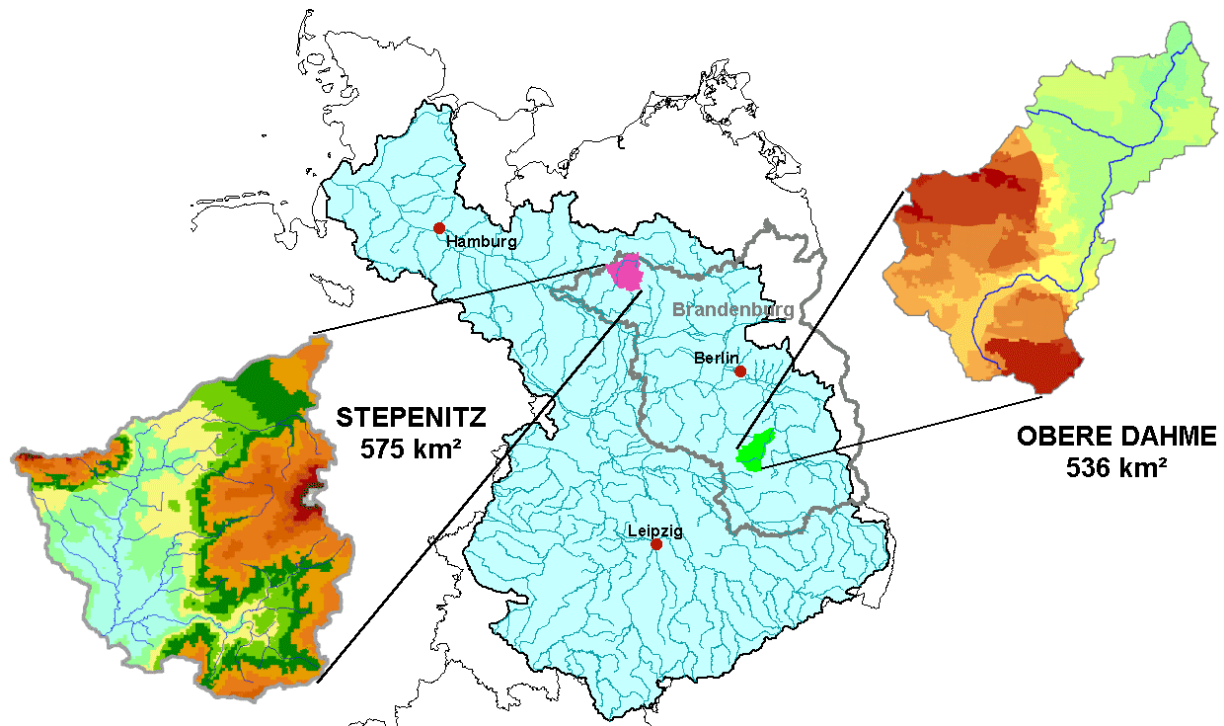


Abb. 3.3 Überblick über den deutschen Teil des Elbeeinzugsgebietes, das Land Brandenburg und die im Rahmen der vorliegenden Studie für die Modellanpassung herangezogenen Einzugsgebiete der Oberen Dahme und der Stepenitz (charakterisiert durch das jeweils verwendete Digitale Höhenmodell - DHM).

Da das grundsätzliche Vorgehen bei der Modellanpassung und die wesentlichen Eigenschaften des Einzugsgebietes der Oberen Dahme bereits ausführlich in Kapitel 4.4 von LAHMER et al. (2001b) beschrieben wurden, sollen an dieser Stelle lediglich ergänzende Anmerkungen gemacht werden. Die Notwendigkeit einer Neuanpassung des Modells im Rahmen der vorliegenden Studie ergab sich aus den folgenden zwei Gründen:

- Verwendung einer anderen zeitlichen Datenbasis (es kamen mehr und z. T. andere meteorologische Zeitreihen zum Einsatz)
- Verwendung einer den speziellen Anforderungen des Auftraggebers gerecht werdenden, überarbeiteten Modellversion von ArcEGMO.

Die Modelländerungen zusammen mit dem geänderten meteorologischen Input führen dazu, dass sich im Vergleich zur Vorstudie geringfügig andere Werte für verschiedene Wasserhaushaltsgrößen ergeben. So werden für die überlappende Periode 1961-1990 beispielsweise etwas geringere mittlere Jahreswerte des Gebietsniederschlags berechnet. Dies wiederum führt - zusammen mit den Modellmodifikationen - dazu, dass sich die mittleren Jahreswerte der realen Verdunstung sowie der Oberflächenabflussbildung

etwas verringern und die Werte der Sickerwasserbildung geringfügig steigen. Die Werte des Gebietsabflusses verändern sich für die o. g. Periode dagegen praktisch nicht.

Als Beispiel für die auftretenden Änderungen und im Vorgriff auf die später diskutierten Trendanalysen sind in **Abb. 3.4** die im Rahmen dieser Studie berechneten Jahressummen der Sickerwasserbildung für die Periode 1961-1998 zusammen mit den Ergebnissen der Vorgängerstudie (LAHMER et al. 2001b) für die Periode 1961-1990 dargestellt. Wegen der geänderten meteorologischen Datenbasis und den oben erläuterten Änderungen am hydrologischen Modell ArcEGMO treten Abweichungen zwischen den Jahressummen beider Studien auf, die im langjährigen Mittel der gemeinsamen Periode 1961-1990 mit etwa 5 % relativ gering bleiben, für einzelne Jahre hingegen bis zu 22 mm (1989) betragen können. Eine Neumodellierung des Untersuchungsgebietes für die Gesamtperiode 1961-1998 (und nicht nur für den zusätzlichen Zeitbereich 1991-1998) war also in der Tat geboten.

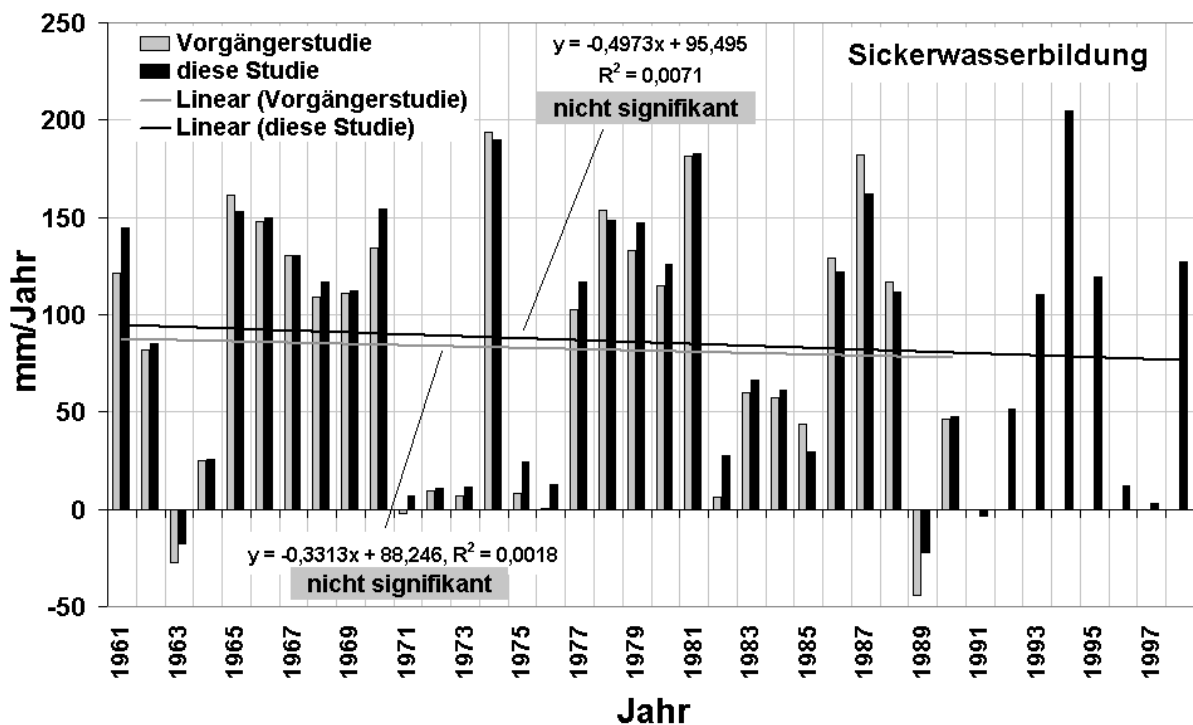


Abb. 3.4 Für das Land Brandenburg ermittelte Jahressummen der Sickerwasserbildung für die Gesamtperiode 1961-1998. Neben den in der vorliegenden Studie berechneten Werten sind auch die im Rahmen der Vorgängerstudie (LAHMER et al. 2001b) für die Periode 1961-1990 ermittelten Werte angegeben. Ebenfalls angegeben sind Regressionsgeraden, die im vorliegenden Fall nicht-signifikanten Abnahmen der Sickerwasserbildung entsprechen.

Die eingezeichneten Regressionsgeraden legen zwar für beide Zeitreihen eine Abnahme der Sickerwassermenge für die Periode 1961-1990 bzw. für die erweiterte Periode 1961-1998 nahe, doch handelt es sich in beiden Fällen (bei Anwendung des Mann-Testes, vgl. Kap. 6.1.4) um nicht signifikante Veränderungen. Entsprechende Trendanalysen unter Einschluss von Signifikanztests werden detailliert in Kapitel 6 vorgestellt.

Zum Zweck der Modellkalibrierung und -validierung wurden im Einzugsgebiet der Oberen Dahme (Quellgebiet der Dahme bis zum Pegel Märkisch Buchholz) Niederschlags-Abfluss-Berechnungen für die Periode 1.11.1976 - 31.10.1994 durchgeführt, da für diesen Zeitbereich gemessene Abflusswerte vorlagen. Für die Simulationsrechnungen wurde die gleiche räumliche Aggregation zu 15 Hydrotopklassen verwendet wie für das Gesamtgebiet. Da die Landnutzungsklassen „Brachland“ und „Feuchflächen“ im Gebiet der Oberen Dahme nicht vorkommen, reduziert sich die Anzahl der Hydrotopklassen

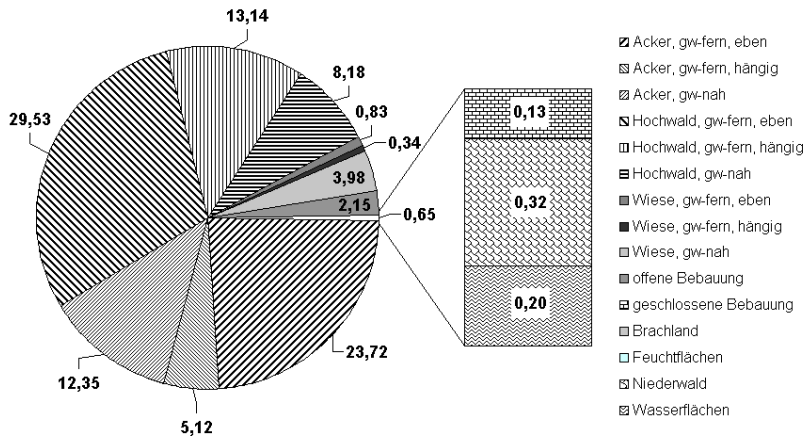


Abb. 3.5 Flächenanteile der für die Simulationsrechnungen verwendeten 15 Hydrotopklassen an der Einzugsgebietsfläche des Validierungsgebietes Obere Dahme.

gegenüber dem Gesamtgebiet allerdings von 15 auf 13. **Abb. 3.5** zeigt die Flächenanteile dieser Hydrotopklassen an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes.

Die am Gebietsauslass der Oberen Dahme (Pegel Märkisch Buchholz) gemessenen und simulierten Durchflüsse sind in **Abb. 3.6** dargestellt. Die Übereinstimmung ist - bei Verwendung verschiedener Gütekriterien (wie z.B. dem von NASH

& SUTCLIFFE, 1979) - generell gut. Lediglich bei der Nachbildung einiger extremer Abflüsse sowie in einigen Herbstmonaten (1982, 1985, 1992 und 1993) zeigen sich gewisse Probleme (die gemessenen Abflüsse werden hier unterschätzt). Für eine Erläuterung der dafür angenommenen Gründe sei auf LAHMER et al. (2001b), S. 50 verwiesen, wo auf mögliche Nutzungsverluste aufgrund von Einleitungen (Rieselfeldbewirtschaftung) in das Gebiet hingewiesen wird.

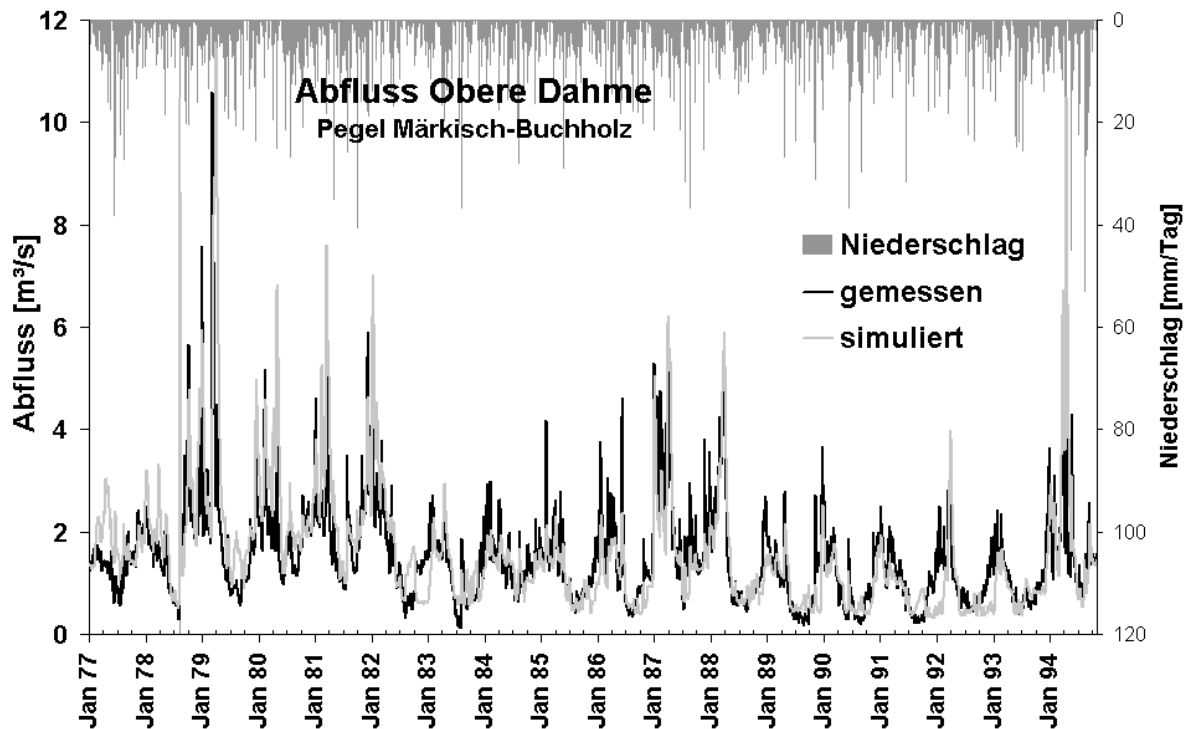


Abb. 3.6 Für das Einzugsgebiet der Oberen Dahme im Zeitraum 1.11.1976-31.10.1994 gemessene und simulierte Durchflüsse am Pegel Märkisch-Buchholz.

Abb. 3.7 zeigt das Ergebnis der im Einzugsgebiet der Stepenitz durchgeführten Abflusssimulation für den Zeitraum 01.01.1981 - 31.10.1994, für den am Pegel Wolfshagen (Gebietsauslass) Meßwerte zur Verfügung standen. Im Vergleich zu den im Rahmen des WaStor-Projektes durchgeführten detaillierten Untersuchungen konnte mit der geänderten Modellversion eine ähnlich gute Modellanpassung wie mit der bisherigen Modellversion erreicht werden. Die Tatsache, dass die Nachbildung der gemessenen

Abflusswerte unter Verwendung der gleichen Modellparameter wie für die Obere Dahme (bei einer wegen der Verwendung anderer Grundlagendaten allerdings anderen Gebietsuntergliederung in Hydrotope und Hydrotopklassen) in dieser Güte gelingt (Nash & Sutcliffe-Gütekriterium > 0.8), ist ein deutliches Indiz dafür, dass das kalibrierte Modell für den gesamten Untersuchungsraum (Brandenburg) eingesetzt werden kann.

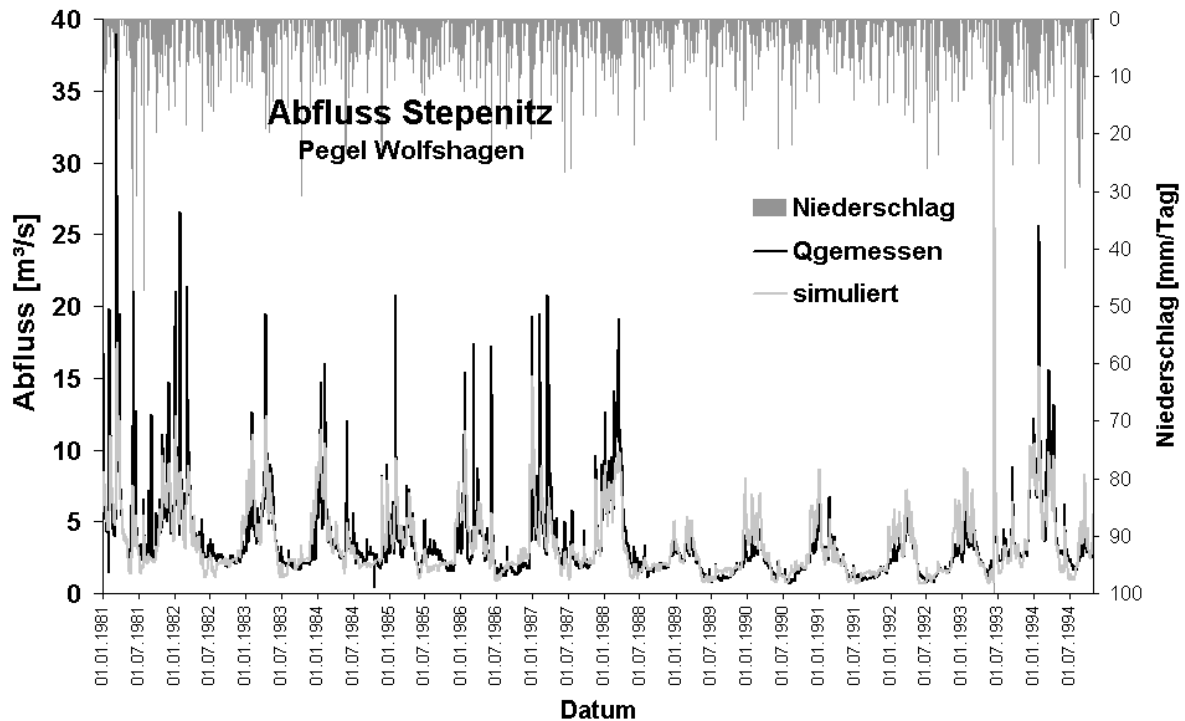


Abb. 3.7 Für das Einzugsgebiet der Stepenitz im Zeitraum 1.1.1981-31.10.1994 gemessene und simulierte Durchflüsse am Pegel Wolfshagen.

4 Flächendeckende Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen

Das vorliegende Kapitel beschreibt die im Land Brandenburg erzielten Ergebnisse der physikalisch basierten, GIS-gestützten hydrologischen Modellierung, deren primäres Ziel in einer flächendeckenden Berechnung der Sickerwasserbildung auf der Basis aggregierter Raumeinheiten bestand. Neben der Sickerwasserbildung wurden im Rahmen der Simulationsrechnungen auch andere Wasserhaushaltsgrößen berechnet, die zum einen für einen Vergleich der hier erzielten Ergebnisse mit denen des Vorgängerprojektes (LAHMER et al. 2001b) genutzt werden können, zum anderen die Interpretation der zeitlichen und räumlichen Dynamik der Sickerwassermenge erleichtern (in diesem Zusammenhang sei noch einmal auf die Anmerkungen zu Ende von Kapitel 1 verwiesen).

Für das gesamte Land Brandenburg wurde unter Nutzung des hydrologischen Modellierungssystems ArcEGMO ein flächendifferenziertes Niederschlags-Abflussmodell aufgebaut. Die Parametrisierung des Modells erfolgt GIS-gestützt unter Einbeziehung der Informationen der Flächennutzung, der Bodeneigenschaften, der Grundwasserflurabstände, der Geländehöhen und einer Gebietsstrukturierung in 196 Teileinzugsgebiete (siehe Kapitel 2 und 3). Die Modelleichung erfolgte - wie in Kapitel 3.4 beschrieben - anhand der beobachteten Abflussreihen zweier repräsentativer Einzugsgebiete im Land Brandenburg (Obere Dahme und Stepenitz).

Unter Verwendung des kalibrierten und validierten Modells ArcEGMO und der pro Simulationszeitschritt (Tag) interpolierten meteorologischen Eingangsgrößen wurde auf der Basis der in Abb. 3.1 dargestellten 15 Hydrotopklassen für den Zeitraum 1961-1998 orts- und zeitdiskret die Sickerwasserbildung berechnet. Neben dieser Wasserhaushaltsgröße wurden auch der Gebietsniederschlag, die poten-

zielle und reale Verdunstung, die klimatische Wasserbilanz, die Oberflächenabflussbildung und der Gebietsabfluss ermittelt. Die Modellierung wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

1. Simulationsrechnungen für die Gesamtperiode 1961-1998 in Tagesschrittweite auf der Basis räumlich aggregierter Flächeneinheiten (1.599 Hydrotope) und unter Verwendung der für diese Periode verfügbaren und verwendbaren Zeitreihendaten des DWD.
2. Aggregation der Sickerwasserbildung zu (mittleren) Jahreswerten, (mittleren) Monatswerten sowie (mittleren) Sommer- und Winterwerten.

Obwohl der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Berechnung und Analyse der Sickerwasserbildung lag, werden im Folgenden aus den bereits genannten Gründen auch die für alle übrigen klimatischen und Wasserhaushaltsgrößen ermittelten Ergebnisse dargestellt.

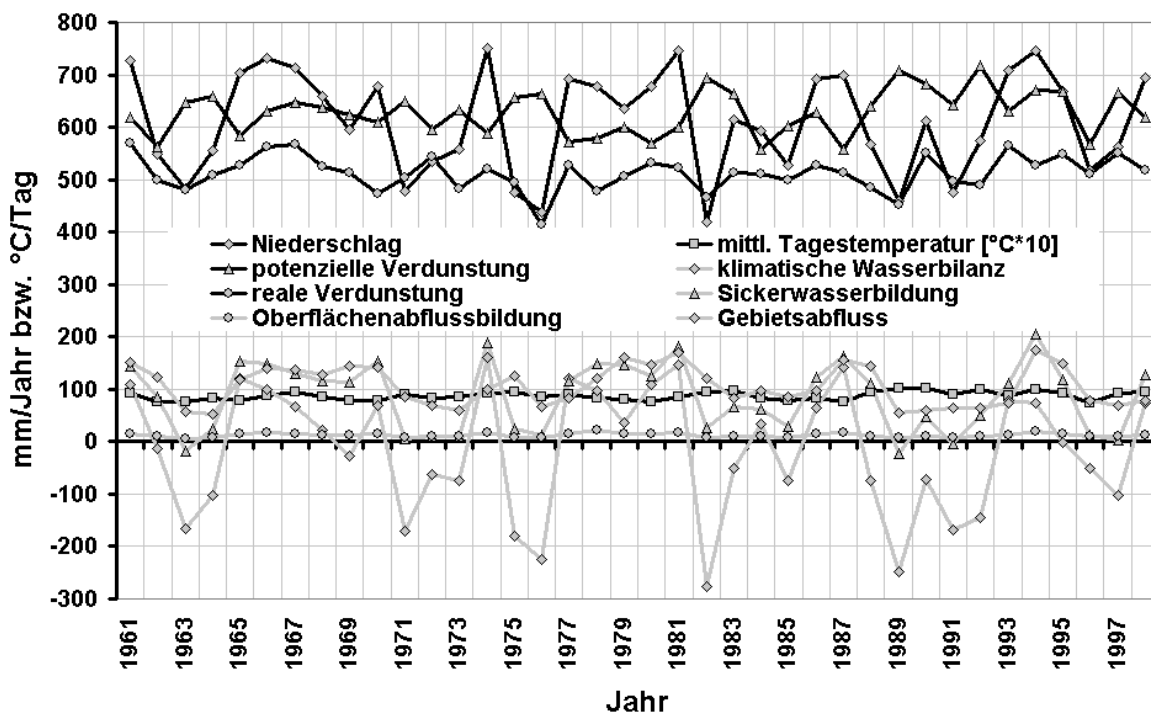


Abb. 4.1 Für das Land Brandenburg ermittelte Jahressummen verschiedener meteorologischer Eingangs- sowie berechneter Wasserhaushaltsgrößen für die Gesamtperiode 1961-1998 (in mm; die mittlere Tagestemperatur ist in °C/Tag und in 10-facher Überhöhung dargestellt).

4.1 Jahressummen 1961-1998

Abb. 4.1 zeigt den Verlauf der für das Land Brandenburg für die Periode 1961-1998 ermittelten, räumlich interpolierten Jahreswerte der meteorologischen Eingangsgrößen (Niederschlag, mittlere Tagestemperatur), der davon abgeleiteten Sekundärgrößen (potenzielle Verdunstung, klimatische Wasserbilanz) sowie der daraus berechneten Wasserhaushaltsgrößen (Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gebietsabfluss).

Auffallend sind die extrem negativen Werte der klimatischen Wasserbilanz in den Jahren 1963, 1971, 1975, 1976, 1982 und 1989, die Resultat des Zusammenwirkens unterdurchschnittlicher jährlicher Niederschläge und überdurchschnittlicher Jahressummen der potenziellen Verdunstung sind (trockene, warme Jahre). Sie verdeutlichen, dass Brandenburg verglichen mit den alten Bundesländern durch ein geringes Wasserdargebot charakterisiert ist. In **Tab. 4.1** sind neben den Jahressummen dieser Größen

Tab. 4.1 Überblick über die für das Land Brandenburg im Zeitraum 1961-1998 ermittelten Jahressummen meteorologischer Eingangs- und berechneter Wasserhaushaltsgrößen (in mm/Jahr bzw. °C/Tag für LT).

Legende: PI = Niederschlag, LT = mittlere Tagestemperatur, EP = potenzielle Verdunstung, WB = klimatische Wasserbilanz, ER = aktuelle Verdunstung, SWB = Sickerwasserbildung, RO = Oberflächenabflussbildung, QC = Gebietsabfluss

Jahr	meteorologische Größen			Wasserhaushaltsgrößen				
	PI	LT	EP	WB	ER	SWB	RO	QC
1961	726,9	9,14	618,5	108,4	570,1	144,6	15,7	151,9
1962	547,5	7,54	561,8	-14,3	498,0	85,1	9,3	122,1
1963	481,7	7,62	647,4	-165,7	480,7	-17,8	6,4	56,5
1964	556,2	8,36	658,3	-102,1	508,9	25,4	8,4	53,0
1965	704,3	7,77	583,5	120,8	527,0	152,9	14,9	117,3
1966	731,6	8,74	630,9	100,7	562,0	150,0	16,3	138,6
1967	713,3	9,51	646,6	66,6	567,8	130,2	14,0	137,3
1968	660,0	8,65	637,9	22,0	524,1	116,5	12,0	126,7
1969	596,3	7,79	624,7	-28,5	514,4	112,6	13,5	143,5
1970	678,5	7,86	608,6	69,9	472,2	154,1	14,5	140,7
1971	478,9	8,99	649,5	-170,6	503,8	6,6	8,8	84,5
1972	533,6	8,27	595,9	-62,3	543,4	11,0	10,5	69,5
1973	557,7	8,66	632,2	-74,5	482,9	11,1	9,3	60,5
1974	749,6	9,24	587,9	161,7	519,9	189,6	17,8	99,2
1975	476,4	9,50	657,0	-180,6	493,6	24,3	8,9	124,4
1976	437,5	8,58	662,7	-225,2	414,8	12,5	6,9	67,0
1977	692,7	8,97	572,7	120,0	526,8	116,7	13,9	83,3
1978	678,2	8,37	580,1	98,1	478,7	148,4	21,6	120,7
1979	635,0	7,98	599,1	35,8	505,9	147,2	14,2	161,1
1980	678,3	7,67	569,6	108,7	532,2	125,9	15,2	147,5
1981	746,1	8,63	600,4	145,7	522,7	182,7	17,7	169,4
1982	419,7	9,44	695,2	-275,4	465,3	27,6	8,3	120,5
1983	613,3	9,70	664,8	-51,5	512,4	66,1	11,2	82,8
1984	592,3	8,37	558,7	33,6	511,8	61,4	11,2	96,9
1985	528,5	7,88	602,3	-73,8	498,3	29,5	8,2	84,5
1986	692,7	8,30	628,9	63,8	527,4	122,0	15,1	98,0
1987	698,0	7,53	557,1	140,9	513,5	162,2	18,4	155,3
1988	566,8	9,48	640,1	-73,3	484,2	111,5	11,2	145,3
1989	460,0	10,15	709,2	-249,2	452,9	-22,1	6,9	54,5
1990	612,0	10,10	683,3	-71,2	551,7	47,5	10,7	60,1
1991	474,8	8,91	642,4	-167,6	496,8	-3,2	7,4	65,2
1992	574,0	9,88	717,8	-143,7	490,2	51,3	9,6	64,8
1993	709,4	8,80	630,0	79,5	565,8	110,7	13,7	74,7
1994	745,4	9,92	671,2	74,3	526,6	204,5	19,0	175,7
1995	667,4	9,19	669,2	-1,8	548,2	119,5	14,7	148,3
1996	517,1	7,36	568,4	-51,3	510,5	12,3	9,7	79,1
1997	562,9	9,22	665,8	-103,0	551,6	2,8	10,4	69,4
1998	694,8	9,48	620,0	74,8	518,0	127,1	12,0	77,7
MW 61-70	639,6	8,30	621,8	17,8	522,5	105,4	12,5	118,8
MW 71-80	591,8	8,62	610,7	-18,9	500,2	79,3	12,7	101,8
MW 81-90	593,0	8,96	634,0	-41,0	504,0	78,8	11,9	106,7
MW 91-98	618,2	9,09	648,1	-29,9	526,0	78,1	12,1	94,4
MW 61-98	610,2	8,72	627,6	-17,4	512,5	85,8	12,3	106,0

negative klimatische Wasserbilanz im Sommer ergibt mit einem fast ebenso großen positiven Wert von +160 mm im Winter im langjährigen Jahresmittel einen leicht negativen Wert von -17 mm. Positive Werte der Sickerwasserbildung im Winter (107 mm) überwiegen negative Werte dieser Wasserhaushaltsgröße im Sommer (-21 mm) und führen im langjährigen Mittel zu einem positiven Wert von ca. 86 mm. Der für die Periode 1961-1998 berechnete mittlere Gebietsabfluss tritt vornehmlich im Winter auf (zu ca. 60 %) und führt im Jahresmittel zu einem Wert von 106 mm.

auch die Mittelwert für die Teilperioden 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990, 1991-1998 sowie für die Gesamtperiode 1961-1998 angegeben.

Um einen Eindruck von der räumlichen Verteilung der berechneten Wasserhaushaltsgrößen zu vermitteln, sollen an dieser Stelle zwei Kartendarstellungen von Jahressummen der Sickerwasserbildung wiedergegeben werden. Ausgewählt wurden dazu die beiden extremen Jahre 1974 (besonders feucht) und 1989 (besonders trocken). **Abb. 4.2** veranschaulicht plastischer als die in **Abb. 4.1** dargestellten Zeitreihen oder die in **Tab. 4.1** angegebenen Werte den drastischen Unterschied zwischen beiden Jahren, der 1989 in großen Teilen Brandenburgs zu negativen Werten der Sickerwasserbildung führte, während 1974 lediglich einige Feuchtgebiete als Zehrflächen wirkten. Für die Karten wurde jeweils die Legende verwendet, die bereits in der Darstellung der mittleren Jahressummen in **Abbildung 4.20** von LAHMER et al. (2001b) Verwendung fand.

4.2 Mittlere Jahres-, Sommer- und Wintersummen 1961-1998

In **Abb. 4.3** sind die mittleren Jahressummen sowie die für das Sommer (Monate Mai bis Oktober) und das Winterhalbjahr (Monate November bis April) berechneten mittleren Halbjahressummen für die Gesamtperiode 1961-1998 dargestellt. Danach fällt in diesem Zeitraum knapp 56 % des Niederschlags in den Sommermonaten. Die potenzielle und reale Verdunstung dominieren (erwartungsgemäß) mit 82,5 % bzw. 79 % in den Sommermonaten, während die Oberflächenabflussbildung sich im Mittel fast gleichmäßig auf die beiden Halbjahre verteilt. Eine mit -177 mm stark

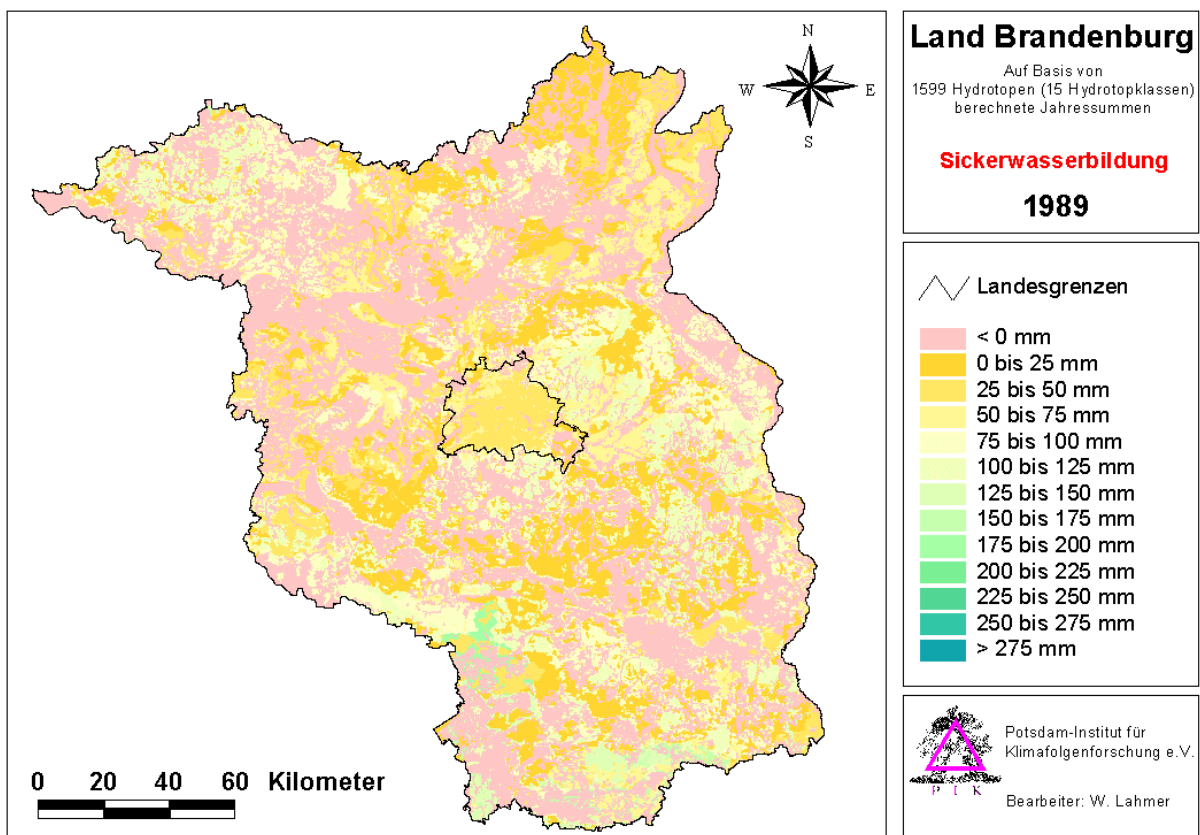
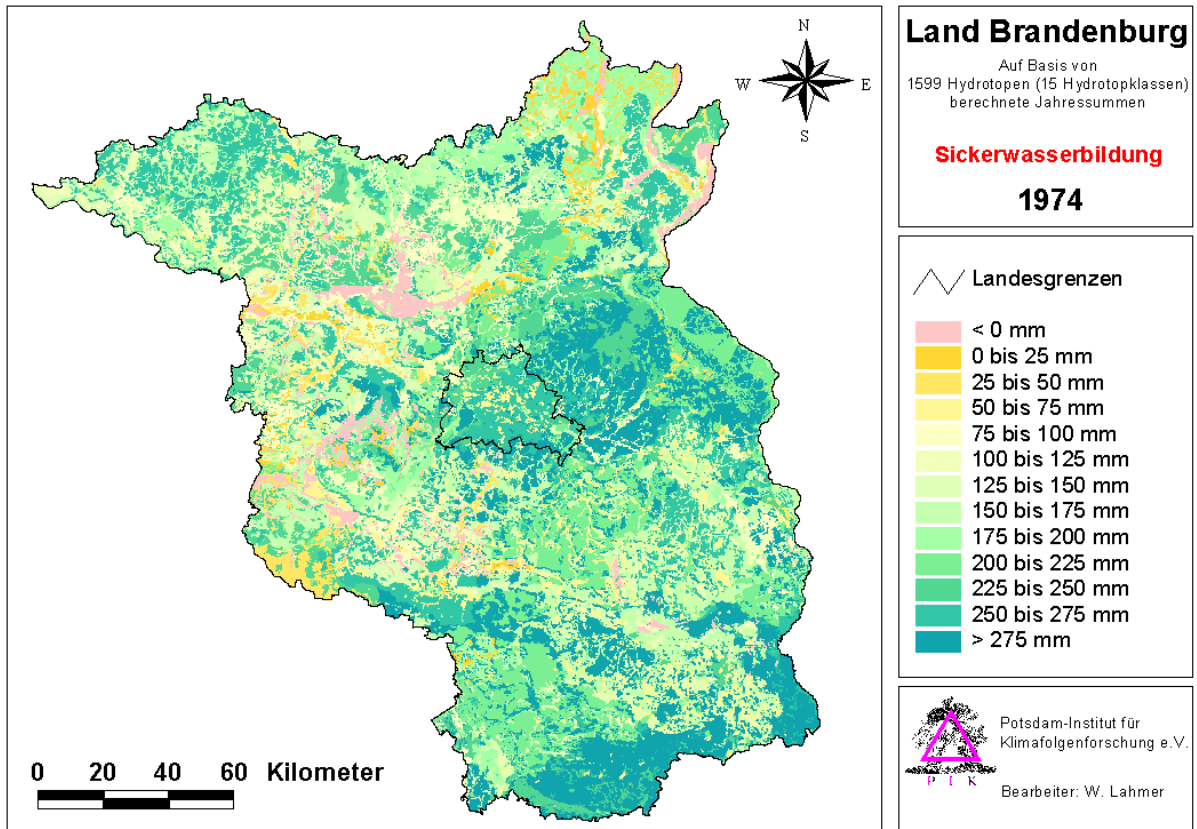


Abb. 4.2 Räumliche Verteilung der im Land Brandenburg berechneten Sickerwassermenge für die beiden extremen Jahre 1974 (besonders feucht, oben) und 1989 (besonders trocken, unten).

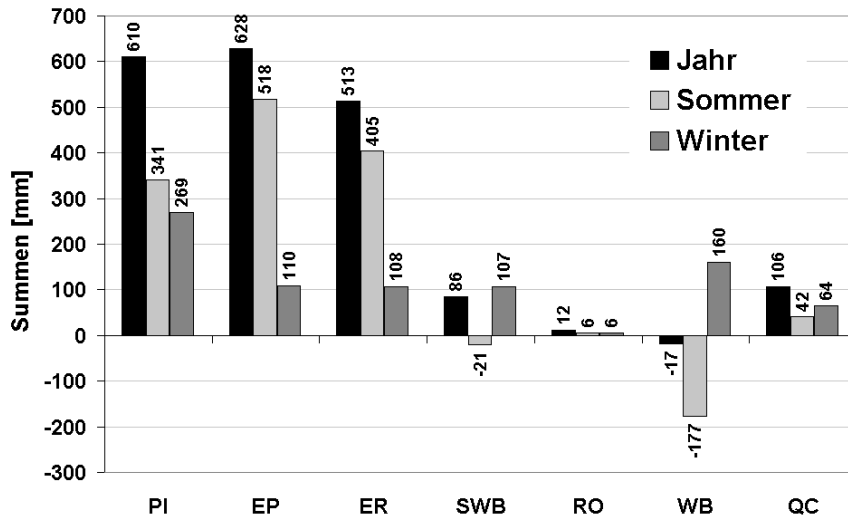


Abb. 4.3 Für die Gesamtperiode 1961-1998 berechnete mittlere Jahres-, Sommer- und Wintersummen der Größen Niederschlag (PI), pot. Verdunstung (EP), klim. Wasserbilanz (WB), reale Verdunstung (ER), Sickerwasserbildung (SWB), Oberflächenabflussbildung (RO) und Gesamtabfluss (QC) im Land Brandenburg. Im Fall der mittleren Tagestemperatur (LT) wurde jeweils der entsprechende Tagesmittelwert berechnet ($^{\circ}\text{C}$) und für Darstellungszwecke um den Faktor 10 erhöht.

vornehmlich in den Wintermonaten erfolgt, wo die für das Gesamtgebiet berechnete mittlere Sickerwassermenge mit +107 mm erheblich höher ist als für die Sommermonate (-21 mm) (vgl. Abb. 4.3).

Wie für die Jahressummen der beiden extremen Jahre 1974 und 1989 (Abb. 4.2) sollen an dieser Stelle auch für die mittleren Jahres- und

Halbjahressummen Karten der Sickerwasserbildung dargestellt werden. **Abb. 4.4** zeigt zunächst die räumliche Verteilung der mittleren jährlichen Sickerwassermenge für die Periode 1961-1998 im Land Brandenburg. In **Abb. 4.5** sind die mittleren Jahreswerte auf mittlere Sommer- und Winterwerte dieser Periode heruntergebrochen. Deutlich wird, dass die Sickerwasserbildung

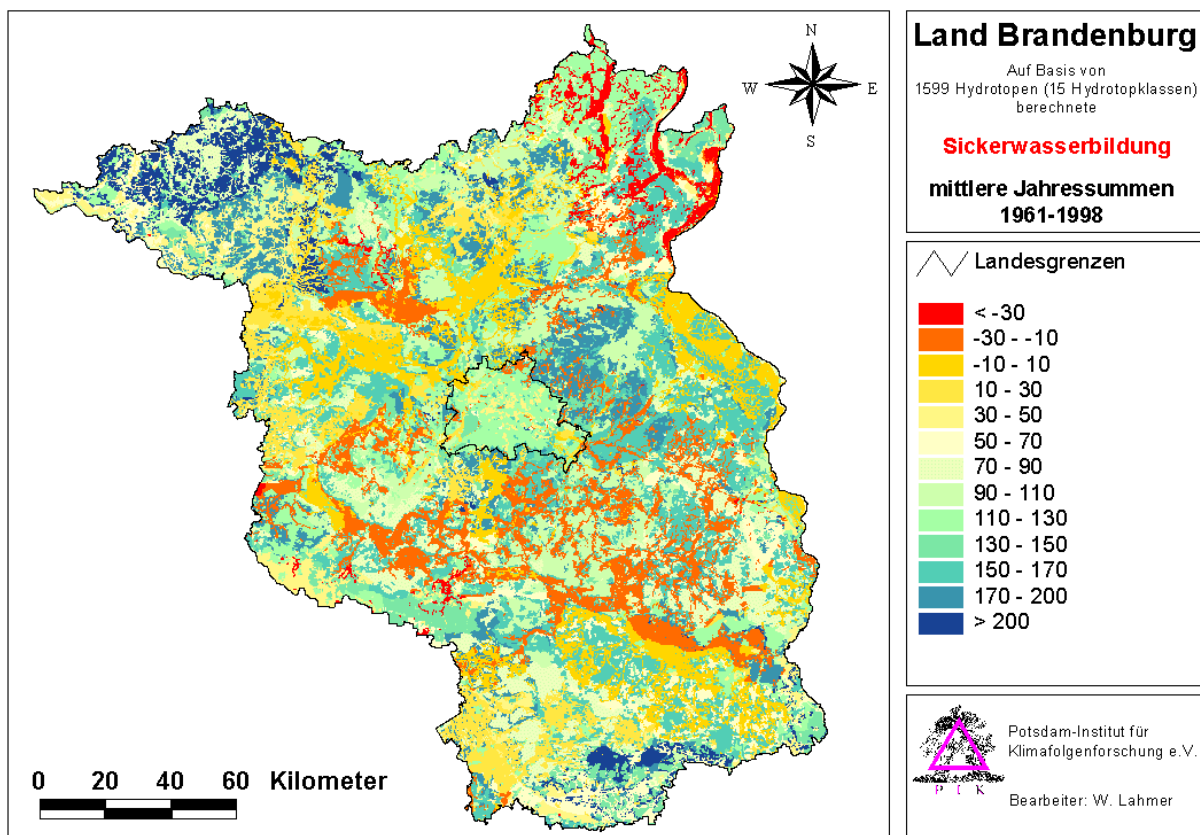


Abb. 4.4 Räumliche Verteilung der mittleren jährlichen Sickerwassermenge für die Periode 1961-1998 im Land Brandenburg.

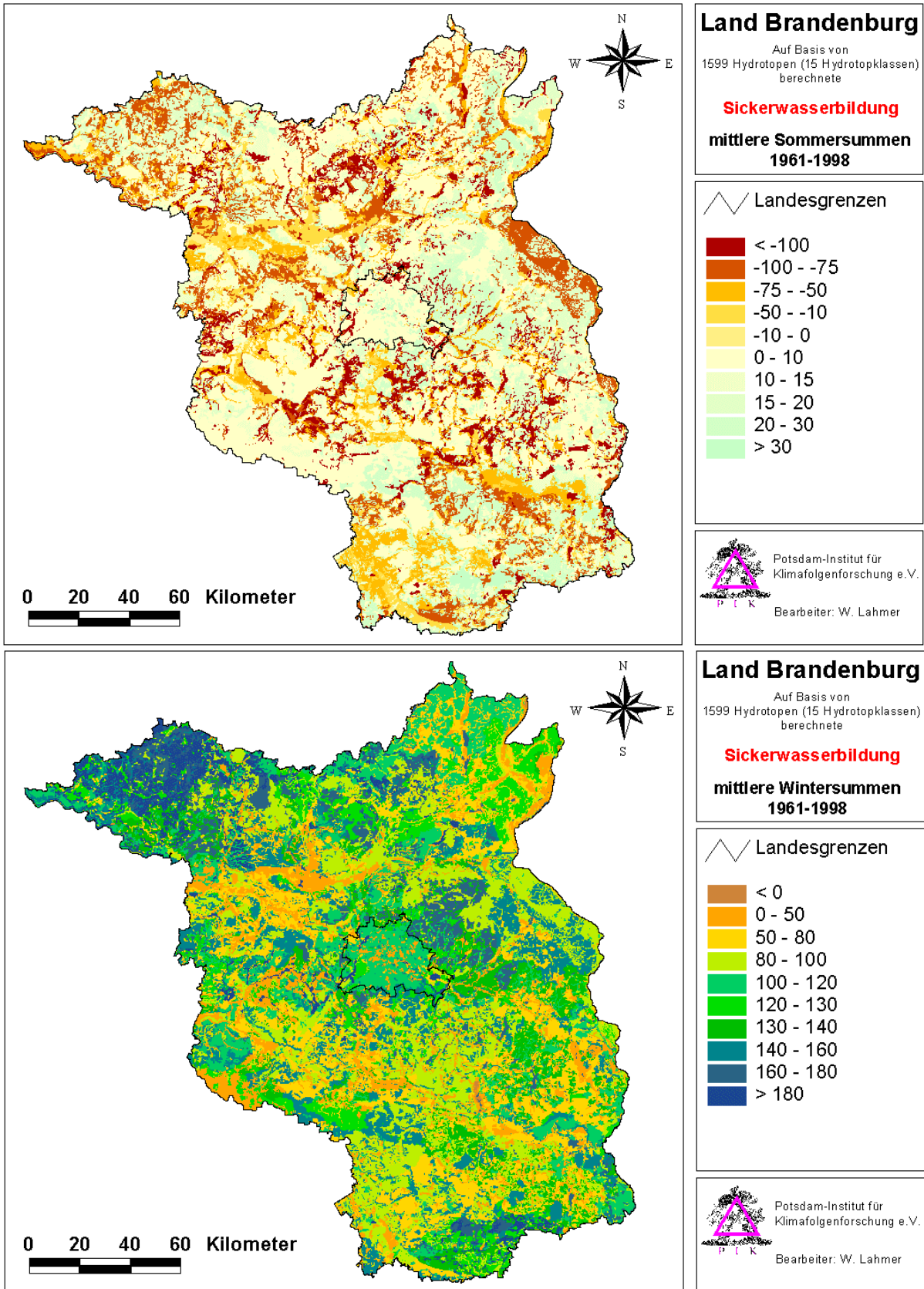
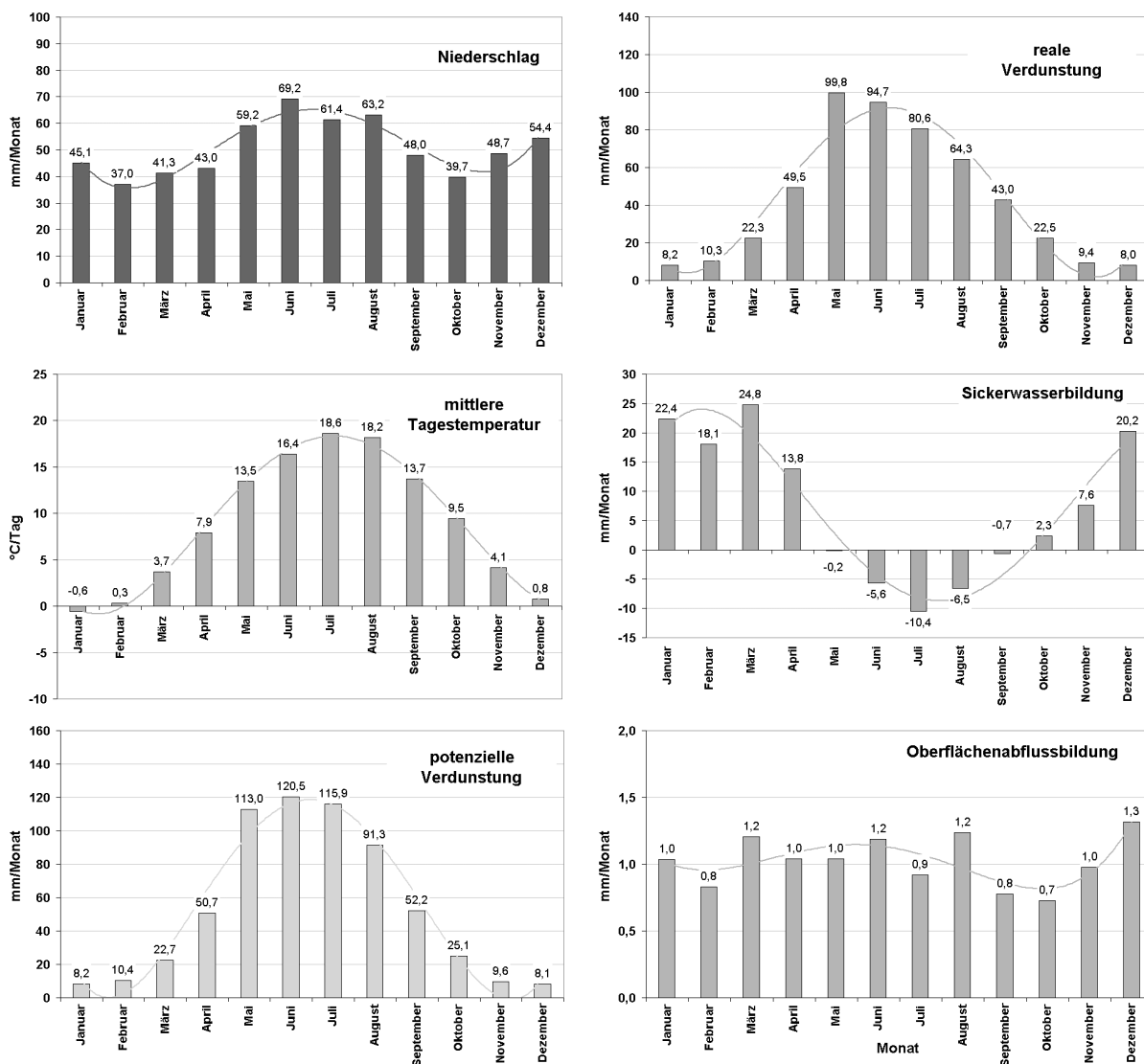


Abb. 4.5 Räumliche Verteilung der für den Zeitraum 1961-1998 berechneten mittleren Sickerwassermenge im Sommer- (oben) und im Winterhalbjahr (unten).

4.3 Mittlere Monatssummen 1961-1998

Abb. 4.6 zeigt die für den Zeitraum 1961-1998 im Land Brandenburg berechneten mittleren Monatssummen des Niederschlags, der potenziellen Verdunstung, der klimatischen Wasserbilanz und der mittleren Tagestemperatur und die daraus resultierenden mittleren Monatssummen der realen Verdunstung, der Sickerwasserbildung, der Oberflächenabflussbildung und der Gesamtabflusshöhe. Danach fällt der *Niederschlag* - wie bereits in Zusammenhang mit Abb. 4.1 diskutiert - eher in den Sommermonaten (mit einem Maximum im Juni), während die Niederschlagshöhe in den Wintermonaten lediglich 44 % der mittleren Jahressumme von 610 mm ausmacht. Die *mittlere Tagestemperatur* beträgt im Jahresmittel knapp 8,9° C und zeigt lediglich für den Monat Januar Werte unter 0° C. Der innerjährliche Gang der *potenziellen Verdunstung* wird wesentlich durch die Temperaturverteilung bestimmt. Die langjährige Jahressumme von 627 mm wird deshalb hauptsächlich durch die Sommermonate bestimmt, wo Monatswerte von bis zu 121 mm (Juni) auftreten.



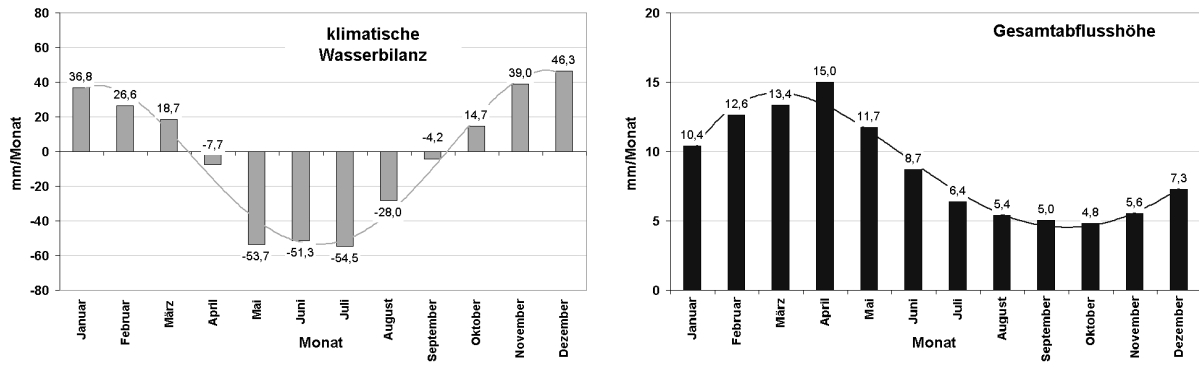


Abb. 4.6 Für das Land Brandenburg berechnete mittlere Monatssummen (Periode 1961-1998) meteorologischer Eingangsgrößen (Niederschlag, mittl. Tagestemperatur) und davon abgeleiteter Größen (potenzielle Verdunstung, klimatische Wasserbilanz) sowie daraus resultierende mittlere Monatssummen der realen Verdunstung, der Sickerwasserbildung, der Oberflächenabflussbildung und der Gesamtabflusshöhe.

Die *klimatische Wasserbilanz* als Differenz zwischen dem Niederschlag und der potenziellen Verdunstung weist lediglich von Oktober bis März positive Werte auf, während im restlichen Jahr (April bis September) z. T. erhebliche negative Werte zu verzeichnen sind. Die Niederschlagsmengen reichen dann nicht aus, die potenzielle Verdunstung zu befriedigen. Als Resultat dieses sommerlichen Defizits ergibt sich im langjährigen Durchschnitt ein negativer Wert von etwa -17 mm für diese Wasserhaushaltsgröße.

Der innerjährliche Gang der *realen Verdunstung* ist dem der potenziellen Verdunstung sehr ähnlich, doch werden hier maximal knapp 100 mm im Mai erreicht, da der für die potenzielle Verdunstung berechnete Wert von 113 mm nicht voll ausgeschöpft werden kann. Für die nachfolgenden Sommermonate wird die Lücke zwischen Verdunstungsanspruch und tatsächlicher Verdunstung noch erheblich größer und erreicht mit etwa 35 mm im Juli den höchsten Wert. Nur im Dezember und Januar entspricht die reale Verdunstung fast exakt der potenziell möglichen.

Die Monatsmittelwerte der *Sickerwasserbildung* zeigen einen zur klimatischen Wasserbilanz stark korrelierten Verlauf und weisen für die Sommermonate (Mai bis September) Werte von bis zu -11,8 mm auf (im Juli). In diesen Monaten ist die Verdunstung so hoch, dass der Untersuchungsraum im Mittel als „Zehrfläche“ wirkt und die Verdunstung offener Wasserflächen sowie der Wasserentzug durch die Vegetation (Transpirationsbedarf) durch den Niederschlag nicht befriedigt werden kann. Im Jahresdurchschnitt ergibt sich eine mittlere Jahressumme von immerhin noch etwa 86 mm für diese Wasserhaushaltsgröße, der aber z. B. schon durch geringfügige Änderungen der klimatischen Bedingungen negativ beeinflusst werden könnte (LAHMER und BECKER 2000, LAHMER et al. 2001a/c, LAHMER 2002, LAHMER 2003a/b, LAHMER and BRONSTERT 2003, BRONSTERT et al. 2003). Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass bei der in bebauten oder teilbebauten Gebieten berechneten Sickerwasserbildung zwar der Versiegelungsgrad dieser Flächen, aufgrund nicht flächendeckend vorliegender Informationen aber nicht der Anschluss an eine Mischkanalisation berücksichtigt wurde. Da die daraus resultierenden Effekte auf diese Nutzungsklassen beschränkt bleiben, werden die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt des Gesamtuntersuchungsraumes aber als äußerst gering angesehen.

Die *Oberflächenabflussbildung* weist keine nennenswerten monatlichen Variationen auf, da sie (abgesehen von versiegelten oder teilversiegelten Flächen) im Wesentlichen durch kurzfristige Extremniederschläge und eine damit einhergehende Bodenaufsättigung hervorgerufen wird. Die *Gesamtabflusshöhe* wird in den Sommermonaten vor allem durch die hohen Sickerwasserbildungsraten in den Wintermonaten (insbesondere Dezember bis April) gespeist, die dann über das Grundwasser verzögert zum Abfluss kommen.

4.4 Mittelwerte der Sickerwasserbildung für Dekaden

Abb. 4.7 zeigt die Entwicklung der Sickerwasserbildung über die vier Teilperioden 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 und 1991-1998. Dargestellt sind die auf Jahres-, Halbjahres- und Quartalsbasis berechneten Mittelwerte. Dabei zeigt sich, dass für die Jahreswerte ein deutlicher Abfall der Sickerwasserbildung von den 60-er hin zu den 70-er Jahren zu beobachten ist. Anschließend stagniert der mittlere Jahreswert auf niedrigem Niveau. Dem gegenüber „erholen“ sich die Mittelwerte für die Winterperiode (Monate November bis April) nach einem vergleichbaren Abfall von der ersten zur zweiten Dekade in den 80-er Jahren wieder, um in den 90-er Jahren aber erneut leicht abzufallen. Die mittleren Sommerwerte (Monate Mai bis Oktober) der Sickerwasserbildung sind für alle Dekaden durchweg negativ. In den 90-er Jahren erfolgt - verglichen mit den 80-er Jahren - ein leichter Anstieg zu geringfügig weniger negativen Werten.

Betrachtet man die Quartalssummen, so zeigt das erste Quartal (Monate Dezember bis Februar, „Winter“) keine nennenswerte Änderung im Untersuchungszeitraum 1961-1998. Dem gegenüber weist das zweite Quartal (Monate März bis Mai, „Frühling“) einen starken Abfall von den 60-er zu den 70-er Jahren auf, um anschließend bei den dann erheblich reduzierten Werten zu verbleiben. Das dritte Quartal (Monate Juni bis August, „Sommer“) zeigt insbesondere für den Zeitraum 1991-1998 einen Abfall zu noch negativeren Werten, die als Indiz für eine zunehmend ausgeprägtere Gebietszehrung im Sommer interpretiert werden können.

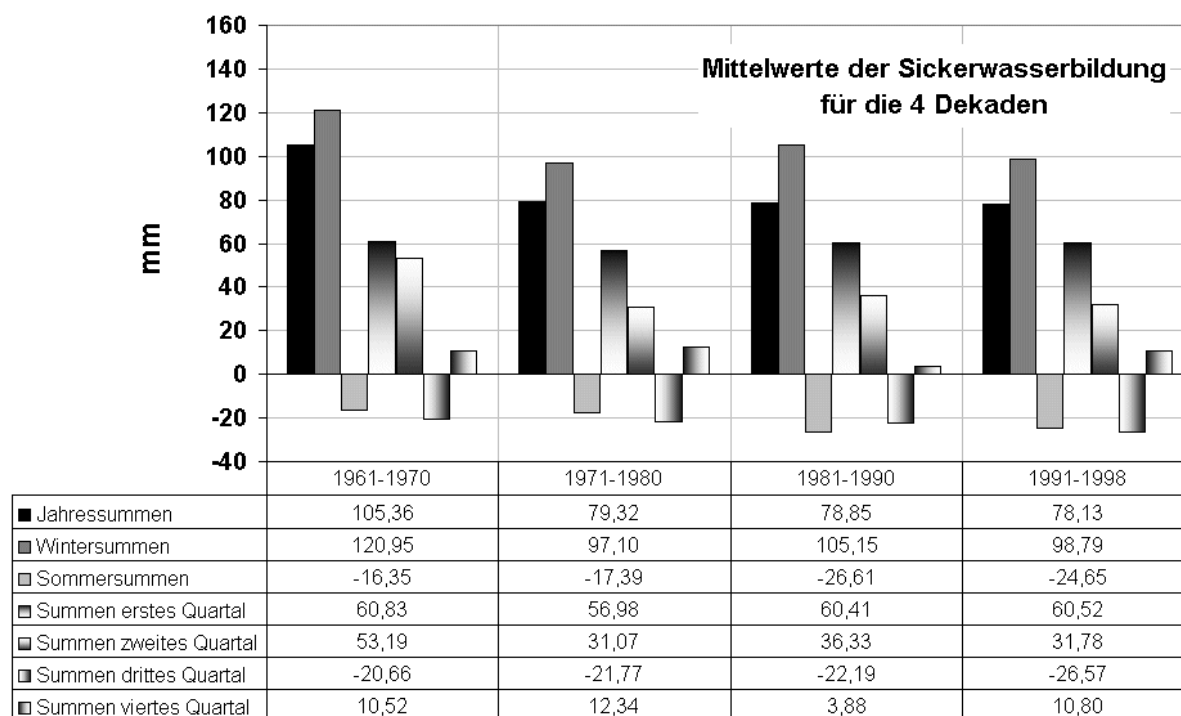


Abb. 4.7 Mittelwerte der Sickerwasserbildung (mittlere Jahres-, Halbjahres- und Quartalswerte) für die vier Teilperioden 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 und 1991-1998.

Allerdings sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass auf Dekadenwerten basierende statistische Analysen wegen des geringen Stichprobenumfangs der zu Grunde liegenden Zeitreihen grundsätzlich als sehr unsicher einzustufen sind. Hinzu kommt, dass gerade bei oder in der Nähe der Übergänge zwischen den Dekaden überdurchschnittlich große Sprünge in der jährlichen Sickerwasserbildung auftreten (vgl. Abb. 3.4 und Abb. 4.1), und sich aus diesem Grunde das für den Gesamtzeitraum 1961-1998 abgeleitete Verhalten nicht aus dem Verhalten für Dekaden (die „willkürlich“ gewählte Teilzeiträume darstellen) erschließt.

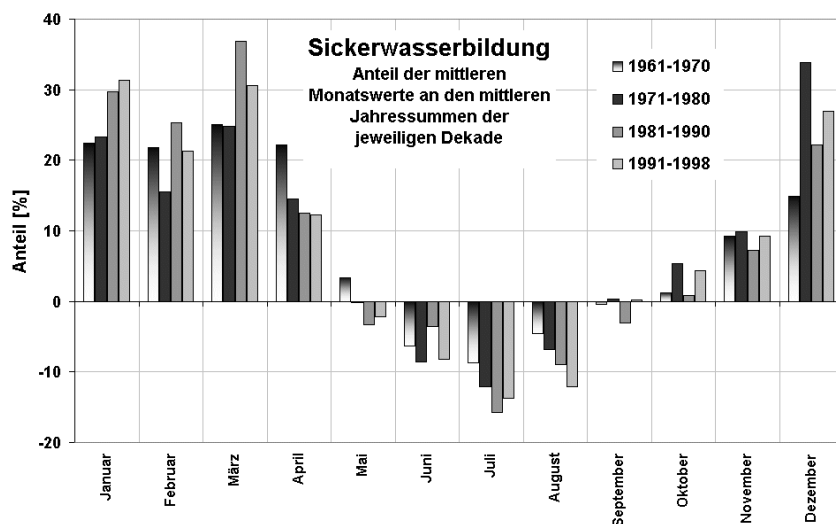


Abb. 4.8 Mittlere Monatssummen der für das Land Brandenburg berechneten Sickerwassermenge für die Teilperioden 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 und 1991-1998. Um Verschiebungen zwischen den Dekaden deutlich zu machen, sind für jede Dekade die prozentualen Anteile der Sickerwassermenge an der jeweiligen mittleren Jahressumme angegeben.

Um die innerjährlichen Verschiebungen zwischen diesen Perioden deutlich zu machen, sind für jeden Monat die prozentualen Anteile an der jeweiligen mittleren Jahressumme der betreffenden Dekade angegeben.

Deutlich wird, dass die Sickerwasserbildung in den 80-er und 90-er Jahren zunehmend in den Wintermonaten Januar bis März erfolgt, während sich das Defizit (die Zehrung) in den Sommermonaten Juli und August gegenüber den 60-er und 70-er Jahren erhöht. Auffallend ist auch der Rückgang der Sickerwasserbildung im April und Mai. Während in den 60-er Jahren noch etwa 18,4 % der mittleren (nur die positiven Werte berücksichtigenden) Jahressumme im April gebildet wird, reduziert sich der relative Anteil in den 90-er Jahren auf nur noch 9,0 %. Die im Mai im Mittel gebildete Sickerwassermenge ändert sich sogar von gering positiven Werten in den 60-er Jahren zu negativen Werten (Zehrung) in den 80-er und 90-er Jahren.

Der Grund für die beobachteten innerjährlichen Verschiebungen der Sickerwasserbildung auf Dekadenbasis wird in **Abb. 5.1** deutlich, wo die mittleren Monatssummen des Niederschlags, der Verdunstung und des Gebietsabflusses für die Teilperioden 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 und 1991-1998 dargestellt sind (wieder in Form prozentualer Anteile an den jeweiligen mittleren Jahressummen). Obwohl sich hier keine sehr klaren Tendenzen abzeichnen, ist der Abbildung doch zu entnehmen, dass sich das Niederschlagsdargebot in den Monaten Dezember bis März in den 80-er und 90-er Jahren gegenüber den 60-er und 70-er Jahren erhöht. Dem gegenüber beobachtet man im April und November eine abfallende Tendenz der relativen Niederschlagsmengen.

Wegen der im Zeitraum 1961-1998 signifikant gestiegenen Temperaturen (siehe Abb. 5.2 und Abb. 5.3) erhöht sich gegen Ende der Untersuchungsperiode zwar die Verdunstung in den Wintermonaten (insbesondere in den Monaten Januar bis April), doch bleibt die absolute Höhe der Verdunstung nach wie vor zu gering, um das zusätzliche Niederschlagsdargebot im Winter über den Verdunstungsprozess wesentlich zu reduzieren. Der relative Gebietsabfluss erhöht sich deshalb gegen Ende der Untersuchungsperiode (in den 80-er und 90-er Jahren) insbesondere in den Monaten Januar bis April. Rückgänge scheinen sich dagegen insbesondere in den Monaten Mai und Dezember anzudeuten. Insgesamt sind die auf Dekadenbasis ausgewiesenen jahreszeitlichen Verschiebungen im Fall des Gebietsabflusses wegen des innerjährlichen Ausgleichs über den langsamen Grundwasserpfad aber stark gedämpft.

4.5 Innerjährliche Verschiebungen der Sickerwassermenge

Um zu untersuchen, ob und inwieweit sich die berechnete Sickerwassermenge im Verlauf des Untersuchungszeitraumes 1961-1998 innerjährlich zwischen den Dekaden verschiebt, wurden auch Auswertungen auf Monatsbasis für Dekaden durchgeführt. **Abb. 4.8** zeigt die für das Land Brandenburg berechneten mittleren Monatssummen der Sickerwassermenge für die Teilperioden 1961-

5 Zeitliche Entwicklung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen

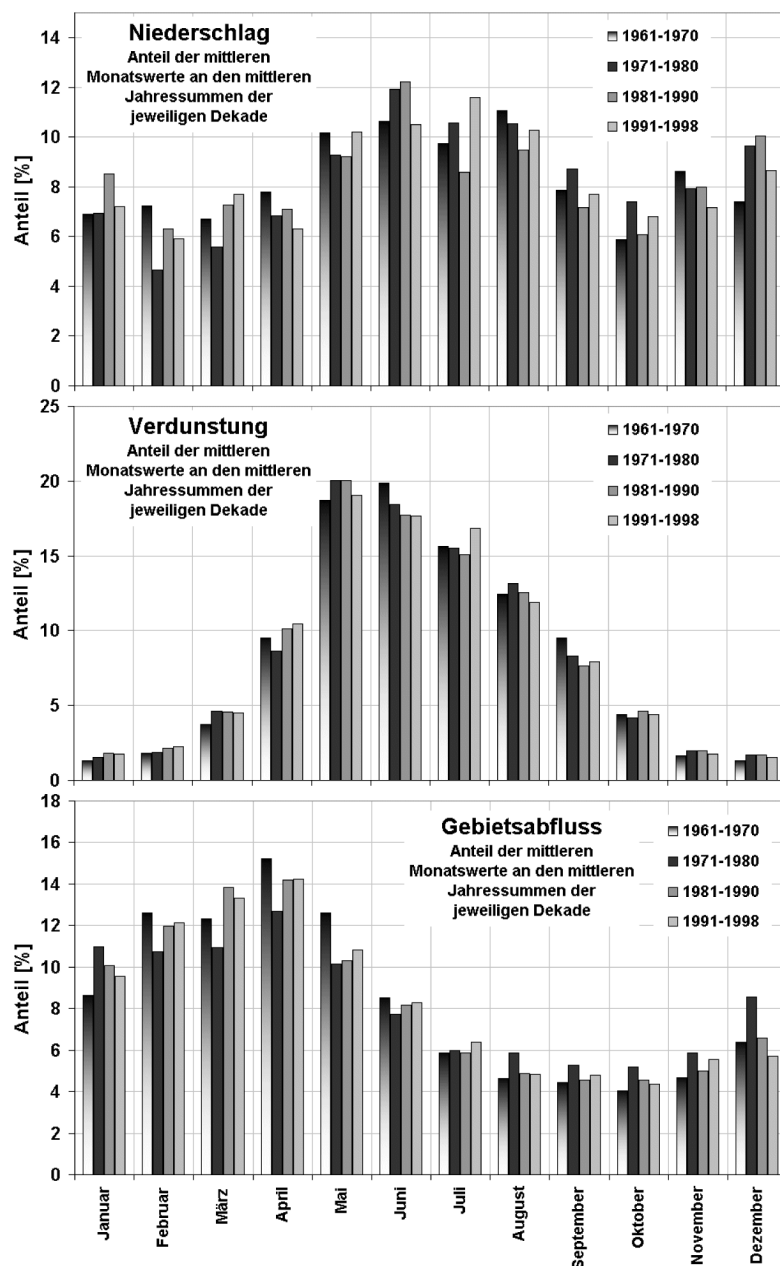


Abb. 5.1 Für das Land Brandenburg berechnete *mittlere Monatssummen* des Niederschlags (oben), der Verdunstung (Mitte) und des Gebietsabflusses (unten) für die *Teilperioden* 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 und 1991-1998. Um innerjährliche Verschiebungen deutlich zu machen, sind die prozentualen Anteile an der jeweiligen mittleren Jahressumme jeder Dekade angegeben.

Eine Ursache abnehmender Grundwasserstände (siehe Kapitel 1) können klimatische Veränderungen sein. Die Auswertung von Ganglinien klimatischer Parameter kann deshalb mögliche Entwicklungstendenzen aufzeigen, die sich auf den Wasserhaushalt insgesamt und auf die gebildete Sickerwassermenge im Besonderen auswirken. Sollten also signifikante Abnahmen der Sickerwasserbildung festgestellt werden, so könnte eine Ursache dieser Änderungen (und damit auch abnehmender Grundwasserstände) in klimatischen Änderungen liegen, die sich z. B. über eine Niederschlagsab- oder eine Temperaturzunahme ausdrücken.

Vor einer detaillierten Analyse der zeitlichen Entwicklung der Sickerwassermenge in Kapitel 6 (Trendanalysen) soll im Kapitel 5 deshalb zunächst die für den untersuchten Zeitraum 1961-1998 berechnete Entwicklung *aller* Wasserhaushaltsgrößen (einschließlich der Sickerwassermenge) im Zusammenhang dargestellt werden. Diese Darstellung dient auch dem Zweck, die zeitliche Dynamik der Sickerwassermenge in Abhängigkeit von den meteorologischen Eingangsgrößen und den anderen Wasserhaushaltsgrößen transparenter zu machen. Kapitel 5.1 beruht dabei auf einer Analyse der für die Periode 1961-1998 berechneten Jahressummen, während Kapitel 5.2 auf den entsprechenden Halbjahreswerten (Sommer- und Wintersummen) aufsetzt.

5.1 Zeitliche Entwicklung von Jahreswerten

Abb. 5.2 zeigt die für die Periode 1961-1998 flächendeckend für das Land Brandenburg berechneten Jahressummen aller meteorologischer Eingangsgrößen sowie der daraus berechneten Wasserhaushalts-

größen (siehe auch Abb. 4.1). Um die zeitliche Entwicklung dieser Größen zu verdeutlichen, sind jeweils sowohl *Regressionsgeraden* als auch *Gleitmittel* über 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Zur Definition dieser statistischen Größen sei auf Kapitel 6.1 verwiesen.

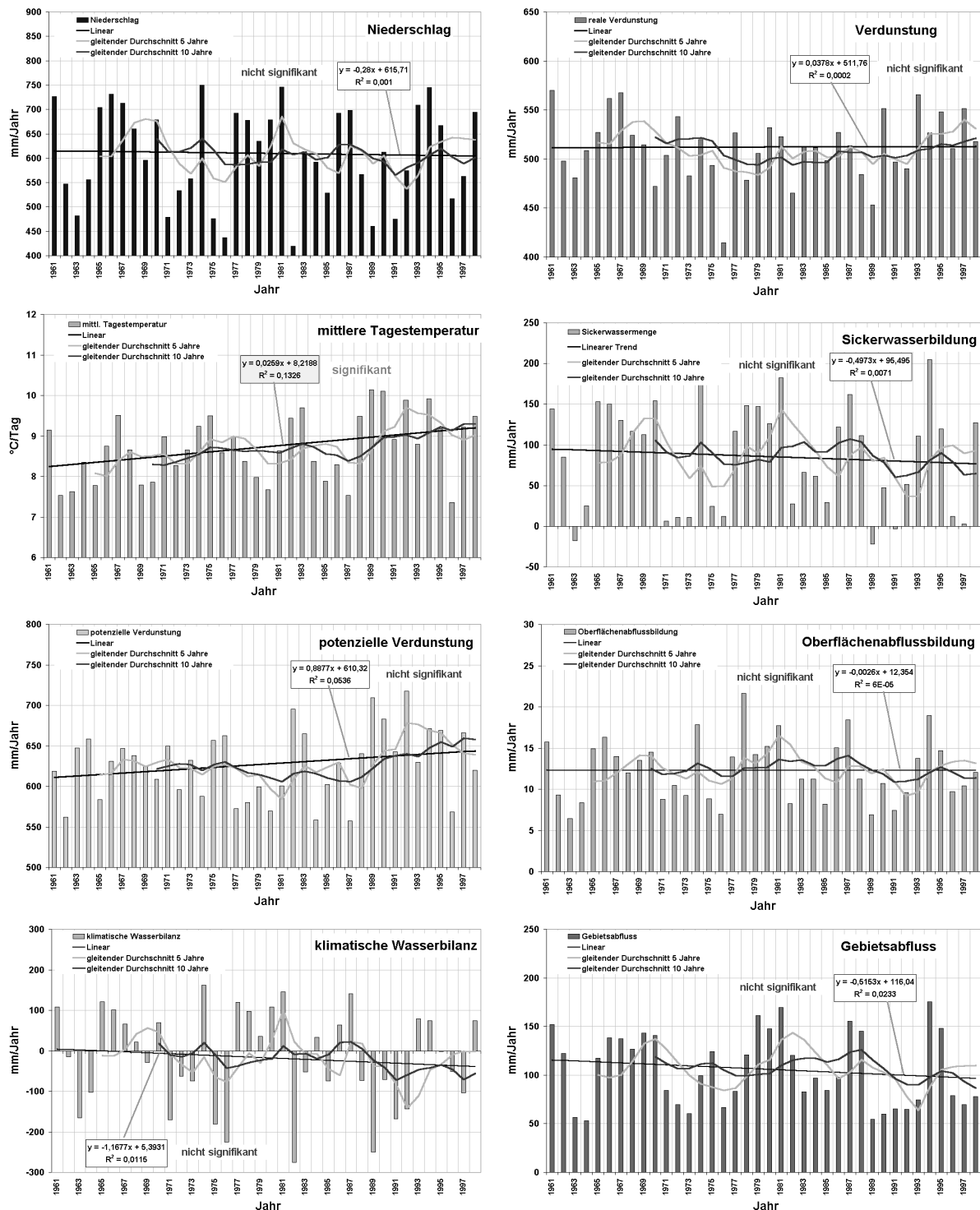


Abb. 5.2 Auf Basis der Jahressummen 1961-1998 berechnete zeitliche Entwicklung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen. Neben Regressionsgeraden sind auch Gleitmittel über 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Bis auf die mittlere Tagestemperatur zeigt keine der dargestellten Größen im Zeitraum 1961-1998 eine statistisch signifikante zeitliche Veränderung (einen Trend).

Obwohl nur für die Sickerwasserbildung detaillierte Trendanalysen durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 6), lassen sich anhand des berechneten Bestimmtheitsmaßes R^2 (vgl. Gleichung 2) Aussagen dazu treffen, ob es sich bei den in Abb. 5.2 dargestellten zeitlichen Entwicklung der verschiedenen Größen um signifikante Änderungen („Trends“) handelt oder nicht. Danach ist im Zeitraum 1961 bis 1998 lediglich der Anstieg der mittleren Tagestemperatur LT von 8,24 °C auf 9,20 °C, d. h. um knapp 1 °C, statistisch signifikant, da das Bestimmtheitsmaß mit einem Wert von $R^2 = 0,13$ über dem für eine 38 Datenpunkte umfassende Reihe kritischen Wert von $R^2 = 0,07$ liegt.

Hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang darauf, dass diese Trendaussage (wie auch die für alle anderen Größen) auf der Basis räumlich interpolierter Tageswerte der meteorologischen Eingangsgrößen gewonnen wurde (vgl. Kapitel 3.3) und sich nicht auf die Auswertung von Temperaturganglinien ausgewählter meteorologischer Stationen stützt. Alle in Abb. 5.2 dargestellten Jahresreihen basieren mithin auf Werten, die flächendeckend für das gesamte Untersuchungsgebiet (Land Brandenburg) berechnet wurden. Daraus folgt aber auch, dass es trotz des Fehlens eines Trends für eine bestimmte meteorologische Größe durchaus einzelne meteorologische Stationen geben kann, an denen die dort gemessene Größe einen statistisch signifikanten Anstieg oder Abfall zeigt. Aus diesem Grunde ist es gefährlich, bei großskaligen Untersuchungen anhand von Punktmessungen auf das Trendverhalten in einem größeren Raum zu schließen.

Der für die potenzielle Verdunstung EP in Abb. 5.2 ausgewiesene Anstieg von 611 mm auf 644 mm, d. h. um etwa 5,4 %, ist gegenüber der Änderung der mittleren Tagestemperatur statistisch nicht signifikant. Dies gilt in gleicher Weise auch für alle anderen in Abb. 5.2 dargestellten Größen, die eine abfallende Tendenz zeigen, wie den Niederschlag PI, der um 10,4 mm oder 1,7 % sinkt, die klimatische Wasserbilanz WB, die innerhalb von 38 Jahren von im Mittel leicht positiven Werten auf einen negativen Wert von etwa -39 mm fällt, die Sickerwasserbildung SWB, die sich in diesem Zeitraum von 95 mm auf 76,6 mm (also um etwa 19 %) reduziert und den Gebietsabfluss QC, der einen Rückgang um knapp 17 % oder 19 mm (von 115,5 mm auf 96,5 mm) aufweist. Alle anderen Größen (Verdunstung ER und Oberflächenabfluss RO) bleiben mehr oder weniger konstant.

Insbesondere ist darauf hinzuweisen, dass eine Verringerung des Niederschlags (vornehmlich im Winterhalbjahr) zwar grundsätzlich zu absinkenden Grundwasserständen führen kann, die für das Land Brandenburg berechneten mittleren Jahresniederschläge jedoch keine statistisch belegbare abnehmende Tendenz aufweisen. Weiterhin erwähnenswert sind die in Abb. 5.2 ausgewiesenen geringen Sickerwassermengen in aufeinander folgenden Jahren (z.B. 1963/64, 1971-1973, 1982-1985, 1989-1992 und 1996/97), die durch unterdurchschnittliche Niederschläge in diesen Perioden hervorgerufen werden und zu fallenden Grundwasserspiegeln führen können.

Betrachtet man die Gleitmittel über 5 bzw. 10 Jahre, so fallen die hohen Korrelationen zwischen PI, WB, SWB und QC auf. Der Niederschlag prägt also wesentlich die letztgenannten drei Wasserhaushaltsgrößen. Die ebenfalls hohen Korrelationen zwischen PI und RO beruhen darauf, dass die Oberflächenabflussbildung auf versiegelten und grundwassernahen Flächen besonders in Phasen hohen Niederschlags auftritt. Die potenzielle Verdunstung EP wird wesentlich durch die mittlere Tagestemperatur LT bestimmt und zeigt deshalb starke Korrelationen zu LT. Der in den Jahreswerten des Gebietsabflusses QC beobachtbare starke Einbruch vom Jahr 1988 auf das Jahr 1989 beruht im Wesentlichen auf der Kombination von hohen mittleren Tagestemperaturen und geringen Niederschlägen im Jahre 1989.

Die anhand der Gleitmittel erkennbaren Zusammenhänge zwischen den Wasserhaushaltsgrößen werden gestützt durch Korrelationsanalysen, die für die Jahreszeitreihen aller in Abb. 5.2 dargestellter Wasserhaushaltsgrößen durchgeführt wurden und deren Ergebnisse in **Tab. 5.1** zusammengefasst sind.

Der *Korrelationskoeffizient* R ist ein Maß für den Grad der linearen Verbindung zwischen zwei Variablen, die eine bivariate Normalverteilung besitzen. Er kann als normalisierte Kovarianz von zwei Variablen x, y berechnet werden:

$$R = \frac{\text{cov}(x, y)}{s_x \cdot s_y} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{n \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (1)$$

Tab. 5.1 Korrelationskoeffizienten R und Bestimmtheitsmaß $B = R^2$ zwischen den für das Land Brandenburg berechneten Jahreswerten (Periode 1961-1998) der meteorologischen Größen Niederschlag (PI) und mittlere Tagestemperatur (LT), den davon abgeleiteten Sekundärgrößen potenzielle Verdunstung (EP) und klimatische Wasserbilanz (WB) sowie den Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung (ER), Sickerwasserbildung (SWB), Oberflächenabflussbildung (RO) und Gebietsabfluss (QC). Statistisch signifikante Werte von R und B^2 (siehe Text) sind hinterlegt.

Korrelationskoeffizient R								
	PI	LT	EP	WB	ER	SWB	RO	QC
PI		-0,01	-0,37	0,95	0,64	0,91	0,88	0,54
LT			0,73	-0,26	0,08	-0,07	-0,09	-0,14
EP				-0,66	-0,17	-0,40	-0,43	-0,29
WB					0,58	0,88	0,87	0,55
ER						0,40	0,45	0,24
SWB							0,91	0,77
RO								0,69
Bestimmtheitsmaß $B = R^2$								
PI		0,00	0,14	0,89	0,41	0,82	0,78	0,30
LT			0,53	0,07	0,01	0,00	0,01	0,02
EP				0,43	0,03	0,16	0,18	0,09
WB					0,34	0,77	0,75	0,30
ER						0,16	0,20	0,06
SWB							0,83	0,59
RO								0,47

Mit Hilfe des Korrelationskoeffizienten kann festgestellt werden, ob sich zwei Messreihen gleich entwickeln. Hängen hohe Werte einer Reihe mit hohen Werten der anderen zusammen, so spricht man von „positiver Korrelation“ (Maximalwert +1). Hängen niedrige Werte einer Reihe mit hohen Werten der anderen zusammen, so handelt es sich um eine „negative Korrelation“ (Minimalwert -1). Ist der Korrelationskoeffizient gleich Null, so besteht zwischen den Werten der beiden Datensätze kein Zusammenhang.

Das *Bestimmtheitsmaß* B stellt eine weitere, weit verbreitete statistische Größe dar, die als Kriterium zur Beurteilung der Stärke des Zusammenhangs zwischen zwei Datenreihen verwendet wird (siehe auch Gleichung 6). B berechnet sich aus dem Korrelationskoeffizienten R nach

$$B = R^2 \quad (2)$$

Tab. 5.2 Bewertung des Korrelationskoeffizienten R nach Chaddock.

Bereich von R	Grad der Korrelation nach Chaddock
< 0,3	sehr gering
0,3 bis 0,5	mäßig
0,5 bis 0,7	deutlich
0,7 bis 0,9	eng
0,9 bis 1,0	sehr eng
1,0	funktional

In Tab. 5.1 sind alle Korrelationskoeffizienten R , deren absoluter Wert 0,275 überschreitet, sowie alle Werte des Bestimmtheitsmaßes B , die größer als 0,07 sind, hinterlegt. Dabei handelt es sich um die Werte von R und B , die im Fall einer 38 Datenpunkte umfassenden Zeitreihe eine statistisch signifikante Beziehung zwischen den Zeitreihen indizieren (Signifikanzniveau = 0,05). **Tab. 5.2** enthält darüber hinaus qualitative Bewertungsmaßstäbe für den Korrelationskoeffizienten R nach Chaddock (MANIAK 1997).

Danach zeigt die Zeitreihe der Sickerwasserbildung SWB statistisch signifikante positive Korrelationen zu den Zeitreihen des Niederschlags PI, der klimatischen Wasserbilanz WB und der Verdunstung ER sowie eine statistisch signifikante negative Korrelation zur Zeitreihe der potenziellen Verdunstung EP. Der Zusammenhang zwischen SWB und PI ist entsprechend Tab. 5.2 dabei als „sehr eng“, der zwischen SWB und WB als „eng“ einzustufen. Die starken Korrelationen zwischen SWB und WB beruhen

darauf, dass WB definitionsgemäß wesentlich durch PI geprägt wird. Die „mäßige“ positive Korrelation zwischen SWB und der realen Verdunstung ER beruht darauf, dass auch ER wesentlich durch den Niederschlag mitbeeinflusst wird. Auf eine weitergehende Interpretation der in Tab. 5.1 angegebenen statistischen Größen soll angesichts der primär interessierenden Größe Sickerwassermenge an dieser Stelle verzichtet werden.

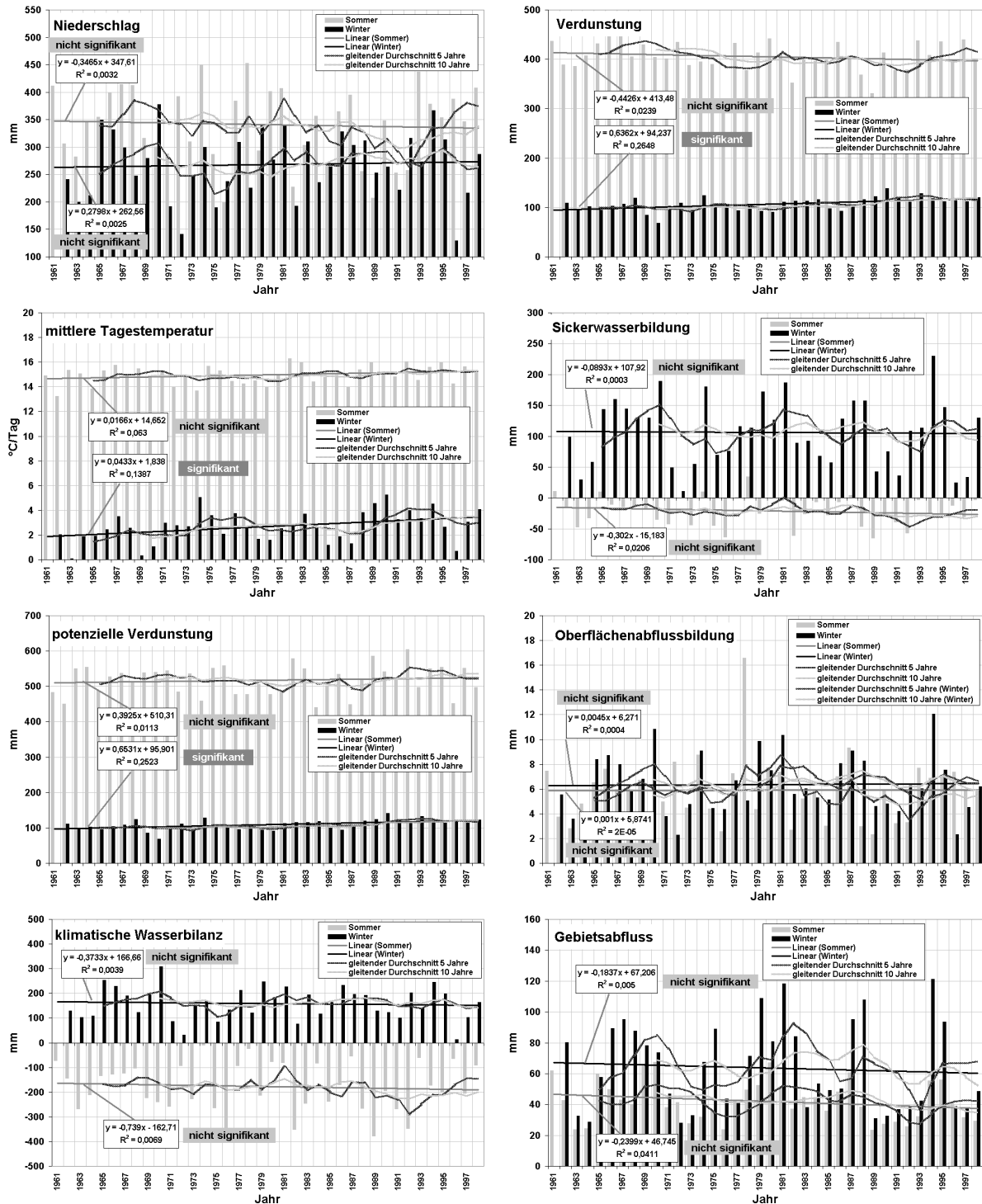


Abb. 5.3 Auf Basis von Halbjahreswerten (Sommer- und Wintersummen) für die Periode 1961-1998 berechnete zeitliche Entwicklung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen. Neben Regressionsgeraden sind Gleitmittel über 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Bis auf die im Winterhalbjahr berechnete mittlere Tagestemperatur, potenzielle und reale Verdunstung zeigt keine der dargestellten Größen im Zeitraum 1961-1998 eine statistisch signifikante zeitliche Veränderung (einen Trend).

5.2 Zeitliche Entwicklung von Halbjahreswerten

Abb. 5.3 zeigt die für die Periode 1961-1998 berechneten Sommer- (Monate Mai bis Oktober) und Wintersummen (Monate November bis April) aller Wasserhaushaltsgrößen, zusammen mit den Regressionsgeraden und den auf Basis von 5 bzw. 10 Jahren berechneten Gleitmitteln. Diese Darstellung untersetzt die in Abb. 5.2 dargestellte zeitliche Entwicklung der Jahreswerte.

Zieht man auch hier das berechnete Bestimmtheitsmaß R^2 heran um zu überprüfen, ob es sich bei den auf Halbjahresbasis berechneten zeitlichen Veränderungen der verschiedenen Größen um signifikante Änderungen („Trends“) handelt, so stellt man fest, dass bis auf die für das Winterhalbjahr berechnete mittlere Tagestemperatur LT, potenzielle Verdunstung EP und reale Verdunstung ER keine der dargestellten Größen im Zeitraum 1961-1998

Tab. 5.3 Aus einer linearen Regression der Jahres-, Sommer- und Wintersummen für die Periode 1961-1998 im Land Brandenburg berechnete Änderungen der meteorologischen Größen Niederschlag (PI) und mittlere Tagestemperatur (LT), der davon abgeleiteten Sekundärgrößen potenzielle Verdunstung (EP) und klimatische Wasserbilanz (WB) sowie der Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung (ER), Sickerwasserbildung (SWB), Oberflächenabflussbildung (RO) und Gebietsabfluss (QC). Lediglich bei den hinterlegten Werten handelt es sich um statistisch signifikante Änderungen (Trends).

Legende: Wert 1961/98 = aus der linearen Regression abgeleiteter Wert zu Beginn (1961) und zum Ende der Periode (1998)
Dif = Differenz zwischen dem End- und Anfangswert
 R^2 = Bestimmtheitsmaß

		Wert 1961	Wert 1998	Dif [mm]	Dif [%]	R^2
Sommer	PI	347,3	334,4	-12,8	-3,7	0,0032
	LT	14,67	15,28	0,61	4,18	0,0630
	EP	510,7	525,2	14,5	2,8	0,0113
	WB	-163,4	-190,8	-27,3	-16,7	0,0069
	ER	413,0	396,7	-16,4	-4,0	0,0239
	SWB	-15,5	-26,7	-11,2	-72,2	0,0206
	RO	5,9	5,9	0,0	0,6	0,0000
	QC	46,5	37,6	-8,9	-19,1	0,0411
Winter	PI	262,8	273,2	10,4	3,9	0,0025
	LT	1,88	3,48	1,60	85,08	0,1387
	EP	96,6	120,7	24,2	25,0	0,2523
	WB	166,3	152,5	-13,8	-8,3	0,0039
	ER	94,9	118,4	23,5	24,8	0,2648
	SWB	110,5	100,7	-9,8	-8,9	0,0024
	RO	6,3	6,4	0,2	2,7	0,0004
	QC	67,0	60,2	-6,8	-10,1	0,0050
Jahr	PI	615,4	605,1	-10,4	-1,7	0,0010
	LT	8,24	9,20	0,96	11,64	0,1326
	EP	611,2	644,0	32,8	5,4	0,0536
	WB	4,2	-39,0	-43,2	-1022,5	0,0115
	ER	511,8	513,2	1,4	0,3	0,0002
	SWB	95,0	76,6	-18,4	-19,4	0,0071
	RO	12,4	12,3	-0,1	-0,8	0,0001
	QC	115,5	96,5	-19,1	-16,5	0,0233

im Winter). Die *Oberflächenabflussbildung* schließlich zeigt auch von der Größenordnung her weder im Sommer noch im Winter nennenswerte Änderungen.

eine statistisch signifikante zeitliche Veränderung (einen Trend) zeigt. Lediglich für die drei genannten Größen liegt das Bestimmtheitsmaß R^2 im Winterhalbjahr mit Werten von 0,14, 0,25 bzw. 0,26 über dem kritischen Wert von 0,07 für eine 38 Datenpunkte umfassende Zeitreihe.

Die Zunahme der mittleren *Tagestemperatur* im Winterhalbjahr fällt dabei mit +1,6 °C recht deutlich aus, während die Änderung im Sommer mit +0,6 °C statistisch nicht signifikant ist. Gleiches gilt für die *potenzielle Verdunstung*, die sich im Jahresmittel zwar um +32,8 mm ändert, aber lediglich in den Wintermonaten mit +24,2 mm eine signifikante Veränderung zeigt. Die Veränderung um +14,5 mm im Sommer ist dem gegenüber statistisch nicht signifikant. Während die Zunahme der *realen Verdunstung* im Winter mit +23,5 mm einen positiven Trend indiziert, stellt die Veränderung um -16,4 mm in den Sommermonaten keinen Trend dar.

Dies gilt in gleicher Weise für die im Zeitraum 1961-1998 auf Halbjahresbasis berechneten Veränderungen des *Niederschlags* (-12,8 mm im Sommer, +10,4 mm im Winter), der *klimatischen Wasserbilanz* (-27,3 mm im Sommer, -13,8 mm im Winter), der *Sickerwasserbildung* (-11,2 mm im Sommer, -9,8 mm im Winter) und des *Gebietsabflusses* (-8,9 mm im Sommer, -6,8 mm

Insbesondere ist also festzustellen, dass im Land Brandenburg in der Periode 1961-1998 kein statistisch belegbarer Trend zu ab- oder zunehmenden Winterniederschlägen zu verzeichnen ist. Dennoch sind in den dargestellten Niederschlagssummen der Winterhalbjahre (wie bereits in den entsprechenden Jahressummen, vgl. Abb. 5.2) mehrjährige Perioden mit unterdurchschnittlichen Werten zu erkennen, die einen relevanten Einfluss auf die Grundwasserneubildung haben. Auch hier ist zu wiederholen, dass die Analysen auf flächeninterpolierten täglichen Niederschlagswerten basieren und nicht auf der Analyse von Zeitreihen für ausgesuchte meteorologische Stationen, die durchaus ein anderes Verhalten zeigen können.

Tab. 5.3 fasst die Änderungen aller Wasserhaushaltsgrößen im Zeitraum 1961-1998 zusammen, die sich aus den Berechnungen auf Jahres- (Abb. 5.2) bzw. auf Halbjahresbasis (Abb. 5.3) ergeben. Angegeben sind jeweils die aus der linearen Regression abgeleiteten Werte zu Beginn (1961) und zum Ende der Periode (1998), die sich daraus ergebenden Differenzen in mm ($^{\circ}\text{C}$ für LT) bzw. % sowie die Werte des Bestimmtheitsmaßes $B = R^2$. Bis auf die farblich hervorgehobenen Werte handelt es sich in allen Fällen um statistisch nicht signifikante Änderungen. Für die in dieser Studie primär interessierende Sickerwasserbildung sollen die Trenduntersuchungen im nachfolgenden Kapitel 6 vertieft werden.

6 Trendanalysen der Sickerwassermenge

Die in Kapitel 5 für alle Wasserhaushaltsgrößen durchgeführten statistischen Analysen stellen bereits eine wesentliche Erweiterung der im Rahmen der Studie „Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg“ (LAHMER et al. 2001b) durchgeführten Auswertungen dar. Weitergehende Trendanalysen der primär interessierenden Sickerwasserbildung sind Thema des vorliegenden Kapitels. Für diese Analysen wurden neben verfügbarer Standardsoftware auch Auswerteprogramme des Projektbearbeiters, des BAH und der Univ. Bochum (SCHUMANN 1995) eingesetzt. Die Analysen liefern wichtige Hinweise zu der Frage, ob sich die im Land Brandenburg anfallende Sickerwassermenge im Zeitraum 1961-1998 signifikant verändert hat und in wieweit sich Veränderungen in der Periode 1991-1998 von denen der vorangehenden Dekaden unterscheiden.

Da der Trend - wie auch die untersuchte Wasserhaushaltsgröße Sickerwassermenge selbst - in Raum und Zeit variiert, sollte er möglichst für eine Vielzahl von Zeitreihen und für verschiedene Bearbeitungszeiten und -intervalle analysiert werden. Zeitliche Veränderungen der mit Hilfe von ArcEGMO berechneten Sickerwassermenge wurden deshalb für verschiedene Bearbeitungszeiten bzw. zeitliche Aggregationsstufen (Jahreswerte, Halbjahreswerte, Quartalswerte sowie Monatswerte) analysiert. Die Ergebnisse sollen nachfolgend in Form von Zeitreihen und Trendkarten dargestellt werden.

6.1 Begriffe und Definitionen

6.1.1 Der Trendbegriff

Ein klimatologischer „Trend“ stellt nach RAPP und SCHÖNWIESE (1995) ein Maß für die Veränderung eines Klimazustandes im Laufe eines bestimmten Zeitraums dar. Dabei werden die Trendwerte einer Klimagröße (z. B. des Niederschlags oder der Temperatur) zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten (oder Zeitintervallen) miteinander verglichen. Diese Definition eines Trends wird in der vorliegenden Studie auf die mit Hilfe eines hydrologischen Modells berechnete Wasserhaushaltsgröße Sickerwasserbildung angewendet. Im Folgenden soll zunächst der Begriff des Trends näher beleuchtet werden.

Unter den verschiedenen Möglichkeiten der Berechnung eines Trends soll auch in dieser Studie durchweg der „lineare Trend“ verstanden werden, der gegenüber anderen Berechnungsmöglichkeiten den Vorzug hat, zum einen (nicht nur in der Klimatologie) weit verbreitet und damit vergleichbar, sondern auch einfach zu berechnen und somit leicht interpretierbar zu sein. Verwendet wird häufig der „absolu-

te Trend“ T_a , der sich im vorliegenden Fall aus der Differenz der zum Ende und zu Beginn der Auswertperiode aus der linearen Regression ermittelten Sickerwasserbildung SWB berechnet:

$$T_a = SWB(1998) - SWB(1961) \quad (3)$$

Bei mengenabhängigen Elementen kann darüber hinaus die Einführung eines „relativen Trends“ T_r zweckmäßig sein, da dieser einen direkten Vergleich von Zeitreihen mit unterschiedlichen Mittelwerten ermöglicht. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, einen relativen Trend auf der Basis der linearen Regression anzugeben, die bei gleicher Ausgangslage zu stark unterschiedlichen Ergebnissen führen. Weit verbreitet ist folgende Variante: Bestimmung der Veränderung der Auswertgröße gegenüber der Situation am Anfang des Untersuchungszeitraums (absoluter Trend), ausgedrückt in Anteilen des Mittelwertes dieser Größe im gesamten Untersuchungszeitraum. Im Fall der Sickerwasserbildung SWB berechnet sich der relative Trend T_r also nach

$$T_r = \frac{SWB(1998) - SWB(1961)}{\text{Mittelwert [SWB(1961 bis 1998)]}} \quad (4)$$

Diese Variante der Trendberechnung hat gegenüber anderen u. a. den Vorteil, dass betragsmäßig gleiche Veränderungen, die sich nur im Vorzeichen unterscheiden (Aufwärts- bzw. Abwärtstrend), nicht zu unterschiedlichen Werten des relativen Trends führen. Im Fall einer Größe wie der Sickerwasserbildung SWB, die um Null variieren (also sowohl positive als auch negative Werte annehmen) kann, führt diese Definition allerdings dann zu vergleichsweise hohen T_r -Werten, wenn der Mittelwert in der Nähe von Null liegt. Da Flächen mit einem solchen Verhalten in der Karte des relativen Trends überproportional betont werden und eine Interpretation der flächenhaften Ausbildung des Trends erschweren, wurde im Rahmen dieser Studie auf Darstellungen von T_r verzichtet.

6.1.2 Linearer Trend

Wie die bereits in den Abb. 5.2 und Abb. 5.3 eingezeichneten Regressionsgeraden wurden alle linearen Trends nach der Methode der kleinsten Quadrate entsprechend folgender Gleichung berechnet:

$$y = mx + b \quad (5)$$

Darin ist m die Steigung und b der Y-Achsenabschnitt.

Das für den linearen Trend in den genannten Abbildungen angegebene *Bestimmtheitsmaß* R^2 berechnet sich nach

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A}_i)^2}{\left(\sum_{i=1}^N A_i^2 \right) - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N A_i \right)^2} \quad (6)$$

und stellt nach Gleichung (2) das Quadrat des in Gleichung (1) definierten Korrelationskoeffizienten R dar.

6.1.3 Gleitmittel

Erste Hinweise auf langfristige Schwingungen und Trends liefern auch die bereits in den Abb. 5.2 und Abb. 5.3 eingezeichneten *Gleitmittel*. Mit ihrer Hilfe werden Werte in den Prognosezeitraum übertra-

gen, die auf dem Mittelwert der Variablen für eine bestimmte Anzahl vorhergehender Perioden beruhen. Die prognostizierten Werte basieren auf der Formel

$$F_{(t+1)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_{t-i+1} \quad (7)$$

wobei N die Anzahl der vorhergehenden Perioden ist, die in den gleitenden Durchschnitt einbezogen werden, A_i den aktuellen Wert zum Zeitpunkt i und F_i den prognostizierten Wert zum Zeitpunkt i darstellen. Der gleitende Durchschnitt liefert Informationen, die bei einem einfachen Durchschnitt aus allen Stammdaten nicht erkennbar sind. Die Anzahl der Punkte auf einer Linie mit gleitendem Durchschnitt ist gleich der Gesamtzahl der Punkte in der Datenreihe abzüglich der Punkte, die für die Periode angegeben werden.

6.1.4 Statistische Signifikanz von Trends

Grundsätzlich lässt sich ein „Trend“ ohne Informationen über seine statistische Signifikanz nicht richtig interpretieren. Deshalb muss eine zusätzliche Aussage darüber getroffen werden, wie „sicher“ die beobachtete Änderung ist, wie deutlich sie sich also gegenüber der gesamten Zeitreihenvariabilität heraushebt. Erst durch eine solche qualifizierende Aussage wird die Bewertung eines Trends möglich.

Ein erster Anhaltspunkt für die Signifikanz eines Trends ist das Trend-Rausch-Verhältnis, das den Trend in Bezug zur Variabilität der Zeitreihe setzt, die wiederum am einfachsten durch die Standardabweichung beschrieben wird. Da diese Vorgehensweise normalverteilte Daten voraussetzt (erfahrungsgemäß sind zeitlich variierende Größen oft normalverteilt oder zumindest symmetrisch, räumlich verteilte Größen oft sehr unsymmetrisch; im Fall der Sickerwasserbildung kann nicht á priori eine Normalverteilung vorausgesetzt werden), wird im Rahmen dieser Studie auf die Verwendung dieses Signifikanzkriteriums verzichtet.

Ein geeignetes Verfahren zur Abschätzung der Signifikanz, das keine Normalverteilung der Daten (oder die Linearität des Trends) voraussetzt, ist der Trendtest nach Mann („*Mann-Test*“) (z. B. HANDBOOK OF HYDROLOGY 1993). Dieser Test bewertet lediglich ein relatives Ansteigen oder Abfallen der Reihenwerte, aus der keinerlei detaillierte Informationen über den zeitlichen Verlauf der Änderung abgeleitet werden können, d. h. ohne zu spezifizieren, ob es sich um einen linearen oder einen nicht-linearen Trend handelt. Der Mann-Trendtest liefert Zahlenwerte, die mit vorgegebenen Vertrauenswerten und Irrtumswahrscheinlichkeiten identifiziert werden können. Die von dieser anspruchsvolleren Methode gelieferten Signifikanzen liegen oftmals höher als die des einfachen Trend-Rausch-Verhältnisses.

Die auch in der vorliegenden Studie verwendete Mann-Statistik berechnet sich für eine Zeitreihe y_t ($t=1...N$) nach:

$$SMK = \sum_{t_1=1}^{N-1} \sum_{t_2=t_1+1}^N ZM_{t_1,t_2} \quad (8)$$

wobei $ZM_{t_1,t_2} = 1$ für $y_{t_1} > y_{t_2}$ (abwärts), $ZM_{t_1,t_2} = -1$ für $y_{t_1} < y_{t_2}$ (aufwärts) und $ZM_{t_1,t_2} = 0$ für $y_{t_1} = y_{t_2}$ (gleichbleibend).

Die Test-Statistik ist

$$Z = \frac{SMK + m}{\sqrt{\frac{1}{18}[N(N-1)(2N+5)]}} \quad (9)$$

wobei $m = 0$ für $SMK < 0$ und $m = -1$ für $SMK > 0$. Ist $SMK = 0$, so wird Z als NULL angenommen.

Die Hypothese eines aufwärts oder abwärts gerichteten Trends kann bei einem Signifikanzlevel α dann nicht verworfen werden, wenn $|z| > u_{1-\alpha/2}$, wobei $u_{1-\alpha/2}$ das $1-\alpha/2$ Quantil der Standard-Normalverteilung ist. Der Signifikanzlevel α wird in den hier durchgeführten Analysen als 0,05 angenommen.

Für die Anwendung des Mann-Tests werden Zeitreihen mit mehr als $N = 40$ Elementen empfohlen. Falls es sich um nicht zu stark autokorrelierte Werte handelt, kann er aber auch für N bis hinunter zu 10 angewendet werden (HANDBOOK OF HYDROLOGY 1993). Da die hier betrachteten Jahreszeitreihen 38 Jahreswerte umfassen, ist die Anwendung des Tests aus diesem Grunde selbst auf Jahresbasis unproblematisch. Einige Analysen wurden darüber hinaus auch auf Basis von Monatswerten durchgeführt, wobei die Anzahl der Zeitreihenelemente dann mit 456 mehr als ausreichend ist.

Bei Anwendung des Mann-Tests ist allerdings zu beachten, dass er je nach zeitlicher Auflösung der Zeitreihen unterschiedliche Ergebnisse liefern kann. So kann z. B. ein auf Basis von Monats- oder Jahreswerten als „signifikant“ erkannter Trend in einer Zeitreihe bei Verwendung von Tageswerten ein „nicht signifikantes“ Ergebnis liefern. Grund dafür sind mögliche Schwingungen in einer Zeitreihe, die erst bei einer höheren Zeitauflösung deutlich werden. Außerdem sollte angemerkt werden, dass der Mann-Test nur dann verlässliche Aussagen liefert, wenn der lokale Anstieg bzw. Abfall der untersuchten Zeitreihe dem gleichen, ungerichteten physikalischen Geschehen unterliegt. Werden die zeitlichen Veränderungen dagegen auch durch andere, zeitlich gerichtete Prozesse beeinflusst, die keinen Trend verursachen, so ist die Anwendung dieses statistischen Tests kritisch zu betrachten.

Weiterhin konnte im Rahmen dieser Studie wegen des zusätzlichen hohen Bearbeitungsaufwandes keine Überprüfung dahingehend stattfinden, in wieweit die Übertragung des Mann-Tests auf hydrologische Daten grundsätzlich gerechtfertigt ist. Da hydrologische Zeitreihen (wie z. B. Abflusszeitreihen) im Gegensatz zu meteorologischen Daten oft „linksschief“ sind, bedarf es weitergehender systematischer Untersuchungen zu grundlegenden Eigenschaften der hier analysierten Sickerwasserbildung, die aus den genannten Gründen allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Studie waren.

6.2 Trends in den Jahres-, Sommer- und Wintersummen

Abb. 6.1 zeigt die bereits in Abb. 3.4 sowie in Zusammenhang mit allen anderen Wasserhaushaltsgrößen (Abb. 5.2) dargestellten Jahreswerte der Sickerwasserbildung. Neben der linearen Regression und den (der untersuchten Gesamtperiode angepassten) Gleitmitteln für 5 und 10 Jahre ist diesmal (und in den folgenden Abbildungen) auch der Mittelwert sowie der 1-Sigma-Bereich (Mittelwert plus oder minus Standardabweichung) eingezeichnet. Die Regressionsgerade induziert eine Abnahme der Sickerwassermenge von 95 mm im Jahre 1961 auf 76,6 mm im Jahre 1998, d. h. um 18,4 mm oder 19,4 % (siehe auch Tab. 6.1). Wie im Folgenden näher ausgeführt wird, handelt es sich bei dieser Abnahme der jährlichen Sickerwassermenge jedoch um keinen Trend, da diese Abnahme statistisch nicht signifikant ist.

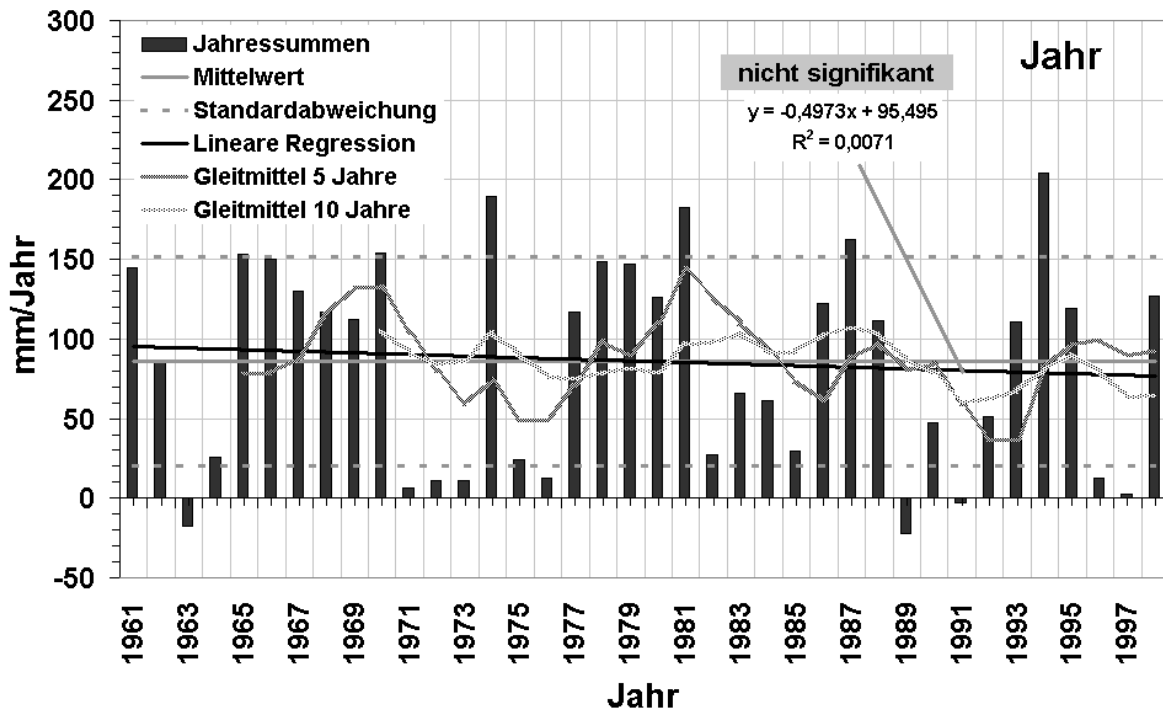


Abb. 6.1 Für das Land Brandenburg auf der Basis von *Jahressummen* für die Periode 1961-1998 berechnete Werte der Sickerwasserbildung. Neben dem Mittelwert und dem 1-Sigma-Bereich sind die Regressionsgerade und Gleitmittel für 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Die durch die Regressionsgerade angezeigte Abnahme der Sickerwassermenge ist statistisch nicht signifikant, d. h. es handelt sich um keinen Trend.

Um die Frage nach der Signifikanz zu beantworten, wurden mit Hilfe des bereits erwähnten Trendprogramms (SCHUMANN 1995) Trendanalysen auf der Basis der Jahressummen der Sickerwasserbildung für den Gesamtzeitraum 1961-1998 durchgeführt. Das Programm kann grundsätzlich für die Analyse monatlicher oder jährlicher Zeitreihen verwendet werden und maximal 20 Zeitreihen gleichzeitig analysieren.

Eine zusätzliche Möglichkeit besteht darin, Teilzeitreihen der Gesamtreihe 1961-1998 statistisch auszuwerten. Dazu wird zunächst die gesamte Zeitreihe, anschließend die Zeitreihe partiell analysiert („fraktionale Trendanalyse“). Die Zeitreihe wird dazu in zwei gleich große Teilreihen unterteilt, und die Trendanalyse wird für die zweite Hälfte der Zeitreihe durchgeführt. Der Trennpunkt wird anschließend (beginnend in der Mitte) schrittweise zum Ende der Zeitreihe bewegt, und für jede Teilreihe wird die Trendanalyse wiederholt. Auf diese Weise werden Änderungen in den letzten Jahren langer Zeitreihen gefunden. Auch bei diesem Vorgehen wird der Mann-Test dazu verwendet, einen Trend innerhalb des zweiten Teils der Zeitreihe zu suchen. Wird als Resultat eine signifikante Tendenz für einen Anstieg oder Abfall erkannt, so wird das lineare Regressionsmodell angewandt. Auf die Darstellung von Ergebnissen solcher fraktionaler Trendanalyse wird im Folgenden an geeigneter Stelle Bezug genommen.

Die mit Hilfe dieses Programms durchgeführten statistischen Analysen zeigen, dass es sich bei der in Abb. 6.1 dargestellten Abnahme der für das Gesamtgebiet berechneten jährlichen Sickerwasserbildung um keinen signifikanten Trend handelt. Diese Aussage wird durch das Bestimmtheitsmaß R^2 unterstützt, das im vorliegenden Fall mit einem Wert von 0,0071 weit unter dem für eine 38 Datenpunkte umfassende Reihe kritischen Wert von 0,07 liegt.

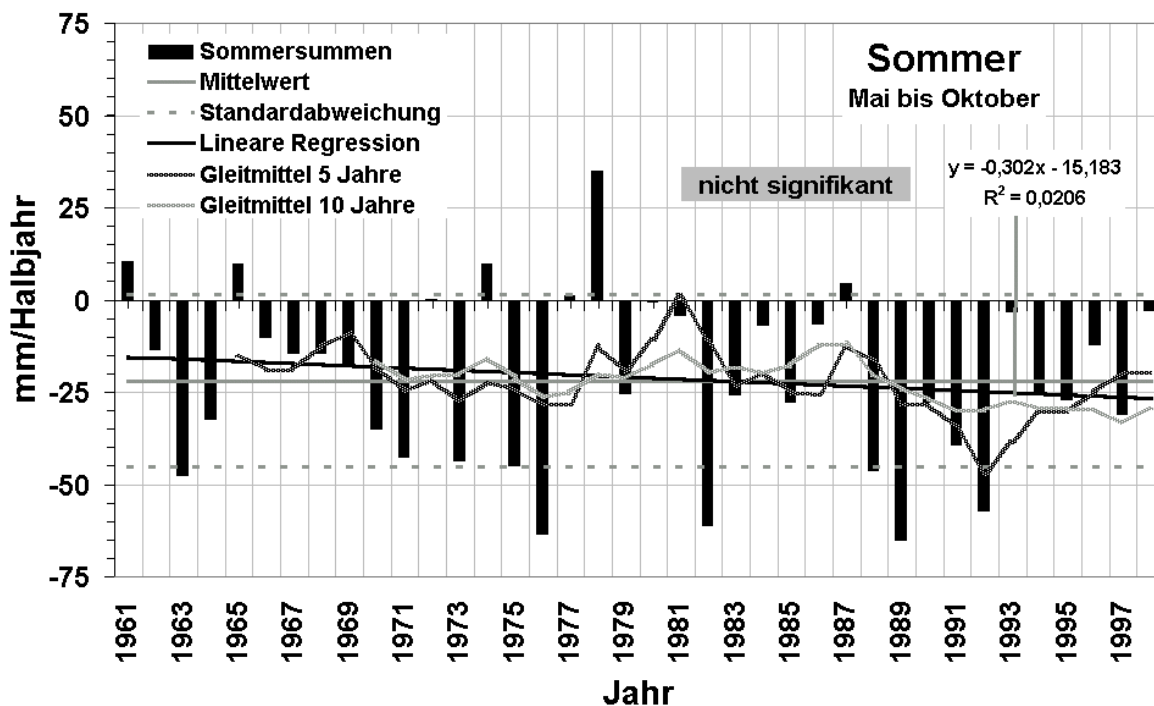
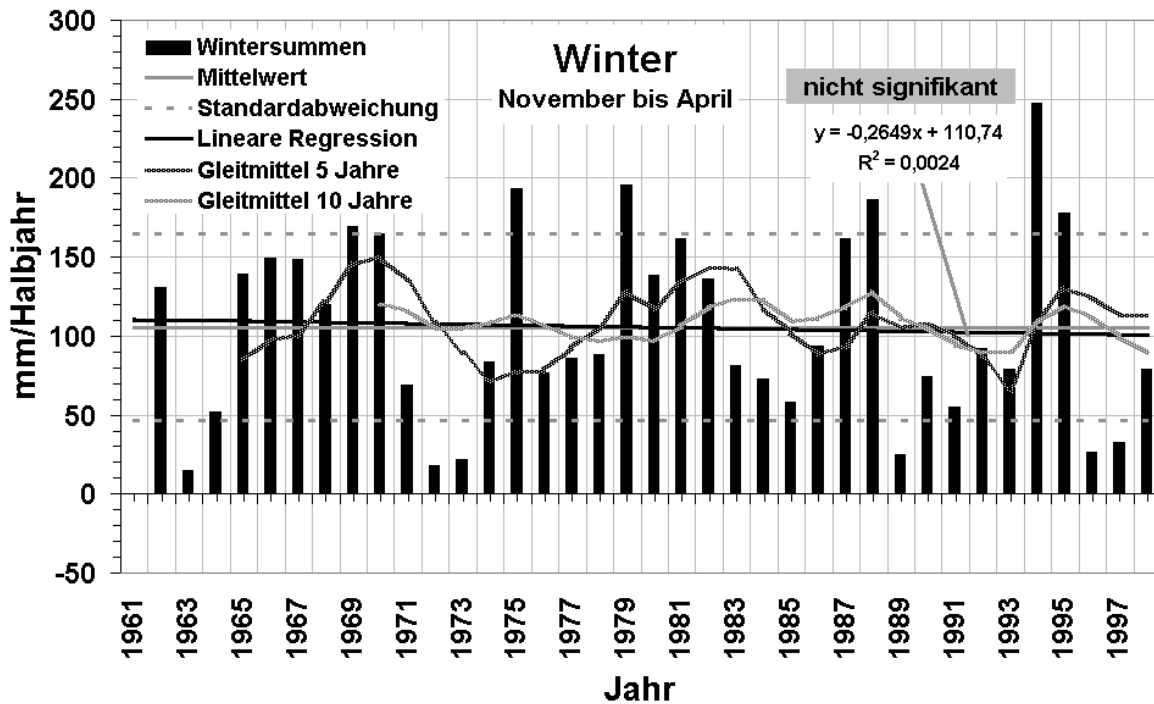


Abb. 6.2 Für das Land Brandenburg auf der Basis von Winter- und Sommersummen für die Periode 1961-1998 berechnete Werte der Sickerwasserbildung. Neben dem Mittelwert und dem 1-Sigma-Bereich sind die Regressionsgeraden und Gleitmittel für 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Die durch die Regressionsgeraden angezeigten Abnahmen der Sickerwassermenge sind weder für das Winter- noch für das Sommerhalbjahr statistisch signifikant, d. h. es handelt sich in beiden Fällen um keinen Trend.

Abb. 6.2 bricht die in Abb. 6.1 dargestellten Jahreswerte auf Halbjahreswerte herunter. Dargestellt sind die für das Land Brandenburg auf der Basis von Winter- (November bis April) und Sommersummen (Mai bis Oktober) berechneten Werte der Sickerwasserbildung für die Periode 1961-1998. Um zu klä-

ren, ob die Halbjahreswerte der Sickerwassermenge eine statistisch signifikante Änderung aufweisen, wurden mit Hilfe des Trendprogramms auch hier Trendanalysen durchgeführt. Diese zeigen, dass für den Gesamtzeitraum 1961-1998 weder die Winter- noch die Sommersummen einen Trend aufweisen. Diese Aussage wird durch die Werte des Bestimmtheitsmaßes R^2 gestützt, die mit 0,0024 bzw. 0,0206 wie im Fall der analysierten Jahreswerte unter dem für eine 38-jährige Zeitreihe kritischen Wert von 0,07 liegen. Signifikante Abnahmen der Sickerwassermenge lassen sich lediglich für die 10-jährigen Teilperioden 1982-1992 und 1988-1998 ausweisen (fraktionale Trendanalyse). In diesem Zusammenhang ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die geringe Anzahl von Werten eine sichere statistische Aussage nicht zulässt.

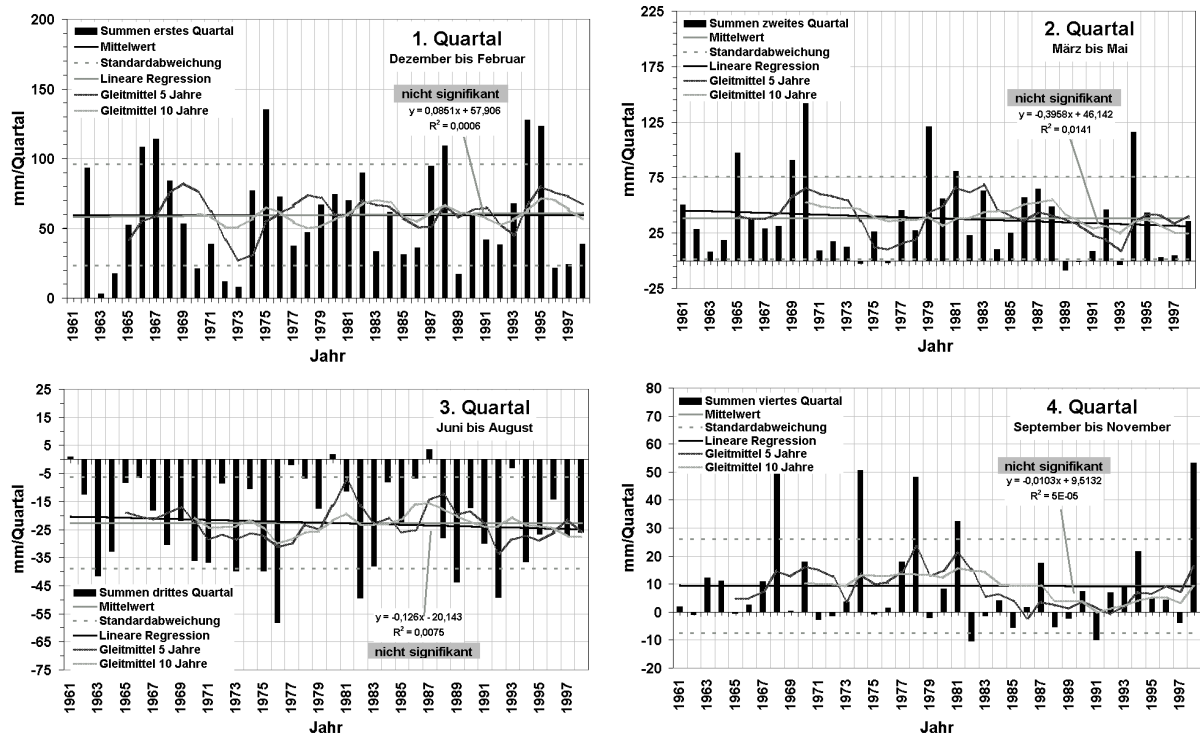


Abb. 6.3 Für das Land Brandenburg auf der Basis von *Quartalssummen* für die Periode 1961-1998 berechnete Werte der Sickerwasserbildung. Neben dem Mittelwert und dem 1-Sigma-Bereich sind die Regressionsgeraden und Gleitmittel für 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Die durch die Regressionsgeraden angezeigten Änderungen der Sickerwassermenge sind für keines der vier Quartale statistisch signifikant, d. h. es handelt sich in keinem Fall um einen Trend.

Die zuvor auf der Basis von Jahres- und Halbjahreswerten durchgeführten Analysen wurden auf die zeitliche Aggregationsstufe von Quartalswerten erweitert um festzustellen, ob sich für eines oder mehrere der vier Quartale statistisch signifikante Änderungen der Sickerwassermenge feststellen lassen. **Abb. 6.3** zeigt die Ergebnisse für die Monate Dezember bis Februar (1. Quartal, „Winter“), März bis Mai (2. Quartal, „Frühling“), Juni bis August (3. Quartal, „Sommer“) und September bis November (4. Quartal, „Herbst“).

Die statistischen Analysen zeigen, dass für den Gesamtzeitraum 1961-1998 keine der Quartalssummen einen Trend aufweist. Das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt mit Werten von 0,0006, 0,0141, 0,0075 und 0,00005 in allen Fällen unter dem kritischen Wert von 0,07. Somit handelt es sich auch bei der durch die lineare Regression im zweiten Quartal für den Zeitraum 1961-1998 angezeigte Abnahme der Sickerwassermenge um ca. 32 % um keinen statistisch belegbaren Trend.

Tab. 6.1 fasst die Ergebnisse der für das Land Brandenburg berechneten mittleren Jahres-, Winter-, Sommer- und Quartalssummen der Sickerwasserbildung (Periode 1961-1998) sowie die daraus abgelei-

teten Werte der statistischen Analysen zusammen. Zu beachten ist, dass die Datenreihen für das erste Quartal (Dezember bis Februar) und das erste Halbjahr (November bis April) lediglich aus 37 Werten bestehen, was bei den statistischen Analysen berücksichtigt wurde.

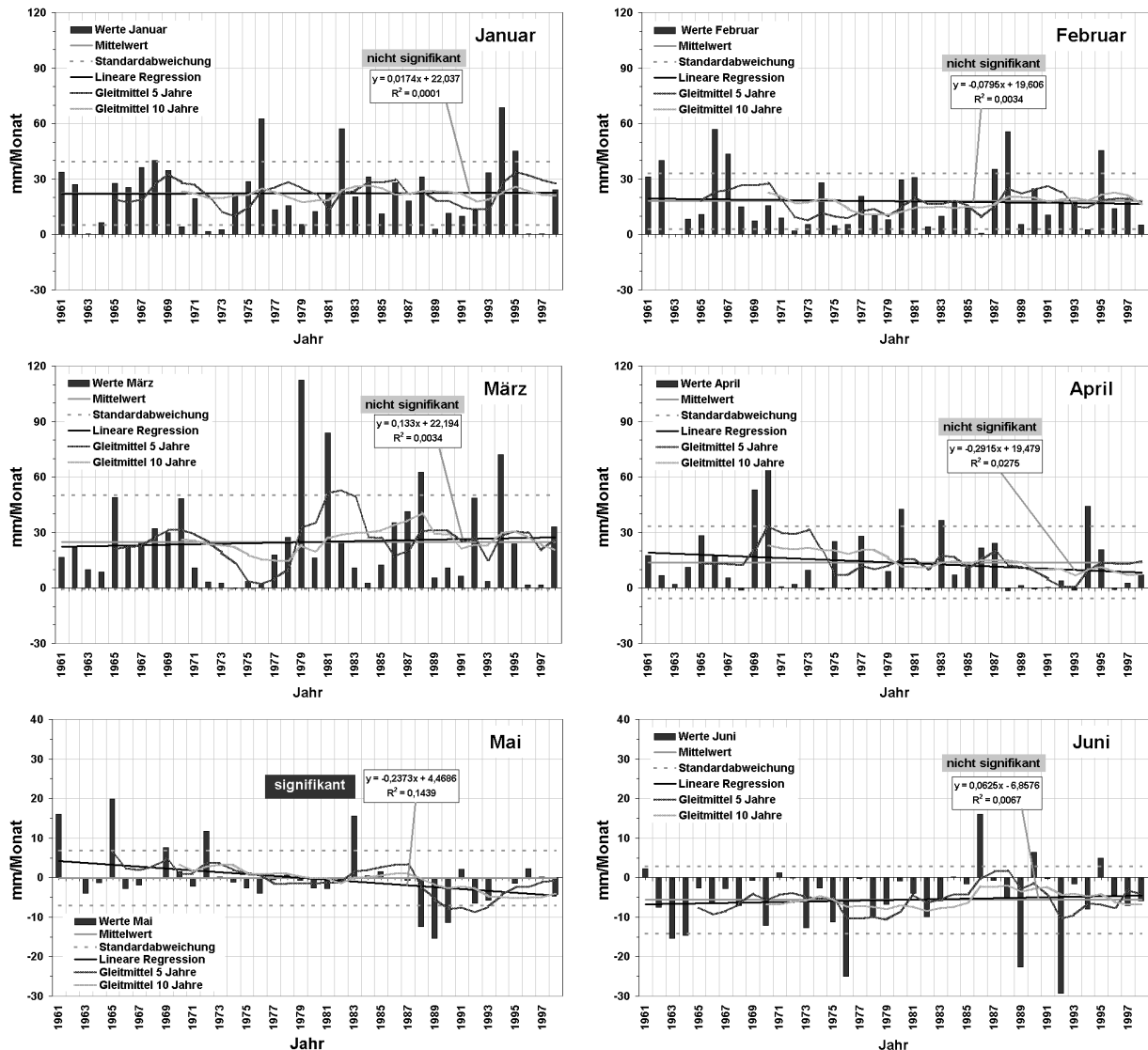
Tab. 6.1 Für das Land Brandenburg berechnete Jahres-, Winter-, Sommer- und Quartalssummen der Sickerwasserbildung (Periode 1961-1998) und daraus abgeleitete Werte der statistischen Analysen.

Summen Sickerwasserbildung Periode 1961-1998							
JAHR	Jahr	Winter	Sommer	1. Quartal	2. Quartal	3. Quartal	4. Quartal
1961	144,59		10,56		50,33	0,90	2,01
1962	85,05	130,62	-13,34	93,48	28,59	-12,38	-0,82
1963	-17,78	14,96	-47,39	3,25	7,89	-41,46	12,21
1964	25,42	51,61	-32,30	17,41	18,69	-32,66	11,05
1965	152,92	139,21	9,62	52,41	97,33	-8,33	-0,45
1966	150,05	149,54	-10,09	108,27	37,00	-6,47	2,62
1967	130,24	148,30	-14,27	114,00	28,96	-18,14	10,88
1968	116,51	120,11	-14,26	84,05	30,93	-30,33	49,32
1969	112,56	169,49	-16,93	53,29	90,48	-21,76	0,45
1970	154,08	164,70	-35,08	21,27	141,72	-35,98	17,97
1971	6,58	68,91	-42,47	38,82	9,36	-36,70	-2,67
1972	10,97	18,24	0,28	11,88	17,19	-8,45	-1,46
1973	11,13	22,14	-43,44	8,07	12,64	-39,76	3,68
1974	189,61	83,29	9,73	77,01	-2,33	-10,48	50,52
1975	24,32	193,20	-44,80	135,23	26,16	-39,67	-0,72
1976	12,48	76,33	-63,46	72,74	-2,07	-58,23	1,59
1977	116,66	86,11	1,03	37,32	45,37	-1,93	18,04
1978	148,39	88,54	34,82	47,22	27,40	-6,78	48,10
1979	147,17	195,77	-25,24	67,05	120,82	-17,42	-1,99
1980	125,90	138,45	-0,37	74,51	56,19	1,70	8,33
1981	182,74	161,39	-4,00	69,97	80,87	-11,39	32,39
1982	27,58	136,06	-61,21	89,93	22,90	-49,40	-10,37
1983	66,09	81,04	-25,78	33,28	62,90	-38,12	-1,32
1984	61,43	73,01	-6,62	61,53	10,05	-7,95	4,19
1985	29,46	58,16	-27,56	31,35	25,00	-23,01	-5,46
1986	121,99	93,95	-6,44	36,16	56,95	-6,69	1,79
1987	162,19	161,72	4,51	94,85	64,95	3,52	17,61
1988	111,54	186,56	-46,25	109,40	48,77	-27,85	-5,23
1989	-22,07	25,22	-64,98	17,36	-8,22	-43,81	-2,31
1990	47,49	74,35	-27,74	60,30	-0,88	-17,24	7,51
1991	-3,21	55,33	-39,22	41,94	8,82	-29,83	-9,95
1992	51,32	92,29	-57,21	38,14	46,25	-49,24	6,96
1993	110,66	78,82	-3,01	68,01	-3,40	-3,01	8,84
1994	204,53	247,29	-25,06	127,96	115,85	-36,52	21,62
1995	119,54	177,76	-27,00	123,19	43,25	-26,54	5,13
1996	12,27	26,74	-12,02	21,76	3,14	-14,25	4,25
1997	2,78	32,83	-30,91	24,23	4,48	-27,13	-3,74
1998	127,11	79,24	-2,78	38,89	35,82	-26,01	53,29
Mittelwert [mm]	85,80	105,44	-21,93	59,61	38,42	-22,60	9,31
Standardabweichung [mm]	65,60	59,03	23,37	36,26	37,07	16,22	16,73
Korrelationskoeffizient R	-0,084	-0,049	-0,144	0,025	-0,119	-0,086	-0,007
Bestimmtheitsmaß B	0,0071	0,0024	0,0206	0,0006	0,0141	0,0075	0,0000
Steigung [mm/Jahr]	-0,497	-0,265	-0,302	0,085	-0,396	-0,126	-0,010
Regressionswert 1961 [mm]	95,00	110,47	-15,48	57,99	45,75	-20,27	9,50
Regressionswert 1998 [mm]	76,60	100,67	-26,66	61,14	31,10	-24,93	9,12
Änderung 1961-1998 [mm]	-18,40	-9,80	-11,17	3,15	-14,64	-4,66	-0,38
Änderung 1961-1998 [%]	-19,37	-8,87	-72,16	5,43	-32,01	-23,00	-4,01

Wie die in der Tabelle angegebenen Werte des Korrelationskoeffizienten R und des Bestimmtheitsmaßes B zeigen, liegen die Summen der Sickerwasserbildung für alle bisher diskutierten zeitlichen Aggregationsstufen jeweils deutlich unter den kritischen Wert von $R \approx 0,265$ bzw. $B = R^2 \approx 0,07$.

6.3 Trends in den Monatssummen

Da sich auch auf Quartalsbasis keine Trends in der berechneten Sickerwasserbildung nachweisen ließen, wurden abschließend Trendanalysen auf Monatsbasis durchgeführt. **Abb. 6.4** zeigt die für den Zeitraum 1961-1998 berechneten Monatssummen für die Monate Januar bis Dezember samt der Ergebnisse der statistischen Analysen. Danach ist lediglich für den Monat Mai eine statistisch signifikante Abnahme der Sickerwassermenge festzustellen. Das Bestimmtheitsmaß B der Regressionsgerade liegt mit 0,1439 deutlich über dem kritischen Wert von 0,07. Dem gegenüber fällt der durch die lineare Regression nahe gelegte Rückgang im August mit einem Wert von $B = 0,0507$ gerade unter die Signifikanzschwelle eines statistisch belegbaren Trends. Die Änderungen der Sickerwassermenge für alle anderen Monate fallen noch erheblich deutlicher unter diese Schwelle.



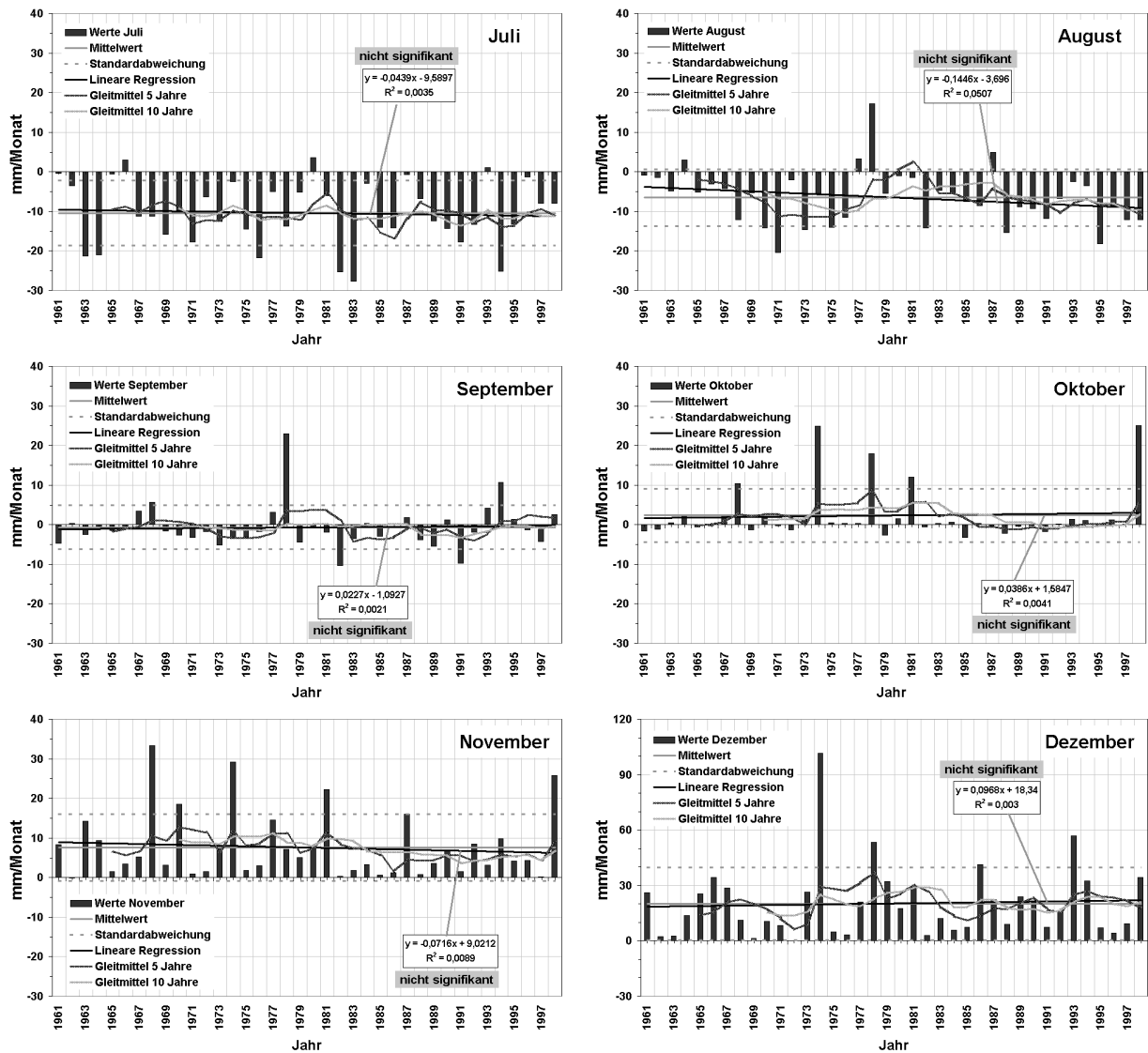


Abb. 6.4 Für das Land Brandenburg auf der Basis von *Monatssummen* für die Periode 1961-1998 berechnete Werte der Sickerwasserbildung. Neben dem Mittelwert und dem 1-Sigma-Bereich sind die Regressionsgeraden und Gleitmittel für 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Die durch die Regressionsgeraden angezeigten Änderungen der Sickerwassermenge sind lediglich für den Monat Mai signifikant, d. h. nur für diesen Monat handelt es sich um einen statistisch nachweisbaren Trend.

Tab. 6.2 gibt einen Überblick über die für das Land Brandenburg auf der zeitlichen Aggregationsstufe von Monaten berechneten Werte der Sickerwasserbildung in der Periode 1961-1998 sowie die daraus abgeleitete Werte der statistischen Analysen.

6.4 Flächendifferenzierte Darstellung der Trends

Neben den bisher diskutierten Trendanalysen zeitlich unterschiedlich aggregierter Zeitreihen sind auch Aussagen darüber von Interesse, welche Teilflächen im Land Brandenburg eine signifikante Änderung in der Sickerwassermenge aufweisen. Dazu wurden für die Monatssummen der Sickerwassermenge aller 1.599 Einzelflächen (Hydrotope) Trendanalysen für die Gesamtperiode 1961-1998 durchgeführt. Die monatliche Auflösung wurde gewählt, um bei der Signifikanzprüfung die Konsistenz mit dem bereits erwähnten Trendprogramm (SCHUMANN 1995) sicherzustellen.

Tab. 6.2 Für das Land Brandenburg berechnete *Monatssummen* der Sickerwasserbildung (Periode 1961-1998) und daraus abgeleitete Werte der statistischen Analysen. Statistisch signifikante Werte des Bestimmtheitsmaßes B, die einem Trend der Sickerwasserbildung entsprechen, sind hervorgehoben.

Monatssummen der Sickerwasserbildung für die Periode 1961-1998												
JAHR	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
1961	33,88	31,29	16,75	17,61	15,97	2,20	-0,46	-0,84	-4,75	-1,56	8,32	26,18
1962	27,09	40,21	22,07	6,76	-0,23	-7,49	-3,49	-1,41	0,35	-1,08	-0,09	2,36
1963	0,60	0,29	9,85	1,95	-3,91	-15,33	-21,33	-4,79	-2,46	0,45	14,23	2,70
1964	6,35	8,37	8,74	11,23	-1,28	-14,64	-21,03	3,00	-0,60	2,25	9,40	13,64
1965	27,70	11,07	48,93	28,48	19,92	-2,56	-0,62	-5,16	-1,38	-0,59	1,52	25,60
1966	25,62	57,04	22,13	17,63	-2,76	-6,38	3,01	-3,09	-0,66	-0,21	3,49	34,23
1967	36,18	43,60	25,15	5,65	-1,85	-2,73	-11,20	-4,21	3,41	2,31	5,16	28,77
1968	40,13	15,15	32,08	-1,18	0,04	-7,02	-11,20	-12,10	5,64	10,39	33,30	11,30
1969	34,62	7,37	29,91	52,99	7,57	-0,76	-15,78	-5,22	-1,51	-1,22	3,19	1,40
1970	4,32	15,55	48,24	92,00	1,48	-12,05	-9,72	-14,20	-2,63	2,04	18,55	10,49
1971	19,45	8,88	10,76	0,79	-2,19	1,29	-17,65	-20,34	-3,26	-0,32	0,91	8,28
1972	1,71	1,89	3,38	2,07	11,74	-0,18	-6,30	-1,97	-1,69	-1,31	1,54	0,09
1973	2,62	5,36	2,78	9,74	0,12	-12,68	-12,47	-14,61	-5,15	1,35	7,48	26,58
1974	22,26	28,17	-0,23	-0,96	-1,14	-2,62	-2,48	-5,38	-3,53	24,87	29,17	101,48
1975	28,82	4,93	3,74	25,06	-2,64	-11,25	-14,46	-13,96	-3,02	0,53	1,77	4,80
1976	62,49	5,45	2,34	-0,52	-3,89	-24,97	-21,76	-11,50	-1,73	0,39	2,93	3,25
1977	13,32	20,76	17,89	27,97	-0,49	-0,27	-5,02	3,36	3,18	0,27	14,60	21,10
1978	15,76	10,36	27,46	-0,75	0,69	-10,15	-13,79	17,16	22,99	17,93	7,19	53,55
1979	5,53	7,96	112,40	9,14	-0,72	-6,73	-5,21	-5,48	-4,41	-2,68	5,11	32,26
1980	12,47	29,77	16,23	42,60	-2,64	-0,87	3,54	-0,98	-0,88	1,46	7,76	17,44
1981	21,62	30,92	83,98	-0,32	-2,79	-3,93	-5,97	-1,49	-1,91	12,08	22,21	28,34
1982	57,28	4,31	24,61	-0,68	-1,03	-9,90	-25,33	-14,17	-10,30	-0,48	0,41	2,86
1983	20,50	9,91	10,88	36,47	15,55	-5,86	-27,56	-4,70	-3,53	0,33	1,89	12,22
1984	31,11	18,21	2,65	6,95	0,46	0,25	-2,88	-5,32	0,28	0,59	3,32	5,83
1985	11,20	14,31	12,62	10,87	1,51	-1,52	-13,94	-7,55	-2,90	-3,16	0,60	7,41
1986	28,08	0,67	35,36	21,83	-0,24	15,99	-14,21	-8,47	0,19	0,30	1,30	41,20
1987	18,36	35,29	41,35	24,23	-0,62	-0,74	-0,66	4,92	1,87	-0,25	15,99	22,46
1988	31,28	55,66	62,55	-1,38	-12,40	-5,77	-6,73	-15,35	-3,79	-2,21	0,77	8,92
1989	2,84	5,60	5,55	1,55	-15,32	-22,59	-12,43	-8,79	-5,39	-0,47	3,55	23,82
1990	11,55	24,93	10,89	-0,40	-11,37	6,41	-14,37	-9,28	1,17	-0,29	6,63	21,63
1991	9,82	10,49	6,34	0,43	2,05	-0,23	-17,74	-11,86	-9,68	-1,76	1,50	7,44
1992	13,25	17,45	48,76	3,89	-6,40	-29,19	-13,22	-6,84	-1,82	0,25	8,53	16,65
1993	33,49	17,87	3,52	-1,25	-5,67	-1,61	1,09	-2,50	4,24	1,43	3,18	56,86
1994	68,54	2,56	72,06	44,09	-0,30	-7,95	-25,08	-3,49	10,64	1,12	9,86	32,48
1995	45,18	45,53	23,82	20,88	-1,45	4,91	-13,23	-18,22	1,34	-0,36	4,15	6,98
1996	0,56	14,22	1,72	-0,89	2,32	-4,45	-1,28	-8,52	-1,27	1,18	4,33	4,34
1997	0,48	19,41	1,56	2,71	0,21	-7,04	-7,99	-12,10	-4,24	0,25	0,25	9,29
1998	24,25	5,35	33,15	6,95	-4,27	-5,85	-8,02	-12,15	2,49	25,01	25,78	34,42
Mittelwert [mm]	22,38	18,06	24,79	13,79	-0,16	-5,64	-10,45	-6,52	-0,65	2,34	7,63	20,23
Standardabweichung [mm]	17,18	15,20	25,33	19,53	6,95	8,47	8,20	7,14	5,52	6,72	8,44	19,67
Korrelationskoeffizient R	0,011	-0,058	0,058	-0,166	-0,379	0,082	-0,059	-0,225	0,046	0,064	-0,094	0,055
Bestimmtheitsmaß B	0,0001	0,0034	0,0034	0,0275	0,1439	0,0067	0,0035	0,0507	0,0021	0,0041	0,0089	0,0030
Steigung [mm/Jahr]	0,017	-0,079	0,133	-0,292	-0,237	0,062	-0,044	-0,145	0,023	0,039	-0,072	0,097
Regressionswert 1961 [mm]	22,05	19,53	22,33	19,19	4,23	-6,80	-9,63	-3,84	-1,07	1,62	8,95	18,44
Regressionswert 1998 [mm]	22,70	16,59	27,25	8,40	-4,55	-4,48	-11,26	-9,19	-0,23	3,05	6,30	22,02
Änderung 1961-1998 [mm]	0,64	-2,94	4,92	-10,79	-8,78	2,31	-1,62	-5,35	0,84	1,43	-2,65	3,58
Änderung 1961-1998 [%]	2,92	-15,06	22,04	-56,21	-207,48	34,03	-16,86	-139,30	78,47	87,97	-29,59	19,42

Da dieses Programm nur für die gleichzeitige Analyse von bis zu 20 Zeitreihen geeignet ist, wurde vom BAH ein Auswerteprogramm erstellt, das die Ergebnisse der Trendanalysen in die Fläche überträgt. Dabei werden die von ArcEGMO erzeugten, jeweils 456 Monatswerte umfassenden Zeitreihen für alle 1.599 Hydrotope gleichzeitig analysiert und die Ergebnisse (Steigung, Anfangs- und Endwert der Regressionsgeraden, aus der linearen Regression resultierende Änderung sowie Korrelationskoeffizient) in einem direkt von ArcView™ lesbaren Format bereitgestellt. Die Signifikanzprüfung für alle 1.599 Einzelflächen erfolgt auch in diesem Auswerteprogramm mit Hilfe des Mann-Testes.

Im Folgenden werden verschiedene Ergebnisse der flächendifferenzierte Trendanalysen dargestellt und diskutiert. Dazu gehören neben räumlichen Verteilungen des berechneten Korrelationskoeffizienten (Kapitel 6.4.1) Karten des „absoluten“ Trends mit den aufgrund der linearen Regression ausgewiesenen Differenzen der jährlichen Sickerwassermenge zwischen dem Anfangs- und dem Endzustand (Kapitel 6.4.2). Aus den zu Beginn von Kapitel 6 angegebenen Gründen wird auf Kartendarstellungen des ebenfalls berechneten „relativen Trends“ dagegen verzichtet.

6.4.1 Räumliche Verteilung des Korrelationskoeffizienten

In den Abbildungen der Kapitel 5 und 6 wurde in Zusammenhang mit den linearen Regressionsgeraden der Zeitreihen der Sickerwasserbildung jeweils das in Gleichung (2) definierte Bestimmtheitsmaß B angegeben, das dem Quadrat des in Gleichung (1) angegebenen Korrelationskoeffizienten R entspricht. Für die flächendeckenden Darstellungen der Veränderungen der Sickerwasserbildung wurde R ebenfalls berechnet, und zwar getrennt für alle 1.599 ausgewiesenen Einzelflächen (Hydrotpe).

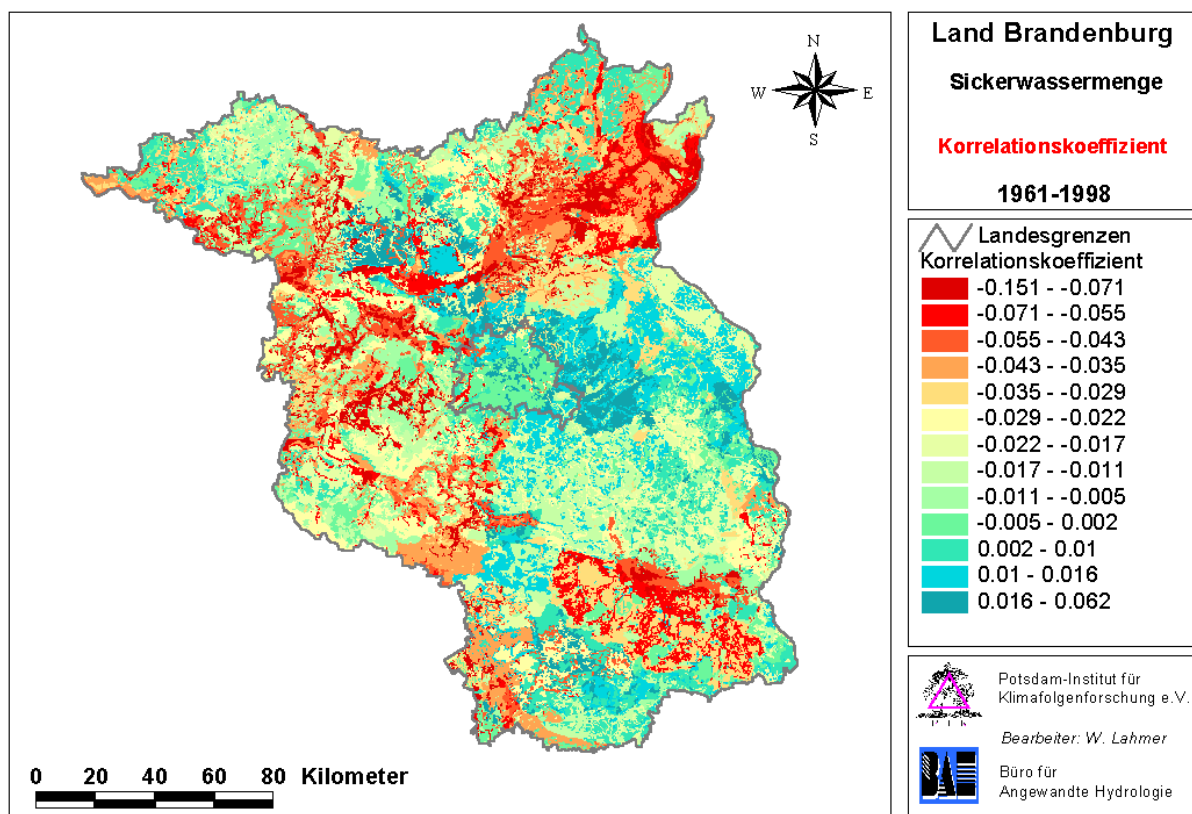


Abb. 6.5 Räumliche Verteilung des für das Land Brandenburg für den Gesamtzeitraum 1961-1998 auf der Basis von 1.599 Einzelflächen berechneten *Korrelationskoeffizienten* R .

Die räumliche Verteilung des für diese Einzelflächen und für die Gesamtperiode 1961-1998 berechneten Korrelationskoeffizienten R der Sickerwasserbildung ist in **Abb. 6.5** dargestellt. Die Karte verdeutlicht, wie ausgeprägt und mit welcher Tendenz im Land Brandenburg Veränderungen der berechneten Sickerwasserbildung auftreten. Der Wertebereich von R zwischen $-0,15$ und $+0,06$ entspricht Werten des Bestimmtheitsmaßes B zwischen $0,0036$ und $0,0025$ und stimmt mit dem in den Abbildungen der Kapitel 5 und 6 angegebenen Wertebereich für $B=R^2$ überein. Da die für alle Einzelflächen berechneten Korrelationskoeffizienten in der Nähe von Null liegen, besteht zwischen der Zeitvariablen (Monat) und den Werten der berechneten Sickerwasserbildung kein (oder ein nur geringer) statistischer Zusammenhang. Dies ist für eine von statistisch verteilten meteorologischen Variablen (deren langfristige Verän-

derungen u. U. entgegengesetzt verlaufen) bestimmte Wasserhaushaltsgröße wie die Sickerwasserbildung grundsätzlich auch sinnvoll.

Die räumliche Verteilung des Korrelationskoeffizienten zeigt starke Ähnlichkeiten mit der in Kapitel 6.4.2 diskutierten Karte des „absoluten Trends“ T_a (siehe Abb. 6.6), da sich die über den 38-jährigen Untersuchungszeitraum beobachteten zeitlichen Veränderungen der Sickerwasserbildung in einer - wenn auch geringen - Korrelation zur „Laufvariablen“ (Monat) der Zeitreihen äußern. Die Frage, bei welchen der in Abb. 6.5 ausgewiesenen Flächen es sich um Flächen mit einer signifikanten Änderung der Sickerwassermenge handelt, soll in Zusammenhang mit der Karte des absoluten Trends weiterverfolgt werden (Kapitel 6.4.2).

6.4.2 Absoluter Trend der Sickerwassermenge

Abb. 6.6 zeigt die zwischen 1961 (Anfangszustand) und 1998 (Endzustand) auf der Basis der linearen Regression und Gleichung (3) für 1.599 Einzelflächen (Hydrotöpfe) flächendifferenziert berechneten Änderungen der Sickerwassermenge („absoluter Trend“). Diese weisen Werte zwischen -139 mm und +50 mm auf. Die gewählte Klassifizierung in insgesamt 13 Klassen ermöglicht einen Vergleich mit den für die Simulationsrechnungen verwendeten Basiskarten (wie z. B. Landnutzung oder Grundwasserflurabstand) und die Identifizierung von Flächen, die besonders große Veränderungen der Sickerwassermenge aufweisen.

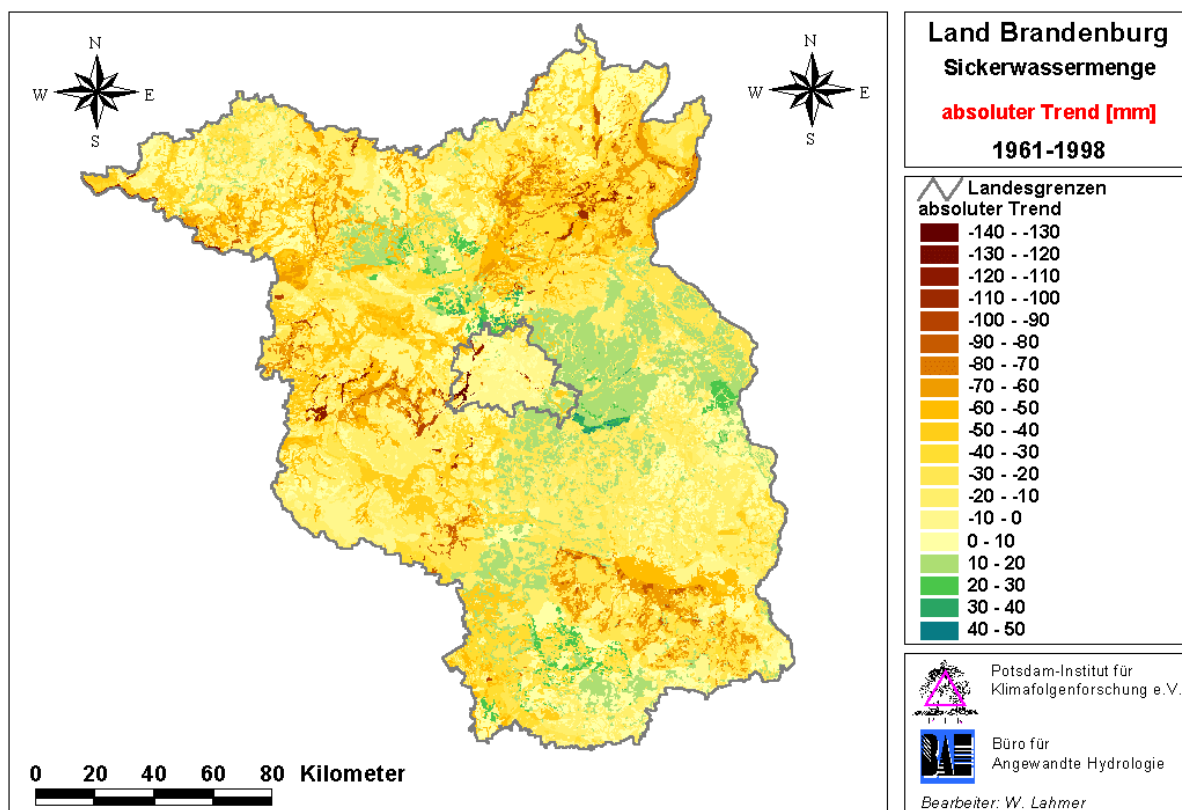


Abb. 6.6 Für das Land Brandenburg auf der Basis des Gesamtzeitraums 1961-1998 berechneter „absoluter Trend“ der Sickerwasserbildung mit 13 Kategorien der zwischen 1961 und 1998 berechneten Änderung der Sickerwassermenge (in mm).

Tab. 6.3 gibt einen Überblick über die statistischen Kennwerte der für das Land Brandenburg für den Gesamtzeitraum 1961-1998 berechneten „absoluten Trendkarte“. Für verschiedene Wertebereiche (Intervalle) des zwischen dem Anfangs- (1961) und Endzustand (1998) berechneten absoluten Trends T_a der Sickerwassermenge sind die Anzahl der in diese Intervalle fallenden Elementarflächen EFL und

Hydrotope HYD, die dazu gehörenden Flächengrößen sowie die Flächenanteile am Gesamtgebiet angeben, und zwar (i) für alle Flächen des Untersuchungsraumes und (ii) für die Flächen mit signifikanten Änderungen der Sickerwassermenge. Danach weisen knapp 75 % der Gesamtfläche Brandenburgs eine Abnahme der Sickerwassermenge auf, während für etwas mehr als 25 % der Flächen zwischen 1961 und 1998 ein Anstieg der Sickerwassermenge berechnet wird.

Tab. 6.3 Statistische Kennwerte der für das Land Brandenburg für den Gesamtzeitraum 1961-1998 berechneten „absoluten Trendkarte“: Differenz der auf der Basis einer linearen Regression berechneten Sickerwassermenge zwischen dem Anfangs- (1961) und Endzustand (1998), Anzahl der in verschiedene Wertebereiche fallenden Einzelflächen (Elementarflächen EFL und Hydrotope HYD), Flächengrößen und Flächenanteile am Gesamtgebiet. Die statistischen Größen sind sowohl für alle Flächen des Untersuchungsgebietes (links) als auch für die signifikant trendbehafteten Flächen (rechts) angegeben.

Intervall [mm]	alle Flächen				signifikante Flächen			
	Anzahl EFL	Anzahl HYD	Fläche [km ²]	Flächenanteil an Gesamtfläche [%]	Anzahl EFL	Anzahl HYD	Fläche [km ²]	Flächenanteil an Gesamtfläche [%]
-140 bis -130	88	1	16,4	0,05	0	0	0,0	0,00
-130 bis -120	68	2	9,1	0,03	0	0	0,0	0,00
-120 bis -110	179	4	29,0	0,09	0	0	0,0	0,00
-110 bis -100	458	12	94,2	0,31	0	0	0,0	0,00
-100 bis -90	238	14	51,7	0,17	1	1	0,1	0,00
-90 bis -80	732	12	212,0	0,69	275	2	109,4	0,36
-80 bis -70	741	27	213,6	0,70	184	6	75,3	0,25
-70 bis -60	3154	46	1334,1	4,37	1209	21	458,7	1,50
-60 bis -50	4438	93	1744,9	5,71	1026	17	365,8	1,20
-50 bis -40	4585	92	1802,1	5,90	712	15	200,2	0,66
-40 bis -30	5171	117	2355,8	7,71	199	8	68,4	0,22
-30 bis -20	7600	151	4290,7	14,04	32	2	20,9	0,07
-20 bis -10	8448	245	6466,7	21,16	62	6	32,6	0,11
-10 bis 0	7898	307	4174,8	13,66	0	0	0,0	0,00
0 bis 10	6700	265	3978,5	13,02	0	0	0,0	0,00
10 bis 20	6367	161	3310,6	10,84	0	0	0,0	0,00
20 bis 30	844	42	401,3	1,31	0	0	0,0	0,00
30 bis 40	106	5	62,3	0,20	0	0	0,0	0,00
40 bis 50	10	2	3,7	0,01	0	0	0,0	0,00
50 bis 60	11	1	2,3	0,01	0	0	0,0	0,00
<i>Summe</i>	<i>57836</i>	<i>1599</i>	<i>30553,6</i>	<i>100,00</i>	<i>3700</i>	<i>78</i>	<i>1331,4</i>	<i>4,36</i>
<i>negativ</i>	<i>43798</i>	<i>1123</i>	<i>22794,9</i>	<i>74,61</i>	<i>3700</i>	<i>78</i>	<i>1331,4</i>	<i>4,36</i>
<i>positiv</i>	<i>14038</i>	<i>476</i>	<i>7758,7</i>	<i>25,39</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,00</i>

Dass es sich bei den ausgewiesenen Änderungen der Sickerwassermenge in der Karte des absoluten Trends nicht in jedem Fall um statistisch signifikante Änderungen handeln kann, liegt nach den Diskussionen in Zusammenhang mit den Trendanalysen von Zeitreihen (Kapitel 6.2 bis 6.4) nahe. Um diese Flächen gesondert auszuweisen, wurde im Rahmen der flächentaillierten Analysen deshalb für alle 1.599 Einzelflächen eine Signifikanzprüfung unter Verwendung des Mann-Testes durchgeführt.

Die Ergebnisse dieses Tests sind in Tab. 6.3 sowie in **Abb. 6.7** dargestellt. Auf der rechten Seite der Abbildung sind alle Teilflächen im Land Brandenburg ausgewiesen, für die der Mann-Test eine signifikante Änderung der jährlichen Sickerwassermenge zwischen 1961 und 1998 ausweist. Auf der linken Seite ist zusätzlich ein Ausschnitt der Flächenverteilungen des absoluten Trends unter Ausweisung der signifikant trendbehafteten Teilflächen dargestellt. Folgende Befunde sind festzuhalten:

1. Nur Flächen, die eine Abnahme der Sickerwassermenge aufweisen, „bestehen“ den Signifikanztest. Bei allen Flächen mit einem Anstieg der Sickerwasserbildung SWB handelt es sich dagegen um nicht-signifikante Anstiege und damit um keinen Trend.

2. Sowohl in der Karte des Korrelationskoeffizienten R (Abb. 6.5) als auch in der Karte des absoluten Trends T_a (Abb. 6.6) fallen die signifikanten Trendflächen mit denen zusammen, die vergleichsweise hohe Korrelationskoeffizienten bzw. hohe negative Änderungen der Sickerwassermenge aufweisen.

3. Flächen mit den größten Abnahmen der Sickerwassermenge zeigen nicht zwangsläufig einen Trend. So handelt es sich bei allen Flächen mit Abnahmen von mehr als 100 mm nicht um Flächen mit einer signifikanten Abnahme der Sickerwassermenge (vgl. Tab. 6.3 und Abb. 6.8). Dies unterstreicht die grundsätzliche Bedeutung von Signifikanztests bei Trendanalysen.

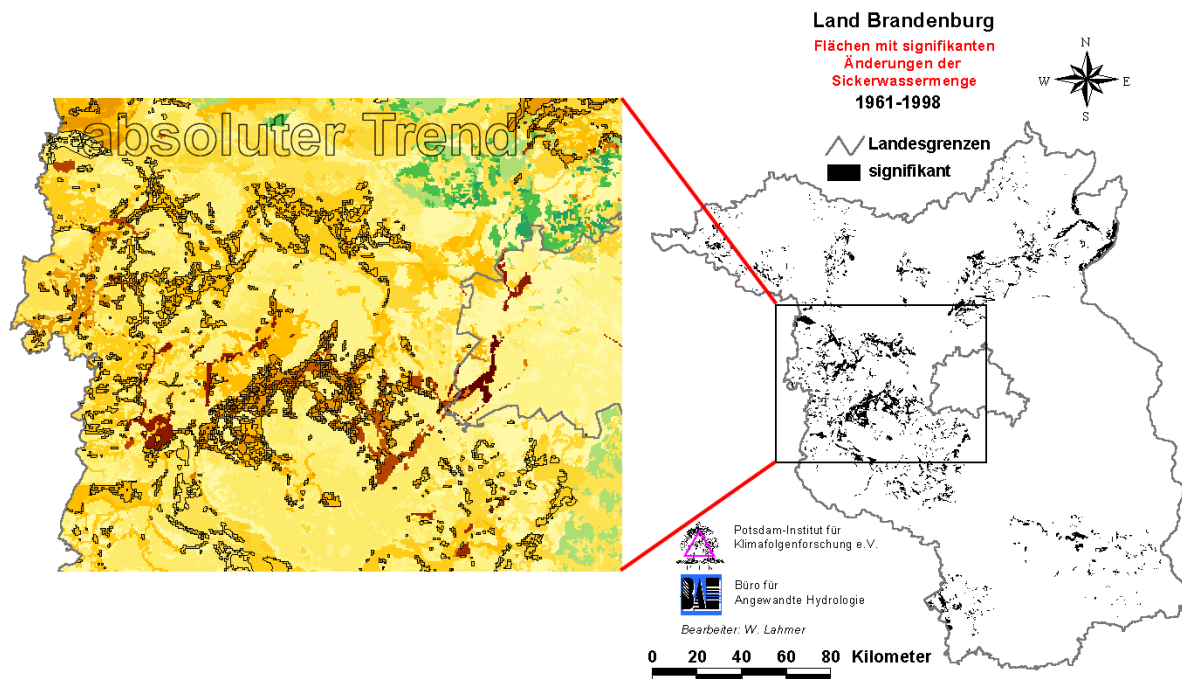


Abb. 6.7 Teilflächen im Land Brandenburg, für die der Mann-Test signifikante Änderungen (Trends) der Sickerwassermenge zwischen 1961 und 1998 ausweist (rechts). Auf der linken Seite sind Ausschnitte der Flächenverteilungen des absoluten Trends T_a zusammen mit den als signifikant trendbehaftet ausgewiesenen Teilflächen (schwarz umrandet) dargestellt.

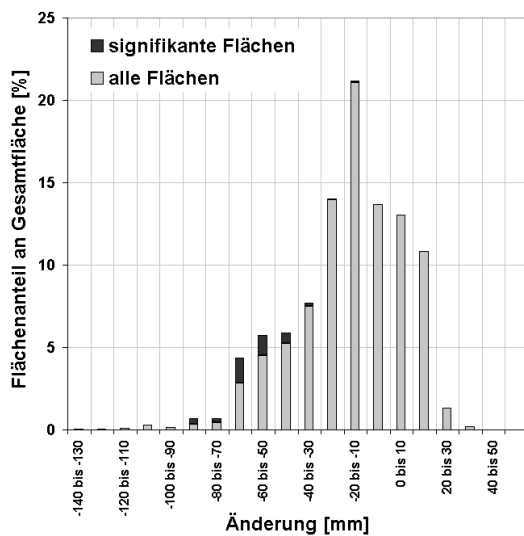


Abb. 6.8 Häufigkeitsverteilung der im Land Brandenburg im Zeitraum 1961-1998 flächendifferenziert berechneten Änderungen der Sickerwassermenge. Dargestellt sind die Flächenanteile am Gesamtgebiet als Funktion des absoluten Trends T_a - sowohl unter Einschluss aller Flächen (hell) als auch für die signifikant trendbehafteten Flächen (dunkel).

grundwassernahe Flächen, deren bereits geringe Sickerwasserbildung im Zeitraum 1961-1998 weiter absinkt.

Nach Tab. 6.3 weisen lediglich etwa 4,4 % der Fläche Brandenburgs (1331,4 km²) eine signifikante (negative) Änderung der Sickerwassermenge auf. Auf diesen Flächen beträgt der Rückgang der gebildeten Sickerwassermenge im Zeitraum 1961-1998 zwischen 11,9 mm und 98,3 mm. Um welche Flächentypen es sich dabei handelt, soll in Kapitel 6.4.3 eingehender diskutiert werden.

Abb. 6.8 zeigt die Häufigkeitsverteilung der in Tab. 6.3 angegebenen Änderungen der Sickerwassermenge. Dargestellt sind die im Bereich zwischen -140 mm und + 60 mm auftretenden Werte des absoluten Trends T_a als Funktion des Flächenanteils der entsprechenden Flächen am Gesamtgebiet des Landes Brandenburg. Die Darstellung verdeutlicht die oben unter (1) bis (3) diskutierten Befunde und illustriert, welche Flächen signifikante Änderungen der zwischen dem Anfangs- (1961) und Endzustand (1998) berechneten Sickerwassermenge aufweisen. Wie in Kapitel 6.4.3 detaillierter ausgeführt wird, handelt es sich bei den Flächen mit negativem Trend in erster Linie um

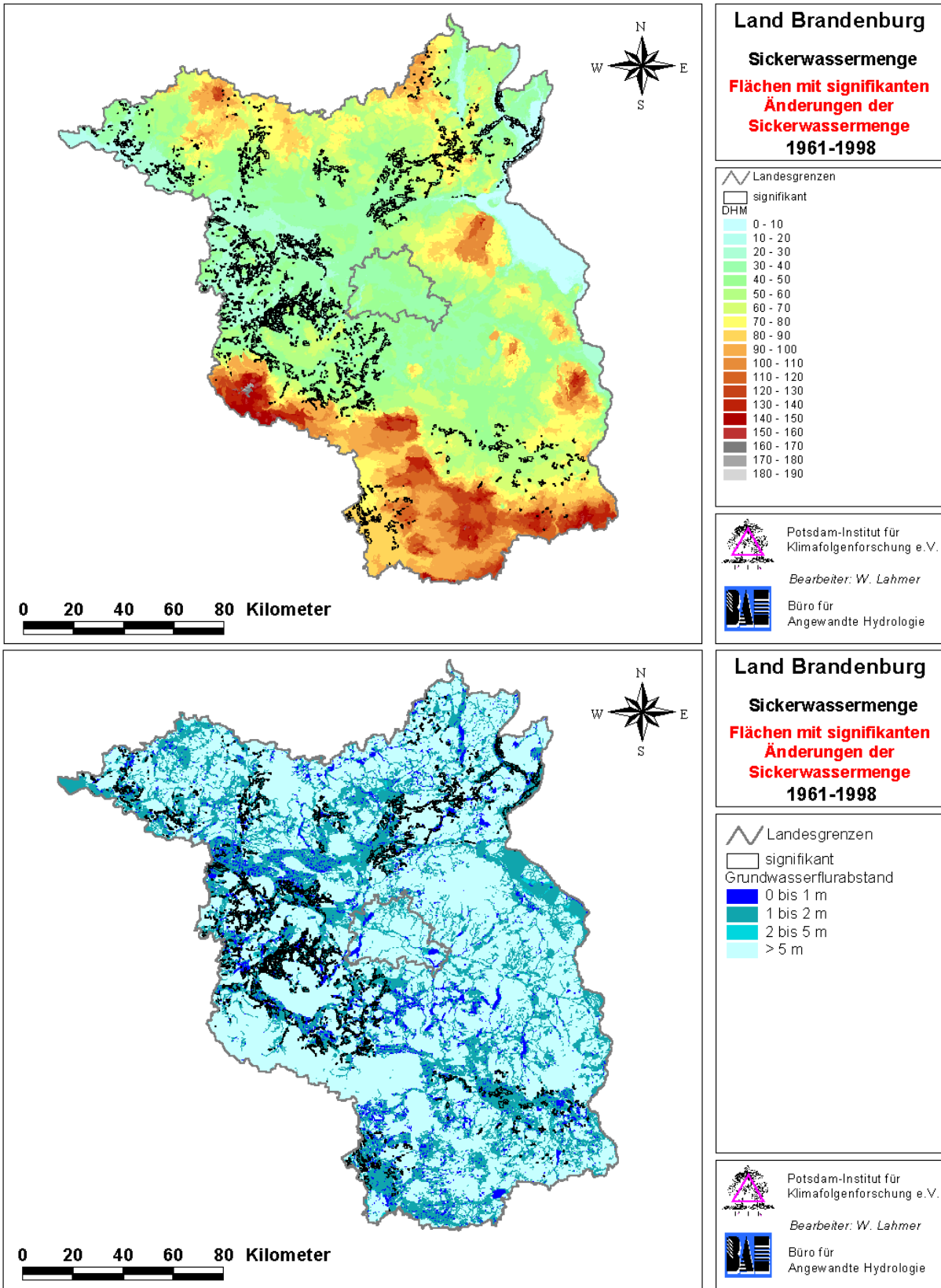


Abb. 6.9 Kartendarstellungen des für die Simulationsrechnungen verwendeten Digitalen Höhenmodells (oben) sowie des Grundwasserflurabstandes (unten), zusammen mit den Teilflächen im Land Brandenburg, für die eine signifikante Änderung (absoluter Trend T_a) der Sickerwassermenge zwischen 1961 und 1998 ausgewiesen wird (schwarz umrandet).

Dies wird durch die Darstellungen in **Abb. 6.10** unterstrichen, in denen die signifikant trendbehafteten Flächen zusammen mit dem für die Simulationsrechnungen verwendeten Digitalen Höhenmodell sowie der Grundwasserflurabstandskarte dargestellt sind. Deutlich wird, dass der negative Trend der Sickerwasserbildung verstärkt in den Niederungsgebieten und nur vereinzelt auf Hochflächen auftritt. Dies bedeutet, dass insbesondere die zunehmende Zehrung auf grundwassernahen Flächen zu den signifikanten Änderungen in der Sickerwasserbildung führt.

6.4.3 Sensitive Teilflächen

Um die Frage zu beantworten, welche Flächentypen im Land Brandenburg die größten Änderungen der Sickerwasserbildung zeigen, wurde die in **Abb. 6.6** dargestellte Karte des absoluten Trends T_a unter Berücksichtigung der für die Simulationsrechnungen verwendeten 15 Hydrotopklassen (siehe **Abb. 3.1**) statistisch ausgewertet. **Tab. 6.4** zeigt als Ergebnis dieser Analysen den Mittelwert des absoluten Trends T_a für jede Hydrotopklasse, und zwar für den Fall, dass alle Flächen (links) bzw. nur die Flächen mit einem nach dem Mann-Test signifikanten Trend (rechts) in die Analyse eingeschlossen werden.

Tab. 6.4 Trendverhalten verschiedener *Flächentypen* (Hydrotopklassen) für die im Land Brandenburg im Zeitraum 1961-1998 berechnete Sickerwasserbildung. Die statistischen Analysen basieren auf den für alle Flächen (links) sowie für die Flächen mit signifikantem Trend (rechts) berechneten absoluten Trends T_a . Für jede Hydrotopklasse sind die Anzahl der analysierten Einzelflächen (Elementarflächen EFL), die Flächengröße, der Flächenanteil am Gesamtgebiet sowie der Mittelwert des absoluten Trends angegeben. Für die signifikant trendbehafteten Flächen ist zusätzlich der Anteil an der Gesamtfläche der betreffenden Hydrotopklasse ausgewiesen.

Hydrotopklasse Bezeichnung	alle Flächen				signifikante Flächen				
	Anzahl EFL	Fläche [km ²]	Flächen- anteil an Gesamt- fläche [%]	Mittel wert T_a [mm]	Anzahl EFL	Fläche [km ²]	Flächen- anteil an Gesamt- fläche [%]	Mittel- wert T_a [mm]	Anteil signifi- kanter Flächen [%]
Acker, gw-fern, eben	8209	7410,3	24,25	0,1					
Hochwald, gw-fern, eben	6134	7044,8	23,06	-11,7					
Wiese, gw-fern, eben	2769	781,3	2,56	1,8					
offene Bebauung	7377	1882,9	6,16	2,4					
geschlossene Bebauung	1006	253,9	0,83	1,7					
Brachland	675	341,3	1,12	1,5					
Feuchtflächen	623	226,0	0,74	-34,6	62	10,4	0,03	-62,4	4,6
Niederwald	395	173,5	0,57	-4,8					
Acker, gw-nah	11326	5760,7	18,85	-38,4	342	123,0	0,40	-57,4	2,1
Hochwald, gw-nah	7378	2480,1	8,12	-40,8	2269	758,4	2,48	-57,4	30,6
Wiese, gw-nah	5219	1930,6	6,32	-42,4	1027	439,6	1,44	-59,5	22,8
Acker, gw-fern, hängig	1399	536,7	1,76	-4,1					
Hochwald, gw-fern, hängig	1562	1022,8	3,35	-18,5					
Wiese, gw-fern, hängig	358	80,2	0,26	-4,5					
Wasserflächen	3406	628,5	2,06	-64,2					
<i>Summe</i>	<i>57836</i>	<i>30553,6</i>	<i>100,00</i>		<i>3700</i>	<i>1331,4</i>	<i>4,36</i>		

Aus diesen Analysen folgt, dass lediglich Teile der Hydrotopklassen „Feuchtflächen“, „grundwassernahes Ackerland“, „grundwassernaher Hochwald“ und „grundwassernahe Wiesen“ im Gesamtzeitraum 1961-1998 zu signifikanten (negativen) Änderungen der Sickerwasserbildung führen. Da der Anteil dieser signifikant trendbehafteten Flächen an der Gesamtfläche des Landes Brandenburg lediglich etwa 4,4 % beträgt (vgl. auch **Tab. 6.3**), ergibt sich aus der Analyse des gesamten Untersuchungsraumes keine statistisch signifikante Abnahme der berechneten Sickerwassermenge (vgl. **Abb. 6.1**). Der Flächenanteil der signifikant trendbehafteten Flächen an den o. g. Hydrotopklassen beträgt 4,6 %, 2,1 %, 30,6 % und 22,8 %, ist also für die beiden Klassen „grundwassernaher Hochwald“ und „grundwassernahe Wiesen“ besonders hoch. Für alle anderen Klassen werden zwar ebenfalls

nahe Wiesen“ besonders hoch. Für alle anderen Klassen werden zwar ebenfalls Änderungen der Sickerwasserbildung berechnet, doch erfüllen diese nicht das Signifikanzkriterium.

Dies wird anschaulich in **Abb. 6.10**, wo der mittlere absolute Trend T_a der Sickerwasserbildung für die 15 verwendeten Hydrotopklassen im Land Brandenburg dargestellt ist. Im linken Teil erfolgte die Auswertung unter Berücksichtigung aller Flächen im Untersuchungsgebiet, im rechten Teil jeweils nur für die Flächen, die nach dem Mann-Test eine signifikante Änderung der Sickerwassermenge (einen Trend) aufweisen. Danach zeigen die bereits genannten vier Flächentypen signifikante Änderungen der im Zeitraum 1961-1998 gebildeten Sickerwassermenge, die in der Größenordnung von etwa -60 mm liegen.

Hervorgehoben werden sollte an dieser Stelle noch einmal, dass ohne Ausnahme nur grundwassernahe Flächen im Zeitraum 1961 bis 1998 eine signifikante (negative) Änderung der Sickerwassermenge zeigen. Die für diese Flächentypen grundsätzlich bereits geringe (oder sogar negative) Sickerwasserbildung verringert sich für einzelne Flächen weiter, so dass in der Periode 1961-1998 eine statistisch signifikante Abnahme nachgewiesen werden kann.

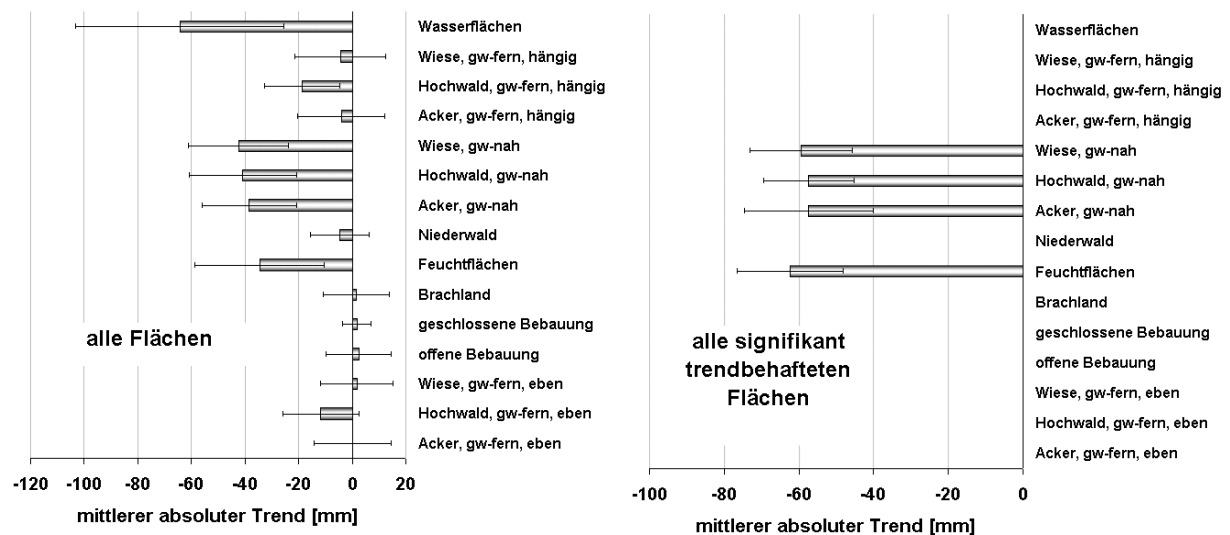


Abb. 6.10 Mittlerer „absoluter Trend T_a “ der Sickerwasserbildung SWB (samt Standardabweichung) für die 15 im Land Brandenburg ausgewiesenen *Hydrotopklassen*. Die Auswertung erfolgte unter Berücksichtigung aller Flächen (links) sowie nur der Flächen, die nach dem Mann-Test signifikante Änderungen von SWB (einen Trend) aufweisen (rechts).

7 Vorschläge für ergänzende Untersuchungen

Außer den bereits angesprochenen möglichen Erweiterungen der durchgeführten Trendanalysen gibt es zahlreiche Möglichkeiten, auf der Basis der Studie „Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg“ (LAHMER et al. 2001b) und den vorliegenden Trendanalysen ergänzende Untersuchungen durchzuführen und dabei z. T. wissenschaftliches (aber zugleich auch praxisrelevantes) „Neuland“ zu betreten. Die nachfolgend aufgeführten Vorschläge für ergänzende Untersuchungen betreffen zum einen die Voraussetzungen für den oft geäußerten Wunsch nach einer höheren regionalen oder sogar lokalen Aussagekraft der Ergebnisse, zum anderen eine denkbare Erweiterung des thematischen Spektrums um Inhalte, die sich an abgeschlossenen, gegenwärtig laufenden sowie für die Zukunft geplanten Forschungsprojekten des PIK orientieren.

7.1 Erhöhung der räumlichen Auflösung

Der Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchungen lag auf Trendanalysen der Sickerwasserbildung und nicht auf einer detaillierten räumlichen Abbildung dieser Wasserhaushaltsgröße oder ihrer zeitlichen Änderungen für den gesamten Untersuchungsraum Brandenburg. Stehen solche Untersuchungen im Vordergrund, so sind Simulationsrechnungen unter Verwendung einer höher aufgelösten räumlichen Datengrundlage sowie einer größeren Anzahl meteorologischer Stationen durchzuführen. Entsprechende meteorologische Daten wären vom DWD zu beschaffen.

Die Erhöhung der kleinräumigen Aussagekraft der Ergebnisse erfordert insbesondere eine bessere räumliche Abbildung des Niederschlags, der auch bei den Simulationsrechnungen der vorliegenden Studie in einigen Landesteilen für solche Zwecke bislang noch nicht ausreichend genau erfasst wird. Für detaillierte regionale Aussagen ist darüber hinaus die Auflösung der für die Übertragung der meteorologischen Variablen verwendeten Raumeinheiten zu erhöhen. Dies könnte entweder durch die Verwendung einer höher aufgelösten Teileinzugsgebietskarte geschehen oder durch Modellierung auf Elementarflächenbasis, was wegen der dann hohen Anzahl von fast 58.000 Einzelflächen einen erheblich höheren Zeitaufwand bei der Modellierung und Analyse bedeutet.

7.2 Aufgaben des Flusseinzugsgebietsmanagements

Auch aus den in Zusammenhang mit der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) national anstehenden Aufgaben ergeben sich vielfältige und anspruchsvolle Anforderungen an weitergehende hydrologische Untersuchungen im Land Brandenburg. Neben den naturräumlichen Charakteristika des Untersuchungsraumes (wie Landbedeckung, Böden, Grundwasserflurabstand und Gewässernetz) sind in diesem Zusammenhang dann auch alle für den Wasserhaushalt relevanten anthropogenen Eingriffe (Einleitungen, Entnahmen, Staumaßnahmen etc.) sowie die Auswirkungen wasserwirtschaftlicher Bauwerke wie z.B. Speicher auf die Abflussverhältnisse zu berücksichtigen.

Voraussetzung dafür sind erweiterte Datengrundlagen unter Berücksichtigung der in früheren Jahrzehnten durchgeführten wasserwirtschaftlichen Maßnahmen, des aktuellen Bestandes technischer Anlagen, ihres heutigen Funktionszustandes und ihrer aktuellen Betriebsweise. Die für solche Aufgaben zu entwickelnden komplexeren Modellwerkzeuge sind die Grundlage dafür, Effekte der „hydrologischen Infrastruktur“ oder potenzieller Maßnahmen in der Landschaft nachzubilden und als realistischeren „Ist-Zustand“ für Szenarienanalysen eines geänderten Managements zu verwenden.

Ansätze dieser Art werden z.Z. im Rahmen des Förderprogramms "Forschung für die Umwelt" zum Thema „Flusseinzugsgebietsmanagement" in dem vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben „Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel“ umgesetzt. In diesem von der Univ. Potsdam geleiteten und vom PIK koordinierten Verbundvorhaben (in dem auch das LUA einen der Projektpartner darstellt) wird das Einzugsgebiet der Havel in seiner oben angesprochenen Komplexität modelliert und analysiert. Einzelheiten zu diesem Forschungsprojekt können u. a. der Internetseite www.havelmanagement.de, aber auch LAHMER und BRONSTERT (2002), LAHMER et al. (2003) oder LAHMER (2003b) entnommen werden.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Ziel der vorliegenden, in aktuelle Untersuchungen des Landesumweltamtes Brandenburg (LUA) eingebunden Studie bestand in einer wissenschaftlichen Analyse der in Brandenburg seit einigen Jahren sinkenden Grundwasserstände, die auf einer Auswertung von etwa 1.000 Grundwassermessstellen basiert. Eine Prognose und Extrapolation der beobachteten Trends ist schwierig, solange die kausalen Zusammenhänge nicht geklärt sind. Da die natürliche Ursache einer Änderung des Grundwasserspiegels

in einer Variation der gebildeten Sickerwassermenge liegt, boten sich zur wissenschaftlichen Untersetzung der Grundwasserproblematik räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Untersuchungen mit einem geeigneten Niederschlags-Abfluss-Modell an. Die Untersuchungen ordnen sich thematisch in das Projekt „Stabilisierung und Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes in Brandenburg“ des LUA ein, in dem ein generelles Konzept zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushalts in Brandenburg erarbeitet wird.

Die in Ergänzung zur Studie „Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg“ (LAHMER et al. 2001b) in der vorliegenden Studie durchgeführten Analysen zur statistischen Ermittlung von Trends in der Sickerwassermenge liefern wichtige Hinweise darauf, ob, in welche Richtung und wie signifikant sich die im Land Brandenburg gebildete Sickerwassermenge im Zeitraum 1961-1998 verändert hat. Sie helfen damit auch die Frage zu beantworten, welchen Einfluss die in den 90-er Jahren dicht aufeinander folgenden „Jahrhundertssommer“ auf die hydrologische Situation des Landes Brandenburg gehabt haben und in wie weit sich diese (noch) von den zu erwartenden Auswirkungen eines Klimawandels (LAHMER und BECKER 2000, BILD DER WISSENSCHAFT 2001, LAHMER et al. 2001a/c, LAHMER 2002, LAHMER 2003a/b, LAHMER and BRONSTERT 2003, BRONSTERT et al. 2003) unterscheiden.

Die Sickerwassermenge wurde mit Hilfe einer für diese Studie überarbeiteten Version des hydrologischen Modellierungssystems ArcEGMO berechnet und für den Zeitbereich 1961-1998 in orts- und zeitdiskreter Form analysiert. Als meteorologische Triebkräfte wurden die Informationen der an 23 Klima- und 54 Niederschlagsstationen gemessenen meteorologischen Zeitreihen des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Die räumlichen Datengrundlagen basieren auf den bereits für die Vorgängerstudie verwendeten digitalen Karten. Grundlage für die Simulationsläufe war die sog. „Elementarflächenkarte“, die sich aus der GIS-Verschneidung aller notwendigen digitalen räumlichen Grundlagenkarten ergibt und für das Land Brandenburg insgesamt 57.836 Elementarflächen ausweist. Für die Modellierung wurden die aus einer räumlichen Aggregation dieser Einzelflächen resultierenden 1.599 georeferenzierten „Hydrotöpfe“ verwendet, die eine hinreichend hoch aufgelöste Berechnung der Sickerwassermenge bei vertretbaren Rechenzeiten ermöglichten. Das Modell wurde durch eine separate Modellierung zweier im Land Brandenburg liegender Einzugsgebiete (Obere Dahme und Stepenitz) an die Gebietseigenschaften des Untersuchungsraumes angepasst.

Obwohl der Schwerpunkt der Untersuchungen auf Analysen der Sickerwasserbildung lag, wurden auch alle anderen relevanten Wasserhaushaltsgrößen berechnet und analysiert. Ihre Wiedergabe im vorliegenden Bericht stellt eine geschlossene Darstellung der Gesamtthematik sicher, verdeutlicht das Zusammenwirken verschiedener Einflussfaktoren und erleichtert die Interpretation der für die Sickerwassermenge erzielten Ergebnisse. Vor dem Hintergrund der zeitlichen Entwicklung der übrigen Wasserhaushaltsgrößen wird damit auch die Dynamik der Sickerwassermenge transparenter.

Ein Ergebnis der flächendeckend durchgeführten Wasserhaushaltsberechnungen ist die hohe Variabilität der Jahressummen der Sickerwasserbildung, die ihren Ausdruck z. B. in den exemplarisch dargestellten räumlichen Verteilungen für die beiden extremen Jahre 1974 (besonders feucht) und 1989 (besonders trocken) findet (s. Abb. 4.2). Die hohe Variabilität hängt unmittelbar mit extremen Werten der klimatischen Wasserbilanz in diesen Jahren zusammen, die Resultat des Zusammenwirkens unter- bzw. überdurchschnittlicher jährlicher Niederschläge mit über- bzw. unterdurchschnittlichen Jahressummen der potenziellen Verdunstung sind (s. Abb. 4.1). Die auf der Basis von Sommer- und Wintersummen für die Periode 1961-1998 durchgeführten Analysen zeigen, dass im Land Brandenburg knapp 56 % des Niederschlags in den Sommermonaten fällt, eine mit -177 mm stark negative klimatische Wasserbilanz im Sommer mit einem fast ebenso großen positiven Wert von +160 mm im Winter im langjährigen Jahresmittel einen leicht negativen Wert von -17 mm ergibt, positive Werte der Sickerwasserbildung im Winter (107 mm) negative Werte im Sommer (-21 mm) überwiegen und im langjährigen Mittel zu einem

Wert von etwa +86 mm führen und der Gebietsabfluss mit einem mittleren Jahreswert von 106 mm zu ca. 60 % im Winter auftritt (s. Abb. 4.3).

Eine Ursache abnehmender Grundwasserstände können klimatische Veränderungen sein. Die Auswertung von Ganglinien klimatischer Größen kann deshalb mögliche Entwicklungstendenzen aufzeigen, die sich auf den Wasserhaushalt insgesamt und auf die gebildete Sickerwassermenge im Besonderen auswirken. Entsprechende, auf der Basis von Jahressummen durchgeführte Analysen zur zeitlichen Entwicklung aller meteorologischen Eingangsgrößen sowie damit berechneter Wasserhaushaltsgrößen zeigen, dass im Zeitraum 1961 bis 1998 lediglich der Anstieg der mittleren Tagestemperatur LT um knapp 1 °C statistisch signifikant ist (s. Abb. 5.2). Für alle anderen Größen ergeben sich auf der Basis linearer Regressionsanalysen zwar mehr oder weniger große Änderungen, doch sind diese allesamt statistisch nicht signifikant (d. h. es handelt sich um keine Trends). Dies gilt insbesondere auch für die mittleren Jahresniederschläge, die keine statistisch belegbare abnehmende Tendenz aufweisen.

Auf der Basis von Sommer- und Wintersummen für den Zeitraum 1961-1998 durchgeführte statistische Analysen belegen, dass bis auf die für das Winterhalbjahr berechnete mittlere Tagestemperatur sowie die potenzielle und reale Verdunstung keine der berechneten Größen im Zeitraum 1961-1998 eine statistisch signifikante zeitliche Veränderung (einen Trend) zeigt (s. Abb. 5.3). Im Fall der genannten drei Größen fallen die Wintertrends dabei mit +1,6 °C, +24,2 mm und +23,5 mm recht deutlich aus, während die Veränderungen in den Sommermonaten mit +0,6 °C, +14,5 mm und -16,4 mm keine statistisch signifikanten Veränderungen darstellen. Gleiches gilt für die auf Halbjahresbasis berechneten Veränderungen des Niederschlags (-12,8 mm/+10,4 mm für Sommer/Winter), der klimatischen Wasserbilanz (-27,3 mm/-13,8 mm), der Sickerwasserbildung (-11,2 mm/-9,8 mm) und des Gebietsabflusses (-8,9 mm/-6,8 mm). Dies bedeutet u.a auch, dass im Land Brandenburg im Zeitraum 1961-1998 kein statistisch belegbarer Trend zu ab- oder zunehmenden Winterniederschlägen zu verzeichnen ist.

Da die primär interessierende Sickerwassermenge - und damit auch ihre Veränderungen - in Raum und Zeit variieren, wurde diese für eine Vielzahl räumlicher (Gesamtgebiet, Hydrotupe) und zeitlicher Aggregationsstufen (Jahres-, Halbjahres-, Quartals- sowie Monatswerte) berechnet und ausgewertet. Die statistische Signifikanz der berechneten Trends wurde jeweils mit Hilfe des Mann-Tests abgeschätzt.

Im Fall der Jahressummen liefert die Regressionsgerade für den Gesamtzeitraum 1961-1998 zwar eine Abnahme der Sickerwassermenge von 95 mm im Jahre 1961 auf 76,6 mm im Jahre 1998, doch erweist sich diese Abnahme um immerhin 19,4 % als statistisch nicht signifikant (s. Abb. 6.1). Gleiches gilt für die Winter- und Sommersummen, deren Abnahmen von 110,5 mm auf 100,7 mm bzw. von -15,5 mm auf -26,7 mm keinen Trend darstellen (s. Abb. 6.2). Die Erweiterung der Analysen auf Quartalswerte der Sickerwassermenge zeigt, dass für den Gesamtzeitraum 1961-1998 auch keine der Quartalsummen einen Trend aufweist (s. Abb. 6.3). Dies gilt selbst für die im zweiten Quartal („Frühling“) berechnete Abnahme der Sickerwassermenge um immerhin 32 %. Erst die abschließend auf Monatsbasis durchgeführten Trendanalysen zeigen, dass lediglich der Monat Mai eine statistisch signifikante Abnahme (von 4,2 mm im Jahre 1961 auf -4,6 mm im Jahre 1998) aufweist (s. Abb. 6.4). Die Änderungen der Sickerwassermenge für alle anderen Monate fallen dagegen z. T. deutlich unter die Signifikanzschwelle.

Um die Teilflächen im Land Brandenburg zu identifizieren, die eine signifikante Änderung der Sickerwassermenge aufweisen, wurden zusätzlich Trendanalysen für alle 1.599 modellierten Einzelflächen (Hydrotupe) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen wurden mit Hilfe eines speziell dafür erstellten Programms in die Fläche übertragen. Die räumliche Verteilung des für die Gesamtperiode 1961-1998 berechneten Korrelationskoeffizienten (s. Abb. 6.5) verdeutlicht, wie ausgeprägt und mit welcher Tendenz im Land Brandenburg Veränderungen der berechneten Sickerwassermenge auftreten. Die zwischen 1961 (Anfangszustand) und 1998 (Endzustand) auf der Basis der linearen Regression für die 1.599 Einzelflächen flächendifferenziert berechneten Änderungen der Sickerwassermenge („absoluter Trend“) reichen von -139 mm bis +50 mm (s. Abb. 6.6).

Knapp 75 % der Gesamtfläche Brandenburgs zeigen danach eine Abnahme der Sickerwassermenge, während für etwas mehr als 25 % der Flächen ein Anstieg berechnet wird. Die Signifikanzprüfung unter Verwendung des Mann-Testes zeigt, dass lediglich etwa 4,4 % der Fläche Brandenburgs eine signifikante (negative) Änderung der Sickerwassermenge aufweisen. Auf diesen Flächen beträgt der Rückgang der jährlich gebildeten Sickerwassermenge im Zeitraum 1961-1998 zwischen 11,9 mm und 98,3 mm. Nur Flächen mit einer Abnahme der Sickerwassermenge bestehen den Signifikanztest. Bei allen Flächen mit einer zunehmenden Sickerwassermenge handelt es sich dagegen um nicht-signifikante Anstiege.

Um die Frage zu beantworten, welche Flächentypen im Land Brandenburg die größten Änderungen der gebildeten Sickerwassermenge zeigen, wurde die Karte des absoluten Trends unter Differenzierung des Beitrages der 15 für die Simulationsrechnungen verwendeten Hydrotopklassen statistisch ausgewertet. Aus diesen Analysen folgt, dass lediglich „Feuchtflächen“, „grundwassernahes Ackerland“, „grundwassernaher Hochwald“ und „grundwassernahe Wiesen“ zu signifikanten (negativen) Änderungen der Sickerwasserbildung führen (s. Abb. 6.10). Dabei zeigen die beiden letztgenannten Klassen mit etwa 31 % bzw. 23 % ihrer Gesamtfläche ein besonders ausgeprägtes Trendverhalten.

Bei den Flächen mit negativem Trend handelt es sich ohne Ausnahme um grundwassernahe Flächen, deren bereits geringe oder sogar negative Sickerwasserbildung („Zehrung“) im Zeitraum 1961-1998 statistisch signifikant weiter absinkt. Dies wird gestützt durch den Vergleich mit dem Höhenmodell und der Karte des Grundwasserflurabstandes (s. Abb. 6.10), der verdeutlicht, dass der negative Trend der Sickerwasserbildung fast ausschließlich in den Niederungsgebieten auftritt. Dies bedeutet, dass insbesondere die zunehmende Zehrung auf grundwassernahen Flächen zu den signifikanten Änderungen in der Sickerwasserbildung führt. Wesentliche Ursachen für diese Änderungen sind die (wenn auch statistisch nicht signifikante) Abnahme des Niederschlags und die (statistisch signifikante) Zunahme der mittleren Tagestemperatur.

Grundsätzlich sind in Zusammenhang mit den durchgeführten Analysen die Bedeutung der 90-er Jahre für die Ergebnisse und die Gefahr von Trenduntersuchungen zu kurzer Zeitreihen (z.B. Jahreswerte für Dekaden) deutlich geworden. Letztere ergibt sich aus der Tatsache, dass solche Zeitreihen wegen des „zufälligen“ Systemzustandes am Anfang und Ende der Zeitreihe zu Fehlinterpretationen führen können.

Mögliche Erweiterungen der durchgeführten Untersuchungen betreffen insbesondere die Ausweitung flächenhafter Trendanalysen, die wegen des hohen Rechen- und Analyseaufwands bislang nur für die Gesamtperiode 1961-1998 durchgeführt wurden. Jahreszeitlich differenziertere Betrachtungen unter Analyse von Halbjahreswerten, Quartalen oder einzelner Monate könnten zusätzliche Hinweise darauf geben, wann welche Regionen im Land Brandenburg besonders ausgeprägte Änderungen der Sickerwassermenge aufweisen. Neben diesen erweiterten Analysemethoden sind auch Untersuchungen denkbar, die der Forderung nach einer höheren regionalen Aussagekraft der Ergebnisse gerecht werden. Diese würden allerdings eine Neubearbeitung der räumlichen Datenbasis unter Einschluss räumlich höher aufgelöster Karten erfordern.

Aus den bisherigen Erfahrungen des Projektbearbeiters bei der Bearbeitung anderer wissenschaftlicher Projekte lassen sich schließlich die Vorschläge für ergänzende Untersuchungen im Land Brandenburg unterbreiten, die neben Aspekten des Globalen Wandels auch Thematiken berühren, die sich an den Anforderungen an ein umfassendes Flusseinzugsgebietsmanagement orientieren.

9 Literatur

- Becker, A. und Lahmer, W. (1996). Klimawandel und seine Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. *gwf-Wasser Special* 14/96.
- Becker, A., Lahmer, W., Müller-Wohlfeil, D.-I., Pfützner, B. (1996). Hydrologische Verhältnisse und Verfügbarkeit der Wasserressourcen, in: Stock, M., Toth, F. (Hrsg.), Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Land Brandenburg, Bericht des PIK für das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg 3-1-3-14.
- Becker, A. und Lahmer, W. (1999). GIS-basierte großskalige hydrologische Modellierung. In: Kleeberg, H.-B., Mauser, W., Peschke, G. und Streit, U. (Hrsg.). Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992 bis 1998), Forschungsbericht, Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). Wiley-VCH, Weinheim, 1999, ISBN 3-527-27145-7, S. 115-129.
- Becker, A., Lahmer, W. (Hrsg.) (2003). Wasser- und Nährstoffhaushalt im Elbegebiet und Möglichkeiten zur Stoffeintragsminderung. - Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft. Weißensee-Verlag, Berlin (in Vorbereitung).
- Becker, A., Klöcking, B., Lahmer, W. and Pfützner, B. (2002). The Hydrological Modelling System ARC/EGMO. In: Mathematical Models of Large Watershed Hydrology (Eds.: Singh, V.P. and Frevert, D.K.). Water Resources Publications, Littleton/Colorado. 891pp. ISBN 1-887201-34-3, p. 321-384.
- Bild der Wissenschaft (2001). Deutschland 2050 – Die Klimaprognosen. 10/2001, S. 44-49.
- BMBF (1995). Forschungskonzeption „Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe (Elbe-Ökologie)“. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie. Bonn, August 1995.
- Bork, H.-R. (1997). Wasser- und Stoffrückhalt im Tiefland des Elbeeinzugsgebietes“ (WaStor). Antrag an das BMBF.
- Bronstert, A., Lahmer, W. und Krysanova, V. (2003). Klimaänderung in Brandenburg und Folgen für den Wasserhaushalt. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg.
- Handbook of Hydrology, (1993). Handbook of Hydrology, D.R. Maidment (ed. in chief) Mc Graw-Hill, Inc. 1993.
- Lahmer, W. und Becker, A. (1998a). Grundprinzipien für eine GIS-gestützte großskalige hydrologische Modellierung. Beitrag zum Workshop „Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in großen Einzugsgebieten“ vom 15. bis 16. Dezember 1997 in Potsdam. PIK-Report No. 43, PIK 1998, S. 55-66.
- Lahmer, W. und Becker, A. (1998b). Macro- and Mesoscale Hydrological Modelling in the Elbe River Basin, in: Bucek, J., Sir, M., Tesar, M. (Hrsg.), Catchment Hydrological and Biochemical Processes in Changing Environment, Prague, Czech Republik: Inst. of Hydrodynamics (Academy of Sciences of the Czech Republik), Czech Hydrometeorological Institute, National Committee for Hydrology of the Czech Republik, 57-61.
- Lahmer, W. und Becker, A. (1998c). Auswirkung von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt eines mesoskaligen Einzugsgebietes. Beitrag zum 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar „Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe“ vom 20. bis 23. Oktober 1998 in Karlovy Vary (Karlsbad). B.G. Teubner Stuttgart, Leipzig 1998, p. 315-318.
- Lahmer, W. and Becker, A. (1999). Socio-Economic Implications of Land Use Change Modelling on a Regional Scale. In: Windhorst, W. and Enckell, P.H. (Edts.), Proceedings of the International Conference ‘Sustainable Landuse Management – The Challenge of Ecosystem Protection’, Salzau Federal Cultural Center, Schleswig-Holstein, Germany, 28.9-1.10. 1999. Verein zur Förderung der Ökosystemforschung zu Kiel e.V. EcoSys – Beiträge zur Ökosystemforschung, Kiel, Suppl. Bd. 28, 73-82.
- Lahmer, W., Becker, A., Pfützner, B. (1999a). Modelling Land Use Change on a Regional Scale. In: Vlasak, P., Filip, P., Chara, Z. (Edts.), Proceedings of the International Conference ‘Problems in Fluid Mechanics and Hydrology’. The Institute of Hydrodynamics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic, June 23 - 26, 1999, Vol. 2, p. 415-423.
- Lahmer, W., Pfützner, B., Becker, A. (1999b). Großskalige hydrologische Modellierung von Landnutzungsänderungen vor dem Hintergrund unsicherer Eingangsdaten. In: N. Fohrer und P. Döll (Hrsg.): Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in großen Einzugsgebieten. Workshop am 19./20. November 1998 in Rauschholzhausen bei Gießen. Kassel University Press, ISBN 3-933146-21-6, 153-161.

- Lahmer, W., Becker, A., Müller-Wohlfeil, D.-I. and Pfützner, B. (1999c). A GIS-based Approach for Regional Hydrological Modelling. In: B. Diekkrüger, M.J. Kirkby, U. Schröder (Eds.): Regionalization in Hydrology. IAHS publication no. 254, ISSN 0144-7815, 33-43.
- Lahmer, W., Klöcking, B. and Pfützner, B. (1999d). Meteorological Input Variables in Meso and Macroscale Hydrological Modelling. In: Extended abstracts of the International Conference on Quality, Management and Availability of Data for Hydrology and Water Resources Management, Koblenz, 22-26 March, 1999, p. 165-168.
- Lahmer, W. (2000). Macro- and Mesoscale Hydrological Modelling in the Elbe River Basin. In: Catchment Hydrological and Biochemical Processes in Changing Environment (Eds. V. Elias and I.G. Littlewood). Proceedings of the Liblice Conference, 22-24 September 1998, Liblice, Czech Republic. IHP-V, Technical Documents in Hydrology, No. 37, UNESCO, Paris, 2000, p. 89-105.
- Lahmer, W. und Becker, A. (2000). Mögliche Auswirkungen von Klimaveränderungen am Beispiel einer Untersuchung für das Land Brandenburg. In: Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wasserwirtschaft. KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 2000 (47), Nr. 2, 170-175.
- Lahmer, W. and Pfützner, B. (2000). Scaling problems in large-scale hydrological modelling. In: Verhoest, N.E.C., Van Herpe, Y.J.P. and De Troch, F.P. (Edts.). Monitoring and Modelling Catchment Water Quantity and Quality. Conference proceedings. Laboratory of Hydrology and Water Management, Ghent University, Ghent, Belgium, p. 95-99.
- Lahmer, W., Klöcking, B., Haberlandt, U. (2000a). Möglichkeiten der skalenübergreifenden hydrologischen Modellierung. In: Heterogenität landschaftshaushaltlicher Wasser- und Stoffumsätze in Einzugsgebieten - Beiträge zum 3. Workshop Hydrologie am 18./19. November 1999 in Göttingen. EcoRegio 8/2000, Veröffentlichungen der Abteilung Landschaftsökologie am Geographischen Institut der Universität Göttingen, Hrsg. G. Gerold, ISBN 3-933441-03-X, S. 37-46.
- Lahmer, W., Pfützner, B. and Becker, A. (2000b). Influences of Environmental Changes on Regional Flood Events. In: Bronstert, A., Bismuth, C. and Menzel, L. (Edts.). European Conference on Advances in Flood Research. PIK-Report No. 65, p. 238-254. Potsdam Institute for Climate Impact Research, November 2000.
- Lahmer, W., Pfützner, B. and Becker, A. (2000c). Data-related Uncertainties in Meso- and Macroscale Hydrological Modelling. In: Heuvelink, G.B.M. and Lemmens, M.J.P.M (Eds.). Accuracy 2000. Proceedings of the 4th international symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences. Amsterdam, July 2000, pp. 389-396.
- Lahmer, W., Pfützner, B. and Becker, A. (2001a). Assessment of Land Use and Climate Change Impacts on the Mesoscale. Phys. Chem. Earth (B). Vol. 26, No. 7-8, pp. 565-575, 2001 Elsevier Science Ltd.
- Lahmer, W., Steidl, J., Dannowski, R., Pfützner, B., Schenk, R. (2001b). Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg. Landesumweltamt Brandenburg (Hrsg.). Studien und Tagungsberichte, Band 27, ISSN 0948-0838, Eigenverlag, Potsdam, Dezember 2000.
- Lahmer, W., Pfützner, B., Ströbl, B. (2001c). Possible Impacts of Climate and Land Use Changes on the Water Balance of Semi-arid German River Basins. 19th European Regional ICID Conference Sustainable Use of Land and Water, Brno and Prague, Czech Republic, 4-8 June 2001 (CD-ROM).
- Lahmer, W. (2002). Trend and Climate Change Impact Analyses on the Mesoscale. In: Holko, L., Miklanek, P. and Kostka, Z. (Eds.): Interdisciplinary Approaches in Small Catchment Hydrology - Monitoring and Research. International conference convened by the European Network of Experimental and Representative Basins (ERB) and UNESCO IHP Northern European FRIEND Project 5. Demanovska dolina, Slovakia, 25-28 September 2002. Bratislava, 2002, ISBN 80-968480-6-2, 127-131.
- Lahmer, W. und Bronstert, A. (2002). Erster Zwischenbericht zum BMBF-Projekt „Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel“, Förderkennzeichen: 0330012, Berichtszeitraum: 01.10.2001 bis 31.03.2002. Univ. Potsdam, März 2002, unveröffentlicht.
- Lahmer, W. (2003a). Hydrologische Auswirkungen von Klimaänderungen im Land Brandenburg. In: F.-W. Gerstengarbe, F. Badeck, F. Hattermann, V. Krysanova, W. Lahmer, P. Lasch, M. Stock, F. Suckow, F. Wechsung, P. C. Werner (Hrsg.): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. Studie im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg. PIK-Report Nr. 83, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Juni 2003, ISSN 1436-0179.

- Lahmer, W. (2003b). River Basin Management: What about Climatic Changes? In: Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions (Edts.: Servat, E., Najem, W., Leduc, C. and Shakeel, A.). IAHS Publication no. 278, ISSN 0144-7815, IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK, 324-331.
- Lahmer, W. and Bronstert, A. (2003). River Basin Management and Global Change Impacts. 2nd International Symposium on Integrated Water Resources Management (IWRM), 'Towards Sustainable Water Utilization in the 21st Century (ICWRS)', Univ. of Stellenbosch, Stellenbosch, Western Cap, South Africa, 22-24 January 2003.
- Lahmer, W., Itzerott, S. und Bronstert, A. (2003). Zweiter Zwischenbericht zum BMBF-Projekt „Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel“, Förderkennzeichen: 0330012, Berichtszeitraum: 01.01.2002 bis 31.12.2002. Univ. Potsdam, März 2003, unveröffentlicht.
- Maniak (1997). Hydrologie und Wasserwirtschaft. 4. Auflage, Springer-Verlag.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1979). River flow forecasting through conceptual models, 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Pfützner, B., Lahmer, W., Becker, A. und Klöcking, B. (1998). ArcEGMO – GIS-gestützte hydrologische Modellierung. Programmdokumentation, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Potsdam.
- Pfützner, B. (2002). ARC/EGMO. In: Barben, M., Hodel, H.-P., Kleeberg, H.-B., Spreafico, M. und Weingartner, R. (Hrsg.). Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen – Erfahrungen aus den Rhein-anliegerstaaten. Bericht Nr. I-19 der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rhein-gebietes-KHR, p. 151-154. ISBN 90-36954-11-8.
- Quast, J. und Steidl, J. (Hrsg.). Wasser- und Stoffrückhalt im Tiefland des Elbeeinzugsgebietes. Schlussbericht zum BMBF-Forschungsprojekt. Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung. Müncheberg 2002.
- Rapp, J. und Schönwiese, Ch.-D. (1995). Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie B – Meteorologie und Geophysik, Band 5, Fachb. Geowissenschaften der Johann Wolfgang Goethe-Univ. Frankfurt, Frankfurt am Main.
- Schumann (1995). Description of the Trend1 Programme. Ruhr-Univ. Bochum, 1995.
- Statistisches Bundesamt (1997). Daten zur Bodenbedeckung für die Bundesrepublik Deutschland, Wiesbaden.
- Turc, L. (1961). Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. *Ann. Agron.* 12, 13-49.

Überblick über die Abbildungen

Abb. 2.1 Flächenanteile der aggregierten CORINE-Landnutzungsklassen an der Gesamtfläche des Landes Brandenburg.	9
Abb. 2.2 Flächenanteile der 20 im Land Brandenburg vorkommenden Bodeneinheiten an der Landesfläche.	10
Abb. 2.3 Flächenanteile der vier im Land Brandenburg definierten Grundwasserflurabstandsklassen an der Gesamtfläche.	10
Abb. 2.4 Überblick über die 23 Klima- und 54 Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die für den Zeitbereich 1961-1998 Tagesreihen der erforderlichen Klimavariablen liefern und für die Simulationsrechnungen mit ArcEGMO im Land Brandenburg verwendet wurden. Die Strukturierung des Untersuchungsraumes in 196 Teileinzugsgebiete ist ebenfalls angegeben.	12
Abb. 3.1 Flächenanteile der für die Simulationsrechnungen verwendeten 15 Hydrotopklassen an der Gesamtfläche des Landes Brandenburg.	16
Abb. 3.2 Schematische Darstellung des in ArcEGMO verwendeten Standardverfahrens zur Übertragung meteorologischer Punktdaten in die Fläche ("erweitertes Quadrantenverfahren").	17
Abb. 3.3 Überblick über den deutschen Teil des Elbeeinzugsgebietes, das Land Brandenburg und die im Rahmen der vorliegenden Studie für die Modellanpassung herangezogenen Einzugsgebiete der Oberen Dahme und der Stepenitz (charakterisiert durch das jeweils verwendete Digitale Höhenmodell - DHM).	18
Abb. 3.4 Für das Land Brandenburg ermittelte Jahressummen der Sickerwasserbildung für die Gesamtperiode 1961-1998. Neben den in der vorliegenden Studie berechneten Werten sind auch die im Rahmen der Vorgängerstudie (LAHMER et al. 2001b) für die Periode 1961-1990 ermittelten Werte angegeben. Ebenfalls angegeben sind Regressionsgeraden, die im vorliegenden Fall nicht-signifikanten Abnahmen der Sickerwasserbildung entsprechen.	19
Abb. 3.5 Flächenanteile der für die Simulationsrechnungen verwendeten 15 Hydrotopklassen an der Einzugsgebietsfläche des Validierungsgebietes Obere Dahme.	20
Abb. 3.6 Für das Einzugsgebiet der Oberen Dahme im Zeitraum 1.11.1976-31.10.1994 gemessene und simulierte Durchflüsse am Pegel Märkisch-Buchholz.	20
Abb. 3.7 Für das Einzugsgebiet der Stepenitz im Zeitraum 1.1.1981-31.10.1994 gemessene und simulierte Durchflüsse am Pegel Wolfshagen.	21
Abb. 4.1 Für das Land Brandenburg ermittelte Jahressummen verschiedener meteorologischer Eingangs- sowie berechneter Wasserhaushaltsgrößen für die Gesamtperiode 1961-1998 (in mm; die mittlere Tagestemperatur ist in °C/Tag und in 10-facher Überhöhung dargestellt).	22
Abb. 4.2 Räumliche Verteilung der im Land Brandenburg berechneten Sickerwassermenge für die beiden extremen Jahre 1974 (besonders feucht, oben) und 1989 (besonders trocken, unten).	24
Abb. 4.3 Für die Gesamtperiode 1961-1998 berechnete mittlere Jahres-, Sommer- und Wintersummen der Größen Niederschlag (PI), pot. Verdunstung (EP), klim. Wasserbilanz (WB), reale Verdunstung (ER), Sickerwasserbildung (SWB), Oberflächenabflussbildung (RO) und Gesamtabfluss (QC) im Land Brandenburg. Im Fall der mittleren Tagestemperatur (LT) wurde jeweils der entsprechende Tagesmittelwert berechnet (°C) und für Darstellungszwecke um den Faktor 10 erhöht.	25
Abb. 4.4 Räumliche Verteilung der mittleren jährlichen Sickerwassermenge für die Periode 1961-1998 im Land Brandenburg.	25
Abb. 4.5 Räumliche Verteilung der für den Zeitraum 1961-1998 berechneten mittleren Sickerwassermenge im Land Brandenburg im Sommer- (oben) und im Winterhalbjahr (unten).	26
Abb. 4.6 Für das Land Brandenburg berechnete mittlere Monatssummen (Periode 1961-1998) meteorologischer Eingangsgrößen (Niederschlag, mittl. Tagestemperatur) und davon abgeleiteter Größen (potenzielle Verdunstung, klimatische Wasserbilanz) sowie daraus resultierende mittlere Monatssummen der realen Verdunstung, der Sickerwasserbildung, der Oberflächenabflussbildung und der Gesamtabflusshöhe.	28
Abb. 4.7 Mittelwerte der Sickerwasserbildung (mittlere Jahres-, Halbjahres- und Quartalswerte) für die vier Teilperioden 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 und 1991-1998.	29
Abb. 4.8 Mittlere Monatssummen der für das Land Brandenburg berechneten Sickerwassermenge für die Teilperioden 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 und 1991-1998. Um Verschiebungen zwischen den Dekaden deutlich zu machen, sind für jede Dekade die prozentualen Anteile der Sickerwassermenge an der jeweiligen mittleren Jahressumme angegeben.	30
Abb. 5.1 Für das Land Brandenburg berechnete <i>mittlere Monatssummen</i> des Niederschlags (oben), der Verdunstung (Mitte) und des Gebietsabflusses (unten) für die <i>Teilperioden</i> 1961-1970, 1971-1980, 1981-	

1990 und 1991-1998. Um innerjährliche Verschiebungen deutlich zu machen, sind die prozentualen Anteile an der jeweiligen mittleren Jahressumme jeder Dekade angegeben.....	31
Abb. 5.2 Auf Basis der Jahressummen 1961-1998 berechnete zeitliche Entwicklung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen. Neben Regressionsgeraden sind auch Gleitmittel über 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Bis auf die mittlere Tagestemperatur zeigt keine der dargestellten Größen im Zeitraum 1961-1998 eine statistisch signifikante zeitliche Veränderung (einen Trend).....	32
Abb. 5.3 Auf Basis von Halbjahreswerten (Sommer- und Wintersummen) für die Periode 1961-1998 berechnete zeitliche Entwicklung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen. Neben Regressionsgeraden sind Gleitmittel über 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Bis auf die im Winterhalbjahr berechnete mittlere Tagestemperatur, potenzielle und reale Verdunstung zeigt keine der dargestellten Größen im Zeitraum 1961-1998 eine statistisch signifikante zeitliche Veränderung (einen Trend).....	35
Abb. 6.1 Für das Land Brandenburg auf der Basis von <i>Jahressummen</i> für die Periode 1961-1998 berechnete Werte der Sickerwasserbildung. Neben dem Mittelwert und dem 1-Sigma-Bereich sind die Regressionsgerade und Gleitmittel für 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Die durch die Regressionsgerade angezeigte Abnahme der Sickerwassermenge ist statistisch nicht signifikant, d. h. es handelt sich um keinen Trend.....	41
Abb. 6.2 Für das Land Brandenburg auf der Basis von <i>Winter- und Sommersummen</i> für die Periode 1961-1998 berechnete Werte der Sickerwasserbildung. Neben dem Mittelwert und dem 1-Sigma-Bereich sind die Regressionsgeraden und Gleitmittel für 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Die durch die Regressionsgeraden angezeigten Abnahmen der Sickerwassermenge sind weder für das Winter- noch für das Sommerhalbjahr statistisch signifikant, d. h. es handelt sich in beiden Fällen um keinen Trend.....	42
Abb. 6.3 Für das Land Brandenburg auf der Basis von <i>Quartalssummen</i> für die Periode 1961-1998 berechnete Werte der Sickerwasserbildung. Neben dem Mittelwert und dem 1-Sigma-Bereich sind die Regressionsgeraden und Gleitmittel für 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Die durch die Regressionsgeraden angezeigten Änderungen der Sickerwassermenge sind für keines der vier Quartale statistisch signifikant, d. h. es handelt sich in keinem Fall um einen Trend.....	43
Abb. 6.4 Für das Land Brandenburg auf der Basis von <i>Monatssummen</i> für die Periode 1961-1998 berechnete Werte der Sickerwasserbildung. Neben dem Mittelwert und dem 1-Sigma-Bereich sind die Regressionsgeraden und Gleitmittel für 5 bzw. 10 Jahre eingezeichnet. Die durch die Regressionsgeraden angezeigten Änderungen der Sickerwassermenge sind lediglich für den Monat Mai signifikant, d. h. nur für diesen Monat handelt sich um einen statistisch nachweisbaren Trend.....	46
Abb. 6.5 Räumliche Verteilung des für das Land Brandenburg für den Gesamtzeitraum 1961-1998 auf der Basis von 1.599 Einzelflächen berechneten <i>Korrelationskoeffizienten R</i>	48
Abb. 6.6 Für das Land Brandenburg auf der Basis des Gesamtzeitraums 1961-1998 berechneter „ <i>absoluter Trend</i> “ der Sickerwasserbildung mit 13 Kategorien der zwischen 1961 und 1998 berechneten Änderung der Sickerwassermenge (in mm).....	49
Abb. 6.7 Teilflächen im Land Brandenburg, für die der Mann-Test signifikante Änderungen (Trends) der Sickerwassermenge zwischen 1961 und 1998 ausweist (rechts). Auf der linken Seite sind Ausschnitte der Flächenverteilungen des absoluten Trends T_a zusammen mit den als signifikant trendbehaftet ausgewiesenen Teilflächen (schwarz umrandet) dargestellt.	51
Abb. 6.8 Häufigkeitsverteilung der im Land Brandenburg im Zeitraum 1961-1998 flächendifferenziert berechneten Änderungen der Sickerwassermenge. Dargestellt sind die Flächenanteile am Gesamtgebiet als Funktion des absoluten Trends T_a - sowohl unter Einschluß aller Flächen (hell) als auch für die signifikant trendbehafteten Flächen (dunkel).....	51
Abb. 6.9 Kartendarstellungen des für die Simulationsrechnungen verwendeten Digitalen Höhenmodells (oben) sowie des Grundwasserflurabstandes (unten), zusammen mit den Teilflächen im Land Brandenburg, für die eine signifikante Änderung (absoluter Trend T_a) der Sickerwassermenge zwischen 1961 und 1998 ausgewiesen wird (schwarz umrandet).	52
Abb. 6.10 Mittlerer „absoluter Trend T_a “ der Sickerwasserbildung SWB (samt Standardabweichung) für die 15 im Land Brandenburg ausgewiesenen <i>Hydrotopklassen</i> . Die Auswertung erfolgte unter Berücksichtigung aller Flächen (links) sowie nur der Flächen, die nach dem Mann-Test signifikante Änderungen von SWB (einen Trend) aufweisen (rechts).	54

Überblick über die Tabellen

Tab. 2.1 Überblick über die für das Land Brandenburg zur Berechnung der Sickerwassermenge verwendeten räumlichen Grundlagenkarten.....	9
Tab. 2.2 Überblick über die für die Modellierung des Landes Brandenburg verwendeten meteorologischen Zeitreihen des Deutschen Wetterdienstes (DWD).	13
Tab. 4.1 Überblick über die für das Land Brandenburg im Zeitraum 1961-1998 ermittelten Jahressummen meteorologischer Eingangs- und berechneter Wasserhaushaltsgrößen (in mm/Jahr bzw. °C/Tag für LT).	23
Tab. 5.1 Korrelationskoeffizienten R und Bestimmtheitsmaß $B = R^2$ zwischen den für das Land Brandenburg berechneten Jahreswerten (Periode 1961-1998) der meteorologischen Größen Niederschlag (PI) und mittlere Tagestemperatur (LT), den davon abgeleiteten Sekundärgrößen potenzielle Verdunstung (EP) und klimatische Wasserbilanz (WB) sowie den Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung (ER), Sickerwasserbildung (SWB), Oberflächenabflussbildung (RO) und Gebietsabfluss (QC). Statistisch signifikante Werte von R und B^2 sind hinterlegt.	34
Tab. 5.2 Bewertung des Korrelationskoeffizienten nach Chaddock.	34
Tab. 5.3 Aus einer linearen Regression der Jahres-, Sommer- und Wintersummen für die Periode 1961-1998 im Land Brandenburg berechnete Änderungen der meteorologischen Größen Niederschlag (PI) und mittlere Tagestemperatur (LT), der davon abgeleiteten Sekundärgrößen potenzielle Verdunstung (EP) und klimatische Wasserbilanz (WB) sowie der Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung (ER), Sickerwasserbildung (SWB), Oberflächenabflussbildung (RO) und Gebietsabfluss (QC). Lediglich bei den hinterlegten Werten handelt es sich um statistisch signifikante Änderungen (Trends).	36
Tab. 6.1 Für das Land Brandenburg berechnete Jahres-, Winter-, Sommer- und Quartalssummen der Sickerwasserbildung (Periode 1961-1998) und daraus abgeleitete Werte der statistischen Analysen.	44
Tab. 6.2 Für das Land Brandenburg berechnete <i>Monatssummen</i> der Sickerwasserbildung (Periode 1961-1998) und daraus abgeleitete Werte der statistischen Analysen. Statistisch signifikante Werte des Bestimmtheitsmaßes B, die einem Trend der Sickerwasserbildung entsprechen, sind hervorgehoben. ..	47
Tab. 6.3 Statistische Kennwerte der für das Land Brandenburg für den Gesamtzeitraum 1961-1998 berechneten „absoluten Trendkarte“: Differenz der auf der Basis einer linearen Regression berechneten Sickerwassermenge zwischen dem Anfangs- (1961) und Endzustand (1998), Anzahl der in verschiedene Wertebereiche fallenden Einzelflächen (Elementarflächen EFL und Hydrotope HYD), Flächengrößen und Flächenanteile am Gesamtgebiet. Die statistischen Größen sind sowohl für alle Flächen des Untersuchungsgebietes (links) als auch für die signifikant trendbehafteten Flächen (rechts) angegeben.	50
Tab. 6.4 Trendverhalten verschiedener <i>Flächentypen</i> (Hydrotopklassen) für die im Land Brandenburg im Zeitraum 1961-1998 berechnete Sickerwasserbildung. Die statistischen Analysen basieren auf den für alle Flächen (links) sowie für die Flächen mit signifikantem Trend (rechts) berechneten absoluten Trends T_a . Für jede Hydrotopklasse sind die Anzahl der analysierten Einzelflächen (Elementarflächen EFL), die Flächengröße, der Flächenanteil am Gesamtgebiet sowie der Mittelwert des absoluten Trends angegeben. Für die signifikant trendbehafteten Flächen ist zusätzlich der Anteil an der Gesamtfläche der betreffenden Hydrotopklasse ausgewiesen.....	53

PIK Report-Reference:

- No. 1 3. Deutsche Klimatagung, Potsdam 11.-14. April 1994
Tagungsband der Vorträge und Poster (April 1994)
- No. 2 Extremer Nordsommer '92
Meteorologische Ausprägung, Wirkungen auf naturnahe und vom Menschen beeinflusste Ökosysteme, gesellschaftliche Perzeption und situationsbezogene politisch-administrative bzw. individuelle Maßnahmen (Vol. 1 - Vol. 4)
H.-J. Schellnhuber, W. Enke, M. Flechsig (Mai 1994)
- No. 3 Using Plant Functional Types in a Global Vegetation Model
W. Cramer (September 1994)
- No. 4 Interannual variability of Central European climate parameters and their relation to the large-scale circulation
P. C. Werner (Oktober 1994)
- No. 5 Coupling Global Models of Vegetation Structure and Ecosystem Processes - An Example from Arctic and Boreal Ecosystems
M. Plöchl, W. Cramer (Oktober 1994)
- No. 6 The use of a European forest model in North America: A study of ecosystem response to climate gradients
H. Bugmann, A. Solomon (Mai 1995)
- No. 7 A comparison of forest gap models: Model structure and behaviour
H. Bugmann, Y. Xiaodong, M. T. Sykes, Ph. Martin, M. Lindner, P. V. Desanker, S. G. Cumming (Mai 1995)
- No. 8 Simulating forest dynamics in complex topography using gridded climatic data
H. Bugmann, A. Fischlin (Mai 1995)
- No. 9 Application of two forest succession models at sites in Northeast Germany
P. Lasch, M. Lindner (Juni 1995)
- No. 10 Application of a forest succession model to a continentality gradient through Central Europe
M. Lindner, P. Lasch, W. Cramer (Juni 1995)
- No. 11 Possible Impacts of global warming on tundra and boreal forest ecosystems - Comparison of some biogeochemical models
M. Plöchl, W. Cramer (Juni 1995)
- No. 12 Wirkung von Klimaveränderungen auf Waldökosysteme
P. Lasch, M. Lindner (August 1995)
- No. 13 MOSES - Modellierung und Simulation ökologischer Systeme - Eine Sprachbeschreibung mit Anwendungsbeispielen
V. Wenzel, M. Kücken, M. Flechsig (Dezember 1995)
- No. 14 TOYS - Materials to the Brandenburg biosphere model / GAIA
Part 1 - Simple models of the "Climate + Biosphere" system
Yu. Svirezhev (ed.), A. Block, W. v. Bloh, V. Brovkin, A. Ganopolski, V. Petoukhov, V. Razzhevaikin (Januar 1996)
- No. 15 Änderung von Hochwassercharakteristiken im Zusammenhang mit Klimaänderungen - Stand der Forschung
A. Bronstert (April 1996)
- No. 16 Entwicklung eines Instruments zur Unterstützung der klimapolitischen Entscheidungsfindung
M. Leimbach (Mai 1996)
- No. 17 Hochwasser in Deutschland unter Aspekten globaler Veränderungen - Bericht über das DFG-Rundgespräch am 9. Oktober 1995 in Potsdam
A. Bronstert (ed.) (Juni 1996)
- No. 18 Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, A. Becker (Juli 1996)
- No. 19 Identification of vulnerable subregions in the Elbe drainage basin under global change impact
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Cramer, A. Becker (Juli 1996)
- No. 20 Simulation of soil moisture patterns using a topography-based model at different scales
D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Lahmer, W. Cramer, V. Krysanova (Juli 1996)
- No. 21 International relations and global climate change
D. Sprinz, U. Luterbacher (1st ed. July, 2nd ed. December 1996)
- No. 22 Modelling the possible impact of climate change on broad-scale vegetation structure - examples from Northern Europe
W. Cramer (August 1996)

- No. 23 A methode to estimate the statistical security for cluster separation
F.-W. Gerstengarbe, P.C. Werner (Oktober 1996)
- No. 24 Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients
H. Bugmann, W. Cramer (Januar 1997)
- No. 25 The development of climate scenarios
P.C. Werner, F.-W. Gerstengarbe (Januar 1997)
- No. 26 On the Influence of Southern Hemisphere Winds on North Atlantic Deep Water Flow
S. Rahmstorf, M. H. England (Januar 1977)
- No. 27 Integrated systems analysis at PIK: A brief epistemology
A. Bronstert, V. Brovkin, M. Krol, M. Lüdeke, G. Petschel-Held, Yu. Svirezhev, V. Wenzel (März 1997)
- No. 28 Implementing carbon mitigation measures in the forestry sector - A review
M. Lindner (Mai 1997)
- No. 29 Implementation of a Parallel Version of a Regional Climate Model
M. Kücken, U. Schättler (Oktober 1997)
- No. 30 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results
W. Cramer, D. W. Kicklighter, A. Bondeau, B. Moore III, G. Churkina, A. Ruimy, A. Schloss, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)
- No. 31 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Analysis of the seasonal behaviour of NPP, LAI, FPAR along climatic gradients across ecotones
A. Bondeau, J. Kaduk, D. W. Kicklighter, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)
- No. 32 Evaluation of the physiologically-based forest growth model FORSANA
R. Grote, M. Erhard, F. Suckow (November 1997)
- No. 33 Modelling the Global Carbon Cycle for the Past and Future Evolution of the Earth System
S. Franck, K. Kossacki, Ch. Bounama (Dezember 1997)
- No. 34 Simulation of the global bio-geophysical interactions during the Last Glacial Maximum
C. Kubatzki, M. Claussen (Januar 1998)
- No. 35 CLIMBER-2: A climate system model of intermediate complexity. Part I: Model description and performance for present climate
V. Petoukhov, A. Ganopolski, V. Brovkin, M. Claussen, A. Eliseev, C. Kubatzki, S. Rahmstorf (Februar 1998)
- No. 36 Geocybernetics: Controlling a rather complex dynamical system under uncertainty
H.-J. Schellnhuber, J. Kropp (Februar 1998)
- No. 37 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf Weizenbestände des Free-Air Carbon dioxide Enrichment (FACE) - Experimentes Maricopa (USA)
Th. Kartschall, S. Grossman, P. Michaelis, F. Wechsung, J. Gräfe, K. Waloszczyk, G. Wechsung, E. Blum, M. Blum (Februar 1998)
- No. 38 Die Berücksichtigung natürlicher Störungen in der Vegetationsdynamik verschiedener Klimagebiete
K. Thonicke (Februar 1998)
- No. 39 Decadal Variability of the Thermohaline Ocean Circulation
S. Rahmstorf (März 1998)
- No. 40 SANA-Project results and PIK contributions
K. Bellmann, M. Erhard, M. Flechsig, R. Grote, F. Suckow (März 1998)
- No. 41 Umwelt und Sicherheit: Die Rolle von Umweltschwellenwerten in der empirisch-quantitativen Modellierung
D. F. Sprinz (März 1998)
- No. 42 Reversing Course: Germany's Response to the Challenge of Transboundary Air Pollution
D. F. Sprinz, A. Wahl (März 1998)
- No. 43 Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in großen Einzugsgebieten. Zusammenstellung der Beiträge des Workshops am 15. Dezember 1997 in Potsdam
A. Bronstert, V. Krysanova, A. Schröder, A. Becker, H.-R. Bork (eds.) (April 1998)
- No. 44 Capabilities and Limitations of Physically Based Hydrological Modelling on the Hillslope Scale
A. Bronstert (April 1998)
- No. 45 Sensitivity Analysis of a Forest Gap Model Concerning Current and Future Climate Variability
P. Lasch, F. Suckow, G. Bürger, M. Lindner (Juli 1998)

- No. 46 Wirkung von Klimaveränderungen in mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern
M. Lindner (Juli 1998)
- No. 47 SPRINT-S: A Parallelization Tool for Experiments with Simulation Models
M. Flechsig (Juli 1998)
- No. 48 The Odra/Oder Flood in Summer 1997: Proceedings of the European Expert Meeting in
Potsdam, 18 May 1998
A. Bronstert, A. Ghazi, J. Hladny, Z. Kundzewicz, L. Menzel (eds.) (September 1998)
- No. 49 Struktur, Aufbau und statistische Programmbibliothek der meteorologischen Datenbank am
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
H. Österle, J. Glauer, M. Denhard (Januar 1999)
- No. 50 The complete non-hierarchical cluster analysis
F.-W. Gerstengarbe, P. C. Werner (Januar 1999)
- No. 51 Struktur der Amplitudengleichung des Klimas
A. Hauschild (April 1999)
- No. 52 Measuring the Effectiveness of International Environmental Regimes
C. Helm, D. F. Sprinz (Mai 1999)
- No. 53 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen innerhalb des
Free-Air Carbon Dioxide Enrichment-Experimentes: Ableitung allgemeiner Modelllösungen
Th. Kartschall, J. Gräfe, P. Michaelis, K. Waloszczyk, S. Grossman-Clarke (Juni 1999)
- No. 54 Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN
L. Menzel (August 1999)
- No. 55 Dry atmosphere asymptotics
N. Botta, R. Klein, A. Almgren (September 1999)
- No. 56 Wachstum von Kiefern-Ökosystemen in Abhängigkeit von Klima und Stoffeintrag - Eine
regionale Fallstudie auf Landschaftsebene
M. Erhard (Dezember 1999)
- No. 57 Response of a River Catchment to Climatic Change: Application of Expanded Downscaling to
Northern Germany
D.-I. Müller-Wohlfel, G. Bürger, W. Lahmer (Januar 2000)
- No. 58 Der "Index of Sustainable Economic Welfare" und die Neuen Bundesländer in der
Übergangsphase
V. Wenzel, N. Herrmann (Februar 2000)
- No. 59 Weather Impacts on Natural, Social and Economic Systems (WISE, ENV4-CT97-0448)
German report
M. Flechsig, K. Gerlinger, N. Herrmann, R. J. T. Klein, M. Schneider, H. Sterr, H.-J. Schellnhuber
(Mai 2000)
- No. 60 The Need for De-Aliasing in a Chebyshev Pseudo-Spectral Method
M. Uhlmann (Juni 2000)
- No. 61 National and Regional Climate Change Impact Assessments in the Forestry Sector
- Workshop Summary and Abstracts of Oral and Poster Presentations
M. Lindner (ed.) (Juli 2000)
- No. 62 Bewertung ausgewählter Waldfunktionen unter Klimaänderung in Brandenburg
A. Wenzel (August 2000)
- No. 63 Eine Methode zur Validierung von Klimamodellen für die Klimawirkungsforschung hinsichtlich
der Wiedergabe extremer Ereignisse
U. Böhm (September 2000)
- No. 64 Die Wirkung von erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen auf die Transpiration eines
Weizenbestandes unter Berücksichtigung von Wasser- und Stickstofflimitierung
S. Grossman-Clarke (September 2000)
- No. 65 European Conference on Advances in Flood Research, Proceedings, (Vol. 1 - Vol. 2)
A. Bronstert, Ch. Bismuth, L. Menzel (eds.) (November 2000)
- No. 66 The Rising Tide of Green Unilateralism in World Trade Law - Options for Reconciling the
Emerging North-South Conflict
F. Biermann (Dezember 2000)
- No. 67 Coupling Distributed Fortran Applications Using C++ Wrappers and the CORBA Sequence
Type
Th. Slawig (Dezember 2000)
- No. 68 A Parallel Algorithm for the Discrete Orthogonal Wavelet Transform
M. Uhlmann (Dezember 2000)

- No. 69 SWIM (Soil and Water Integrated Model), User Manual
V. Krysanova, F. Wechsung, J. Arnold, R. Srinivasan, J. Williams (Dezember 2000)
- No. 70 Stakeholder Successes in Global Environmental Management, Report of Workshop,
Potsdam, 8 December 2000
M. Welp (ed.) (April 2001)
- No. 71 GIS-gestützte Analyse globaler Muster anthropogener Waldschädigung - Eine sektorale
Anwendung des Syndromkonzepts
M. Cassel-Gintz (Juni 2001)
- No. 72 Wavelets Based on Legendre Polynomials
J. Fröhlich, M. Uhlmann (Juli 2001)
- No. 73 Der Einfluß der Landnutzung auf Verdunstung und Grundwasserneubildung - Modellierungen
und Folgerungen für das Einzugsgebiet des Glan
D. Reichert (Juli 2001)
- No. 74 Weltumweltpolitik - Global Change als Herausforderung für die deutsche Politikwissenschaft
F. Biermann, K. Dingwerth (Dezember 2001)
- No. 75 Angewandte Statistik - PIK-Weiterbildungsseminar 2000/2001
F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.) (März 2002)
- No. 76 Zur Klimatologie der Station Jena
B. Orlowsky (September 2002)
- No. 77 Large-Scale Hydrological Modelling in the Semi-Arid North-East of Brazil
A. Güntner (September 2002)
- No. 78 Phenology in Germany in the 20th Century: Methods, Analyses and Models
J. Schaber (November 2002)
- No. 79 Modelling of Global Vegetation Diversity Pattern
I. Venevskaia, S. Venevsky (Dezember 2002)
- No. 80 Proceedings of the 2001 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental
Change "Global Environmental Change and the Nation State"
F. Biermann, R. Brohm, K. Dingwerth (eds.) (Dezember 2002)
- No. 81 POTSDAM - A Set of Atmosphere Statistical-Dynamical Models: Theoretical Background
V. Petoukhov, A. Ganopolski, M. Claussen (März 2003)
- No. 82 Simulation der Siedlungsflächenentwicklung als Teil des Globalen Wandels und ihr Einfluß auf
den Wasserhaushalt im Großraum Berlin
B. Ströbl, V. Wenzel, B. Pfützner (April 2003)
- No. 83 Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen
auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven
F.-W. Gerstengarbe, F. Badeck, F. Hattermann, V. Krysanova, W. Lahmer, P. Lasch, M. Stock,
F. Suckow, F. Wechsung, P. C. Werner (Juni 2003)
- No. 84 Well Balanced Finite Volume Methods for Nearly Hydrostatic Flows
N. Botta, R. Klein, S. Langenberg, S. Lützenkirchen (August 2003)
- No. 85 Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg auf der Basis
flächendeckender Wasserhaushaltsberechnungen
W. Lahmer, B. Pfützner (September 2003)