

Studien und Tagungsberichte
Band 27

**Flächendeckende Modellierung
von Wasserhaushaltsgrößen
für das Land Brandenburg**



LANDESUMWELTAMT
BRANDENBURG



**Studien und Tagungsberichte, Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg
ISSN 0948-0838**

Herausgeber:

Landesumweltamt Brandenburg (LUA)

Berliner Straße 21–25

14467 Potsdam

Tel.: 0331-23 23 259

Fax.: 0331-29 21 08

e-mail: infoline@lua.brandenburg.de

Band 27

Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg

Potsdam, im Dezember 2000

Redaktion:

LUA, Abteilung Gewässerschutz und Wasserwirtschaft

Referat Wasserwirtschaftliche Rahmen- und Bewirtschaftungsplanung, Dr. René Schenk

Bearbeitung:

- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK), Postfach 60 12 03, 14412 Potsdam
Dr. Werner Lahmer (Kapitel 1, 2, 4, 5)
- Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Institut für Landschaftswasserhaushalt, Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg
Dr. Ralf Dannowski, Dr. Jörg Steidl (Kapitel 1, 2, 3, 5)
- Büro für Angewandte Hydrologie (BAH), Wollankstraße 117, 13187 Berlin
Dr. Bernd Pfützner (Kapitel 4)

Gesamtherstellung: Digital & Druck, Inh. Matthias Greschow, Welzow
gedruckt auf Recycling-Papier aus 100% Altpapier

Schutzgebühr: 15,- DM



Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Landesregierung Brandenburg herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers

Studien und Tagungsberichte
Band 27

**Flächendeckende Modellierung
von Wasserhaushaltsgrößen
für das Land Brandenburg**

Beitrag zum Projekt
„Stabilisierung und Verbesserung des Landschaftswasser-
haushaltes in Brandenburg“
des Landesumweltamtes Brandenburg



Zentrum für Agrarlandschafts-
Landnutzungsforschung



LANDESUMWELTAMT
BRANDENBURG





Inhalt

Zusammenfassung und Ausblick	4
Summary and outlook	6
1 Einführung	
1.1 Die Konzeption des Landesumweltamtes zur Stabilisierung und Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes	8
1.2 Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen	8
2 Datengrundlagen	
2.1 Anforderungen an die Datengrundlagen	10
2.2 Klima	10
2.2.1 Mittlere Niederschlagshöhe	10
2.2.2 Mittlere potenzielle Verdunstungshöhe	10
2.2.3 Meteorologische Zeitreihen	11
2.3 Landnutzung	11
2.4 Topographie	13
2.5 Geologie	13
2.5.1 Böden	13
2.5.2 Grundwasserflurabstand	14
2.6 Hydrographie	14
2.7 Datenaufbereitung	15
3 Modellierung des Gebietswasserhaushaltes mit dem Modell ABIMO	
3.1 Methodik	24
3.1.1 Kenntnisstand	24
3.1.2 Das Abflussbildungsmodell ABIMO	25
3.1.3 Kalibrierung und Validierung des Ansatzes in Beispielsgebieten	26
3.1.4 Separation des Gesamtabflusses in Winter- und Sommerhalbjahr	30
3.2 Gesamtabfluss für das Land Brandenburg	36
3.3 Vergleich mit früheren Ergebnissen	38
4 Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen mit dem Modellierungssystem ARC/EGMO	
4.1 Einleitung	41
4.2 Das hydrologische Modellierungssystem ARC/EGMO	41
4.3 Räumliche Disaggregation und Aggregation	43
4.3.1 Disaggregation zu Elementarflächen	43
4.3.2 Aggregation zu Hydrotopen und Hydrotopklassen	43
4.4 Modellvalidierung	46
4.5 Flächendeckende Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg	50
4.5.1 Ergebnisse für das Gesamtgebiet	50
4.5.2 Ergebnisse für die Planungsräume	56
4.5.3 Ergebnisse für verschiedene Hydrotopklassen	68
5 Vergleich der angewandten Modelle und Ergebnisse	
5.1 Vergleich der Modellansätze	70
5.2 Vergleich der Ergebnisse	72
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	73
Literaturverzeichnis	75

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, die räumliche Variabilität und die quantitative Ausprägung verschiedener Wasserhaushaltsgrößen wie Niederschlag, Evapotranspiration und Gesamtabfluss flächendeckend für das Land Brandenburg zu ermitteln. Dazu wurden die Mittelwerte dieser Größen für den Zeitraum 1961–1990 berechnet und in Form von kleinmaßstäbigen Karten dargestellt. Darüber hinaus sollte durch den Vergleich von unterschiedlichen Modellansätzen untersucht werden, inwieweit die Ergebnisse der einzelnen Modelle variieren und welche Vor- oder Nachteile der jeweilige Modellansatz bietet. Eingesetzt wurden das Modell ABIMO, das im Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) genutzt wird, und das Modell ARC/EGMO, mit dem im Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) gearbeitet wird.

Um ein hohes Maß an Vergleichbarkeit zwischen beiden Modellansätzen zu gewährleisten, wurden zunächst identische Datensätze der statischen räumlichen Variablen für die zur Modellierung notwendigen Grundlagendaten erstellt. Für die meteorologischen Daten mussten aufgrund der differenzierten Modellanforderungen jedoch unterschiedliche Datensätze verwendet werden. Aus der Verschneidung aller räumlichen Grundlagendaten wurde eine Karte mit 57.836 Elementarflächen erzeugt, die sich voneinander durch ihre naturräumliche Ausstattung unterscheiden. Um mit dem auf Tagesschrittbasis arbeitenden ARC/EGMO zu angemessenen Rechenzeiten bei gleichzeitiger hoher Ergebnisqualität zu kommen, wurden diejenigen Elementarflächen, die sich durch ähnliche hydrologische Eigenschaften auszeichnen, zunächst zu Hydrotopen und darauf basierend zu 15 Hydrotopklassen aggregiert (Kapitel 4.3).

Über die Vergleichbarkeit zwischen den Modellansätzen hinaus ging es bei den Wasserhaushaltsberechnungen mit ABIMO zunächst um die methodische Frage, aufbauend auf der neuen Datenbasis der potenziellen Evapotranspiration (Gras-Referenzverdunstung nach dem HAD, 1998) zu Werten des Gesamtabflusses zu kommen, die konsistent zu den bis dahin verfügbaren sind. Dazu war eine Kalibrierung an gemessenen Abflüssen der Einzugsgebiete der Ucker und der Oberen Dahme für die Jahressumme der Gesamtabflusshöhe erforderlich, die mit der um 10 % erhöhten Gras-Referenzverdunstung die beste Annäherung brachte (Kap. 3.1.3). Für die Separation der mit ABIMO zu errechnenden Gesamtabflusshöhe in die Teilsommen des hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahres wurde – wiederum anhand gemessener Werte der genannten Einzugsgebiete – die bodenabhängig differenzierte Auffüllung des Boden-/Grundwasserspeichers im Winterhalbjahr spezifiziert. Sie beschreibt die bilanzbedingte Umverteilung des Gesamtabflusses zwischen Sommer- und Winterhalbjahr und beträgt im Landesmittel (ohne Berlin) 51 mm (Kap. 3.1.4).

Mit der beschriebenen räumlich differenzierten, zeitlich für die Jahre 1961–1990 aggregierten Datengrundlage wurde das Modell ABIMO zur Berechnung der langjährig mittleren Gesamtabflusshöhe im Landesmaßstab eingesetzt. Die dazu erforderliche bidirektionale Datenübergabe zwischen Geographischem Informationssystem (GIS) und Modell erfolgte mittels einer im ZALF entwickelten Datenschnittstelle (Kap. 3.2).

Der abschließende Vergleich der ABIMO-Ergebnisse mit der 1993 auf der Basis der älteren Deckfolien für die Jahre 1951–1980 erarbeiteten Übersicht für das Land Brandenburg ergab im Mittel eine um 25 mm a^{-1} verringerte Höhe des Gesamtabflusses ($R_{\text{ABIMO}} = 105 \text{ mm a}^{-1}$ gegenüber $R_{\text{RASTER}} = 130 \text{ mm a}^{-1}$). Als Hauptursache für diese Verschiebung wurde die methodisch bedingte Differenz der räumlichen Verteilungen der potenziellen Evapotranspiration ($ET_{\text{ABIMO}} = 656 \text{ mm/a}$, $ET_{\text{RASTER}} = 626 \text{ mm}$) herausgestellt (Kap. 3.3).

Im Gegensatz zu ABIMO handelt es sich bei ARC/EGMO um ein zeitlich hoch aufgelöstes dynamisches Modell zur Berechnung aller relevanten Wasserhaushaltsgrößen in Gebieten unterschiedlicher Größe (ca. 10 bis 100.000 km²), das neben den Vertikalprozessen des Landschaftswasserhaushaltes auch die Lateralprozesse nachbildet (siehe Kap. 4.2). Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung (normalerweise ein Tag, bei ausreichender Datengrundlage aber auch höher) können die Wasserhaushaltsgrößen potenzielle Verdunstung, klimatische Wasserbilanz, (tatsächliche) Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gebietsabfluss in Tagesschritten berechnet und in Form von Monats-, Winter-, Sommer- oder Jahreswerten (sowie entsprechenden, über den Gesamtzeitraum gemittelten Werten) ausgegeben werden. ARC/EGMO ist so konzipiert, dass mit allgemein verfügbaren digitalen Karten gearbeitet werden kann. Durch die direkte Anbindung an ein GIS ist dabei die direkte Nutzung dieser Daten möglich. Die Möglichkeiten der Modellkalibrierung beschränken sich auf die Korrektur der verwendeten meteorologischen Stationswerte (z.B. Niederschlag) sowie auf die Anpassung der lateralen Prozesse (z.B. Zeitkonstanten der Abflusskomponenten), für die gewöhnlich keine flächendeckenden Informationen vorliegen.

Das Modell wurde in den Einzugsgebieten der Oberen Dahme sowie der Stepenitz anhand von täglichen Abflusswerten validiert. Der Vergleich zwischen den gemessenen Abflussreihen und den mit ARC/EGMO für die jeweils gleiche Periode modellierten Reihen zeigte dabei eine sehr gute Übereinstimmung (Kapitel 4.4 sowie LAHMER & BECKER 1998A). Sowohl für das Validierungsgebiet Obere Dahme als auch für das Gesamtgebiet (Brandenburg/Berlin) wurden für die Periode 1961–1990 alle interessierenden Wasserhaushaltsgrößen auf täglicher Basis berechnet und zu mittleren Jahreswerten (im Hinblick auf den Vergleich mit den Ergebnissen von ABIMO) aggregiert. Für das Gesamtgebiet wurden ebenfalls mittlere Jahressummen für das Sommer- und Winterhalbjahr (Abb. 4.13) sowie mittlere Monatssummen (Abb. 4.14) berechnet. Diese Berechnungen wurden durch Untersuchungen ergänzt, die die besondere Bedeutung der meteorologischen Eingangsgrößen und ihrer räumlichen Erfassung bei der großskaligen Modellierung verdeutlichen. Darüber hinaus wurden die Wasserhaushaltsgrößen auch für die vom LUA vorgegebenen 18 wasserwirtschaftlichen Planungsräume berechnet (Kap. 4.5.2) sowie gesonderte Untersuchungen zur Bedeutung der verschiedenen Hydrotopklassen für die Wasserhaushaltsbilanz des Untersuchungsgebietes durchgeführt (Abb. 4.26 und 4.27).

Der Vergleich der mit beiden Modellansätzen ermittelten Ergebnisse zeigt, dass sich im Fall der langjährigen Jahresmittelwerte (Tabelle 5.2) für den Gesamttraum Brandenburg/Berlin

nur relativ geringe Differenzen für die wesentlichen Wasserhaushaltsgrößen ergeben. So weichen die mit ABIMO und ARC/EGMO erzielten Ergebnisse für den Niederschlag, die Evapotranspiration und die Gesamtabflusshöhe lediglich um 0,6 %, 0,1 % und 0,2 % voneinander ab. Werden allerdings die langjährigen Mittelwerte des Sommer- bzw. Winterhalbjahres gegenüber gestellt, so differieren die Ergebnisse für die Größen Evapotranspiration und Gesamtabflusshöhe zum Teil erheblich (Tabellen 5.3 und 5.4). Ähnliches gilt grundsätzlich auch für die auf der Basis der wasserwirtschaftlichen Planungsräume erzielten Ergebnisse. Als Gründe für die abweichenden Ergebnisse können neben der unterschiedlichen Verarbeitung der meteorologischen Eingangsgrößen und der räumlichen Basiskarten in erster Linie Unterschiede bei der Berechnung der Verdunstung angeführt werden, die sich z.B. in den deutlich unterschiedlichen mittleren Sommer- und Wintersummen ausdrücken.

Abschließend ist festzustellen, dass ein dynamisches hydrologisches Modell wie ARC/EGMO seine sich aus der höheren zeitlichen Auflösung ergebenden Vorteile im Fall der Berechnung von zeitlich hoch aggregierten Wasserhaushaltsgrößen (mittleren Jahreswerten) im Landesmaßstab kaum ausspielen kann. Dennoch liefert es auch auf dieser zeitlichen Aggregationsstufe Informationen zu weiteren Wasserhaushaltsgrößen wie Sickerwasserbildung und Oberflächenabflussbildung. Zusätzliche Informationen zum zeitlichen Verhalten verschiedener Wasserhaushaltsgrößen ergeben sich dann, wenn mit Hilfe dieses Modells die mittleren Jahreswerte aller Wasserhaushaltsgrößen (Abb. 4.12) auf Halbjahres- (Abb. 4.13) oder Monatswerte (Abb. 4.14) heruntergebrochen werden.

Die hohe zeitliche Auflösung von einem Tag (oder ggf. geringer) eignet sich dagegen besonders gut für Untersuchungen zur Hochwassergefährdung oder GIS-gestützte Szenarienrechnungen zu den Auswirkungen von Landnutzungs- oder Klimaänderungen in Einzugsgebieten verschiedener Größe, da dort Informationen auf Tages- (Klimaänderungsszenarien) oder Monatsbasis (z.B. Jahresgang der Vegetation) eine entscheidende Rolle spielen. Positiv wirken sich für solche Untersuchungen auch die variablen Möglichkeiten der räumlichen Aggregation und Disaggregation (Kap. 4.3) aus, die für Simulationszeiten von 50 oder 100 Jahren (bei täglicher Auflösung) eine effektive Modellierung erst ermöglichen.

Aus der eingangs abgeleiteten, auf der Konzeption des Landesumweltamtes zur Stabilisierung und Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes basierenden Aufgabenstellung ergeben sich vielfältige und anspruchsvolle Anforderungen an weitere hydrologische Modellierungsarbeiten. Diese sollten neben der Berücksichtigung aller naturräumlichen Charakteristika wie Landbedeckung, Böden, Grundwasserflurabstand und Gewässernetz auch die für den Wasserhaushalt relevanten anthropogenen Eingriffe wie Einleitungen, Entnahmen, Staumaßnahmen, andere wasserwirtschaftliche Bauwerke wie Speicher etc. umfassen. Voraussetzung dafür sind erweiterte Datengrundlagen, insbesondere zum Umfang der in früheren Jahrzehnten durchgeführten wasserwirtschaftlichen Maßnahmen, zum Bestand technischer Anlagen, ihrem heutigen Funktionszustand und ihrer aktuellen Betriebsweise sowie den zu erwartenden Anforderungen. Mit den einzusetzenden komplexeren Modellwerkzeugen sind Grundlagen für das künftige Flussgebietsmanagement zu schaffen, um Effekte potenzieller Maßnahmen nachzuweisen, die sich positiv auf den Wasserhaushalt der Landschaften Brandenburgs auswirken. Dabei kommt wachsende Bedeutung ebenso der Frage zu, wie das hydrologisch-wasserwirtschaftliche Gesamtsystem auf zusätzliche, aus Globalem Wandel resultierende Störungen reagiert.

Die größten Gefährdungspotenziale für die Funktionstüchtigkeit des Landschaftswasserhaushaltes hängen nämlich nicht nur von den Eingriffen des Menschen in die Gestaltung der Landschaft ab, sondern verstärkt auch von Problemen, die sich aus möglichen Änderungen des globalen und regionalen Klimas ergeben können (BECKER ET AL. 1996, LAHMER 1999A, LAHMER & BECKER 1999, LAHMER ET AL. 2000). Zwar können bereits jetzt durch eine besser naturraumangepasste Landnutzung, wie z.B. bodenschonende landwirtschaftliche Bearbeitungsmethoden, Änderungen von Anbauzyklen etc., oder Änderungen der aktuellen Landbedeckung, wie z.B. Aufforstungen und andere Konversionsarten (LAHMER & BECKER 1998A, LAHMER & BECKER 1999, LAHMER ET AL. 1999B/C, LAHMER ET AL. 2000), Einflüsse auf verschiedene Wasserhaushaltskomponenten genommen werden, doch müssen diese und andere Maßnahmen unter dem Aspekt von Klimaänderungen und der durch sie induzierten Änderungen des regionalen Wasserhaushaltes neu analysiert und bewertet werden. Die hier vorgestellten Analysen des für die Periode 1961–1990 abgeleiteten „Ist-Zustandes“ stellen deshalb die Basis für solche weitergehenden Analysen dar.

Summary and outlook

The basic aim of the present study was to determine the spatial variability of various water balance components like precipitation, evapotranspiration and discharge for the total area of the state of Brandenburg (about 30.000 km²). Therefore, mean (annual and monthly) values of these components were calculated for the period 1961 to 1990 and visualised as small-scale maps. Another aim was to compare the different approaches used in the study, in order to check to what extent their results differ and which specific advantages they offer. The two approaches used were the model ABIMO applied at the Centre for Agricultural Landscape and Land Use Research (ZALF) and the model ARC/EGMO of the Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK).

In order to guarantee a high degree of comparability between both approaches, identical spatial data sets were used. Only for the meteorological input, different data sets had to be used, due to specific model requirements. By overlaying all spatial basic maps in a GIS-based pre-processing step, a map of 57,836 different elementary areas was produced, each characterised by a unique value of land use, soil, slope, etc. In the case of the highly dynamical modelling system ARC/EGMO working on a daily basis, elementary areas characterised by a similar hydrological behaviour were aggregated into 15 so-called hydrotope classes, in order to assure both high quality results and appropriate simulation times (Chap. 4.3).

An additional basic goal in the ABIMO applications was to achieve values of the total discharge, which result from the recently available data base of potential evapotranspiration (grass reference evapotranspiration following HAD (1998)) and still are comparable to those calculated earlier. Therefore, the annual totals of runoff had to be calibrated by the discharges measured for the Ucker and Upper Dahme basins. The best approach was obtained by a 10 % increase of the grass reference evapotranspiration values (Chap. 3.1.3). In order to separate the annual means of total runoff calculated by ABIMO into winter and summer means, measured values of the soil-dependent storage of the soil/groundwater reservoir in both basins were used. The dynamics of this storage induces the redistribution of total runoff between summer and winter with an average value of about 51 mm (Brandenburg without Berlin) (Chap. 3.1.4).

On the basis of the spatially differentiated and temporally aggregated (1961–1990) database, the model ABIMO was used to calculate the long-term annual mean of runoff for the state of Brandenburg. The data were transferred between the Geographical Information System (GIS) and ABIMO by a bi-directional data interface developed at ZALF (Chap. 3.2). The comparison of the present results with those derived for the state of Brandenburg in 1993 showed a decrease of about 25 mm/a ($R_{\text{ABIMO}} = 105 \text{ mm/a}$ as compared to $R_{\text{RASTER}} = 130 \text{ mm/a}$) for the total runoff. The difference of the spatial distributions of potential evapotranspiration ($ET_{\text{ABIMO}} = 656 \text{ mm/a}$, $ET_{\text{RASTER}} = 626 \text{ mm/a}$) turned out to be the main reason for this reduction (Chap. 3.3).

Contrary to ABIMO, ARC/EGMO represents a temporally high resolution dynamic model for the calculation of all interesting water balance components in areas of different size (10 to 100,000 km²). In addition to the vertical processes of the regional water balance, it also calculates all relevant lateral processes (see Chap. 4.2). Due to the high temporal resolution (normally one day, in case of a sufficient database, higher), the water balance components potential evapotranspiration, climatic water balance, (actual) evapotranspiration, percolation, surface runoff and total basin discharge can be calculated on a daily basis. The results can be aggregated in the form of (mean) monthly, winter, summer and annual values. ARC/EGMO has been designed in a way to work with generally available digital maps. By means of a direct coupling to these maps, the GIS data can be directly used in the simulation runs. Model calibration is restricted to the correction of meteorological data (e.g. precipitation measured at various stations) and parameters of lateral processes (e.g. time constants of runoff components) for which region-wide information is typically unavailable.

The model was validated on the basis of daily discharge values measured for the Upper Dahme and Stepenitz basins. The correlation between the measured and simulated hydrographs was generally good (Chap. 4.4, LAHMER & BECKER 1998A). All relevant water balance components were calculated on a daily basis for the period 1961–1990, both for the Upper Dahme validation basin and the entire Brandenburg/Berlin area. With respect to the comparison with ABIMO results, the daily values were aggregated to annual means. In addition, mean annual sums for summer and winter (Fig. 4.13), as well as mean monthly sums (Fig. 4.14) were derived for the whole area. These results were completed by calculations, which demonstrate the importance of meteorological input and its spatial assessment in meso- to macro-scale modelling. Last but not least, the water balance components were calculated for 18 planning regions (Chap. 4.5.2) and special investigations were carried out to underline the importance of various hydrotope classes for the water balance of the area under investigation (Figs. 4.26 and 4.27).

The comparison of the results obtained by the two approaches shows that there are only relatively slight differences for the essential water balance components in the case of the long-term annual means (Tab. 5.2) for the Brandenburg/Berlin area. The results obtained with ABIMO and ARC/EGMO deviate by only 0.6 %, 0.1 % and 0.2 % for precipitation, evapotranspiration and total runoff, respectively. The differences are considerably larger for the long-term summer and winter means, especially for evapotranspiration and total runoff (Tab. 5.3 and 5.4). The same is true for the results derived for the 18 planning regions. Besides the differences in handling the basic spatial maps and the meteorological input, the main reason for these deviations is the calculation of evapotranspiration. This is most evident in the values of this water balance component derived for the summer and winter season.

In summary, it must be stressed that the overall performance of a dynamic hydrological model like ARC/EGMO is inadequately demonstrated in calculating highly aggregated water balance components (e.g. annual means). Nevertheless, additional information can also be derived on an annual basis, e.g. for percolation and surface runoff. Further information on the dynamics of various water balance components can be obtained, however, only on a lower temporal aggregation level, e.g. in deriving seasonal (Fig. 4.13) or monthly (Fig. 4.14) means.

The high temporal resolution of one day (or less) provided by ARC/EGMO is especially appropriate for investigations of flood events or GIS-based scenario calculations on the effects of land use and climate changes in river basins of different size, since information on a daily (climate change scenarios) or monthly basis (e.g. vegetation period) play a decisive role here. Moreover, the variable possibilities of spatial aggregation and disaggregation (Chap. 4.3) have a positive influence on such investigations, as only they allow an effective modelling for simulation periods from 50 up to 100 years.

Various requirements of further hydrological modelling activities result from the tasks defined in the "Conception for Stabilising and Improving the Landscape Water Balance" of the Brandenburg State Office for Environment. Apart from all natural properties like land cover, soil, groundwater level and drainage network, these activities should also include anthropogenic impacts relevant for the regional water balance

such as water uptake, impounding measures, or storage facilities. The basis for such investigations are supplementary data, especially regarding measures of water resources policy carried out in previous decades, existing technical water regulation facilities and their present operativeness and operation mode. By use of the more complex data and methods related to river basin management, effects of potential measures have to be investigated, which may have a positive impact on the water balance in Brandenburg. Especially the question of how the hydrological water balance will react to additional changes resulting from Global Change is of increasing importance.

The most severe danger for the effectiveness of the regional water balance do not only depend on human impacts on the landscape, but more and more on problems which could result from possible changes of the global and regional climate (BECKER ET AL. 1996, LAHMER 1999A, LAHMER & BECKER 1999, LAHMER ET AL. 2000). In fact, it is possible to influence, even now, different water balance components by land uses adapted to nature-like, e.g. soil-protecting agricultural methods of cultivation, a change of cropping cycles etc., or by a change of the existing land cover, e.g. afforestation and other kinds of conversion (LAHMER & BECKER 1998A, LAHMER & BECKER 1999, LAHMER ET AL. 1999B/C, LAHMER ET AL. 2000). These and other measures, however, have to be analysed and evaluated from the aspect of climatic changes and their impact on the regional water balance. The analyses of the „actual situation“ presented here for the period 1961 to 1990 form the basis for such continued analyses.

1 Einführung

1.1 Die Konzeption des Landesumweltamtes zur Stabilisierung und Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes

Seit Jahrhunderten greift der Mensch in den Wasser- und Naturhaushalt ein, wobei sich nicht nur die Eingriffe, die direkt an Gewässern stattfinden, sondern auch die vielfältigen Veränderungen großflächiger Landschaftsräume mit unterschiedlicher Intensität auf den Wasserhaushalt auswirken. So wurden z.B. Gewässer aufgestaut und begradigt, großflächige Rodungen vorgenommen, Auen eingedeicht und Niedermoore trockengelegt. Große Flächen sind durch Bebauung versiegelt, und zur Gewinnung von fossilen Energieträgern wurde das Grundwasser weiträumig abgesenkt.

Alle diese Eingriffe wurden mit einer bestimmten Zielstellung vorgenommen, sei es zur Energiegewinnung, zur Schiffbarmachung der Gewässer oder zur Gewinnung von Siedlungs- und Landwirtschaftsfläche. Zunehmend machen sich aber auch die negativen Aspekte dieser Eingriffe bemerkbar. Beispielsweise führt der Verlust von Retentionsflächen durch weiträumige Eindeichung der Flussauen neben anderen anthropogenen Eingriffen zu einer Verschärfung der Hochwassersituation. Nicht nur beim Hochwasserschutz, sondern auch in anderen Bereichen verbreitet sich in der Fachwelt immer mehr die Auffassung, dass neben technischen auch naturnahe Verfahren bis hin zur Renaturierung flankierend eingesetzt werden sollten, um die negativen Auswirkungen der menschlichen Eingriffe zu mindern oder zu beseitigen und gleichzeitig eine nachhaltige Nutzung von Landschaften und Gewässern zu gewährleisten.

Auch in Brandenburg machen sich vielfältige wasserwirtschaftliche und landschaftsökologische Probleme von Eingriffen in den Wasserhaushalt bemerkbar. Seit Beginn des Jahres 1999 wird daher im Landesumweltamt Brandenburg (LUA) intensiv an einer „Konzeption zur Stabilisierung und Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes in Brandenburg“ (Konzeption Landschaftswasserhaushalt) gearbeitet. Ziel ist es, ein landesweites Programm zu erstellen sowie Vorschläge für konkrete Maßnahmen abzuleiten, um die Wasserressourcen nachhaltig für den Wasserbedarf von Ökosystemen und die Bedürfnisse von Bevölkerung, Landwirtschaft und Wirtschaft zu sichern. Gleichzeitig soll eine Bündelung von Initiativen verschiedener Einrichtungen auf prioritäre Handlungsfelder erreicht werden.

Die Arbeit zur Konzeption ist innerhalb des LUA abteilungsübergreifend organisiert. Es wirken Vertreter der Abteilungen A, N, Q und W mit. Zusätzlich werden auch der Sachverstand von externen Institutionen sowie die Ergebnisse von Forschungsprojekten in diese Aktivitäten eingebunden. Ein Beispiel dafür ist das Projekt „Wasser- und Stoffrückhalt im Tiefland des Elbeinzugsgebietes – WaStor“ (BMBF, Förderkennzeichen: 0339585), das im Rahmen der Elbeökologieforschung vom Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) mit dem Potsdam-Institut für Klimafolgen-

forschung (PIK), dem Ökologie-Zentrum der Universität Kiel, dem Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei Berlin und der Landesanstalt für Landwirtschaft Brandenburgs bearbeitet wird.

Die geplanten praktischen und theoretischen Arbeiten zur Konzeption fokussieren auf den Wasserhaushalt von Landschaften. Er umfasst die Menge und Beschaffenheit des Wassers sowie die vielfältigen Prozesse, mit denen es in Wechselwirkung mit den landschaftsprägenden Ökosystemen steht. Dabei sind die Stoffflüsse in den Landschaften eng an die Prozesse des Wasserkreislaufes gekoppelt.

Insbesondere liegen der Konzeption Landschaftswasserhaushalt die folgenden Ziele zu Grunde:

- Stabilisierung vom Wasser geprägter Ökosysteme in einem qualitativ guten Zustand und Entwicklung der Komponenten des Wasserhaushaltes möglichst weit in Richtung selbstregulierender Verhältnisse,
- Gestaltung regionaler und überregionaler Wasserkreisläufe in einer Weise, dass Wasser nicht künstlich beschleunigt aus der Landschaft abfließt,
- Berücksichtigung des Wasserbedarfs der verschiedenen Ökosysteme bei der Nutzung des vorhandenen Wasserdargebotes,
- Wasser- und Stoffrückhalt in Mooren, Niederungen und Auen zum Erhalt bzw. zur Wiedergewinnung ihres natürlichen Retentionsvermögens,
- Erhaltung und Wiederherstellung möglichst zahlreicher, von der Quelle bis zur Mündung durchgängiger naturnaher Fließgewässersysteme,
- Reduzierung der diffusen Nähr- und Schadstoffbelastung der Gewässer,
- Förderung natürlicher Bodenfunktionen (Speicherfunktion, Regelungsfunktion, Stoffumwandlungsfunktion) und Reduzierung von Erosionserscheinungen,
- Erhalt der natürlichen Beschaffenheit des Grundwassers.

1.2 Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen

Eine wichtige Grundlage für potenzielle Maßnahmen, die sich positiv auf den Wasserhaushalt von Landschaften auswirken sollen, ist eine möglichst detaillierte Kenntnis der quantitativen Ausprägung der verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen sowie deren räumlicher und zeitlicher Variabilität. Um aktuelle Zustände beurteilen zu können, ist der Vergleich mit einem Referenzzustand notwendig. Für die vorliegende Untersuchung wurde der Zeitraum 1961–1990 für die Ermittlung und Darstellung von mittleren Zuständen der Wasserhaushaltsgrößen gewählt. Die gewünschten Informationen sollten zum einen für die gesamte Fläche des Landes Brandenburg, zum anderen für die Planungsräume der wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung bereitgestellt werden.

Um die Wasserhaushaltsgrößen für ein so großes Gebiet, wie es Brandenburg darstellt, sinnvoll zu ermitteln, bietet sich der Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen an, die für Flächengrößen von einigen 10.000 km² belastbare Ergebnisse liefern. Die bisher schon für derartige Untersuchungen eingesetzten Modelle unterscheiden sich erheblich, sowohl in der zeitlichen Auflösung als auch hinsichtlich der Konzeption des Gesamtansatzes. Vor diesem Hintergrund ist es besonders interessant, inwieweit die Ergebnisse unterschiedlicher Modelle differieren. Vom LUA wurden für die durchzuführenden Untersuchungen diejenigen Modellansätze ausgewählt, die im WaStor-Projekt für die Bearbeitung unterschiedlicher Fragestellungen angewendet werden. Dabei handelt es sich um das bereits länger verwendete Modell ABIMO sowie das in den letzten Jahren entstandene Modellierungssystem ARC/EGMO. Hinsichtlich ihrer methodischen Prägung unterscheiden sich beide Ansätze deutlich voneinander.

Die im ZALF ausgeführte Berechnung der langjährig mittleren Höhe des Gesamtabflusses – als der primären Bilanzgröße des Landschaftswasserhaushaltes – basiert auf dem in der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin, entwickelten Modell ABIMO (RACHIMOV 1996, GLUGLA & FÜRTIG 1997). Die Vorläufer dieses Modells, das zu Beginn der 1980er Jahre für den Lockergesteinsbereich der heutigen neuen Bundesländer flächendeckend angewendete Großrechnermodell RASTER (GLUGLA ET AL. 1976, GLUGLA 1985) und seine PC-Version GWD (GLUGLA & KÖNIG 1989), stellten zu ihrer Zeit Standardtools der Wasserwirtschaft zur Ermittlung des potenziellen Wasserangebots in Nordostdeutschland dar. Auf ihnen beruhen die bis heute gültigen Zahlen auch für den Wasserhaushalt des Landes Brandenburg.

Grundsätzlich rasterorientiert arbeitend, ermöglicht ABIMO bei Verwendung langjähriger, zeitlich invarianter Mittelwerte von Niederschlag und Verdunstung auch für große Gebiete eine nahezu beliebig feine örtliche Auflösung der „statischen“ Eingangsinformationen (Landnutzung, Boden, Grundwasserflurabstand, Gewässerflächen) und damit des Gesamtabflusses mit vertretbarem Rechenaufwand. Waren infolge des hohen manuellen Aufwandes zur Erfassung der Eingangsinformationen bei der Erarbeitung der Rasterfolien (GLUGLA 1985) noch Rasterweiten von 2,5 km (mit Elementflächen von 6,25 km²) zu akzeptieren, so ist heute bei GIS-gestützter Bearbeitung die mögliche örtliche Auflösung allein von der Lagegenauigkeit und dem Generalisierungsgrad der verwendeten Karten-

grundlagen abhängig. Die langfristigen Folgen angenommener oder realer Landnutzungsänderungen für den Landschaftswasserhaushalt lassen sich mit ABIMO in Form von Szenario-rechnungen modellieren – allerdings immer nur für hypothetische stationäre Verhältnisse, d.h. ohne Nachbildung der zu erwartenden Übergangsstadien und charakteristischen Zeitabläufe.

Für die vom PIK durchgeführten, hoch aufgelösten Berechnungen auf Tagesbasis wurde das hydrologische Modellierungssystem ARC/EGMO verwendet, das sich aufgrund einiger besonderer Eigenschaften (siehe Kap. 4.2) in vielen Untersuchungen bewährt und zugleich seine besondere Eignung für Analysen der Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen unter Beweis gestellt hat (z.B. BECKER ET AL. 1996, LAHMER & BECKER 1999, LAHMER ET AL. 1999b/c). Besonders herauszuheben ist die Möglichkeit, unterschiedliche problem-, prozess- und informationsadäquate Flächenuntergliederungen vorzunehmen, Flächen bestimmter Eigenschaften (Topographie, Landnutzung, Vegetation, Boden, Grundwasserflurabstand etc.) lagegenau auszuweisen sowie unterschiedlich detaillierte Teilprozessmodelle zur integrativen Modellierung hydrologischer Prozesse auf regionaler Ebene und in Flusseinzugsgebieten einzusetzen, wobei vorrangig vereinfachte, robuste Ansätze mit physikalisch begründeten Parametern genutzt werden. Wegen der sehr flexiblen Möglichkeiten der räumlichen Aggregation entspricht die Modellkonzeption der Anforderung, selbst für makroskalige Gebiete (wie z.B. den gesamten deutschen Teil des Elbeeinzugsgebietes mit ca. 100.000 km²) Szenarienrechnungen zu den Auswirkungen globaler Änderungen durchzuführen.

Die mit beiden Modellansätzen ermittelten Ergebnisse sowie die graphischen Darstellungen umfassen immer auch die Fläche des Landes Berlin. Dies war notwendig, da Brandenburg und Berlin eine hydrologische Einheit bilden und eine Betrachtung des Gesamttraumes ohne das Territorium Berlins nicht sinnvoll gewesen wäre.

Die Aussagen und die ermittelten Ergebnisse in den Kapiteln 3 (ZALF) und 4 (PIK) spiegeln den aktuellen Kenntnisstand der jeweiligen Forschungsinstitution wider. Mit der vorliegenden Arbeit soll es der interessierten Fachwelt ermöglicht werden, einen vertieften Einblick in die Leistungsfähigkeit sowie die besonderen Stärken beider Modellansätze zu gewinnen.

2 Datengrundlagen

2.1 Anforderungen an die Datengrundlagen

Die Datengrundlagen für die Modellierung müssen vor allem flächendeckend für das Land Brandenburg in einer für das GIS aufbereiteten Form zur Verfügung stehen. Sie sollen den besonderen Anforderungen an die mesoskalige Modellierung entsprechen und darüber hinaus die angestrebte Vergleichbarkeit der mit den Modellsystemen ABIMO und ARC/EGMO erzielten Ergebnisse gewährleisten. Die oft punktuell erhobenen Daten sind dazu je nach Modellanforderungen durch Präprozessing oder zur Laufzeit der Modelle zu regionalisieren. Durch Nutzung allgemein verfügbarer Kartenwerke, die bereits regionalisierte Themen mit statischen oder zeitlich aggregierten Variablen darstellen, kann dieses Problem z.T. umgangen werden. Ein für die Meso- bis Makroskale zweckmäßiger Kartenmaßstab ist 1:200 000 oder größer.

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die für die Modellierungsarbeiten im Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) verwendeten räumlichen Grundlagenkarten. Darstellungen dieser Karten sind im Anschluss an dieses Kapitel wiedergegeben.

Das Ziel der Datenaufbereitung war die Verschneidung aller von den Modellsystemen benötigten räumlichen Daten, um die Flächen auszugrenzen, innerhalb derer jede räumliche Variable jeweils nur noch einen Wert aufweist. Diese Flächen werden als Polygone abgebildet und als „Elementarflächen“ bezeichnet (siehe Kap. 4.3.1). Sie können bezüglich ihrer hydrologischen Eigenschaften als homogen betrachtet werden und bilden die kleinsten Modellierungseinheiten.

Die verschiedenen räumlichen Variablen lagen für die Verschneidung in den unterschiedlichsten Formaten vor. So mussten die Rastermodelle des Grundwasserflurabstandes und der topographischen Höhe in Polygone überführt werden, um sie mit den Polygonen der Bodenformen, der Landnutzung und der Planungsgebiete sowie mit den Linien des Gewässernetzes verschneiden zu können. Ungenauigkeiten in der Lage und Abgrenzung der Elementarflächen, die aus den unterschiedlichen Maßstäben der verwendeten Kartengrundlagen resultieren, mussten vernachlässigt werden. Die Detailliertheit der Elementarflächenkarte wird direkt durch die räumliche Auflösung der Basis-

karten bestimmt. Für großskalige Modellierungen sollte von vornherein mit räumlich nicht zu hoch aufgelösten Karten gearbeitet werden. Die Auflösung der Karten kann noch vor der Verschneidungsoperation im Rahmen des Präprozessing durch räumliche Aggregation angepasst werden.

Für die Wasserhaushaltsmodellierung mit hoher zeitlich Auflösung (ARC/EGMO) werden darüber hinaus räumlich verteilte dynamische Variablen für den Niederschlag und die Verdunstung benötigt. Bei einer Zeitschrittweite der Simulation von einem Tag und einem Berechnungszeitraum von 30 Jahren kann die räumliche Verteilung dieser Variablen nicht für jeden Zeitschritt vorgehalten werden. Sie wird deshalb erst zur Laufzeit des Modells erzeugt.

2.2 Klima

2.2.1 Mittlere Niederschlagshöhe

Für Wasserhaushaltsuntersuchungen mit dem Modell ABIMO werden flächendeckende Werte der mittleren Niederschlagshöhe benötigt. Durch Anwendung von geeigneten Interpolationsverfahren kann aus den vieljährigen Mittelwerten der Niederschlagshöhen einzelner Stationen ein Rastermodell der mittleren Niederschlagshöhe errechnet werden.

Mit dem Hydrologischen Atlas Deutschlands (HAD 1998) steht ein Kartenwerk zur Verfügung, das bereits solche Rastermodelle der auf die Bodenoberfläche korrigierten mittleren jährlichen sowie halbjährlichen Niederschlagshöhen der Zeitreihe 1961–1990 für Deutschland liefert. Dort wurden ca. 4.450 Niederschlagsmessstationen berücksichtigt. Zur Interpolation der Stationswerte wurde ein Verfahren verwendet, das die Abhängigkeit der Niederschlagshöhe von der Orographie und die räumliche Variabilität des Abhängigkeitsverhältnisses einbezieht (MÜLLER-WESTERMEIER 1995). Vom Deutschen Wetterdienst (DWD 1999) ist das digitale Rastermodell mit einer Zellgröße 1 km x 1 km für die vorliegende Studie zur Verfügung gestellt worden. Die Karten der mittleren Niederschlagshöhe der Jahre und der Winterhalbjahre sind für das Land Brandenburg in den Abbildungen 2.3 und 2.4 bzw. 4.16 dargestellt.

2.2.2 Mittlere potenzielle Verdunstungshöhe

Als zweite wesentliche Eingangsgröße für Wasserhaushaltsuntersuchungen mit ABIMO sind flächendeckende Werte der mittleren potenziellen Verdunstungshöhe erforderlich. Die potenzielle Verdunstung (potenzielle Evapotranspiration) wird nach DIN 4049 als „Verdunstungshöhe in mm eines einheitlichen, niedrigen Pflanzenbestandes bei den gegebenen meteorologischen Bedingungen und unbegrenzt verfügbarem Was-

Tab. 2.1: Überblick über die für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin vorhandenen räumlichen Grundlagenkarten, die in die Datenaufbereitung einbezogen wurden

Karte	Beschreibung	Quelle	Anmerkungen
Landnutzung	CORINE	Stat. Bundesamt Wiesbaden Statistik zur Bodenbedeckung (CORINE-Projekt)	Polygon
Bodenarten	Bodenübersichtskarte 1:1 000 000 (BUEK1000)	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	Polygon
Digitales Höhenmodell (DHM)		Landesvermessungsamt BRB	Raster, 50 m x 50 m
Grundwasserflurabstand		WASY GmbH, Berlin	Raster, 250 m x 250 m, überarbeitet
Teileinzugsgebiete	Oberirdische Einzugsgebiete	TK 25 LUA	Polygon ergänzt um wasserwirtschaftliche Planungsräume des LUA, die auch Grundlage für die Festlegung der Landesgrenze waren

ser“ definiert. Die potenzielle Verdunstungshöhe gilt im Allgemeinen als die obere Grenze der möglichen Verdunstung, da im jährlichen Witterungsverlauf das Bodenwasser nicht immer unbegrenzt für die Pflanze verfügbar ist. Die tatsächliche Verdunstung (reale Evapotranspiration) kann bei höheren Beständen und günstigen Versorgungsbedingungen jedoch auch höher sein als die Referenzverdunstung.

Als internationaler Standard für die potenzielle Evapotranspiration gilt die Gras-Referenzverdunstung (ALLEN ET AL. 1994), die aus einfach messbaren meteorologischen Größen sowie aus den Pflanzenparametern für die Standorte meteorologischer Stationen ermittelt werden kann. Sie fand nach WENDLING (1995) Eingang in den HAD (1998). Die Rastermodelle der mittleren jährlichen sowie halbjährlichen Gras-Referenzverdunstung wurden wie die mittlere Niederschlagshöhe ebenfalls für eine Zellgröße von 1 km x 1 km mit dem Interpolationsverfahren nach MÜLLER-WESTERMEIER (1995) errechnet. Die Karten der mittleren potenziellen Verdunstung der Jahre und der Winterhalbjahre sind für das Land Brandenburg in den Abbildungen 2.5 und 2.6 bzw. 4.17 dargestellt.

2.2.3 Meteorologische Zeitreihen

Frühere meso- bis makroskalige Untersuchungen mit dem Modell ARC/EGMO hatten gezeigt, dass die meteorologischen Verhältnisse als wesentliche Triebkraft hydrologischer Prozesse eine entscheidende Rolle bei der Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen auf dieser räumlichen Skala spielen, und bei Nichtbeachtung verschiedener Randbedingungen (wie z.B. einer ausreichenden Dichte meteorologischer Stationen) erhebliche Fehler auftreten können. Für die Anwendung des Modells ARC/EGMO auf Tagesschrittbasis sind Zeitreihen meteorologischer Elemente nötig. Die zur Berechnung von Gebietsniederschlägen erforderliche Anzahl von Messpunkten (Stationen) hängt dabei grundsätzlich von mehreren Bedingungen ab: der Gebietsgröße, der Topographie, der räumlichen Verteilung der Messstationen, der Länge des betrachteten Zeitraums und dem regionalen Niederschlagsklima (Art des dominierenden Niederschlagstyps).

Im Allgemeinen nimmt der Fehler des aus Stationsdaten ermittelten Gebietsniederschlags für tägliche Niederschlagshöhen mit zunehmender Stationsdichte ab. Bei vorgegebener Stationsdichte wiederum ist der Fehler um so größer, je kleiner das Gebiet ist, für das der Gebietsniederschlag zu bestimmen ist. Andererseits ist die räumliche Verteilung der Niederschlagshöhe um so homogener, je größer der Aggregationszeitraum ist. So werden unter Vorgabe eines gleichen Fehlers erheblich mehr Stationen zur Berechnung täglicher Gebietsmittel benötigt als zur Berechnung monatlicher Gebietsniederschläge.

Für die durchgeführten, zeitlich (Tagesbasis) und räumlich (mehr als 50.000 räumliche Einheiten) hoch aufgelösten Wasserhaushaltsrechnungen ist es deshalb wichtig, möglichst viele Klima- und Niederschlagsstationen bei den Simulationsrechnungen zu berücksichtigen, um zu belastbaren Aussagen der berechneten Wasserhaushaltsgrößen zu kommen. Darüber hinaus ist ein Interpolationsverfahren zu verwenden, das

- die vorhandenen Messdaten verschiedener Klimavariablen möglichst realitätsnah in die Fläche überträgt und
- für den Untersuchungszeitraum von 30 Jahren eine effektive Berechnung der Wasserhaushaltsgrößen (vertretbare Rechenzeiten) zulässt.

Um dem Anspruch, möglichst alle für den Untersuchungsraum verfügbaren Zeitreihen für die Simulationsrechnungen zu nutzen, gerecht zu werden, wurden folgende Kriterien bei der Auswahl der Stationen angelegt:

1. eine Überdeckung des Zeitraums 1961–1990,
2. für Klimahauptstationen die Verfügbarkeit aller benötigten Klimavariablen – tägliche Niederschlagshöhe sowie zur Berechnung der potenziellen Verdunstung nach dem Verfahren von Turc/Ivanov (TURC 1961) Tageswerte von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Sonnenscheindauer und
3. das Vorhandensein möglichst geringer Datenlücken (Fehlstellen) für diese Variablen.

Eine Recherche der vorhandenen meteorologischen Zeitreihen des DWD ergab, dass für die Modellierung des Gesamtgebietes vergleichsweise wenige Tageszeitreihen des DWD existieren, die den gesamten Zeitbereich 1961–1990 abdecken. Für die Simulationsrechnungen wurden schließlich 15 Klimastationen und 29 Niederschlagsstationen verwendet, die für den Zeitbereich 1961–1990 die erforderlichen Klimavariablen liefern (siehe Abb. 2.1). Dabei wurden auch außerhalb der Landesgrenzen befindliche Stationen berücksichtigt. Dieses Vorgehen trägt sowohl der Forderung nach einer möglichst hohen Stationsdichte Rechnung, als auch den Anforderungen des für die räumliche Interpolation aller Klimavariablen verwendeten Interpolationsverfahrens („erweitertes Quadrantenverfahren“). Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die für die Modellierung des Untersuchungsgebietes Brandenburg/Berlin und des Validierungsgebietes Obere Dahme verwendeten Zeitreihen der ausgewählten meteorologischen Stationen des DWD. Die meisten der Zeitreihen überdecken eine längere Periode als die für die im Rahmen des vorliegenden Projektes durchgeführten Berechnungen benötigte (1961–1990).

2.3 Landnutzung

Um den Anforderungen der mesoskaligen Modellierung gerecht zu werden, wurde die CORINE-Landnutzungskarte auf der Basis der in Tabelle 2.3 angegebenen Klassifizierung räumlich voraggregiert, wobei insbesondere die hydrologischen Modellsensitivitäten der zugrundeliegenden Landnutzungstypen berücksichtigt wurden. So wurden z.B. die drei Nutzungsklassen „Laubwald“, „Nadelwald“ und „Mischwald“ der CORINE-Karte zur neuen Klasse „Hochwald“ zusammengefasst, da die hydrologischen Unterschiede gegenüber denen anderer Nutzungsklassen (wie z.B. „Ackerland“) gering sind. Bei der Voraggregation wurden die insgesamt 31 für das Untersuchungsgebiet ausgewiesenen Landnutzungsklassen zu 9 übergeordneten Klassen zusammengefasst. Bebaute Flächen wurden differenziert in „offene“ und „geschlossene“ Bebauung. Daneben wurde nach „Hochwald“ und „Niederwald“ unterschieden sowie „Wiesen/Grasland“ und „Feuchflächen“ getrennt ausgewiesen.

Der Einsatz von ABIMO setzt eine weiter gehende Aggregation der Landnutzungsdaten voraus. Dazu wurden die voraggregierten Klassen 1, 3 und 8 (siehe Tab. 2.3) zur Klasse „Landwirtschaftliche Nutzung“ sowie die Klassen 2 und 9 zur Klasse „Wald“ zusammengefasst. Die Klassen 4 und 7 wurden durch Angabe unterschiedlicher Versiegelungsgrade in der Klasse „Bebauung“ separiert; für die Klassen 5 und 6 gibt es direkte Entsprechungen in ABIMO.



Abb. 2.1: Überblick über die 15 Klima- und 29 Niederschlagsstationen des DWD, die für den Zeitbereich 1961–1990 Tagesreihen der erforderlichen Klimavariablen liefern und für die Simulationsrechnungen mit ARC/EGMO im Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin sowie im Validierungsgebiet Obere Dahme verwendet wurden

Stationsnummer	Stations-typ	Stations-name	Höhe [mNN]	Anfang	Ende
3031	Kli	Teterow	46	01.01.1961	30.11.1997
3050	Kli	Marnitz	81	01.01.1951	31.12.1990
3058	Kli	Angermuende	56	01.01.1951	31.12.1990
3177	Kli	Magdeburg	79	01.01.1951	31.12.1990
3326	Kli	Zehdenick	46	01.01.1951	31.12.1990
3336	Kli	Muencheberg	62	01.01.1951	31.12.1990
3342	Kli	Potsdam	81	01.01.1951	31.12.1990
3346	Kli	Lindenberg	98	01.01.1951	31.12.1990
3352	Kli	Wittenberg	105	01.01.1951	31.12.1990
3358	Kli	Cottbus	69	01.01.1951	31.12.1990
3360	Kli	Doberlug-Kirchhain	97	01.01.1951	31.12.1990
3380	Kli	Goerlitz	238	01.01.1960	31.05.1995
3891	Kli	Lueneburg	11	01.01.1961	31.12.1997
3901	Kli	Luechow	17	01.01.1961	31.12.1996
4406	Kli	Gera-Leumnitz	311	01.01.1960	31.05.1995
3316	Pt	Berlin-Temp	48	01.01.1961	31.12.1997
3330	Pt	Neuruppin	38	01.01.1961	31.12.1997
3375	Pt	Leipzig	141	01.01.1961	31.12.1997
41660	Pt	Annaburg	75	01.01.1951	31.12.1990
46403	Pt	Burg	55	01.01.1951	31.12.1990
46606	Pt	Dahme	86	01.01.1951	31.12.1990
46370	Pt	Drebkau	87	01.01.1951	31.12.1990
13065	Pt	Eberswalde	45	01.01.1951	31.12.1990
16005	Pt	Friedrichswalde	79	01.01.1951	31.12.1990
46006	Pt	Fuerstenberg	53	01.01.1951	31.12.1990
46454	Pt	Gross_Leuthen	50	01.01.1951	31.12.1990
41630	Pt	Herzberg	81	01.01.1951	31.12.1990
41451	Pt	Hoyerswerda	135	01.01.1951	31.12.1990
48215	Pt	Karstaedt	34	01.01.1951	31.12.1990
46415	Pt	Lieberose	58	01.01.1951	31.12.1990
47009	Pt	Luckenwalde	50	01.01.1951	31.12.1990
46003	Pt	Mirow	59	01.01.1951	31.12.1990
41466	Pt	Peickwitz	102	01.01.1951	31.12.1990
21215	Pt	Penkun	20	01.01.1951	31.12.1990
21005	Pt	Prenzlau	50	01.01.1951	31.12.1990
13080	Pt	Ruednitz	54	01.01.1951	31.12.1990
41469	Pt	Ruhland	98	01.01.1951	31.12.1990
13020	Pt	Seelow	55	01.01.1951	31.12.1990
41648	Pt	Schoenewalde	79	01.01.1951	31.12.1990
46310	Pt	Spremberg	96	01.01.1951	31.12.1990
15010	Pt	Tanlow	31	01.01.1951	31.12.1990
47042	Pt	Treuenbrietzen	59	01.01.1951	31.12.1990
45345	Pt	Werben	24	01.01.1951	31.12.1990
41724	Pt	Zahna	92	01.01.1951	31.12.1990

Tab. 2.2: Überblick über die für die Modellierung des Untersuchungsgebietes Brandenburg/Berlin und des Validierungsgebietes Obere Dahme verwendeten Zeitreihen meteorologischer Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD)

Kli Klimastation mit Zeitreihen des Niederschlags, der mittleren Tagestemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Sonnenscheindauer
Pt Niederschlagsstation mit Zeitreihe des Niederschlags
Höhe Höhe der Station in m über NN
Anfang/Ende verfügbare Periode der Zeitreihe

Tabelle 2.4 weist die Flächenanteile der im Untersuchungsgebiet und im Validierungsgebiet Obere Dahme vorhandenen Landnutzungsklassen an der jeweiligen Gesamtfläche aus. Danach ist die Landnutzung des Untersuchungsraumes Brandenburg/Berlin zu fast 45 % von Ackerland dominiert. Wald stellt mit etwa 35 % ebenfalls einen beachtlichen Beitrag an der Gesamtfläche. Eine Darstellung der Landnutzung findet sich in Abbildung 2.7.

Hydrologisch relevante Eigenschaften der unterschiedlichen Landnutzungsklassen (wie Versiegelungsgrad, Wurzeltiefe, Interzeptionsspeicherkapazität, Bedeckungsgrad und Rauigkeit) wurden über eine entsprechende Tabelle mit der Landnutzungskarte verknüpft und auf diese Weise bei der GIS-gestützten Modellierung berücksichtigt. So wurde in dieser Tabelle z.B. der Versiegelungsgrad für hoch versiegelte Flächen auf minimal 80 % und maximal 100 %, d. h. im Mittel 90 %, für leicht versiegelte Flächen auf minimal 10 % und maximal 30 %, d.h. im Mittel 20 % gesetzt.

2.4 Topographie

Für die Berücksichtigung der Geländemorphologie stand eine Rasterkarte des Landesvermessungsamtes Brandenburg mit einer horizontalen Auflösung von 50 m x 50 m zur Verfügung. Das Digitale Höhenmodell (DHM) (siehe Abb. 2.10) weist für den Untersuchungsraum maximale Geländehöhen von knapp 190 m ü. NN aus. Aus dem Höhenmodell abgeleitete Informationen (Hangneigung zur Beschreibung lateraler Prozesse in ARC/EGMO) für die hydrologische Modellierung spielen insbesondere im Süden und Südwesten des Landes eine wichtige Rolle. Auf der Basis des DHM wurden den Elementarflächen Hangneigungen in Form von 6 Gefälleklassen (siehe Tab. 2.5) zugewiesen. Anzumerken ist, dass in dem zur Verfügung stehenden DHM Probleme bei der Höhenzuweisung auftreten, die sich in einer übermäßigen Häufung bestimmter Höhenwerte ausdrücken, diese Probleme bei den im vorliegenden Projekt durchgeführten hydrologischen Modellierungen aber tolerierbar sind.

2.5 Geologie

2.5.1 Böden

Neben der Landnutzung beeinflussen auch die Eigenschaften der im Untersuchungsgebiet auftretenden Böden die hydrologischen Prozesse sehr stark. Da die Bodenübersichtskarte BUEK100 (M 1:100 000) der BGR für Brandenburg zur Zeit der Projektbearbeitung leider noch nicht flächendeckend vor-

lag, wurde die geringer aufgelöste Bodenübersichtskarte M 1:1 000 000 (BUEK1000) für die Modellierung verwendet. Diese weist für Gesamtdeutschland 71 Bodeneinheiten in verschiedenen Horizonten aus, wovon im Untersuchungsraum insgesamt 20 vorkommen. Eine Darstellung der in Brandenburg/Berlin vorkommenden Bodenarten zeigt Abbildung 2.8. Über die sog. „Bodentypentabelle“ wurden Informationen zu Bodenart und bodenspezifischen Parametern an die digitale

Tab. 2.3: Aggregation der CORINE-Landnutzungskarte in 9 Landnutzungsklassen

CORINE-Klassifizierung	Nr.	Aggregierte Klassen Beschreibung	Neuer Klassenname
12,15,19,20,21	1	nicht bewässertes Ackerland, Weinbauflächen, einjährige und permanente Anbaukultur, komplexe landw. Anbaumuster, Ackerland mit Flächen nat. Vegetation	Ackerland
23,24,25	2	Laubwald, Nadelwald, Mischwald	Hochwald
10,18,26	3	städt. Grünfläche, Weidefläche, natürliches Grasland	Wiesen/Grasland
2,4,6,9,11	4	offene Bebauung, Straßen/Schiennetz und zugeh. Flächen, Flughafen, Baugebiet, Sport- und Freizeitanlage	offene Bebauung
40,41	5	Fluss/Kanal, See	Wasserflächen
7,8,30,32	6	Bergbaugebiet, Abraumhalde, Strand/Düne/Sandfläche, spärlich bewachsene Fläche	Brachland
1,3,5	7	geschlossene Bebauung, Industrie- und Gewerbefläche, Hafen	geschlossene Bebauung
27,35,36,37	8	Moor/Heide, Feuchtwiese, Torfmoor, Salzweiden	Feuchtfleichen
16,29	9	Obstanbaugebiet, Fläche im Übergang Buschwerk-Wald	Niederwald

Tab. 2.4: Überblick über die Flächenanteile der aggregierten Landnutzungsklassen an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes Brandenburg/Berlin und des Validierungsgebietes Obere Dahme

Bezeichnung	Obere Dahme		Brandenburg/Berlin	
	Fläche km ²	Flächenanteil %	Fläche km ²	Flächenanteil %
Ackerland	220,63	41,19	13707,65	44,86
Hochwald	272,37	50,85	10547,82	34,52
Wiese/Grasland	27,58	5,15	2792,03	9,14
Offene Bebauung	11,53	2,15	1882,91	6,16
Wasserflächen	1,08	0,20	628,53	2,06
Brachland	0,00	0,00	341,27	1,12
Geschlossene Bebauung	0,68	0,13	253,94	0,83
Feuchtfleichen	0,00	0,00	225,98	0,74
Niederwald	1,71	0,32	173,47	0,57

Tab. 2.5: Überblick über die aus dem Digitalen Höhenmodell abgeleiteten Gefälleklassen im Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin

Gefälle-Klasse	Gefälle °
0	0
1	0-2
2	2-4
3	4-6
4	6-8
5	8-10

Bodenkarte angehängt. Diese Tabelle enthält Informationen zum Schichtaufbau (Horizontierung) des jeweiligen Bodens (Anzahl der Bodenschichten, Mächtigkeiten etc.) und verweist ihrerseits auf eine weitere Tabelle („Bodenartentabelle“), die Informationen über Bodenarten und Substrattypen (wie z.B. permanenter Welkepunkt, Lagerungsdichten, Feldkapazität und Gesamtporenvolumen) enthält. Auf diese Weise können alle verfügbaren Bodeninformationen sehr effektiv bei den Simulationsrechnungen mit ARC/EGMO berücksichtigt werden.

2.5.2 Grundwasserflurabstand

Informationen über den mittleren Grundwasserflurabstand stellen eine der wesentlichen Eingangsinformationen bei der hydrologischen Modellierung dar. Flächendeckende mittlere Grundwasserflurabstände können als Differenz der topographischen Geländehöhen und der Höhen des Grundwasserspiegels ermittelt werden. Dafür wurden aus den Isolinenplänen der Fa. WASY für die Geländehöhen (M 1:200 000) und für die Grundwasseroberfläche (M 1:500 000) mit Hilfe eines GIS deckungsgleiche Rastermodelle der Gelände- und der Grundwasseroberfläche mit einer Zellengröße von 250 m x 250 m erzeugt. Anschließend wurde als Differenz aus beiden Rastermodellen ein mittlerer Grundwasserflurabstand für jedes Rasterelement berechnet. Infolge der relativ kleinen Maßstäbe der Isolinenpläne ergaben sich insbesondere in den bekannten grundwassernahen Gebieten (Niedermoor- und Auenstandorte) keine befriedigenden Werte für die Grundwasserflurabstände.

Für die Modellierung des Wasserhaushaltes auf Landesebene werden die berechneten mittleren Grundwasserflurabstände zwar ebenfalls aggregiert, entscheidend bleibt letztlich jedoch, eine räumliche Verteilung der Aggregate zu erzielen, die mit den vorliegenden Gebietserfahrungen übereinstimmt. Die für die Wasserhaushaltsberechnungen benötigten Klassen der mittleren Grundwasserflurabstände sind in Tabelle 2.6 aufgelistet. Die Klassengrenzen ergeben sich aus den Anforderungen des Modells ABIMO (Kap. 3.1.2).

Da Standorte mit sehr geringen Grundwasserflurabständen einen von den übrigen Landflächen deutlich abweichenden Wasserhaushalt aufweisen, erschien es geboten, die mit den oben dargestellten Berechnungen erzielte räumliche Verteilung der Klassen der mittleren Grundwasserflurabstände durch Hinzuziehung von Zusatzinformationen weiter zu qualifizieren. Dafür wurden die Informationen der digitalen Karte der Mittelmaßstäbigen landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK) und der Karte der Gewässer des Landes Brandenburg (M 1:50 000) genutzt.

Tab. 2.6: Zuordnung der mittleren Grundwasserflurabstände zu den Hydromorphieflächentypen der Standortregionaltypen nach MMK

Mittlerer Grundwasserflurabstand in m	Hydromorphieflächentyp
≤ 1	G2, G3
> 1 ... ≤ 2	GN1, GN2, GS3
> 2	übrige Typen

Tab. 2.7: Für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin ausgewiesene Grundwasserflurabstandsklassen

Klasse	Bereich	Flächenanteil in %
1	0 bis 1 m	6,47
2	1 bis 2 m	32,50
3	2 bis 5 m	0,76
4	> 5 m	60,27

Tab. 2.8: Überblick über die Unterteilung des Untersuchungsgebietes Brandenburg/Berlin in 18 Planungsräume und die Anzahl der sie bildenden Teileinzugsgebiete (das Land Berlin ist durch einen eigenen „Planungsraum“ 0 ausgewiesen)

Planungsraum-Nr.	Bezeichnung	Anzahl Teilgebiete	Fläche km ²
0	Berlin	11	891,6
1	Ucker	2	1.197,1
2	Untere Spree 2	5	1.185,1
3	Untere Spree 1	1	1.613,2
4	Untere Oder	11	1.276,0
5	Plane-Buckau	15	1.219,3
6	Neiße	5	589,6
7	Finowkanal	2	719,6
8	Stepenitz	8	1.924,4
9	Schwarze Elster	17	2.858,6
10	Mittlere Spree	3	2.389,1
11	Rhin	11	1.781,6
12	Dosse-Jäglitz	10	1.468,5
13	Untere Havel	27	2.732,3
14	Nuthe	11	1.910,8
15	Dahme	2	2.111,9
16	Obere Havel	15	2.541,5
17	Alte Oder/Oderbruch	7	1.458,0
18	Obere Oder	33	685,6
Summe		196	30.553,6

In der MMK wird für die Standortregionaltypen landwirtschaftlich genutzter Flächen die Hydromorphie der Böden, d.h. deren Grund- und Stauwassermerkmale, eingeschätzt (SCHMIDT & DIEMANN 1991). Entsprechend den in der MMK auf der Basis von Grundwasserstufen ausgewiesenen Hydromorphieflächentypen wurden den jeweiligen Standorteinheiten nach dem Dominanzprinzip mittlere Grundwasserflurabstände zugeordnet (vgl. Tab. 2.6). Weiterhin wurden für Rasterelemente, die von linienförmigen Gewässern aus der Gewässerkarte Brandenburgs gequert werden, mittlere Grundwasserflurabstände > 1 m unterstellt.

In Kombination dieser Regeln wurden diejenigen ursprünglichen Zuordnungen der Rasterelemente zu den Klassen des mittleren Grundwasserflurabstandes korrigiert, die von diesen Regeln abwichen. Die so entstandene Karte der mittleren Grundwasserflurabstände ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Etwa 6,5 % der Landesfläche des Landes Brandenburgs weisen danach Grundwasserflurabstände von weniger als 1 m auf (Tab. 2.7). Gerade diese Gebiete besonders hoher Verdunstung (Zehrflächen) konnten durch die Überarbeitung räumlich erheblich höher aufgelöst werden.

2.6 Hydrographie

Die vom Landesumweltamt Brandenburg zur Verfügung gestellte Teileinzugsgebietskarte weist insgesamt 196 Teileinzugsgebiete mit einer Fläche zwischen 0,02 und 2.092 km² aus. Als Zusatzinformation enthält diese Karte 18 „wasserwirtschaftliche Planungsräume“, die jeweils eine Zusammenfassung mehrerer Teileinzugsgebiete darstellen. Da wegen der zu groben räumlichen Auflösung (siehe Kap. 4.3.2) nicht auf der Basis der Planungsräume, sondern auf der Basis von Hydrotopen (die jeweils die 196 Teileinzugsgebiete bilden) modelliert wurde, erfolgt die Ausweisung von Wasserhaushaltsgrößen für die Planungsräume durch Mittelwertbildung über die jeweils zu einem Planungsraum gehörenden Hydrotope.

Obwohl nur für die Fläche des Landes Brandenburg Simulationsrechnungen durchzuführen waren, erschien es sinnvoll, auch die Fläche des Landes Berlin in diese Rechnungen einzubeziehen, da diese wegen des hohen Bebauungsgrades und des relativ hohen Anteils freier Wasserflächen für die Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen regionale Bedeutung hat. Es existiert zwar ein eigener Planungsraum „Berlin und Umland“, für den auch schon der Entwurf eines wasserwirtschaftlichen Rahmenplans vorgelegt wurde (MUNR & SENSTADTUM 1995). Allerdings überschneidet sich dessen Territorium mit den Gebieten der an Berlin angrenzenden Planungsräume, sodass es notwendig war, nur die Landesfläche Berlins auszugrenzen. Für das Land Berlin wurde deshalb ein gesonderter „Planungsraum“ ausgewiesen, der hier aber nur als räumliche Einheit für die Berechnung der Wasserhaushaltsgrößen und nicht als Planungsraum im rechtlichen Sinne zu verstehen ist. Durch diese Ausweisung entstanden in und um Berlin räumliche Einheiten, die im Grunde genommen keine hydrologisch definierten Teileinzugsgebiete darstellen, aber andererseits eine eindeutige Beziehung zwischen Planungsräumen und Teileinzugsgebieten bei der Simulation sicherstellen.

In Abbildung 2.2 ist die Strukturierung des Untersuchungsgebietes in Teileinzugsgebiete und Planungsräume dargestellt. Tabelle 2.8 gibt einen Überblick über die Fläche der Planungsräume und die Anzahl der sie definierenden Teileinzugsgebiete. Die Tatsache, dass die daraus berechnete Gesamtfläche von 30.554 km² für die Länder Brandenburg und Berlin um ca. 0,6 % von der nach der amtlichen Statistik angegebenen Fläche von 30.365 km² abweicht, hat ihre Ursache in der für die Modellierungsarbeiten gewählten Projektionsmethode (Gauß-Krüger), die insbesondere im Ostteil des Landes zu Verzerrungen führt. Die Grenzen des Landes Brandenburg wurden für die Modellierungsarbeiten über die vom LUA vorgegebenen Planungsräume definiert.

2.7 Datenaufbereitung

Um eine größtmögliche Vergleichbarkeit der Wasserhaushaltsrechnungen sicherzustellen, wurden die zusammengetragenen und oben beschriebenen Datengrundlagen am PIK zu einer konsistenten GIS-Datenbasis aufbereitet, die vom PIK und vom ZALF für Berechnungen mit den Modellsystemen ARC/EGMO bzw. ABIMO genutzt wurde. Diese Datenbasis enthält im Einzelnen:

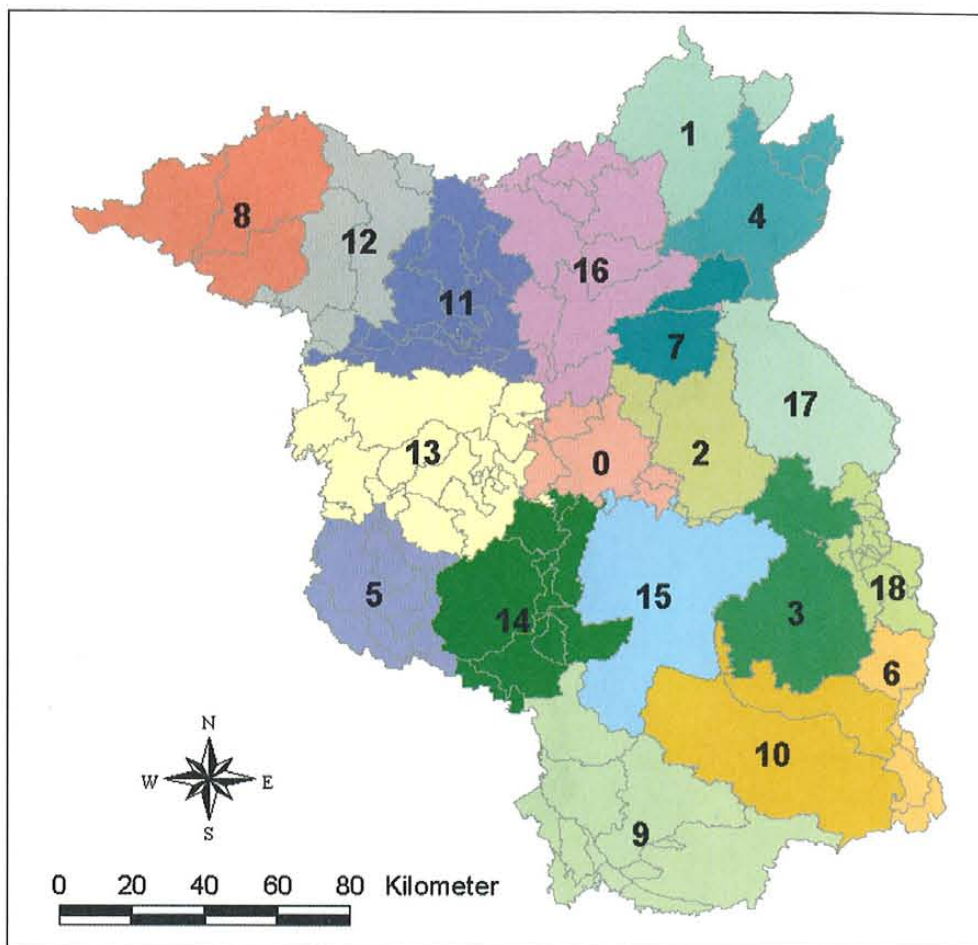


Abb. 2.2: Strukturierung des Untersuchungsgebietes Brandenburg/Berlin in Teileinzugsgebiete und Planungsräume

- die sog. Hydrotopkarte (Flächen ähnlicher hydrologischer Eigenschaften) als räumliche Datenbasis für die Wasserhaushaltsberechnung, die insgesamt 1.599 georeferenzierte Hydrotope in 15 Hydrotopklassen enthält (siehe Kap. 4.3.2).
- die sog. Elementarflächenkarte mit den Zuweisungen der Elementarflächen zu den gebildeten Hydrotopklassen (siehe Kap. 4.3.1) sowie
- Informationen zur Landnutzung (9 voraggregierte Landnutzungsklassen) samt einer entsprechenden Landnutzungstabelle (siehe Kap. 2.3),
- Informationen zu den Bodenarten samt Zuordnungstabellen für Bodentypen/-formen und Bodenarten/Substrattypen (siehe Kap. 2.5.1),
- Informationen zum Grundwasserflurabstand samt einer Flurabstandstabelle (siehe Kap. 2.5.2),
- Informationen zu Höhe und Gefälle (siehe Kap. 2.4) sowie den Teileinzugsgebieten und Planungsräumen (siehe Kap. 2.6).

Die Elementarflächenkarte wurde zusätzlich mit den vorliegenden Karten der mittleren jährlichen Höhen des Niederschlags und der Gras-Referenzverdunstung (siehe Kap. 2.2.1 und 2.2.2) verschnitten, um die für das Modell ABIMO benötigten meteorologischen Daten für die Elementarflächen bereitzustellen.

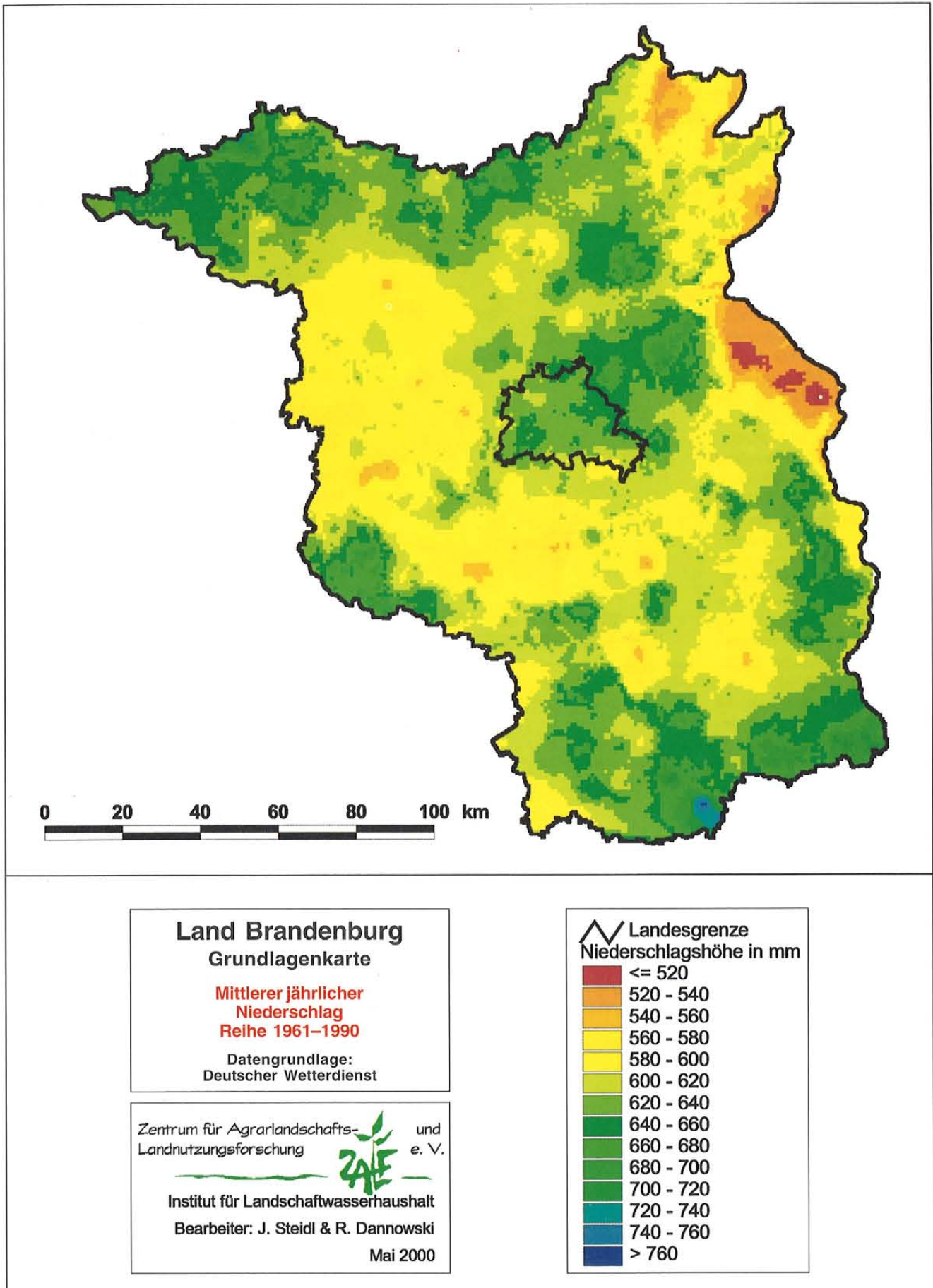


Abb. 2.3: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (korrigiert) der Reihe 1961-1990 (Quelle: DWD 1999)

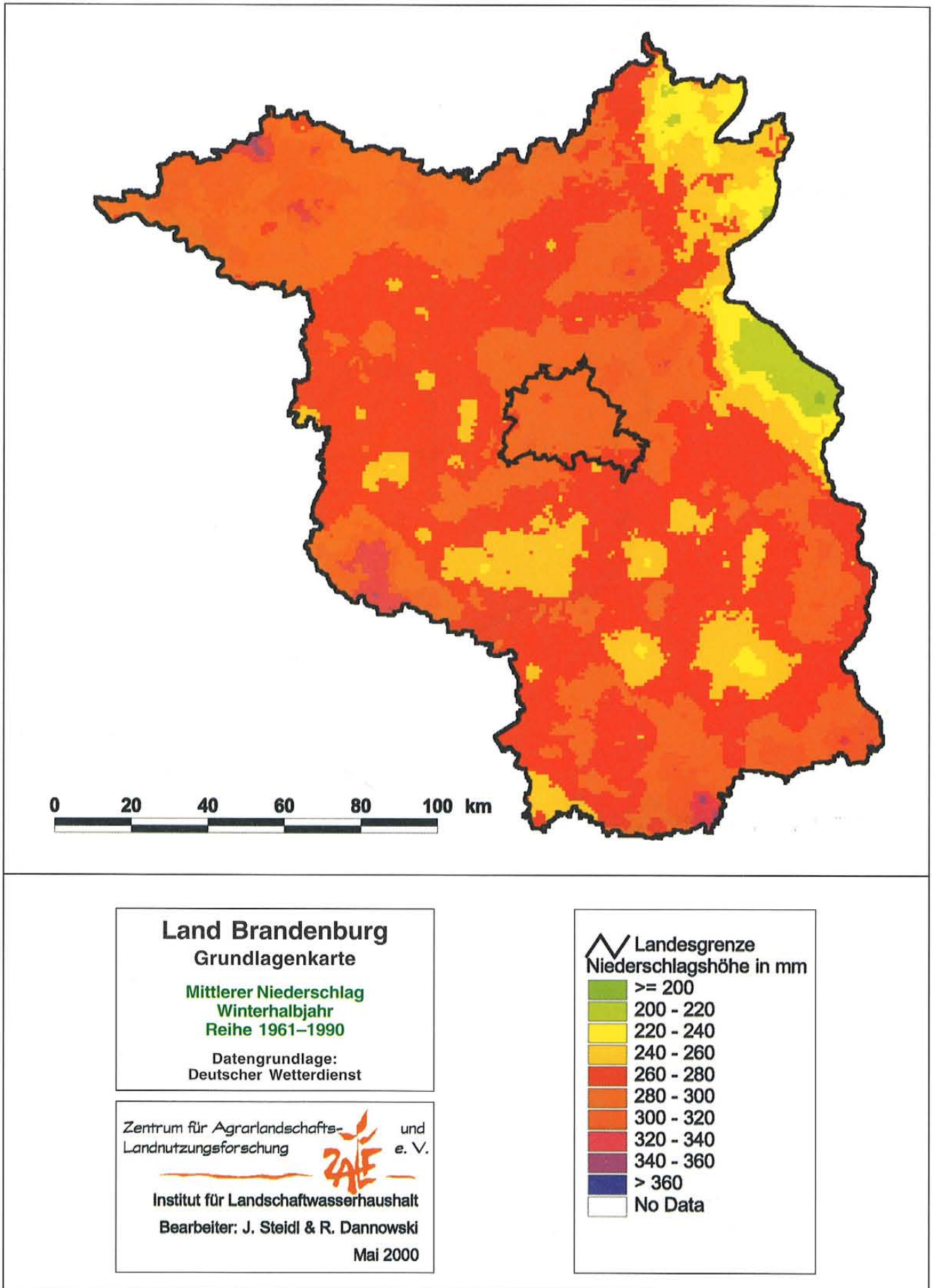


Abb. 2.4: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (korrigiert) im Winterhalbjahr der Reihe 1961–1990 (Quelle: DWD 1999)

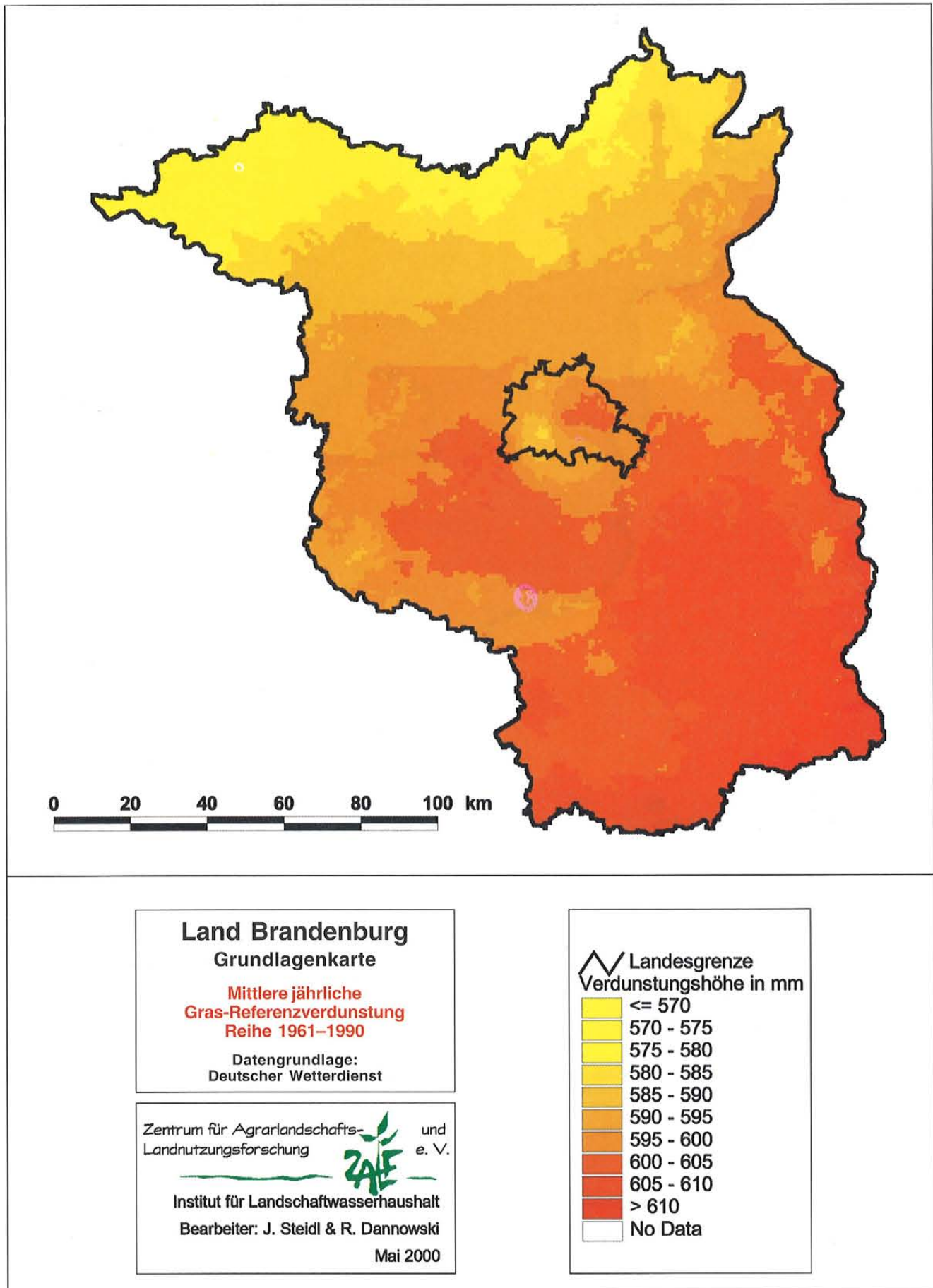


Abb. 2.5: Mittlere jährliche Gras-Referenzverdunstungshöhe der Reihe 1961–1990 (Quelle: DWD 1999)

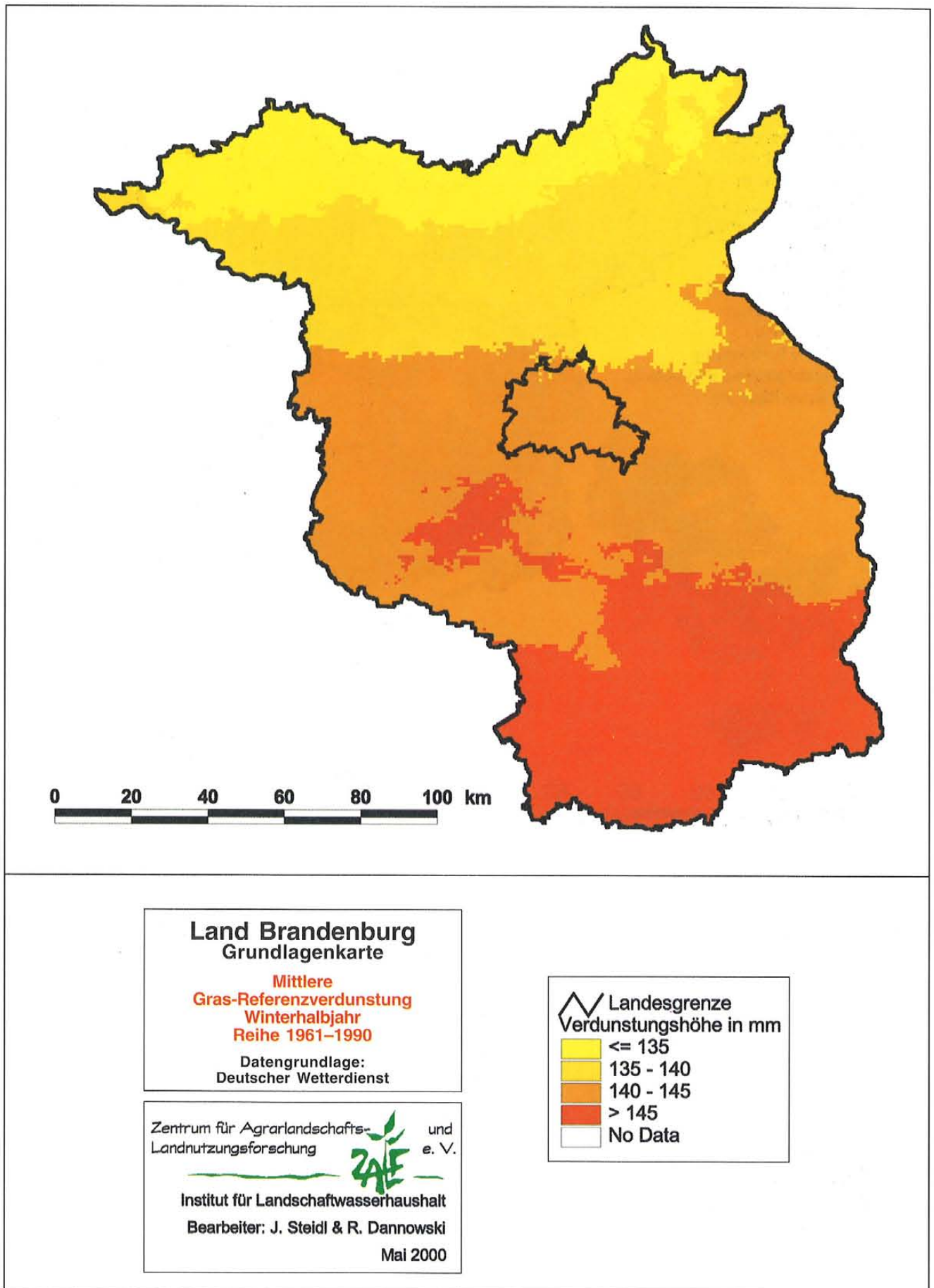
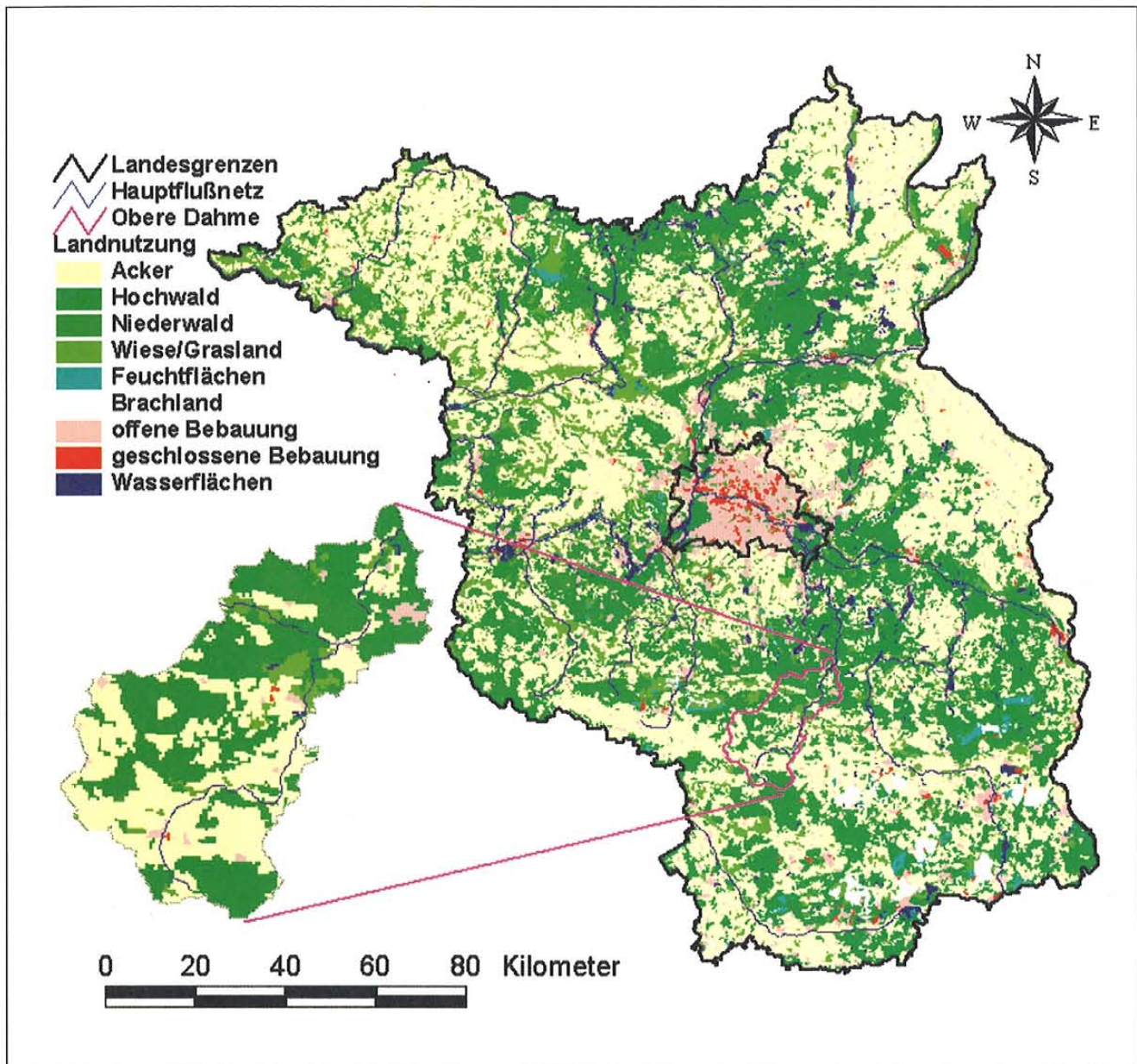


Abb. 2.6: Mittlere jährliche Gras-Referenzverdunstung im Winterhalbjahr der Reihe 1961-1990 (Quelle: DWD 1999)



Land Brandenburg
Grundlagenkarte
Landnutzung

Bundesamt für Statistik zur
 Bodenbedeckung (CORINE-Projekt)
 Stat. Bundesamt Wiesbaden

 Potsdam-Institut für
 Klimafolgenforschung e.V.
 Bearbeiter: W. Lahmer
 Januar 2000

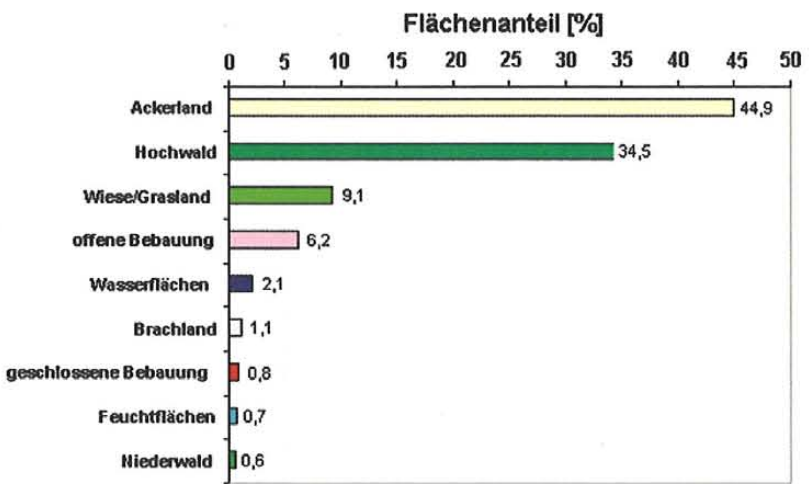


Abb. 2.7: Landnutzungskarte für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin und das Validierungsgebiet Obere Dahme (Quelle: CORINE) mit Hauptflußnetz

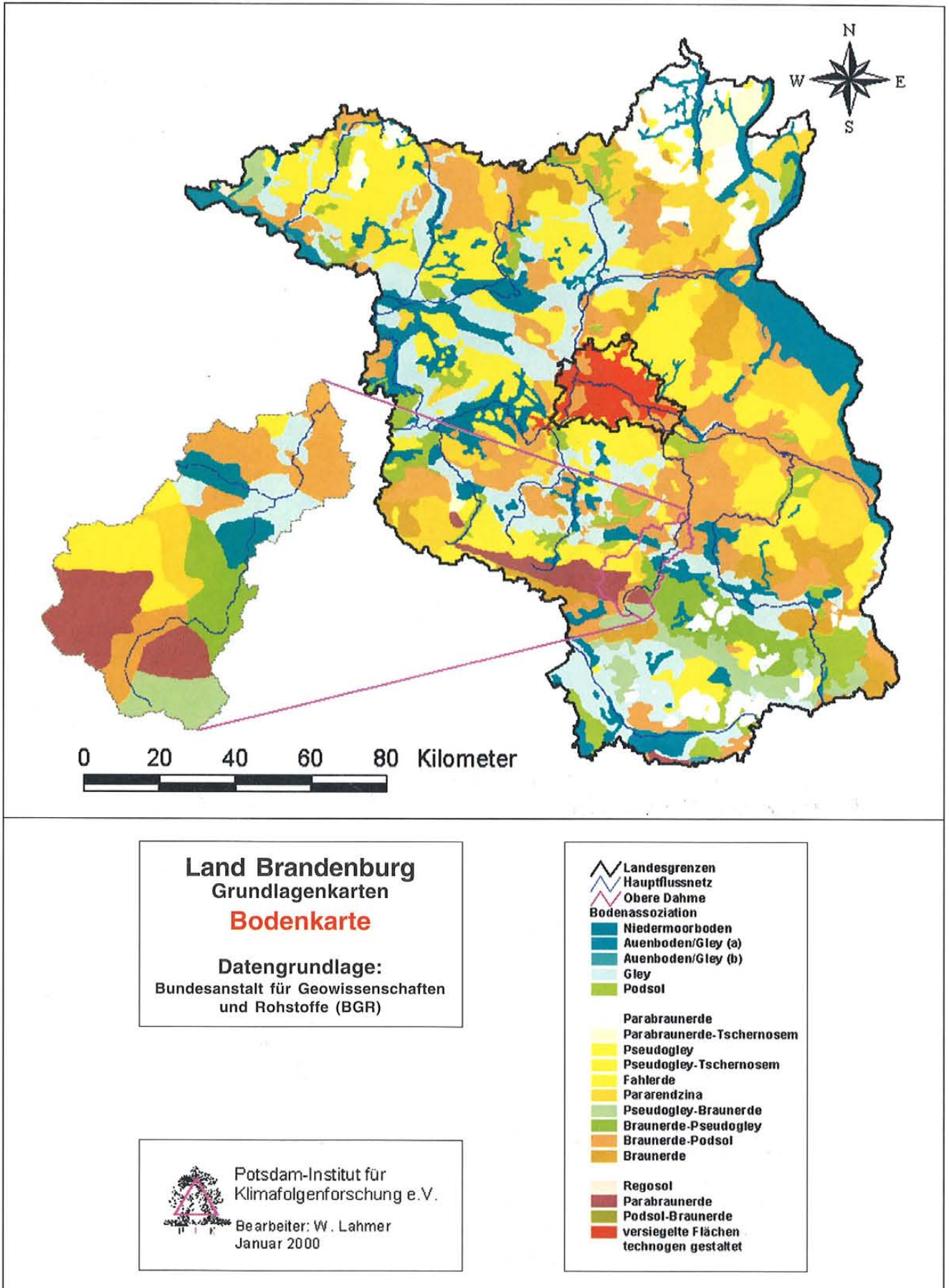


Abb. 2.8: Bodenkarte für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin und das Validierungsgebiet Obere Dahme (M 1:1 000 000; BUEK1000) mit Hauptflussnetz

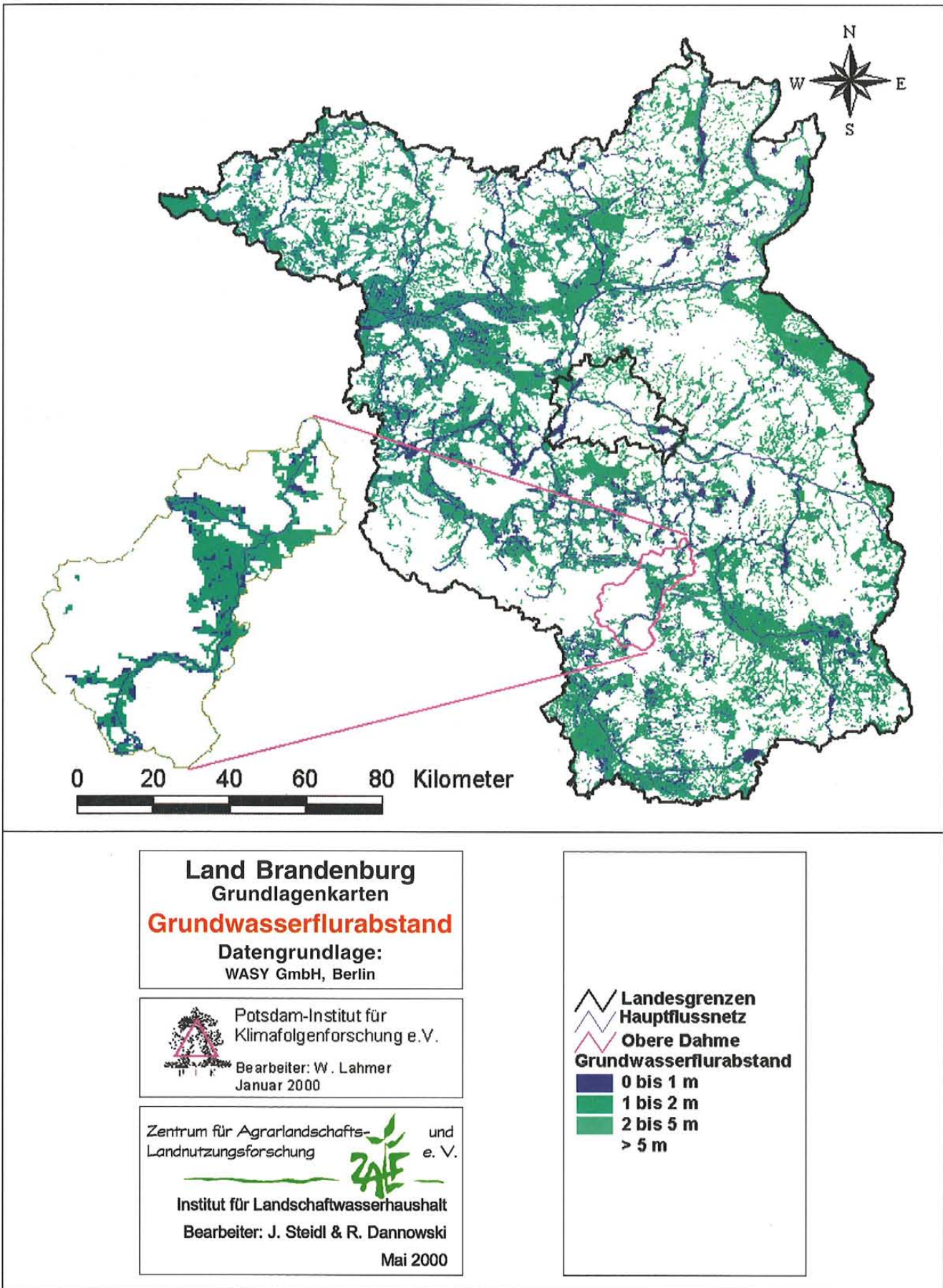


Abb. 2.9: Auf der Basis von Karten der WASY GmbH überarbeitete und vorklassifizierte Grundwasserflurabstandskarte für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin und das Validierungsgebiet Obere Dahme

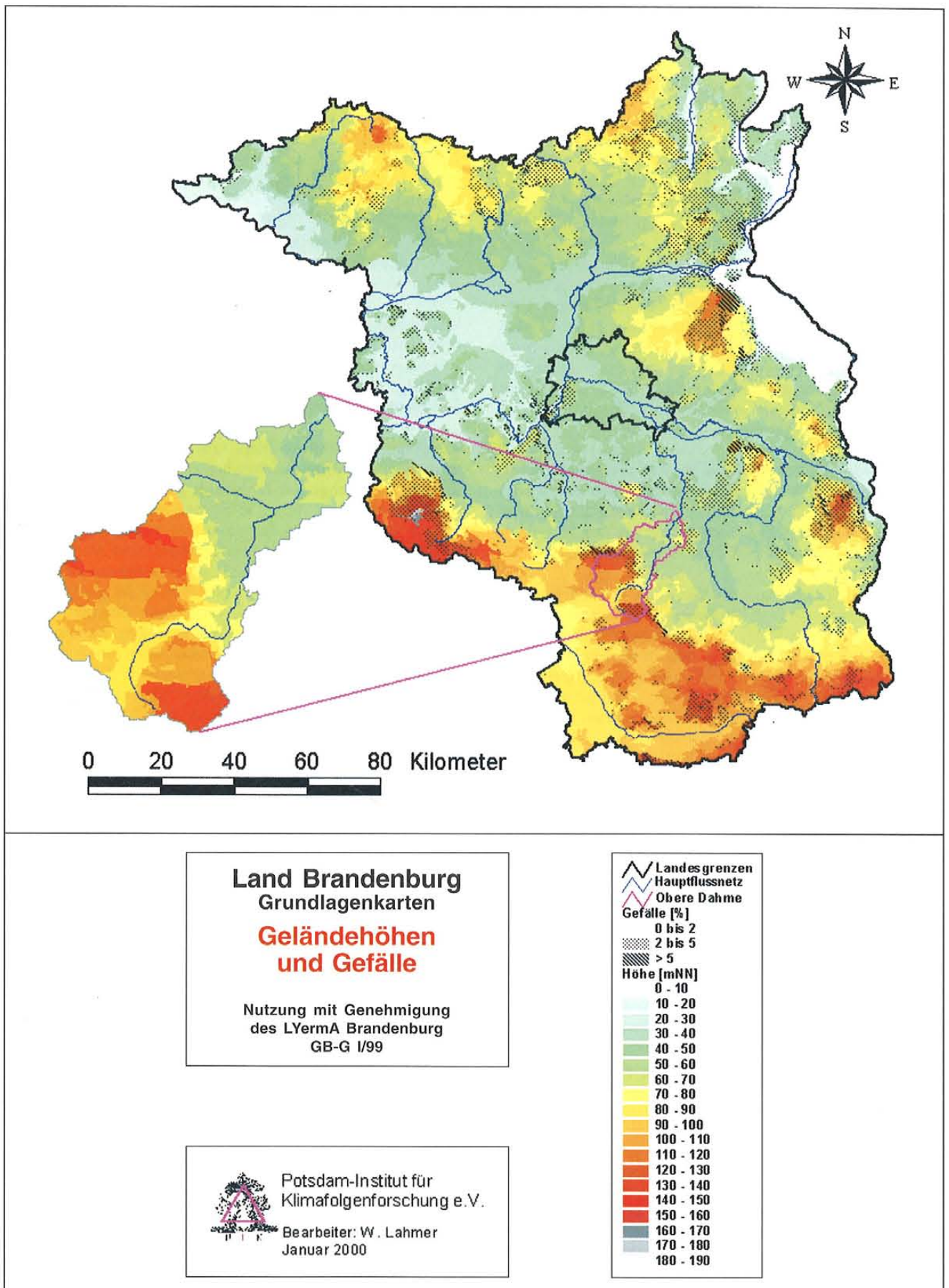


Abb. 2.10: Digitales Höhenmodell und Gefälle für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin und das Validierungsgebiet Obere Dahme (Quelle: Landesvermessungsamt Brandenburg)

3 Modellierung des Gebietswasserhaushaltes mit dem Modell ABIMO

3.1 Methodik

3.1.1 Kenntnisstand

Primäre Bilanzgröße für den Wasserhaushalt eines Gebietes ist die Gesamtabflusshöhe. Sie errechnet sich aus der Differenz Niederschlag minus reale Verdunstung (Evapotranspiration). Während für die Niederschlagshöhe langjährige Messreihen eines ausreichend dichten Beobachtungsnetzes vorliegen, kann die reale Verdunstungshöhe nur auf der Grundlage eines geeigneten Modells bestimmt werden. Im langjährigen Mittel ist die Gesamtabflusshöhe dem gemessenen, auf die Einzugsgebietsfläche bezogenen Abfluss – der Abflussspende – von Fließgewässern gleichzusetzen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, errechnete Werte der Gesamtabflusshöhe und damit die Eignung des zugrunde gelegten Evapotranspirationsmodells anhand von gemessenen Abflussdaten ausgewählter Flusseinzugsgebiete zu überprüfen.

Für das nordostdeutsche Tiefland, zu dem das Gebiet des Landes Brandenburg gehört, repräsentiert die Höhe des Gesamtabflusses in guter Näherung auch die Höhe der Grundwasserneubildung. Dies ist gleichbedeutend mit der Möglichkeit, die Komponenten des Direktabflusses zu vernachlässigen.

So führt Oberflächenabfluss auf den relativ mächtigen Lockergesteinsablagerungen mit überwiegend geringem Geländegefälle meist nur episodisch zu Sammelwasserbildung in Senken, wo wiederum Versickerung und Verdunstung dominieren. Große Teile der Landesfläche Brandenburgs sind so genannten Binnenentwässerungsgebieten, Gebieten ohne Verbindung zu Oberflächengewässern, zuzuordnen. Bei diesen ist zu unterscheiden zwischen Gebieten mit Versickerung in einen Grundwasserleiter (z.B. Sanderflächen) und solchen, die infolge Verbreitung mächtiger bindiger Deckschichten nur oberflächigen oder oberflächennahen (bodeninneren) Abfluss in Geländesenken ausbilden können. Letztere treten insbesondere im Jungmoränengebiet auf, häufig mit Seen oder Söllen als Wasserspeicher und Sedimentationsraum.

Lediglich lokal kann im Bereich der Grund- und Endmoränen ein Direktabfluss in Fließgewässer stattfinden, der aber nur Reichweiten bis zu wenigen 100 m Abstand zum Gewässer aufweist. Dieser Oberflächenabfluss tritt überdies zeitlich begrenzt auf, etwa bei Schneeschmelze oder Regen auf gefrorenem Boden oder ausgelöst durch Starkniederschläge; in Niederungen mit geringem Grundwasserflurabstand ($< 0,5$ m) entsteht nach intensivem Regen Sättigungsabfluss, der durch vorhandene Vorfluter schnell aufgenommen wird und abzuführen ist. Bewaldete Gebiete wiederum besitzen ohnehin geringen Gesamtabfluss – Direktabflüsse treten dort noch stärker in den Hintergrund.

Allerdings unterscheiden sich von den Binnenentwässerungsgebieten in ihrem Abflussverhalten die durch Maßnahmen der Bodenwasserregulierung wie Dränung und Graben-/Rohrleitungsbau für die intensivere landwirtschaftliche Nutzung erschlossenen Teile der Landschaft. Sie erstrecken sich vorwiegend in stauvernässten oder moorigen (Rand-) Bereichen der Binnenentwässerungsgebiete und von Abflussrinnen sowie in den Flussniederungen. Wird das Wasserregime nicht durch Maßnahmen des An- oder Einstaus beeinflusst oder handelt

es sich in den Niederungen der größeren Flüsse nicht um eingedeichte Polderflächen, die unter dem mittleren Niveau des Hauptgewässers liegen und durch Schöpfwerke entwässert werden, so dominieren hier Direktabflüsse in Fließgewässer. Die Gebiete sind durch geringe bis negative (Zehrflächen) Grundwasserneubildung gekennzeichnet. Ebenso sind laterale oberflächennahe Flüsse mit verringerter Grundwasserneubildung charakteristisch für das Abflussverhalten versiegelter, durch Kanalisation erschlossener Flächen in urbanen Gebieten.

Im Landesmaßstab (ohne Berlin) übersteigt der Anteil von Flächen mit Direktabfluss aber kaum 10 %, sodass in Betrachtungen zum langjährig mittleren Landeswasserhaushalt Brandenburgs Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung vereinfachend gleichgesetzt werden können.

Für einige der einleitend (Kap. 1) angeführten Ziele der Konzeption Landschaftswasserhaushalt ist die jahreszeitliche Auflösung der Beträge der langjährig gemittelten Gesamtabflusshöhe von Bedeutung. So ist eine Aufspaltung der üblicherweise angegebenen Jahressummen wenigstens auf Winterhalbjahr (Monate November bis April) und Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) sinnvoll. Sie veranschaulicht in weit besserem Maße als Jahressummen z.B. die durch großflächigen Wassermangel im Sommerhalbjahr gekennzeichnete, oft angespannte Situation im Gebietswasserhaushalt. Besonders für den Stickstoffeintrag ins Grundwasser unter landwirtschaftlich genutzten Flächen lassen Wintersummen der Gesamtabflusshöhe die weitaus besseren Schlussfolgerungen zu (DANNOWSKI ET AL. 1994, DANNOWSKI ET AL. 1999), da mit der im Winterhalbjahr stattfindenden Sickerwasserbewegung und Grundwasserneubildung der größte Vorrat an mineralisiertem Stickstoff im Oberboden zusammenfällt. Für grundwassernahe Niederungen, die im Jahresmittel als Zehrgebiete mit negativer Wasserbilanz wirken, sind die Abflussverhältnisse im Winterhalbjahr für die realistische Beschreibung der Nährstoffabgabe in die Hydrosphäre maßgeblich.

Welche zusätzlichen Erkenntnisse aus einer noch weiter gehenden zeitlichen Auflösung der Abflussbildung im Landesmaßstab gewonnen werden können, wie sich Modellergebnisse langjähriger Zeitreihen zu örtlich differenzierten Mittelwerten aggregieren lassen, aber auch welche Schwierigkeiten damit verbunden sind, wird in Kapitel 4 dargestellt.

Für den Entwurf des Landschaftsprogramms Brandenburg wurde 1993 vom ZALF eine flächendeckende Auswertung des Gesamtabflusses zur Ausweisung der Grundwasserneubildung für das Gebiet des Landes Brandenburg vorgenommen (DANNOWSKI & FRITSCHE 1993). Grundlage waren die Deckfolien des Institutes für Wasserwirtschaft Berlin (GLUGLA 1985) für die N-A-U-Karte (Niederschlag – Abfluss – Unterschiedsgröße, IfW 1958) mit der Jahressumme der Gesamtabflusshöhe im Raster von $2,5 \text{ km} \times 2,5 \text{ km}$. Sie folgen dem Blattschnitt des Hydrographischen Kartenwerkes der DDR (1963) im Maßstab 1:200 000. Hydrometeorologische Basis dieser Deckfolien waren Karten des Niederschlages 1931/60 nach FREYDANK ET AL. (1983) sowie der potenziellen Evapotranspiration 1951/60 nach KORTÜM (1965, 1966).

Mit Hilfe des Programms RASTER (GLUGLA ET AL. 1976) hatten die Autoren nach einem Ansatz von BAGROV (1953) elementweise die mittlere Jahressumme der realen Evapotranspiration sowie aus der Differenz des effektiven, mit dem Faktor 1,09 auf Bodennähe korrigierten Niederschlags und der realen Evapotranspiration die Höhe des Gesamtabflusses errechnet. Weitere Eingangsdaten dazu waren die Evaporationshöhe freier Wasserflächen, die Landnutzungsverteilung in fünf Hauptnutzungsklassen nach topographischen Karten, Bodenspeicherkennwerte und Grundwasserflurabstände. Die Deckfolien der Gesamtabflusshöhe charakterisieren die gebietshydrologische Situation etwa um die Mitte der 1970er Jahre.

Das Modell RASTER ist von seinen Entwicklern auf der Grundlage von Daten in- und ausländischer Lysimeterstationen kalibriert und anhand beobachteter Abflusswerte geschlossener Einzugsgebiete für den Lockergesteinsbereich der neuen Bundesländer verifiziert worden. Dabei lag der mittlere relative Abweichungsbetrag zwischen berechneter und gemessener Abflusshöhe je nach Einzugsgebietsfläche bei ca. 15 bis 10 % (25 bis 50 km²) bis < 5 % (> 1.000 km²), der mittlere Abweichungsbetrag innerhalb der einzelnen Rasterelemente (6,25 km²) wurde mit 20 % eingeschätzt (GLUGLA 1985).

MÜLLER ET AL. (1996) verglichen auf der Grundlage teilweise neueren Datenmaterials gemessener Abflüsse von 26 Einzugsgebieten im Lockergesteinsbereich der neuen Bundesländer insgesamt fünf Methoden für die Berechnung der Gesamtabflusshöhe, bezogen auf Landschaftseinheiten > 100 km². Dabei wies der Ansatz nach GLUGLA/BAGROV eine mittlere Abweichung von -5 mm a⁻¹ auf; die mittlere negative Abweichung betrug 30 mm a⁻¹, die mittlere positive Abweichung 17 mm a⁻¹. Dominierende Einflussgröße bei allen überprüften Verfahren war die Niederschlagshöhe, insbesondere das zur Kompensation systematischer Messfehler verwendete Korrekturverfahren.

3.1.2 Das Abflussbildungsmodell ABIMO

Aufbauend auf dem Modell RASTER bzw. der PC-Version „Arbeitsplatz Grundwasserdargebot – GWD“ entwickelten GLUGLA & FÜRTIG (1997) ihr sog. **Abflussbildungsmodell**, ABIMO. Das Modell behandelt ausschließlich die Vertikalprozesse des Landschaftswasserhaushaltes an der Grenzfläche Atmosphäre/Biosphäre/Lithosphäre: Niederschlag, Verdunstung und Entstehen von Gesamtabfluss (Resultat der Abflussbildung, potenzielles Wasserdargebot). Wie seine Vorläufer ermöglicht ABIMO die großgebietliche rasterorientierte Berechnung der langjährig mittleren Gesamtabflusshöhe, greift aber neuere hydrometeorologische und bodenhydrologische Entwicklungen auf und bietet erweiterte Eingabe- und Differenzierungsmöglichkeiten für Eingangsparameter.

Den methodischen Kern der in diesem Kapitel dargestellten Abflussbildungsmodelle bildet eine Beziehung nach BAGROV (1953), die für grundwasserferne Standorte die reale Verdunstung in Abhängigkeit von potenzieller Verdunstung und Niederschlag beschreibt (Abb. 3.1). Mit wachsendem Niederschlag P nähert sich die reale Verdunstung ETR der potenziellen Verdunstung ETP, der Quotient ETR/ETP geht gegen 1. Bei abnehmendem Niederschlag P (die Quotienten P/ETP und ETR/ETP gehen gegen Null) nähert sich die reale Verdunstung ETR dem Niederschlag P. Das Übergangverhalten zwischen den beiden Randbedingungen wird durch die Speichereigenschaften der verdunstenden Fläche, ausgedrückt im empirischen Effektivitätsparameter n, bestimmt:

$$ETR \rightarrow ETP \quad \text{für} \quad P \rightarrow \infty \quad (3.1)$$

$$ETR \rightarrow P \quad \text{für} \quad ETP \rightarrow \infty \quad (3.2)$$

$$dETR/dP = 1 - (ETR/ETP)^n \quad (3.3)$$

- mit ETR – reale Verdunstung
 ETP – potenzielle Verdunstung
 P – Niederschlag
 n – Effektivitätsparameter nach BAGROV (1953)

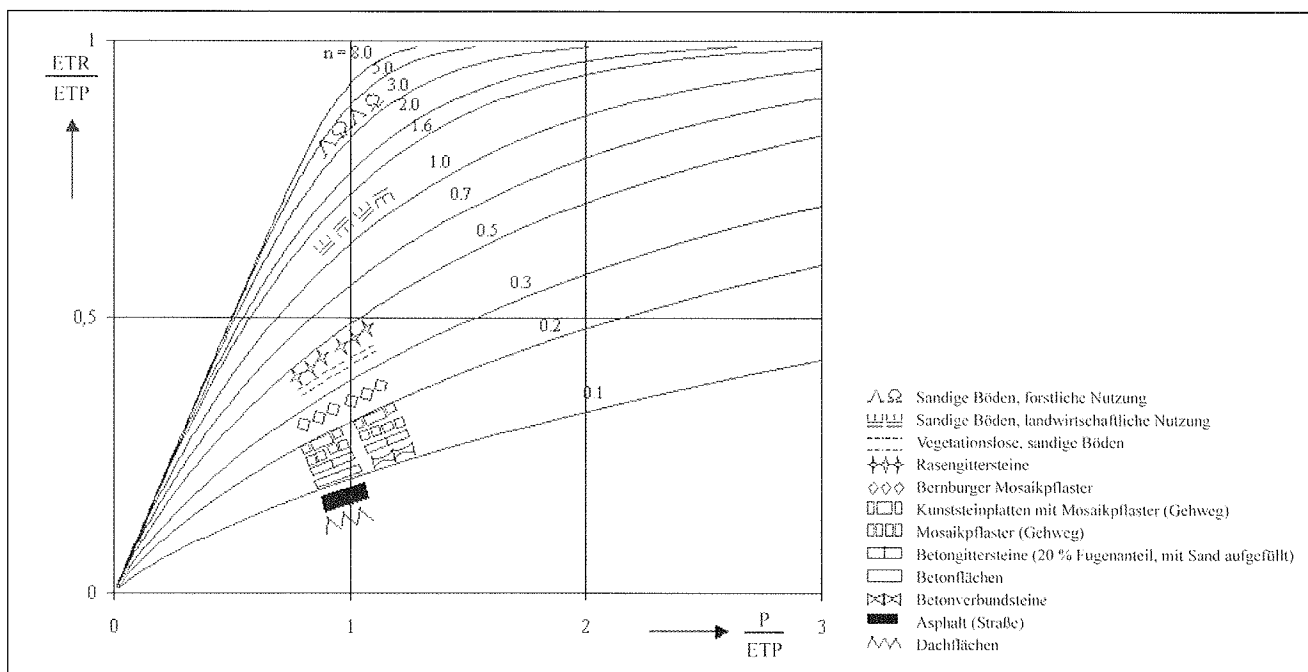


Abb. 3.1: Darstellung der BAGROV-Gleichung für ausgewählte Werte des Effektivitätsparameters n und Abhängigkeit dieses Parameters von Landnutzung und Bodenart (nach GLUGLA & KRAHE 1995)

Der Effektivitätsparameter n hängt von der Landnutzung und dem Wasserspeichervermögen des Bodens ab. Für grundwassernahe Verhältnisse ist die zusätzliche Verfügbarkeit von Grundwasser durch kapillaren Aufstieg zu berücksichtigen. Die Verdunstung von Gewässerflächen wird der potenziellen Verdunstung gleichgesetzt.

Die Berechnung des Gesamtabflusses nach GLUGLA/BAGROV stellt ein seit der zweiten Hälfte der 1970er Jahre in der Wasserwirtschaft der früheren DDR als Standard angewandtes Verfahren dar. Eine einführende Darstellung der Methode geben DYCK & PESCHKE (1995). Mit einer Veröffentlichung von BONTA & MÜLLER (1999) liegt nun neben einem Bericht über einen erfolgreichen internationalen Ergebnisvergleich (Deutschland – Ohio, USA) auch eine weitere, auf ABIMO ausgerichtete, allgemein zugängliche Beschreibung der methodischen Grundlagen vor.

Gegenüber den älteren Programmcodes zur Berechnung des Gesamtabflusses wurden bis zur hier eingesetzten Version 2.1 von ABIMO (RACHIMOV 1996) folgende inhaltliche Verbesserungen vorgenommen:

- Die Quantifizierung des Bodenspeichers erfolgt anstelle einer Ableitung aus dem Feinanteil des Bodens direkt durch Eingabe von Werten der nutzbaren Feldkapazität für den Bereich der durchschnittlichen effektiven Durchwurzelungstiefe. Letztere ist eine Funktion des Bodentyps und der Landnutzung.
- Urbane Flächen sind in das Modell durch Zuweisung von Faktoren für die Versiegelung und für den Anschlussgrad an Kanalisation/Vorfluter integriert. Detaillierte Angaben über die Landnutzung (Bebauung, Plätze, Grünanlagen) und die Bodenbedeckung (diverse Steinpflaster, Asphalt, Beton) und Ergebnisse von Messplätzen in bebauten Gebieten wurden zur Entwicklung von Beziehungen zwischen dem Effektivitätsparameter n und diesen Angaben verwendet.
- Für bewaldete Flächen führten neuere Auswertungen von Langzeitbeobachtungen zu einer Modifikation der Beziehung zwischen dem Effektivitätsparameter n und dem Bodentyp (DVWK 1996).
- Auf grundwassernahen Flächen wird Kapillaraufstieg, abhängig vom Grundwasserflurabstand und der durchschnittlichen effektiven Durchwurzelungstiefe, berücksichtigt. Das kapillar gehobene Grundwasser unterliegt der Evapotranspiration.
- Eventuell stattfindende Feldberegnung kann berücksichtigt werden. Die Beregnungshöhe wird zur korrigierten Niederschlagshöhe und der Höhe des kapillaren Aufstiegs addiert. Die Summe geht anstelle des Niederschlages in die Bilanz ein.
- Die potenzielle Evapotranspiration wird entsprechend dem Ansatz von TURC (1961) berechnet und mit einem Faktor 1,1 an die Bedingungen in Deutschland angepasst. Für bedeckte Grundwasserleiter lässt sich lateraler Direktabfluss (Zwischenabfluss) durch einen speziell zu quantifizierenden Reduktionsfaktor der Grundwasserneubildungsrate berücksichtigen.

Die Stärke des auf Energie- und Wasserbilanzbetrachtungen beruhenden, durch empirisch gewonnene Kennlinien modifizierten GLUGLA/BAGROV-Ansatzes liegt in der praktisch unbegrenzt kleinflächigen örtlichen Differenzierung der Eingangsinformation bei tragbarem Rechenaufwand, allerdings immer vor dem Hintergrund der zeitlichen Aggregation zu langjäh-

rigen Mittelwerten. In (offline-) Kopplung mit einem Geographischen Informationssystem (GIS) lassen sich die auflösungsabhängig teilweise sehr umfangreichen georeferenzierten Datenbestände günstig erzeugen und verwalten. Dabei ist es durchaus möglich, von der ursprünglichen Rastertopologie abzugehen und das Modell mit polygonbezogenen Datensätzen (Hydrotopstruktur) zu betreiben. Die Visualisierungskomponenten des GIS bieten die erforderliche komfortable Funktionalität für die Ergebnisdarstellung in Kartenform. Nachgeschaltete rasterorientierte Prozeduren ermöglichen die Einbindung der errechneten Werte der Gesamtabflusshöhe in GIS-gestützte (stationäre) Modellrechnungen zum Gebietswasserhaushalt und zum regionalen Stofftransport (DANNOWSKI ET AL. 1999).

Besonderes Interesse kommt in jüngster Zeit den Möglichkeiten GIS-gestützter großgebietlicher Szenariorechnungen zu, beispielsweise zu Auswirkungen von Landnutzungs- oder Klimaänderungen auf die mittlere Höhe des Gesamtabflusses oder auf das mittel- bis langfristige Weg-Zeit-Verhalten des unterirdischen Stickstoffeintrags ins Grundwasser und in die Oberflächengewässer im Lockergesteinsbereich (QUAST & STEIDL 1999).

Zur Auflösung der jährlichen mittleren Höhe des Gesamtabflusses in Halbjahressummen ist von den mit ABIMO errechneten Werten die Wintersumme (November–April) der Gesamtabflusshöhe abzuziehen. Diese lässt sich aus der korrigierten mittleren Höhe des Winterniederschlages, vermindert um die mittlere Höhe der Evapotranspiration und die Auffüllung des Boden-/Grundwasserspeichers im Winterhalbjahr, errechnen:

$$R_{So} = R - R_{Wi} \quad (3.4)$$

$$R_{Wi} = P_{Wi} - ET_{Wi} - \Delta S \quad (3.5)$$

mit R – Jahreshöhe des Gesamtabflusses in mm
 R_{So} – Höhe Gesamtabflusses im Sommerhalbjahr in mm
 R_{Wi} – Höhe des Gesamtabflusses im Winterhalbjahr in mm
 P_{Wi} – Niederschlagshöhe im Winterhalbjahr in mm
 ET_{Wi} – Höhe der Verdunstung im Winterhalbjahr in mm
 ΔS – Auffüllung des Boden-/Grundwasserspeichers im Winterhalbjahr in mm

Ortsabhängige Werte für die korrigierte Höhe des Niederschlages und für die Höhe der Verdunstung im Winterhalbjahr lassen sich öffentlich zugänglichen hydrometeorologischen Kartenwerken entnehmen (HAD 1998, DWD 1999). Unbekannt ist zunächst die Auffüllung des Boden-/Grundwasserspeichers im Winterhalbjahr. Es ist davon auszugehen, dass zwischen Anfang November und Ende April unter land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen eine Teilauffüllung der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum stattfindet. Die Quantifizierung dieser Speicheränderung wird in Kapitel 3.1.4 beschrieben.

3.1.3 Kalibrierung und Validierung des Ansatzes in Beispielsgebieten

Als Eingangsgröße für ABIMO wird von GLUGLA & FÜRTIG (1997) die potenzielle Verdunstungshöhe für Landflächen nach TURC/IVANOV empfohlen. Die DWD-Karte der potenziellen Verdunstung, die aus den in Kapitel 2.1 genannten Gründen Verwendung fand, basiert jedoch auf Berechnungen der Gras-Referenz-

verdunstung (HAD 1998, DWD 1999). Die Ergebnisse beider Verfahren weisen Differenzen auf (WENDLING 1995), die erhebliche Konsequenzen für den berechneten Gesamtabfluss zur Folge haben. Es liegen noch keine Erfahrungen für die Verwendung der Gras-Referenzverdunstung mit ABIMO vor. Deshalb war zu prüfen, ob die Gras-Referenzverdunstung als potenzielle Verdunstungshöhe für ABIMO genutzt werden kann bzw. welche Anpassungen vorgenommen werden müssen.

Durch den Vergleich der berechneten Gesamtabflusshöhe mit an ausgewählten Flusspegeln ermittelten mittleren Abflüssen in verschiedenen Einzugsgebieten lassen sich Aussagen zur Gültigkeit der Modellrechnungen ableiten. Dabei geht es nicht mehr um die Validierung des Modells ABIMO (vgl. Kap. 3.1.1 zur Methode von GLUGLA/BAGROV), sondern im Mittelpunkt steht die Kalibrierung der potenziellen Verdunstung als Modelleingangsgröße. Die auszuwählenden Flusspegel sollten dafür folgende Voraussetzungen erfüllen:

- möglichst lückenlose Durchflusswerte über die Zeitspanne der Modellreihe sowie
- das Einzugsgebiet, das durch den jeweiligen Flusspegel repräsentiert wird, sollte
 - hinsichtlich seiner Ausdehnung und der wirksamen hydrologischen Prozesse gut bekannt sein,
 - keine wesentlichen Differenzen zwischen ober- und unterirdischem Einzugsgebiet aufweisen,
 - nicht durch Überleitungen über Einzugsgebietsgrenzen beeinflusst sein,
 - über den Modellzeitraum keine wesentlichen Nutzungsänderungen erfahren haben,
 - möglichst innerhalb der Landesfläche Brandenburgs liegen.

Flusspegel, die allen Anforderungen in gleichem Umfang gerecht werden, konnten in Brandenburg nicht gefunden werden. Dennoch wurden zwei Pegeleinzugsgebiete für die Validierung ausgewählt:

- das Einzugsgebiet der Uecker bis zum Pegel Pasewalk und
- das Einzugsgebiet der Oberen Dahme bis zum Pegel Märkisch Buchholz.

Die Kennzahlen der in diesen Gebieten verfügbaren Pegel sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Beide Gebiete zeigen neben hydroklimatischen Unterschieden besonders hinsichtlich der Verteilung an Acker-, Wald- und Wasserflächen, von Böden mit gutem Wasserspeichervermögen und der Grundwasserbedeckungsverhältnisse deutliche Unterschiede.

Am Pegel Pasewalk sind die täglichen Durchflusswerte seit 1964 mit den Fehl Jahren 1973/74 verfügbar. Das Einzugsgebiet des Pegels ist sehr gut bekannt. Es hat eine Fläche von 1.435 km² und weist für die Reihe 1964/90 eine mittlere Abflusspende von 3,54 l s⁻¹ km⁻² auf. Überleitungen über die Einzugsgebietsgrenzen sind nicht bekannt, und Abweichungen zwischen ober- und unterirdischem Einzugsgebiet sind bei Flussgebieten dieser Größenordnung ohne Bedeutung. Der Pegel liegt jedoch außerhalb Brandenburgs. Es können bei den Berechnungen nur ca. 75 % der Einzugsgebietsfläche des Pegels berücksichtigt werden, da der Eingangsdatensatz für die Berechnungen nur für die Landesfläche Brandenburgs

zur Verfügung stand. Die Verteilung der Hauptnutzungsarten kann über den Modellzeitraum als relativ konstant angesehen werden. Die Verhältnisse Acker/Wald/Sonstiges betragen 80/15/5 und werden auch für das Teilgebiet in Mecklenburg-Vorpommern unterstellt.

Die Fläche des Einzugsgebietes der Oberen Dahme wird mit 550 km² angegeben. Im Einzugsgebiet stehen zunächst insge-

Tab. 3.1: Kennzahlen der gewählten Pegel

Gewässer	Pegel	A _E km ²	MQ m ³ s ⁻¹	Mq l s ⁻¹ km ⁻²	Reihe
Uecker	Pasewalk	1.435	5.080	3,54	1964/90
Oberer Dahme	Dahme-Stadt	22	0,047	2,14	1977/90
Oberer Dahme	Prierow 2	399	0,578	1,45	1971/95
Oberer Dahme	Märkisch Buchholz	550	1,530	2,78	1977/95

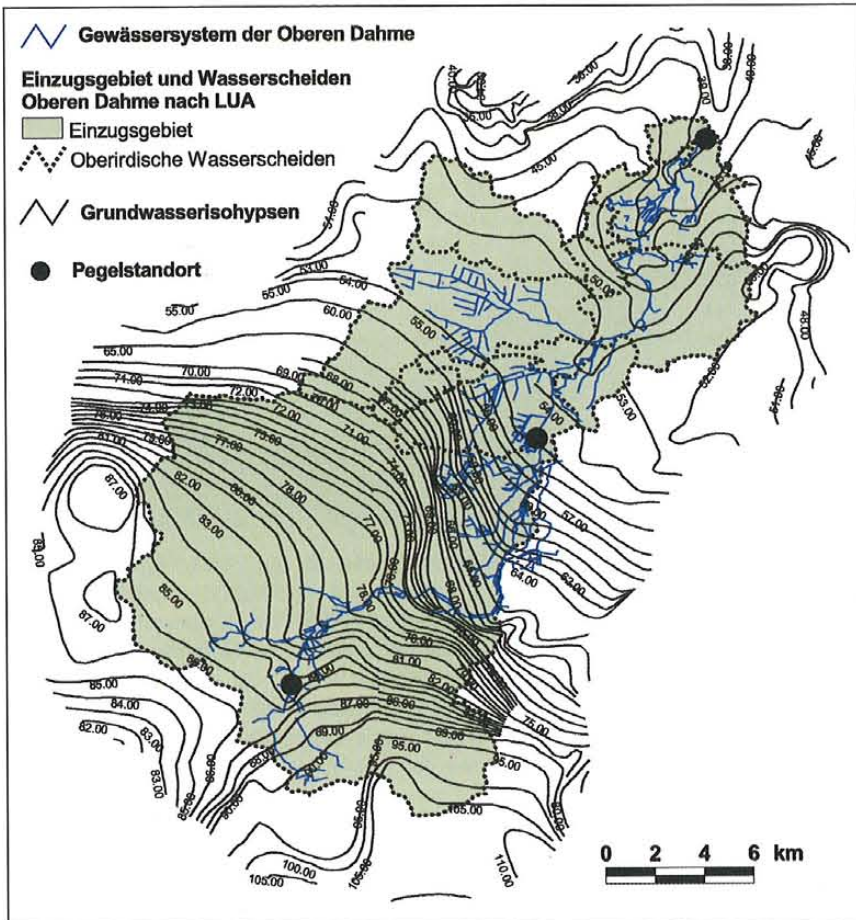
samt drei Pegel für die Validierung zur Verfügung. Überleitungen aus der Spree werden erst unterhalb des Pegels Märkisch Buchholz wirksam. Der Anteil des Waldes übertrifft mit ca. 52 % den Flächenanteil der agrarischen Nutzung (46 %). Der Pegel Dahme-Stadt wurde 1970/71 für die Untersuchungen im Rahmen des Hydrologischen Dezenniums eingerichtet, da sein Einzugsgebiet als relativ unbeeinflusst galt (WWD 1973). Die Messungen werden seit der Inbetriebnahme fortgeführt.

In Tabelle 3.1 werden Differenzen zwischen den mittleren Abflusspenden an den Pegeln der Uecker und der Oberen Dahme deutlich. So wird für den Pegel Prierow 2 mit 1,45 l s⁻¹ km⁻² gegenüber dem Pegel Pasewalk (3,54 l s⁻¹ km⁻²) eine deutlich geringere mittlere Abflusspende ausgewiesen. Insbesondere aber die große Streuung der mittleren Abflusspenden an den Pegeln der Oberen Dahmen ist dahingehend zu interpretieren, dass die angegebenen Einzugsgebietsflächen nicht mit den Flächen übereinstimmen, die durch den jeweiligen Pegel repräsentiert werden. Die ausgewiesenen Einzugsgebiete wurden deshalb einer kritischen Bewertung unterzogen. Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.1.1 zu den dominierenden Abflussverhältnissen im Lockergesteinsbereich lag dabei der Schwerpunkt auf der Überprüfung der unterirdischen Einzugsgebietsgrenzen.

Unter Verwendung der Hydrogeologischen Karte der DDR (M 1:50 000, HYKA 50) und des aktuellen Gewässernetzes der Oberen Dahme wurden für den Kartenausschnitt entsprechend Abbildung 3.2 die mittleren Potenzialhöhen des Grundwassers für ein regelmäßiges Raster berechnet. Dazu wurde das ARC/INFO-Tool TOPOGRID mit einer Rasterweite von 100 m genutzt. Anschließend wurden auf dieser Grundlage ebenfalls mit Hilfe des GIS die Grundwassereinzugsgebiete der einzelnen Pegel ausgewiesen (Abb. 3.3). Diese Gebiete zeigen hinsichtlich ihrer Größe und Lage deutliche Differenzen zu den vom LUA ausgewiesenen oberirdischen Einzugsgebietsgrenzen. Der Anteil des Waldes innerhalb der unterirdischen

Tab. 3.2: Grundwassereinzugsgebiete für die Pegel an der Oberen Dahme

Gewässer	Pegel	A _{Eu} km ²	Mq l s ⁻¹ km ⁻²
Oberer Dahme	Dahme-Stadt	16	3,01
Oberer Dahme	Prierow 2	181	3,19
Oberer Dahme	Märkisch Buchholz	466	3,28



Einzugsgebietsgrenzen für den Pegel Märkisch Buchholz ist mit 49 % jetzt gleich dem der landwirtschaftlichen Nutzung. Die damit neu berechneten mittleren Abflussspenden weisen nur noch eine geringe Streuung auf (Tabelle 3.2) und sind mit denen des Ueckerpegels Pasewalk durchaus vergleichbar.

Mit den so ausgewiesenen Einzugsgebietsflächen der Validierungsgebiete, die durch die Pegel im Bereich der Oberen Dahme repräsentiert werden, wurden die Werte der potenziellen Verdunstung (Gras-Referenzverdunstung entsprechend DWD-Karte von 1999) hinsichtlich ihrer Eignung für die vorliegenden Wasserhaushaltsuntersuchungen geprüft. Die mit ABIMO berechneten mittleren Gesamtabflusshöhen sollten durch Anpassung der in die Berechnung eingehenden potenziellen Evapotranspirationshöhe mit den mittleren Durchflüssen, die für die Flusspegel ermittelt wurden, in Übereinstimmung gebracht werden.

Abb. 3.2: Linien gleicher mittlerer Potenzialhöhen des Grundwassers (nach HYKA 50)

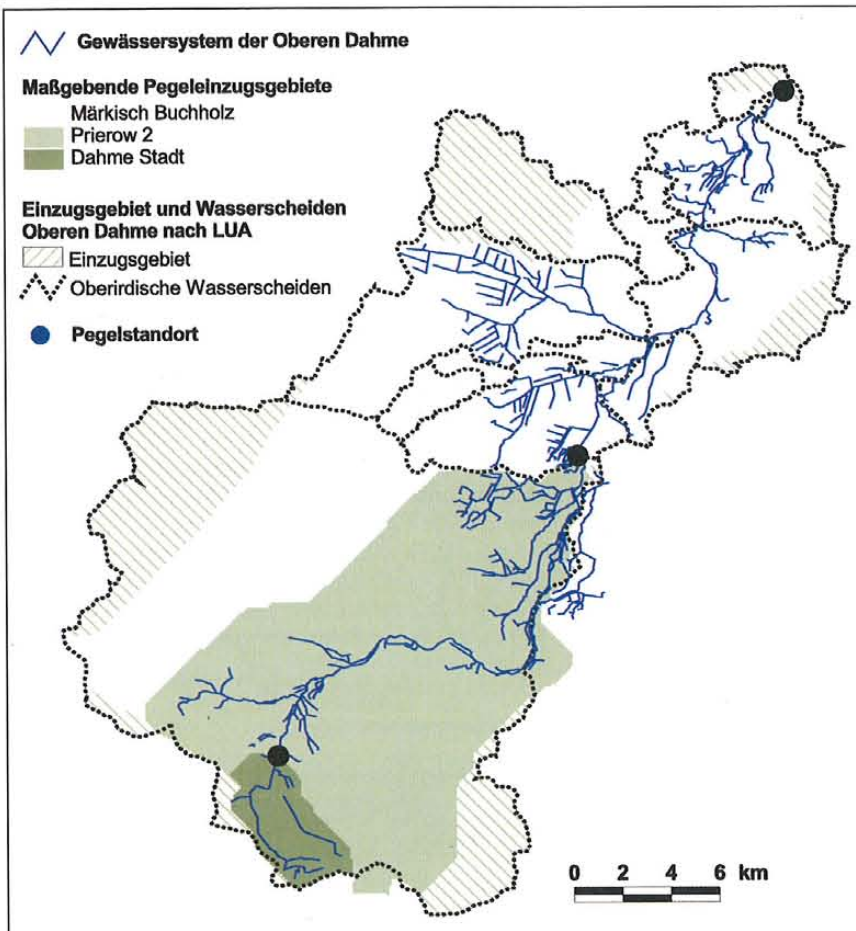


Abb. 3.3: Grundwassereinzugsgebiete der Pegel an der Oberen Dahme

Da an den Pegeln der Dahme keine Durchflussmesswerte vorliegen, die zu der Jahresreihe der Berechnungen passen (vgl. Tab. 3.1), war zunächst die Vergleichbarkeit der Zeitreihen zu klären. Am ZALF sind dazu für die Stationen Potsdam und Müncheberg genügend lange Zeitreihen der Niederschlagsmessung verfügbar.

Vergleicht man die mittleren jährlichen Niederschlagssummen etwa für die Zeitreihen der Durchflussmessungen an den Pegeln mit der Bezugsreihe 1961–1990, so werden nur sehr geringe Differenzen deutlich (Tab. 3.3). Unter der Annahme, dass diese Verhältnisse auch für das Gebiet der Oberen Dahme und ebenso hinsichtlich der potenziellen Verdunstung zutreffen, ist damit ein Vergleich der kürzeren Zeitreihen mit der Bezugsreihe zulässig.

Tab. 3.3: Vergleich der mittleren jährlichen Niederschlagssummen (unkorrigiert) für verschiedene Jahresreihen ($\Delta P = P_{x/y} - P_{1961/90}$)

Station	Potsdam		Müncheberg	
	P	$\Delta P/P_{1961/90}$	P	$\Delta P/P_{1961/90}$
Reihe	mm a ⁻¹		mm a ⁻¹	
1961/90	578	0	521	0
1977/90	585	1 %	535	3 %
1971/90	559	-3 %	516	-1 %

Durch Kalibrierung der aus der DWD-Karte ermittelten potenziellen Verdunstungshöhen als Eingangsgröße für ABIMO waren nunmehr gemessener und berechneter Gesamtabfluss für die Validierungsgebiete in möglichst gute Übereinstimmung zu bringen. Bei unzulässigen Abweichungen von den Pegelwerten sind die Verdunstungshöhen durch für das Gebiet einheitliche Zu- oder Abschläge angepasst und

die Berechnung so lange wiederholt worden, bis ein befriedigendes Ergebnis erreicht wurde.

Für die Pegel Dahme-Stadt und Prierow 2 wurden Restdifferenzen zwischen den berechneten Abflüssen und den gemessenen Durchflüssen von 8 % und -4 % erreicht (Tab. 3.4). Dafür waren die potenziellen Verdunstungshöhen gegenüber der Gras-Referenzverdunstung (DWD 1999) schließlich um 10 % zu erhöhen.

Die am Pegel Märkisch Buchholz auftretenden größeren Residuen lassen sich mit verbliebenen Unsicherheiten bei der Ausweisung des Einzugsgebietes erklären: Durch die Quering des Baruther Urstromtales im Einzugsgebiet des Pegels ist die hydraulische Wirksamkeit des dort vorhandenen Entwässerungssystems der maßgebende Faktor, wofür im Rahmen dieser Untersuchungen jedoch keine Aussagen getroffen werden konnten.

Mit der so angepassten Höhe der potenziellen Verdunstung wurde schließlich zur Prüfung auf Übertragbarkeit die mittlere Gesamtabflusshöhe für das Einzugsgebiet des Ueckerpegels Pasewalk berechnet und ebenfalls mit den mittleren Durchflüssen am Pegel verglichen.

Für den Vergleich war es notwendig, die ABIMO-Ergebnisse unter Annahme gleicher Verhältnisse im nicht detailliert bekannten Teil des Einzugsgebietes auf die Einzugsgebietsfläche des Pegels hochzurechnen. Mit 2 % Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Werten wurde hier eine sehr gute Anpassung erreicht (Tab. 3.4). Das bestätigt die Anwendbarkeit der um 10 % erhöhten Gras-Referenzverdunstung als Jahressumme der potenziellen Evapotranspiration für die Berechnung des Gesamtabflusses mit ABIMO.

Tab. 3.4: Validierungsergebnisse

Pegel	$A_E^{(1)}$ km ²	Rechnung				Messung		$\Delta Q^{(2)}$ (-)
		$P^{(3)}$ mm a ⁻¹	ETR ⁽⁴⁾ mm a ⁻¹	R ⁽⁵⁾ mm a ⁻¹	MQ ⁽⁶⁾ m ³ s ⁻¹	MQ ⁽⁷⁾ m ³ s ⁻¹	R ⁽⁸⁾ mm a ⁻¹	
Pasewalk (75 %)	1.435	598	484	114	5,194	5,080	112	2 %
Dahme-Stadt	16	624	521	103	0,051	0,047	95	8 %
Prierow 2	181	615	519	96	0,553	0,578	101	-4 %
Märkisch Buchholz	466	615	531	84	1,242	1,530	103	-19 %

$A_E^{(1)}$ maßgebliches unterirdisches Einzugsgebiet

$\Delta Q^{(2)}$ Abweichung zwischen MQ⁽⁶⁾ und MQ⁽⁷⁾

$P^{(3)}$ mittlere jährliche Niederschlagshöhe

ETR⁽⁴⁾ mittlere jährliche Evapotranspirationshöhe

R⁽⁵⁾ mittlere jährliche Gesamtabflusshöhe (ABIMO)

MQ⁽⁶⁾ mittlerer jährlicher Gesamtabfluss ($MQ^{(6)} = R^{(5)} * A_E / 31.536$)

MQ⁽⁷⁾ arithmetisches Mittel der täglichen Durchflüsse

R⁽⁸⁾ mittlere jährliche Abflusshöhe ($R^{(8)} = MQ^{(7)} / A_E * 31.536$)

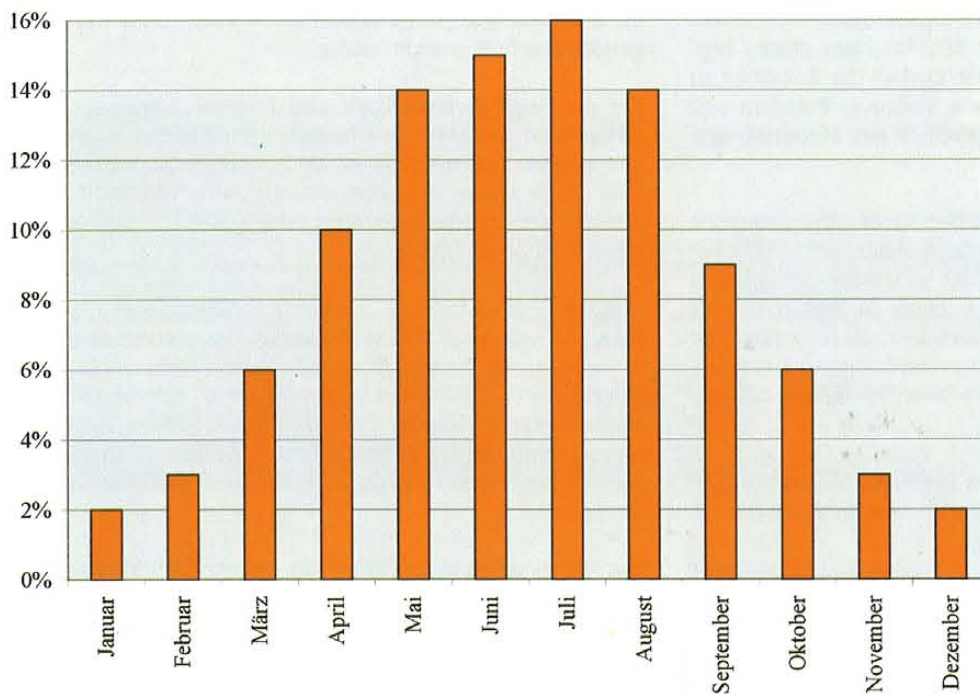


Abb. 3.4: Anteile der mittleren monatlichen Gras-Referenzverdunstungshöhe am Jahreswert (Quelle: HAD 1998)

Tab. 3.5: Ermittlung der Gesamtabflusshöhe im Winterhalbjahr (in mm)

Gebiet	P_{wi}	ETR_{wi}	$P_{wi} - ETR_{wi}$	$R(MQ_{wi})$	ΔS
Uecker/Pasewalk	260	135	125	74	51
Dahme/Prierow 2	272	146	126	73	53
Land Brandenburg	276	142	134	-	51

Tab. 3.6: Bodenabhängige Auffüllung des Boden-/Grundwasserspeichers im Winterhalbjahr

Boden-ID	Bezeichnung	ΔS in mm
6	Niedermoorböden	113
8	Auenböden, Gley aus lehmigen bis tonigen Auensedimenten	72
11	Auenböden, Gley aus sandigen bis tonigen Auensedimenten	62
12	Gley der sandigen Urstromtäler und Niederungen	46
17	Podsol / Braunerde-Podsol / Gley-Podsol aus sandigen Flussablagerungen	36
19	Parabraunerde / Fahlerde / Pseudogley-Parabraunerde aus Geschiebelehm	42
20	Parabraunerde-Tschernosem / Parabraunerde aus Geschiebemergel oder Beckenablagerungen	56
22	Pseudogley aus Geschiebedecksand über Geschiebelehm	54
24	Pseudogley-Tschernosem aus Geschiebelehm mit lehmig-sandiger Deckschicht	58
26	Fahlerde / Bänder-Parabraunerde / Braunerde aus sandigen Deckschichten über Geschiebelehm	51
27	Pararendzina / Regosol / Bänder-Parabraunerde im engräumigen Wechsel aus sandigen bis lehmigen Bildungen der Endmoränen	52
28	Podsolierete Pseudogley-Braunerde / Pseudogley-Fahlerde aus Geschiebedecksand über Geschiebelehm	48
29	Braunerde-Pseudogley / Podsol-Pseudogley aus sandigen Deckschichten über Geschiebelehm	54
31	Braunerde-Podsol / Podsol-Braunerde aus trockenen, nährstoffreichen Sanden	29
32	Braunerde / Bänder-Parabraunerde aus nährstoffreichen Sanden	43
34	Regosol / Lockersyrosem aus trockenen, nährstoffarmen Sanden	28
46	Parabraunerde / Fahlerde / Braunerde aus Sandlöss über Sand oder Lehm	57
57	Podsol-Braunerde aus sauren magmatischen und metamorphen Gesteinen	34
70	Versiegelte Flächen in größeren Städten	15
71	Technogen gestaltete Böden	35

3.1.4 Separation des Gesamtabflusses in Winter- und Sommerhalbjahr

Zur Aufteilung der Höhe des Gesamtabflusses auf Winter- und Sommerhalbjahr ist entsprechend Gl. (3.4) und (3.5) zunächst der Gesamtabfluss R_{wi} für die Monate November bis April zu ermitteln. Unterschiede zwischen potenzieller und realer Evapotranspiration sind für diesen Zeitraum vernachlässigbar. Die mittlere Höhe der Evapotranspiration im Winterhalbjahr ergibt sich damit unmittelbar aus den gebietsspezifischen Werten der potenziellen Evapotranspiration (vgl. Abb. 3.4).

Tabelle 3.5 zeigt für die Landesfläche insgesamt und für die Einzugsgebiete Uecker/Pasewalk und Dahme/Prierow 2 die Werte der korrigierten Niederschlagshöhe P_{wi} und der potenziellen Evapotranspiration ETR_{wi} im Winterhalbjahr nach offiziellen Quellen (HAD 1998, DWD 1999). Die unbekannte winterliche Boden-/Grundwasserspeicherauffüllung ΔS errechnet sich für die gewählten Einzugsgebiete aus der Differenz zwischen berechneter Gesamtabflusshöhe ($P_{wi} - ETR_{wi}$) und der aus dem langjährig gemittelten gemessenen Abfluss MQ_{wi} resultierenden Abflusshöhe im Winterhalbjahr $R(MQ_{wi})$. ΔS liegt für beide ausgewerteten Gebiete – trotz sehr unterschiedlicher Gebietscharakteristika – innerhalb einer Spanne von 2 mm (Tab. 3.5).

Im Landesmaßstab existiert keine derartige Möglichkeit der Ableitung der Boden-/Grundwasserspeicheränderung aus gemessenen Winterabflüssen. Aufgrund der geringen Spanne mit einem flächengewogenen Mittel von 51 mm soll der in den Validierungsgebieten ermittelte Wert für ΔS als repräsentativ für das Land Brandenburg angesehen werden. Eine unterstellte bodenabhängige Differenzierung entsprechend der nutzbaren Feldkapazität und dem Flächenanteil der Bodentypen

führt zu den in Tabelle 3.6 aufgeführten Werten der Speicherauffüllung im Winterhalbjahr. Die so ermittelte mittlere Boden-/Grundwasserspeicheränderung wurde für jedes Rasterelement mit der potenziellen Ver-

dunstung im Winterhalbjahr zum Verlustglied der mittleren jährlichen Winterbilanz (Abb. 3.5) verknüpft, um damit eine Aufteilung in die mittleren halbjährlichen Gesamtabflusshöhen entsprechend Gl. 3.4 und 3.5 vornehmen zu können.

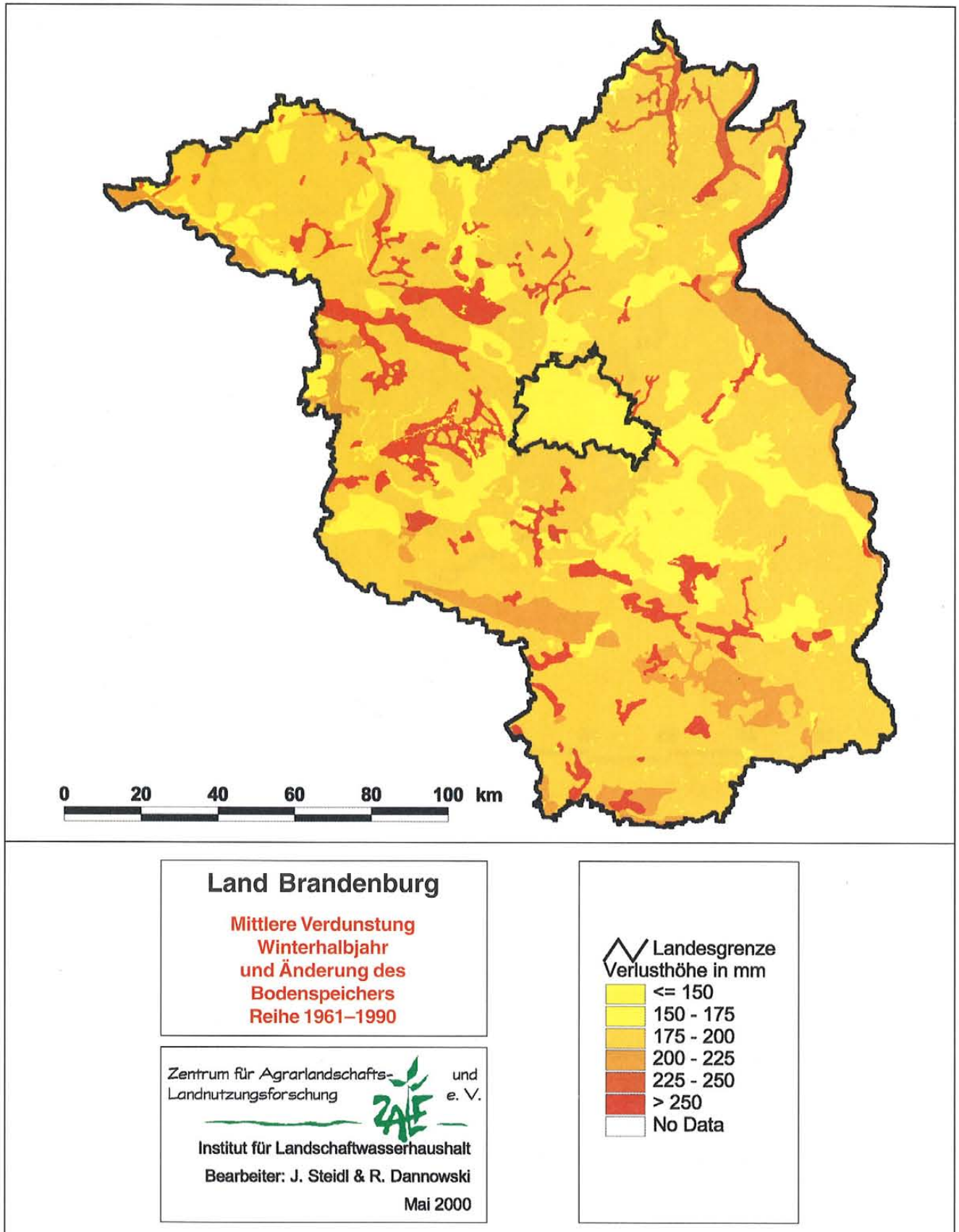
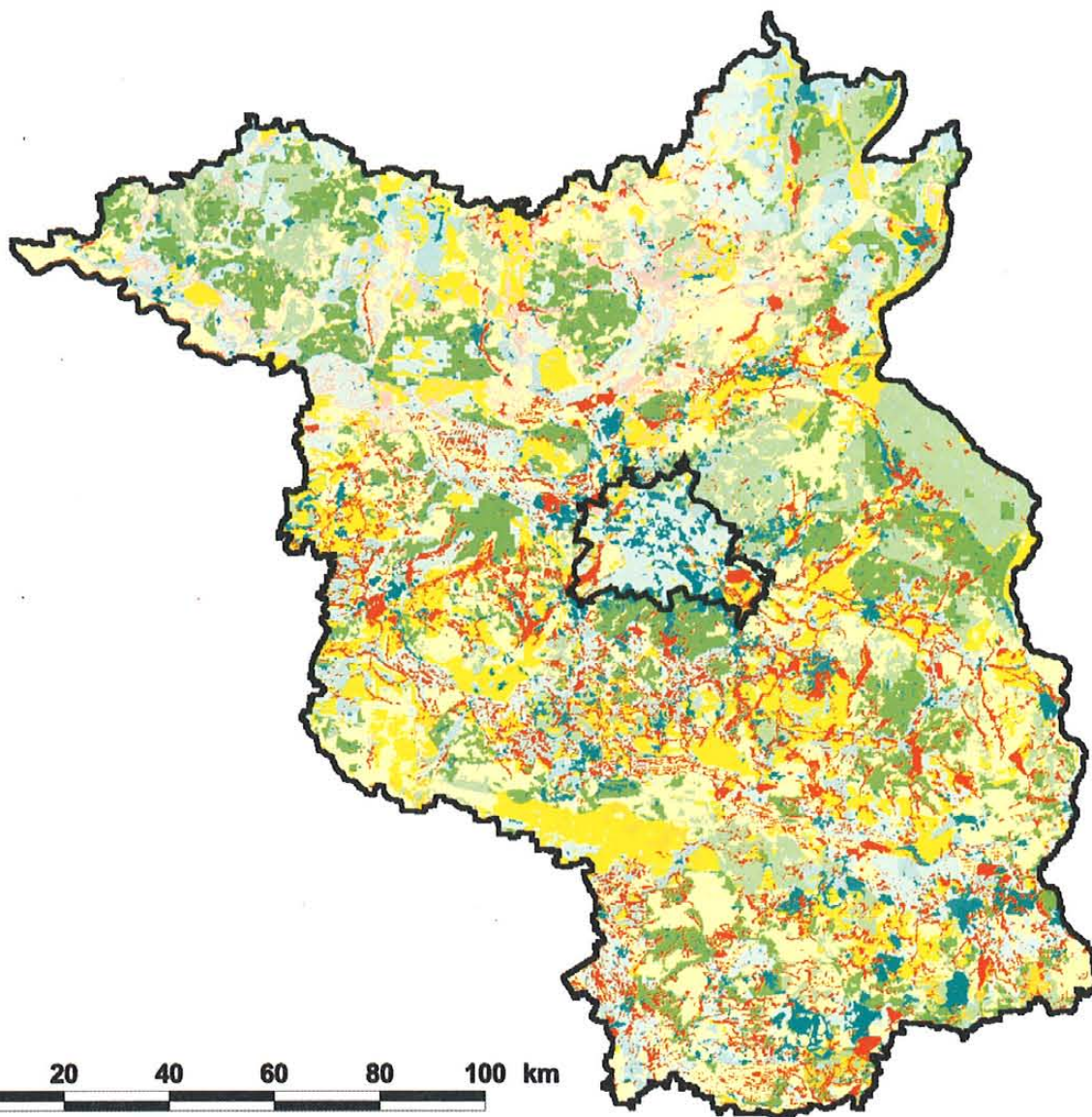


Abb. 3.5: Potenzielle Verdunstung und Boden-/Grundwasserspeicherauffüllung im Winterhalbjahr



0 20 40 60 80 100 km

Land Brandenburg

**Mittlere jährliche
Verdunstung
Reihe 1961–1990**

Berechnungsgrundlage: AMIBO

Zentrum für Agrarlandschafts- und
Landnutzungsforschung



Institut für Landschaftswasserhaushalt

Bearbeiter: J. Steidl & R. Dannowski

Mai 2000

Landesgrenze
Verdunstungshöhe in mm

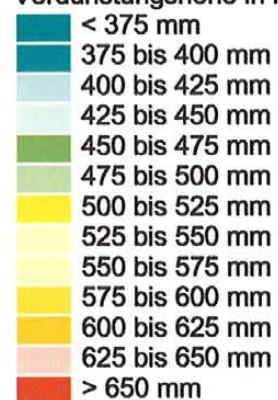


Abb. 3.6: Langjährig mittlere Verdunstung für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin

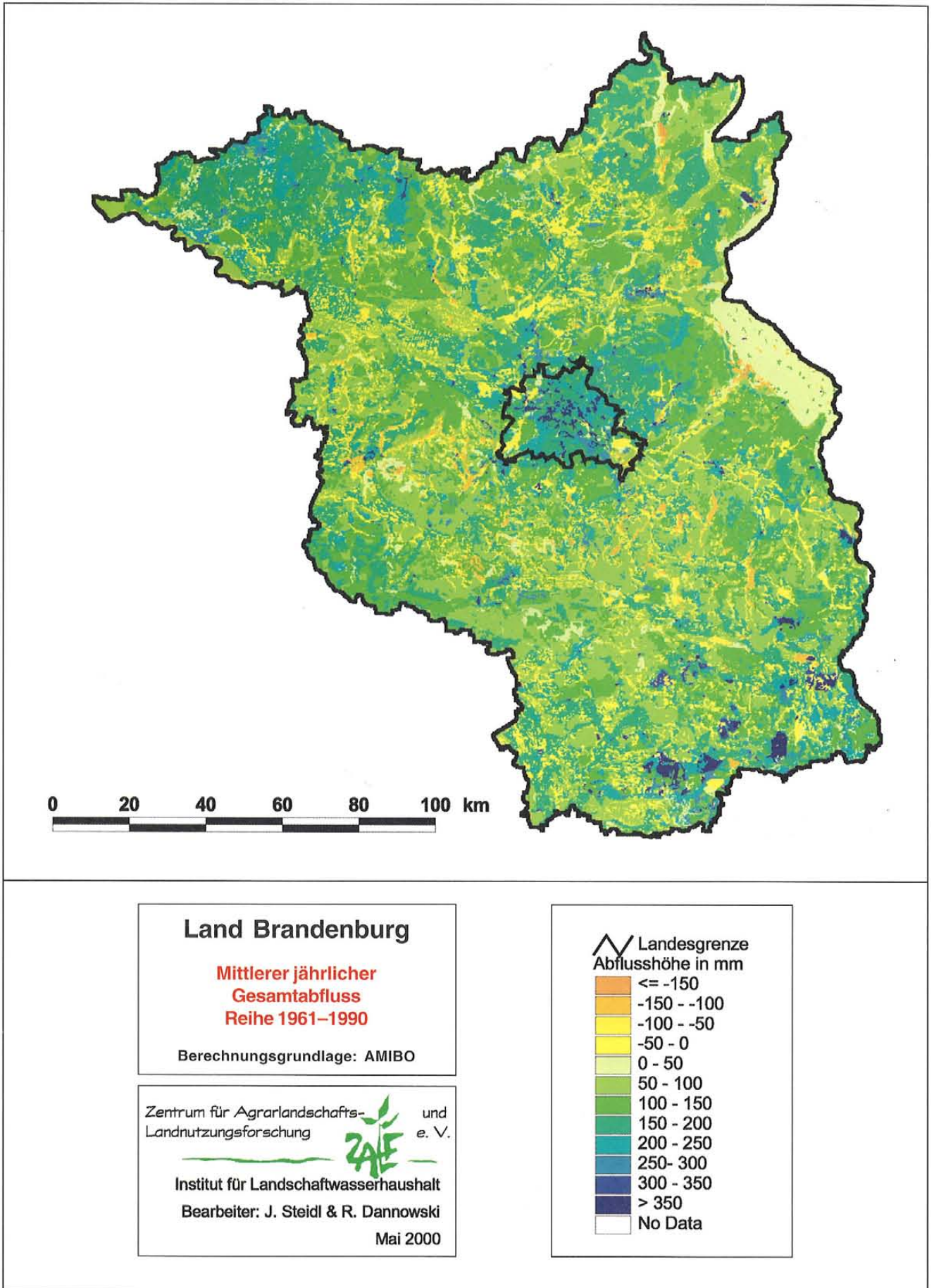


Abb. 3.7: Langjährig mittlerer Gesamtabfluss für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin

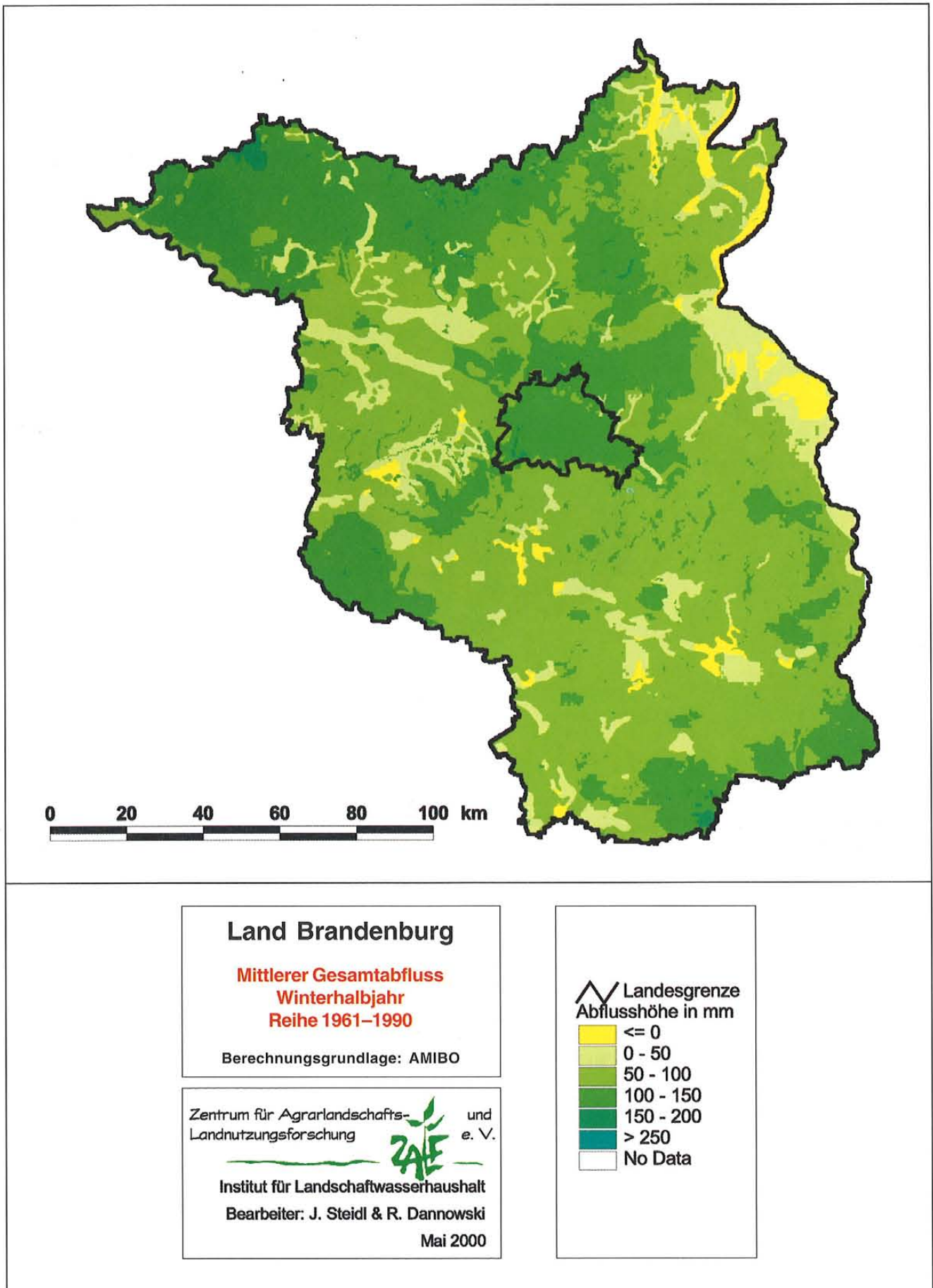


Abb. 3.8: Langjährig mittlerer Gesamtabfluss im Winterhalbjahr für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin

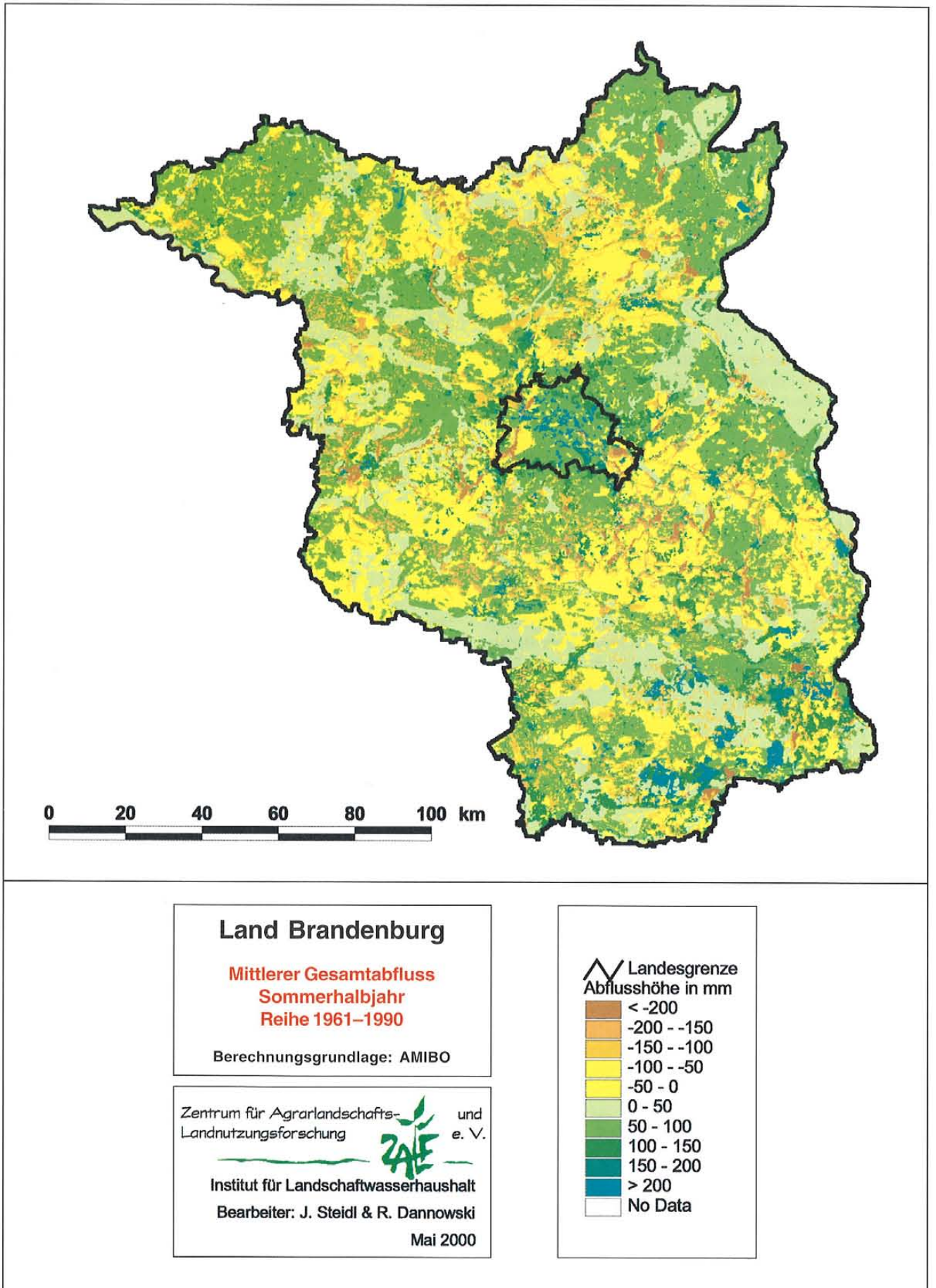


Abb. 3.9: Langjährig mittlerer Gesamtabfluss im Sommerhalbjahr für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin

3.2 Gesamtabfluss für das Land Brandenburg

Die Verteilung der mit ABIMO für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin errechneten Werte der mittleren jährlichen Verdunstungshöhe veranschaulicht Abbildung 3.6, in Abbildung 3.7 ist die nach Verrechnung mit dem langjährig mittleren Niederschlag (Abb. 2.3) resultierende Gesamtabflusshöhe dargestellt. Die Aufteilung der Jahreshöhe des Gesamtabflusses auf die Werte der Winter- und Sommerhalbjahre veranschaulichen die Kartendarstellungen in Abbildungen 3.8 und 3.9. In den Legenden wurde zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit dieselbe Farbskala verwendet wie in Abbildung 3.6.

Tabelle 3.7 zeigt die Komponenten der Abflussbildung in den 18 Planungsräumen und den beiden Bundesländern für das mittlere Jahr und die mittleren Halbjahre. Abbildung 3.10 stellt die Zusammenfassung der meteorologischen Inputgrößen und der errechneten Gesamtabflusshöhe, jeweils für das Jahr und die separierten Halbjahre, für die Gesamtregion Brandenburg/Berlin dar. Abbildung 3.11 veranschaulicht die Differenzierung des errechneten Gesamtabflusses nach den berücksichtigten Hauptnutzungsarten.

Das mit ABIMO errechnete Gebietsmittel der langjährig mittleren Gesamtabflusshöhe der Gesamtregion Brandenburg/Berlin beträgt 108 mm a^{-1} . Damit gelangen im langjährigen Mittel 17,5 % des Niederschlages zum Abfluss. Die mittlere jährliche Verdunstungshöhe wurde zu 507 mm a^{-1} errechnet.

In der Karte der langjährig mittleren Verdunstung (Abb. 3.6) treten einerseits die Gewässer mit jährlichen Verdunstungshöhen bis oberhalb 650 mm a^{-1} , andererseits die versiegelten Flächen urbaner Gebiete und die vegetationsarmen Flächen von Tagebauen und Truppenübungsplätzen mit Verdunstungshöhen bis unterhalb 375 mm a^{-1} hervor. Es wird deutlich, dass der Landesmittelwert von 507 mm a^{-1} für die Gesamtfläche nicht etwa einer dominanten Gebietsstruktur zuzuordnen ist, sondern sich aus einer großen Spanne von Verdunstungswerten einzelner Teilgebiete ergibt. Diese kleinräumigen Variationen sind von einer überregionalen Zunahme der Verdunstung von Norden nach Süden überlagert, die bereits in der Karte der potenziellen Evapotranspiration (Abb. 2.5) sichtbar wurde. Die naturräumliche Differenzierung spiegelt sich wesentlich gröber auch in den Planungsräumen (Tab. 3.7) wider.

Nicht in allen Fällen lassen sich aus den in Tabelle 3.7 ausgewiesenen langjährig gemittelten Werten des Gesamtabflusses für die Planungsräume Schlüsse auf die tatsächlichen mittleren Abflüsse der zugehörigen Gewässer ziehen. Besonders die Entwässerung der **Braunkohlentagebaue** der Lausitz wies im betrachteten Zeitraum 1961–1990 jährliche, den Gesamtabfluss dieser Gebiete bei weitem überschreitende Förderraten zwischen 650 und $1.250 \text{ Mio. m}^3 \text{ a}^{-1}$ auf, die den Abflüssen der Spree und der Schwarzen Elster zugute kamen (z.B. KADEN & SCHRAMM 1994). Entsprechend den für die Sohlentwässerung der Tagebaue erforderlichen Absenkezielen war damit ein Abbau statischer Grundwasservorräte verbunden. Dieser Phase einer regionalen und langfristigen Ausschöpfung des Boden-/Grundwasserspeichers folgen seit Beginn der 1990er Jahre ein drastischer Rückgang der Tagebauentwässerung und die zielgerichtete allmähliche Wiederauffüllung des entstandenen Absenkungstrichters, verbunden mit Einleitungen aus den Oberflächengewässern der Lausitz. Damit sind die gemessenen Abflüsse von Spree und Schwarzer Elster noch auf lange

Sicht anthropogen geprägt und nicht mit den ausgewiesenen potenziellen Abflusswerten vergleichbar.

In den Kartendarstellungen zur **Jahreshöhe** des Gesamtabflusses (Abb. 3.7), aber besonders zum Gesamtabfluss des Winterhalbjahres (Abb. 3.9), wird wieder die bekannte Ost-West-/Nordost-Südwest-Variation des Niederschlages (vgl. Abb. 2.3) deutlich, die auf den abnehmend maritimen Charakter des Klimas und das im Süden des Landes ansteigende Geländeniveau zurückzuführen ist. Zehr- bzw. Trockengebiete ($R \leq 0$) sind in Gelb- bis Brauntönen, Gebiete mit potenziellem Wasserdargebot ($R > 0$) in Grün- bis Blautönen dargestellt. Das Untere Havelland, das Rhin-/Havelland, die Mittlere Mark, das Ostbrandenburgische Heide- und Seengebiet – westlich, südlich und südöstlich Berlins gelegen –, besonders aber das Odertal mit dem Oderbruch, die von unter dem Durchschnitt liegender Niederschlagshöhe geprägt sind, treten in Abbildung 3.7 als Gebiete großflächig geringer Gesamtabflusshöhe ($R < 100 \text{ mm a}^{-1}$) hervor. Die Platten des jüngeren Weichselglazials heben sich infolge größerer Grundwasserflurabstände mit Gesamtabflusshöhen $R > 100 \text{ mm a}^{-1}$ von den sie durchschneidenden Talungen ab. In den grundwassernahen, meist von Niedermoorbildungen ausgefüllten Niederungen liegt der errechnete potenzielle Abfluss deutlich unter dem Mittelwert der Gesamtabflusshöhe.

Diese durch Fremdzufüsse gespeisten Zehrgebiete, die überdies (etwa im Spreewald) mit Wäldern bestanden sein können, weisen Jahressummen des Gesamtabflusses zwischen -150 und -100 mm a^{-1} auf. Durch noch stärker negative Jahreswasserbilanz zeichnen sich größere Wasserflächen aus. Andererseits zeigen insbesondere urbane Flächen aufgrund ihres hohen Versiegelungsgrades weit über dem Gebietsmittel (bis $> 300 \text{ mm a}^{-1}$) liegende Gesamtabflusshöhen. Dies wird auch an den gesondert ausgewiesenen Werten des Landes Berlin in Tabelle 3.7 deutlich. Mit sehr hohen errechneten – allerdings, wie oben ausgeführt, nicht immer abflusswirksamen – Gesamtabflusswerten treten weiterhin die Brachflächen der Tagebaue der Lausitz wie auch Truppenübungsplätze und Industriestandorte hervor.

Im Vergleich der unterschiedlichen Hauptnutzungsarten (Abb. 3.11) wird die Bedeutung vor allem landwirtschaftlicher Flächen für die Gesamtabflusshöhe und damit für die Grundwasserneubildung sowie das nutzbare Wasserdargebot des Landes deutlich. Nach Brachflächen, die mit Ausnahme der Tagebaue Gebiete ganz wesentlich zum Wasserdargebot beitragen, und urbanen Gebieten, deren Abfluss infolge der vorhandenen Kanalisation nur sehr eingeschränkt grundwasserwirksam wird (vgl. Kap. 3.1), besitzen landwirtschaftliche Flächen mit 127 mm a^{-1} die größte jährliche Gesamtabflusshöhe. Der Unterschied zu bewaldeten Flächen beträgt im langjährigen Mittel im Landesmaßstab etwa 70 mm a^{-1} . Zieht man darüber hinaus den hohen Flächenanteil (54,7 %) der landwirtschaftlichen Nutzung in Betracht, so sind von den rund 3,3 Mrd. $\text{m}^3 \text{ a}^{-1}$ potenziellen Wasserdargebots in der Gesamtregion Brandenburg/Berlin ca. 2,1 Mrd. $\text{m}^3 \text{ a}^{-1}$ (64,5 %) landwirtschaftlich genutzten Flächen zuzuordnen.

Die Höhe des Gesamtabflusses im Winterhalbjahr (Abb. 3.8) übersteigt nur kleinräumig im äußersten Nordwesten und im Süden des Landes 150 mm . Die Werte sind aufgrund der

Tab. 3.7: Komponenten der Abflussbildung nach Planungsräumen (Reihe 1961–1990)

Nr.	Bezeichnung	Fläche km ²	Jahr			Winterhalbjahr			Sommerhalbjahr			ΔS mm
			P mm	ET mm	R mm	P mm	ET mm	R mm	P mm	ET mm	R mm	
1	Ucker	1.197	592,3	481,1	111,3	256,7	135,1	64,5	335,7	346,0	46,7	57,0
2	Untere Spree 2	1.185	637,9	501,2	136,7	288,9	141,6	101,0	349,0	359,6	35,7	46,4
3	Untere Spree 1	1.613	613,6	514,1	99,5	270,5	144,6	81,0	343,1	369,5	18,5	44,9
4	Untere Oder	1.276	590,8	490,1	100,7	252,8	137,6	55,9	337,9	352,5	44,8	59,4
5	Plane-Buckau	1.219	626,9	515,0	112,0	294,5	143,7	101,4	332,5	371,3	10,6	49,4
6	Neiße	590	653,3	530,2	123,2	291,5	147,1	101,7	361,9	383,1	21,5	42,7
7	Finowkanal	720	629,7	520,2	109,4	281,2	139,4	96,0	348,5	380,8	13,5	45,8
8	Stepenitz	1.924	647,6	499,2	148,5	302,0	135,3	116,7	345,6	363,8	31,8	50,0
9	Schwarze Elster	2.859	635,6	519,6	116,0	281,2	148,1	83,0	354,4	371,5	33,0	50,1
10	Mittlere Spree	2.389	619,4	502,9	116,5	269,5	147,8	70,8	349,9	355,1	45,7	50,9
11	Rhin	1.782	608,9	516,4	92,5	281,8	137,7	86,6	327,1	378,7	5,9	57,5
12	Dosse-Jäglitz	1.469	618,3	493,0	125,4	291,3	136,3	103,4	327,1	356,6	22,0	51,6
13	Untere Havel	2.732	593,4	512,7	80,7	271,4	142,1	73,2	321,9	370,5	7,5	56,1
14	Nuthe	1.911	594,0	500,7	93,3	268,8	144,9	71,9	325,2	355,9	21,4	52,0
15	Dahme	2.112	605,3	520,8	84,5	268,9	144,4	82,0	336,5	376,4	2,5	42,4
16	Obere Havel	2.542	630,5	524,1	106,4	284,7	137,2	102,2	345,8	386,9	4,2	45,3
17	Alte Oder/Oderbruch	1.458	562,4	499,0	63,3	238,2	141,5	35,1	324,2	357,5	28,3	61,6
18	Obere Oder	686	620,0	521,5	98,5	273,9	143,8	80,4	346,0	377,7	18,1	49,7
19	Berlin	892	632,5	449,0	183,5	288,4	141,8	123,9	326,7	307,2	59,6	22,7
	Brandenburg	29.662	614,6	509,2	105,3	275,9	141,8	83,1	339,2	367,4	22,2	50,9
	Brandenburg + Berlin	30.554	615,1	507,5	107,6	276,2	141,8	83,1	338,9	365,7	23,3	50,1

gleichmäßigeren Verteilung von Niederschlag und Verdunstung (überwiegend Vegetationsruhe) gegenüber dem Sommerhalbjahr wenig differenziert. Bodenunterschiede werden infolge differenzierter Auffüllungsbeträge des Boden-/Grundwasserspeichers ΔS sichtbar. Auch im Winterhalbjahr zeigen sich entsprechend den zur Halbjahresseparation getroffenen Modellannahmen (Kap. 3.1.4) Gebiete mit negativem Gesamtabfluss, in denen der Wasserbedarf für Verdunstung und Auffüllung des Boden-/Grundwasserspeichers das Niederschlagsdargebot übersteigt. Hierbei handelt es sich vor allem um grundwassernahe Niederungsstandorte mit hohem ΔS (Niedermoore) und fremdwassergespeiste Niederungsgebiete mit geringem Niederschlag im (Nord-) Osten Brandenburgs.

Der Anteil dieser Gebiete an den landwirtschaftlich genutzten Böden wie auch deren z.B. gegenüber den Waldstandorten insgesamt höhere Wasserspeicherfähigkeit (begleitet von höherem Auffüllungsbedarf im Winter) bewirken die aus Abbildung 3.11 ersichtliche geringe, die Werte aller anderen unterschreitende Winterabflusshöhe der Landnutzungsart „Landwirtschaft“. Gewässer sind in der Auswertung zum Gesamtabfluss im Winterhalbjahr nur mit ihrer klimatischen Wasserbilanz (P – ETP) berücksichtigt. Für abflusslose Seen entspricht dies der Speicherauffüllung; die Speicherauffüllung durchflossener Seen kann auf der gewählten Maßstabsebene nicht ausreichend quantifiziert werden. Die Versiegelung urbaner Flächen wird infolge der insgesamt geringen, der potenziellen gleichgesetzten Verdunstung nicht verdunstungsmindernd wirksam, sodass sich urbane Gebiete in der Darstellung zum Winterhalbjahr nicht abheben.

Abbildung 3.9 verdeutlicht anhand der Gesamtabflusshöhe des Sommerhalbjahres die große Ausdehnung sommerlicher Zehr- und Trockengebiete im Land Brandenburg und lässt ihre Bedeutung für den regionalen Wasserhaushalt ermesen. Zwar ist im Landesdurchschnitt die sommerliche Gesamtabflusshöhe

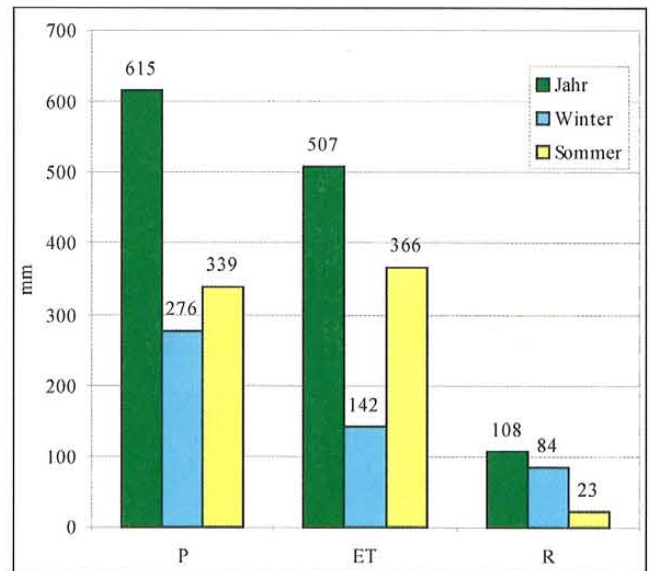


Abb. 3.10: Größen der Wasserbilanz für die Gesamtregion Brandenburg/Berlin

mit 22 bzw. 23 mm (Tab. 3.7) noch geringfügig positiv, doch sind - vor allem in den bereits zu Karte 3.7 genannten niederschlagsärmeren Gebieten – großflächige zusammenhängende Areale mit negativer Gesamtabflusshöhe zu erkennen. Besonders fallen hier wieder die Wasserflächen und die mit Grundwasser versorgten Niederungsflächen auf. Die sommerliche Gesamtabflusshöhe der landwirtschaftlich genutzten Flächen Brandenburgs liegt im langjährigen Mittel noch bei etwa 50 mm. Nur urbane Flächen und Brachland, insbesondere die Tagebauflächen, in denen die Verdunstung auch im Sommerhalbjahr stark eingeschränkt ist, weisen sommerliche Abflusshöhen von 150 mm und mehr auf (vgl. Abb. 3.11).

3.3 Vergleich mit früheren Ergebnissen

Der mit ABIMO neu errechnete Mittelwert der langjährig mittleren Gesamtabflusshöhe für das Land Brandenburg ist mit 105 mm a^{-1} um 25 mm a^{-1} geringer als der 1993 (DANNOWSKI & FRITSCH 1993, DANNOWSKI ET AL. 1994) durch Auswertung der Deckfolien des Gesamtabflusses ermittelte. Vergleichbare Abweichungen im Bereich von 20 bis 30 mm a^{-1} ergeben sich auch für die Validierungsgebiete (Tab. 3.8). In Abbildung 3.12 ist die 1993 erarbeitete Darstellung des Gesamtabflusses (Modell RASTER) für das Land Brandenburg wiedergegeben. Abbildung 3.13 zeigt die Differenz $R_{\text{RASTER}} - R_{\text{ABIMO}}$ der modellierten Werte des Gesamtabflusses in der Auflösung der Deckfolien von $2,5 \text{ km} \times 2,5 \text{ km}$. Dazu wurden die Werte der aktuellen Gesamtabflussberechnung zum größeren Raster aggregiert.

Der überwiegende Teil der Landesfläche weist Abweichungen im Bereich des -0,5- bis +0,5-fachen der Standardabweichung (92 mm a^{-1}) auf (Abb. 3.13). Betrachtet man die örtliche Verteilung der Differenz, so zeigen sich zwei Gruppen von Standorten mit extremen Abweichungen:

- (1) Grundwassernahe Feuchtgebiete und vegetationsarme Flächen mit negativer Differenz (blaue Rasterelemente). Für sie wird mit ABIMO ein größerer Gesamtabfluss gegenüber RASTER berechnet.

- (2) Freie Wasserflächen, an denen sich die umgekehrte Tendenz zeigt (rote Rasterelemente).

Letztere, insbesondere aber die Häufung positiver Abweichungen südlich Berlins, weisen auf Unterschiede der Verteilung der potentiellen Evapotranspiration der alten Auswertung (KORTÜM 1965) und der jetzigen (Gras-Referenzverdunstung, DWD 1999) hin. In diesen Unterschieden, die methodisch bedingt sind, wird auch die Hauptursache für die Verschiebung des Landesmittels der Gesamtabflusshöhe gesehen. Die Differenzen zwischen den Niederschlagshöhen der Jahresreihen 1951–1980 (617 mm a^{-1}) und 1961–1990 (615 mm a^{-1}) im Mittel der Landesfläche dagegen sind vernachlässigbar – was allerdings für die örtliche Niederschlagsverteilung ebenfalls nicht zutreffen muss. Auch methodische Veränderungen des Glugla/Bagrov-Ansatzes von der Realisierung als Modell RASTER (GLUGLA ET AL. 1976) zur Realisierung als Modell ABIMO (GLUGLA & FÜRTIG 1997) fallen nach stichprobenartigen Vergleichen kaum ins Gewicht. Als besondere Ursache für die Veränderung der errechneten Gesamtabflusshöhe der Niedermoorgebiete kommt noch eine Vergrößerung des berücksichtigten mittleren Grundwasserflurabstandes von den 1970er Jahren bis heute in Betracht. Diese müsste aber vor allem zu einer Verringerung der Verdunstung und damit zu einer Erhöhung des Gesamtabflusses geführt haben.

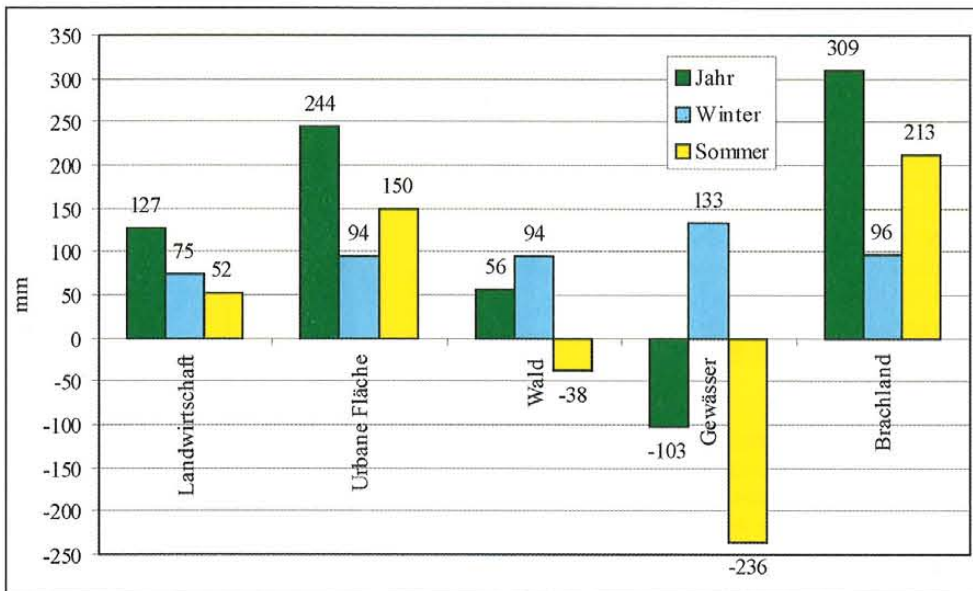


Abb. 3.11: Gesamtabfluss für die Hauptnutzungsarten der Gesamtregion Brandenburg/Berlin

Gebiet	R_{RASTER}	R_{ABIMO}	$R_{\text{RASTER}} - R_{\text{ABIMO}}$
	mm a^{-1}	mm a^{-1}	$\frac{R_{\text{RASTER}} - R_{\text{ABIMO}}}{R_{\text{RASTER}}}$ %
Pegel Pasewalk	138	114	17
Pegel Dahme-Stadt	123	103	16
Pegel Prierow 2	111	96	13
Pegel Märkisch Buchholz	113	84	26
Land Brandenburg (ohne Berlin)	130	105	19

Tab. 3.8: Vergleich der mit RASTER und ABIMO berechneten Werte der Gesamtabflusshöhe

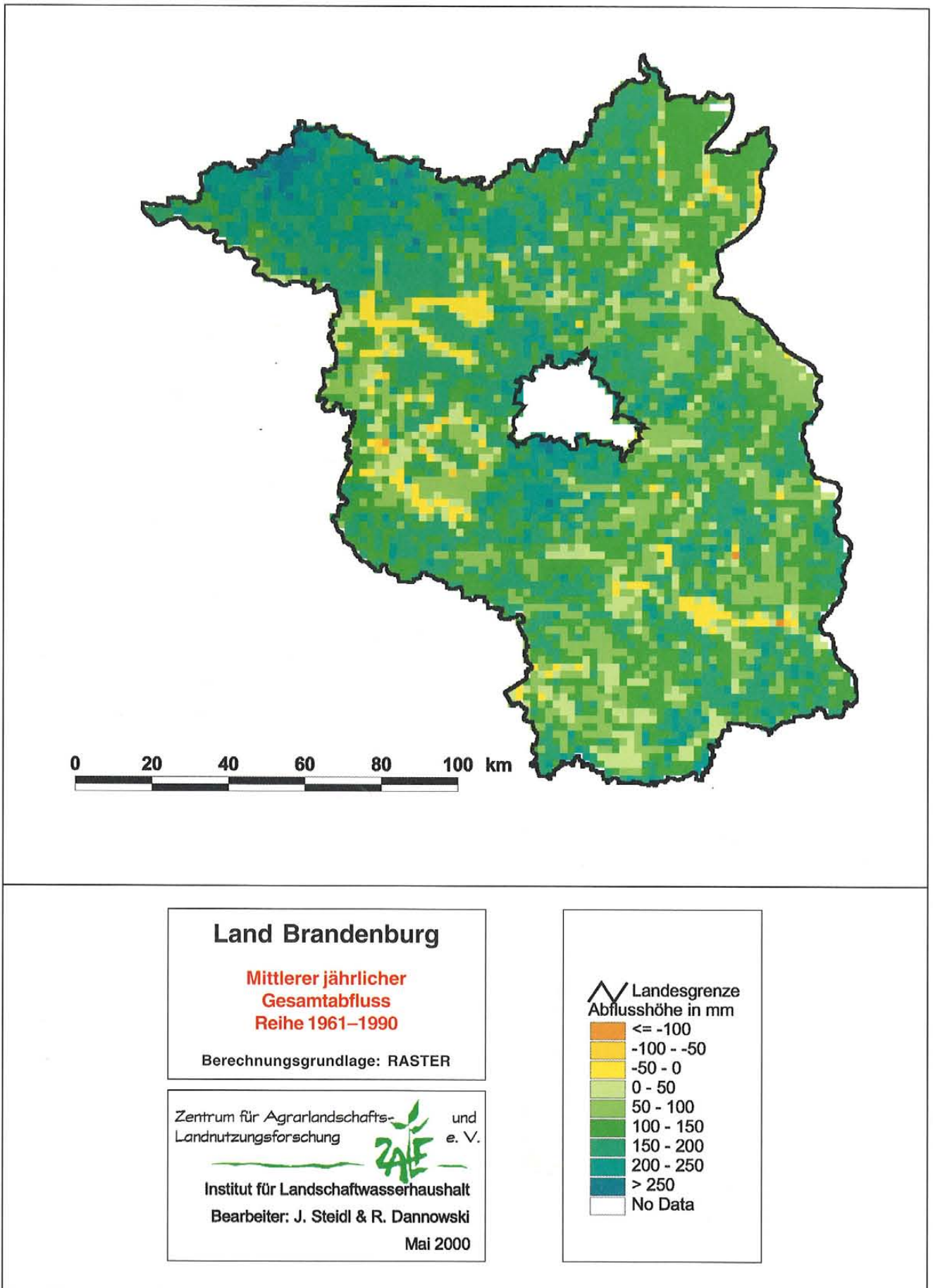
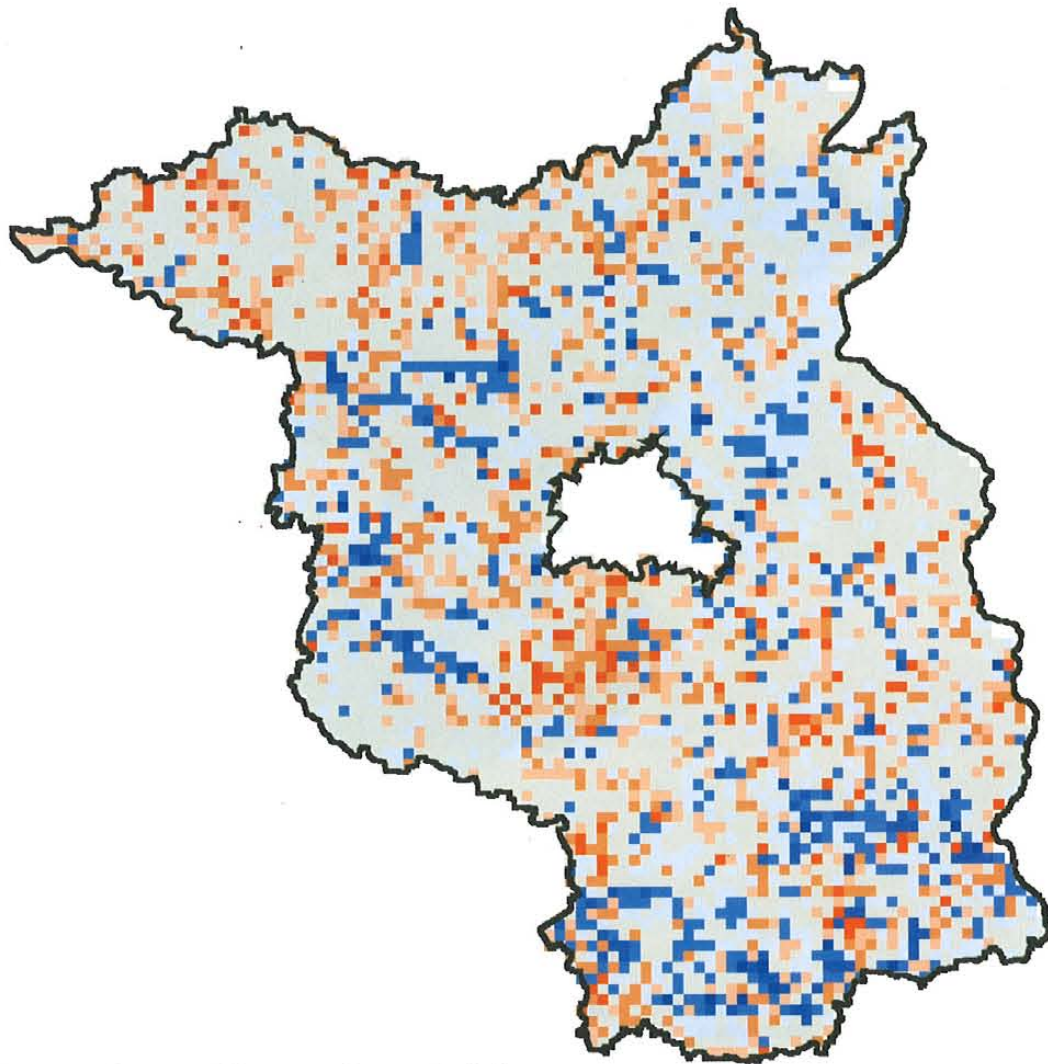


Abb. 3.12: Mit RASTER berechneter mittlerer Gesamtabfluss der Reihe 1951–1980 für das Land Brandenburg (DANNOWSKI & FRITSCHE 1993)



0 20 40 60 80 100 km

Land Brandenburg

Differenz des mittleren
jährlichen Gesamtab-
flusses nach
RASTER und ABIMO

Zentrum für Agrarlandschafts- und
Landnutzungsforschung  e. V.

Institut für Landschaftswasserhaushalt

Bearbeiter: J. Steidl & R. Dannowski

Mai 2000

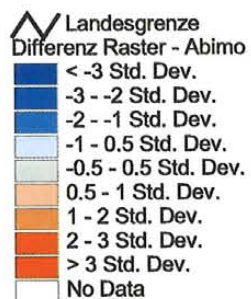


Abb. 3.13: Differenz RASTER – RABIMO der Gesamtabflusswerte nach RASTER (DANNOWSKI & FRITSCH 1993) und ABIMO (vorliegende Studie)

4 Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen mit dem Modellierungssystem ARC/EGMO

4.1 Einleitung

Die Beiträge des PIK zur Konzeption Landschaftswasserhaushalt fallen vorwiegend in den Themenschwerpunkt Einzugsgebiet und Niederung, wo ganze Naturräume in chorischer Dimension betrachtet werden. Hier geht es um großräumige Wasserbilanzen, naturräumliche Besonderheiten für den Landschaftswasserhaushalt, die Betrachtung von gesamten Einzugsgebieten und Niederungen, die großräumige Landschaftsnutzung und deren Auswirkungen auf den Landschaftswasserhaushalt, Fragen der Grundwasserneubildung, Erosionsgefährdung usw. Im Vordergrund stehen Empfehlungen an die Landespolitik zur Landnutzung, Wasserbewirtschaftung und Landschaftsplanung, wobei insbesondere folgende Fragen beantwortet werden sollen:

- Welche Flächen haben größte Bedeutung für Grundwasserneubildung und -zehrung?
- Welche Rolle spielt das Verhältnis Wald – Offenlandschaft – Versiegelung in Hinsicht auf die Grundwasserneubildung?
- Wo sind die größten Gefährdungspotenziale für die Funktionstüchtigkeit des Landschaftswasserhaushaltes (naturraumunangepasste Landnutzung, Grundwasserabsenkung, Versiegelung etc.)?
- Welche Rolle spielt die Niederschlagsverteilung in Brandenburg?
- Wodurch ist das Abflussgeschehen in Brandenburg beeinträchtigt, wo im Land sind Schwerpunkte (Böden, Nutzung usw.)?

Neben Tabellen zu den naturräumlichen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes (z.B. Flächengrößen von Einzugsgebieten bzw. Teileinzugsgebieten) sollten als Endergebnis Landesübersichtskarten zu den Größen Niederschlag, potenzielle Verdunstung, reale Verdunstung, Sickerwasserbildung (die zur Grundwasserneubildung führen kann) und Gesamtabflusshöhe erstellt werden.

In Kapitel 4.2 soll zunächst das für die Durchführung der Wasserhaushaltsrechnungen eingesetzte Modellierungssystem ARC/EGMO kurz vorgestellt werden. Kapitel 4.3 gibt einen Überblick über die bei der flächendeckenden hydrologischen Modellierung angewandten Methoden der räumlichen Disaggregation (Bildung sog. „Elementarflächen“) und Aggregation (Bildung von „Hydrotopen“ und „Hydrotopklassen“). Kapitel 4.4 beschreibt die Kalibrierung und Validierung des verwendeten hydrologischen Modells in ausgewählten, für das Land Brandenburg repräsentativen Teileinzugsgebieten. Kapitel 4.5 schließlich beschreibt die im Untersuchungsraum Brandenburg/Berlin erzielten Ergebnisse der physikalisch basierten, GIS-gestützten hydrologischen Modellierung, deren Ziel in einer flächendeckenden Beschreibung besonders interessierender meteorologischer Eingangsgrößen und berechneter Wasserhaushaltsgrößen auf der Basis von Elementarflächen und daraus aggregierten räumlichen Einheiten bestand.

4.2 Das hydrologische Modellierungssystem ARC/EGMO

Die flächendeckende, zeitlich und räumlich hoch aufgelöste hydrologische Modellierung einer Landflächeneinheit von der Größe Brandenburgs erfordert eine der zeitlichen und räumlichen Skala angemessene Herangehensweise, bei der die Zusammenfassung detaillierter räumlicher Informationen im Rahmen der Datenaufbereitung (siehe Kap. 2) und der Simulationsrechnungen eine besondere Rolle spielt. 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 (wegen der Verwendung allgemein verfügbarer Karten) physikalisch interpretierbar sind. Zwar gibt es eine Reihe von Modellen, die eine physikalisch begründete (meist rasterbezogene), flächendetaillierte und dynamische Modellierung erlauben, wie SHE (ABBOTT ET AL. 1986), IHDM (IH 1987) oder TOPMODEL (BEVEN & KIRKBY 1979), doch sind diese Modelle auch wegen der hohen Datenanforderungen z. T. eher für kleinskalige Anwendungen geeignet. Für die hier durchgeführten Forschungsarbeiten werden dagegen Modellansätze benötigt, die konzeptioneller Art sind und bei verträglichem Zeitaufwand eine Modellierung meso- bis makroskaliger Gebiete ermöglichen. Zu den wenigen, derzeit verfügbaren hydrologischen Modellen, die diesen Ansprüchen genügen, zählen in Europa u.a. das HBV-Modell (BERGSTRÖM 1972) sowie ARC/EGMO (BECKER 1975, BECKER & PFÜTZNER 1986, BECKER & PFÜTZNER 1987, PFÜTZNER ET AL. 1997).

Für die hier durchgeführten Arbeiten wurde das hydrologische Modellierungssystem ARC/EGMO eingesetzt, das sich für solche Studien insbesondere aufgrund seiner Anbindung an das Geographische Informationssystem (GIS) ARC/INFO eignet. Das Modell ermöglicht für hydrologische Einzugsgebiete sowie beliebig geformte Landschaftseinheiten (z.B. administrative Einheiten) die Modellierung aller maßgeblichen Prozesse des Landschaftswasserhaushaltes. 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 (wie z.B. Landnutzungsänderungen) problemorientierter bearbeitet werden können.

Das Modell ist so konzipiert, dass mit allgemein verfügbaren digitalen Karten gearbeitet werden kann und die erforderlichen Modellparameter direkt aus diesen Karten abgeleitet werden. Dieser Ansatz verringert die „Freiheitsgrade“ bei der Modellanpassung erheblich, weshalb von einem „physikalisch-basierten“ Modellansatz gesprochen werden kann. Gleichzeitig bietet dieser Ansatz die Gewähr dafür, das Modell relativ problemlos auf andere, bislang unbeobachtete Gebiete zu übertragen. Die Zeitschrittweite des Modells kann den verfügba-

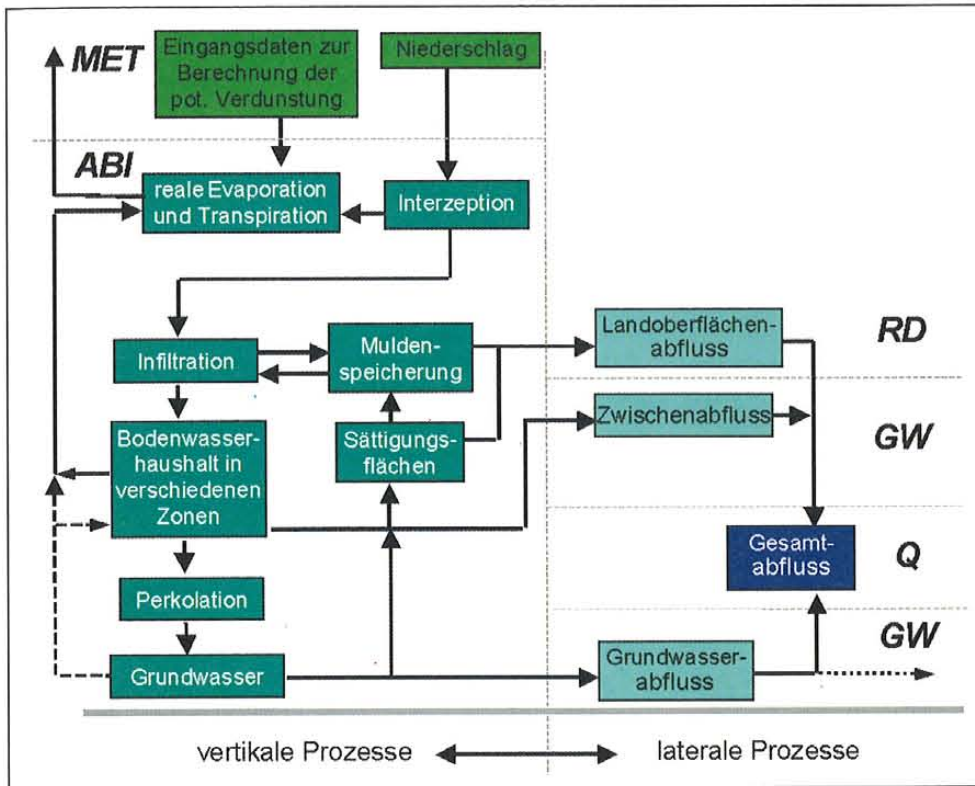


Abb. 4.1: Schematische Darstellung des für die Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen eingesetzten hydrologischen Modellierungssystems ARC/EGMO mit dem darin umgesetzten Mehr-Ebenen-Modellkonzept

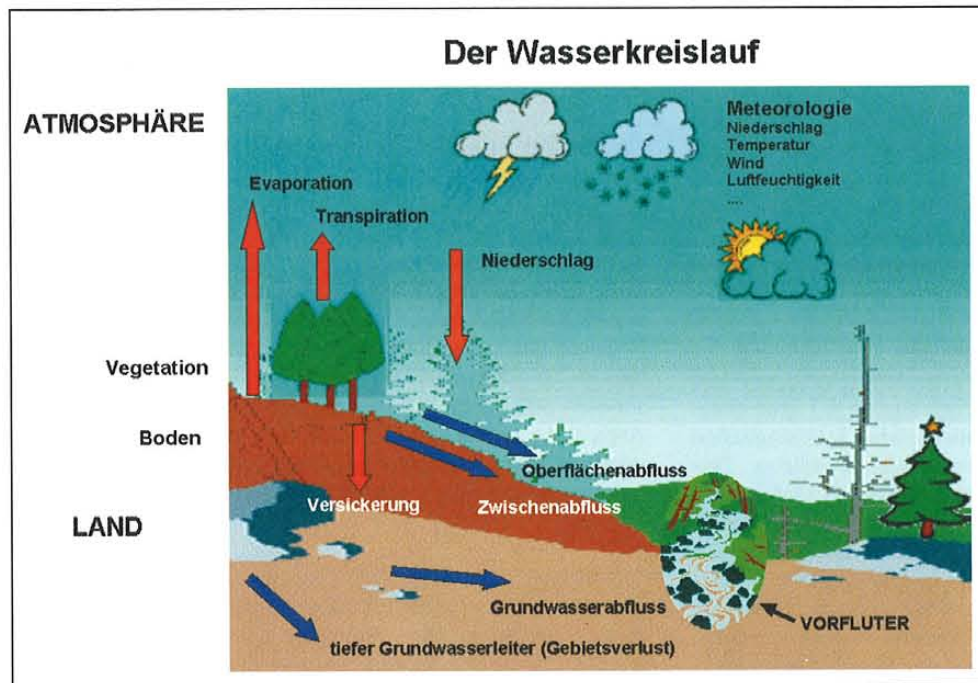


Abb. 4.2: Schematische Darstellung hydrologischer Prozesse an der Schnittstelle Atmosphäre-Landoberfläche, die bei der großskaligen Modellierung berücksichtigt werden müssen

Bei der Strukturierung des Modells wird konsequent zwischen Vertikalprozessen und lateralen Flüssen unterschieden, die in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt sind. Dieses Konzept

wurde in ARC/EGMO zu einem Mehr-Ebenen-Modellkonzept erweitert, in welchem die Modellierung auf folgenden Ebenen erfolgt (vgl. Abb. 4.1).

ren hydrometeorologischen Daten angepasst werden und liegt für die üblicherweise untersuchten Gebietsgrößen bei einem Tag. Die Möglichkeit der zeitlichen Aggregation aller Ergebnisgrößen zu Monats-, Jahres-, Sommer- oder Winter-summen sowie zu mittleren Jahreswerten erlaubt einen einfachen Vergleich mit zeitlich weniger hoch aufgelösten Ergebnissen anderer Modelle.

Abbildung 4.1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Prozessmodule (Teilmodelle) und die Unterscheidung verschiedener Prozessebenen.

Bei den zur Teilprozessbeschreibung einsetzbaren Modulen handelt es sich um physikalisch begründete, konzeptionelle Modellansätze, mit deren Hilfe aus vorgegebenen Systeminputs (meteorologische Größen) und vorgegebenen Systemeigenschaften (z.B. Boden- und Vegetationskennwerte) bzw. Systemzuständen (wie Speicherfüllungen) alle den Gesamtwasserhaushalt einer Landschaft bzw. eines Flussgebietes bestimmenden Zustandsveränderungen und die resultierenden Systemausgänge ermittelt werden können.

Grundsätzlich erlaubt der modulare Aufbau die Nutzung unterschiedlich detaillierter und strukturierter Teilprozessmodelle.

MET: Ermittlung der meteorologischen Modelleingangsgrößen und Übertragung derselben auf die bei den Bodenwasserhaushalts-, Verdunstungs- und Abflussbildungsberechnungen zu berücksichtigenden Flächen. Zur Berechnung der potenziellen Verdunstung können derzeit Ansätze von HAUDE (1958), TURC/IVANOV (TURC 1961) oder PENMAN verwendet werden. Die Niederschlagskorrektur erfolgt über einen temperaturabhängigen Ansatz, die Flächenübertragung der meteorologischen Eingangsgrößen für jeden Zeitschritt (i.d.R. Tag) nach einem „erweiterten Quadrantenverfahren“. Die Berücksichtigung von Schneeniederschlag erfolgt über das Temperatur-Grad-Verfahren.

ABI: Beschreibung der Verdunstung und Abflussbildung (Vertikalprozesse). Zur Berechnung der realen Evapotranspiration wird ein feuchteabhängiger Reduktionsansatz analog Priestley-Taylor verwendet, für die Interzeption ein vegetationsabhängiger linearer Speicheransatz. Die Berechnung der Infiltration erfolgt nach HOLTAN (1961), die der Muldenspeicherung nach einem Speicheransatz. Für die Sättigungsflächenbildung wird eine feuchteabhängige Variation dieser Flächen durchgeführt (BECKER & PFÜTZNER 1986). Die Bodensickerwasserbildung wird unter Verwendung einfacher Speicheransätze berechnet.

RD: Beschreibung der Abflusskonzentration (laterale Abflussprozesse) auf der Landoberfläche. Direkt eingesetzt werden können der kinematische Wellenansatz sowie Speicher- und Translationsansätze.

GW: Beschreibung unterirdischer Abflussprozesse. Je nach Datenverfügbarkeit können Ansätze unterschiedlicher Komplexität verwendet werden (einfachster Ansatz: Einzellinearspeicher).

Q: Beschreibung der Abflusskonzentration im Gewässernetz. Einfachster Ansatz: Einheitsganglinienverfahren (Unit Hydrograph) mit Speicherkaskaden und Verfahren nach KALININ-MILJUKOV.

Durch die GIS-Kopplung wird eine direkte Nutzung von GIS-Daten (z.B. digitale Höhenmodelle, Landnutzung, Vegetation, Bodeneigenschaften, Grundwasserflurabstände, Flusssystemstrukturen etc.) bei der Modellierung und die direkte Bestimmung wichtiger Modellparameter ermöglicht. Weitere Eigenschaften des Systems sind eine variable Untergliederung (Disaggregation) des Einzugsgebietes in beliebige Flächeneinheiten zur Abbildung unterschiedlicher Landnutzungs-, Vegetations- und Bodentypen sowie statistische Ansätze zur Berücksichtigung flächeninterner Heterogenitäten innerhalb aggregierter Flächeneinheiten. Eine ausführlichere Beschreibung des Modellierungssystems und seiner skalenübergreifenden Anwendungsmöglichkeiten ist in PFÜTZNER ET AL. (1997, 1998) enthalten. Zusätzliche Informationen sind außerdem unter der Internetadresse des PIK (www.pik-potsdam.de; Projekt RAGTIME) verfügbar.

Das Modell wurde u.a. im Rahmen des DFG-Projektes „Regionalisierung in der Hydrologie“ (LAHMER ET. AL. 1999A, BECKER & LAHMER 1999) und des BMBF-Projektes „Auswirkungen der Landnutzung auf den Wasser- und Stoffhaushalt der Elbe und ihres Einzugsgebietes“ sowie dessen Teilprojekt „Wasser- und Stoffrückhalt im Tiefland des Elbeeinzugsgebietes“ (WaStor) (BORK 1997) in mehreren Teileinzugs-

gebieten der Elbe angewendet (LAHMER 1998A, LAHMER & BECKER 1998B/C). Wegen seiner hohen zeitlichen Auflösung und den Möglichkeiten, Managementoptionen bei der Modellierung angemessen zu berücksichtigen, wird es auch wesentliches Hilfsmittel bei den im Rahmen des erst kürzlich begonnenen Projektes GLOWA-Elbe des BMBF geplanten Untersuchungen sein.

4.3 Räumliche Disaggregation und Aggregation

4.3.1 Disaggregation zu Elementarflächen

Durch die GIS-Verschneidung der Landnutzungs-, Boden- und Grundwasserflurabstandskarte mit der Karte der Teileinzugsgebiete/Planungsräume entstand die sog. „Elementarflächenkarte“, die im vorliegenden Fall insgesamt 57.836 Elementarflächen (EFL) enthält. Alle Flächen mit einer Größe von weniger als 50.000 m² (bei der Verschneidung entstandene sog. „Splitter-Polygone“) wurden im Rahmen der Datenaufbereitung aus der EFL-Karte eliminiert (d.h. benachbarten Elementarflächen zugeordnet). Wegen ihrer spezifischen hydrologischen Eigenschaften wurden lediglich Elementarflächen der Nutzungsklassen „offene“ und „geschlossene Bebauung“ (hohe Direktabflusskomponente) sowie „offene Wasserflächen“ (hohe Verdunstung) von dieser Datenreduktion ausgeschlossen.

Abbildung 4.3 demonstriert die Komplexität der für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin generierten Elementarflächenkarte. Die mittlere Größe der Elementarflächen beträgt etwa 0,53 km², es treten jedoch auch erheblich größere Elementarflächen auf. Dies unterstreicht einen Vorteil des Polygonansatzes bei der Unterteilung (Disaggregation) des Untersuchungsgebietes, der in Gebieten mit homogenen Eigenschaften zu großen Elementarflächen führt, in Gebieten hoher Heterogenität dagegen zu erheblich kleineren. So findet man relativ große Einheiten überall dort, wo die Topographie wenig ausgeprägt (eben) ist, großflächig einheitliche Grundwasserflurabstände vorherrschen, die Landnutzung homogen ist und ein bestimmter Bodentyp großräumig vorherrscht. Der ebenfalls dargestellte Ausschnitt von ca. 48 x 36 km² Größe verdeutlicht die Existenz von in Form und Größe sehr unterschiedlichen Elementarflächen.

4.3.2 Aggregation zu Hydrotopen und Hydrotopklassen

Wasserhaushaltsberechnungen auf Elementarflächen-Basis stellen die im Rahmen des Modellierungsansatzes genaueste Approximation an die Realität dar, da diese Flächenuntergliederung der tatsächlich vorhandenen Flächendifferenzierung des Untersuchungsgebietes am besten entspricht. Insbesondere für meso- bis makroskalige Untersuchungen sind jedoch häufig räumliche Aggregationen erforderlich, um die Anzahl der zu modellierenden Flächeneinheiten - und damit auch die Rechenzeiten - zu reduzieren, oder weil die zu lösenden Probleme ohnehin aggregierte Aussagen notwendig machen.

Bei der in der Vergangenheit bereits mehrfach erfolgreich angewendeten Aggregierungsmethodik werden die durch Verschneidung der räumlichen Basisdaten gewonnenen quasihomogenen Elementarflächen im Rahmen der Simulationsrechnungen zu sog. „Hydrotopen“ und „Hydrotopklassen“ zusammengefasst und bei der Modellierung als Block behandelt. Diese Klassifizierung erfolgt skalenspezifisch entsprechend

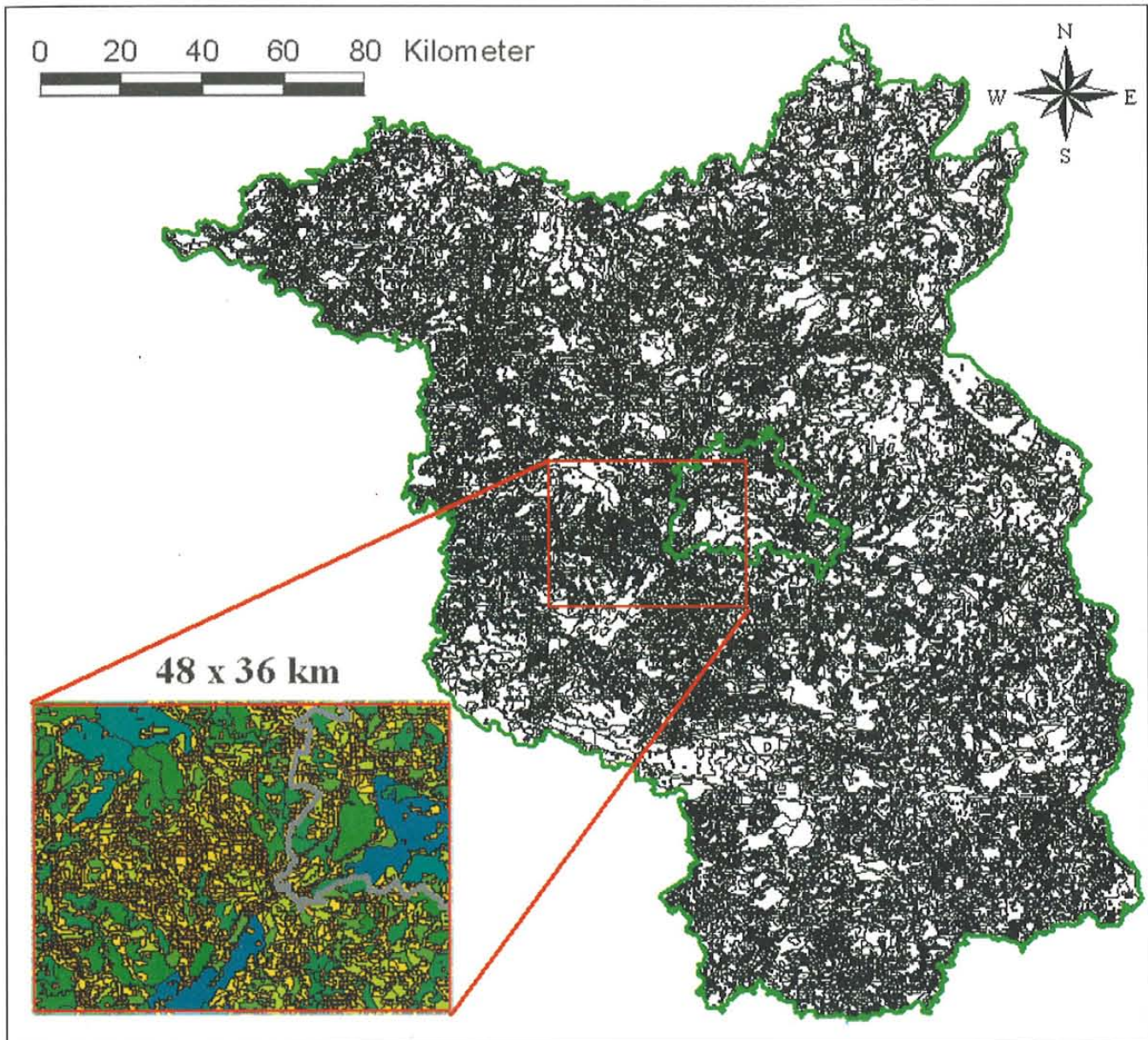


Abb. 4.3: Durch GIS-basierte Verschneidung der Basiskarten für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin generierte Elementarflächenkarte mit 57.836 quasi-homogenen Einzelflächen („Elementarflächen“)

der Dominanz der hydrologisch relevanten Prozesse und ihres Raum-Zeit-Verhaltens. Grundannahme ist hier, dass die Prozessdominanz anhand der 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 selbst.

Eine wichtige Aufgabe bei der hydrotopklassen-bezogenen Modellierung besteht darin, zunächst eine dem Untersuchungsgebiet angemessene Unterteilung festzulegen. So sollte sich die Hydrotopklassifizierung vornehmlich an hydrologischen Gesichtspunkten orientieren und über die räumliche Aggregation in erster Linie solche Flächen voneinander abgrenzen, die sich bezüglich ihres Verdunstungs- und Abflussbildungspotentials charakteristisch unterscheiden. Weiterhin sollten bei der Aggregation zu Hydrotopklassen die dominanten Gebietseigenschaften berücksichtigt werden. Zur Untersuchung potenziell in Frage kommender Hydrotopklassen

wurden deshalb vor Durchführung der Simulationsrechnungen statistische Analysen der EFL-Karte durchgeführt. Das Ergebnis dieser Analysen ist die in Tabelle 4.1 angegebene Ausweisung von insgesamt 15 Hydro-topklassen im Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin und im Validierungsgebiet der Oberen Dahme.

Primäres Kriterium bei der Ausweisung von Hydrotopklassen war der Landnutzungstyp. Eine weitergehende Unterscheidung nach grundwassernahen und -fernen Flächen erfolgte für die dominanten Landnutzungsklassen „Ackerland“, „Hochwald“ sowie „Wiese“. Die grundwasserfernen Flächen dieser drei Landnutzungstypen wurden in einer dritten Differenzierungsebene nach ebenen und hängigen Flächen unterschieden. Dagegen wurde bei den übrigen Landnutzungstypen (offene und geschlossene Bebauung, Brachland, Niederwald, Feuchtflächen, Wasserflächen) nicht weiter nach den sekundären Kriterien Grundwasserflurabstand bzw. Gefälle differenziert, da die entsprechenden Flächenanteile für

eine separate Ausweisung zu gering sind, bestimmte Eigenschaftskombinationen per se nicht sinnvoll sind (wie z.B. grundwassernah und hängig) oder eine weitergehende Unterscheidung aus anderen Gründen unnötig ist (wie z.B. bei Wasserflächen oder versiegelten Flächen).

Entsprechend Tabelle 4.1 stellen grundwasserferne, ebene und grundwassernahe Ackerflächen mit einem Flächenanteil von 21,2 % bzw. 19,3 % die dominanten Hydrotopklassen im Untersuchungsgebiet dar, gefolgt von Hochwald auf grundwasserfernen, ebenen Standorten (18,6 %). Abbildung 4.4 ver-

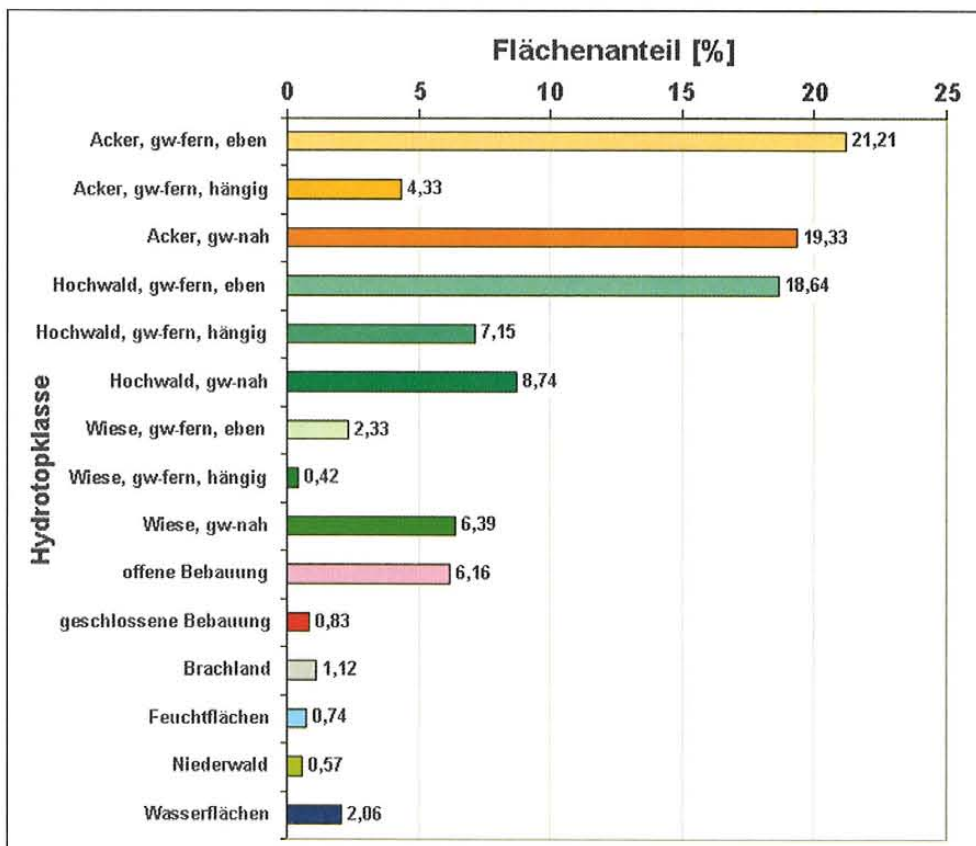
deutlicht die Flächenanteile der 15 Hydrotopklassen an der Gesamtfläche der Länder Brandenburg und Berlin.

Durch die räumliche Aggregation ergeben sich für das Untersuchungsgebiet insgesamt 1.599 georeferenzierte Hydrotope in 15 Hydrotopklassen, die eine räumlich hinreichend hoch aufgelöste Interpolation meteorologischer Eingangsgrößen sowie eine entsprechende Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen bei vertretbaren Rechenzeiten ermöglichen. Abbildung 4.5 zeigt die Heterogenität des räumlichen Musters bei der Unterteilung des Untersuchungsgebietes in die 1.599 Hydrotope.

Tab. 4.1: Überblick über die Flächenanteile der 15 für die Modellierung verwendeten Hydrotopklassen an der Gesamtfläche des Validierungsgebietes Obere Dahme und des Untersuchungsgebietes Brandenburg/Berlin

Hydrotopklasse	Beschreibung	Obere Dahme		Brandenburg/Berlin	
		Fläche [km ²]	Flächenanteil [%]	Fläche [km ²]	Flächenanteil [%]
1	Acker, gw-fern, eben	127,07	23,72	6.478,95	21,21
2	Acker, gw-fern, hängig	27,44	5,12	1.322,70	4,33
3	Acker, gw-nah	66,13	12,35	5.905,99	19,33
4	Hochwald, gw-fern, eben	158,17	29,53	5.694,14	18,64
5	Hochwald, gw-fern, hängig	70,39	13,14	2.183,76	7,15
6	Hochwald, gw-nah	43,81	8,18	2.669,92	8,74
7	Wiese, gw-fern, eben	4,46	0,83	710,52	2,33
8	Wiese, gw-fern, hängig	1,82	0,34	128,75	0,42
9	Wiese, gw-nah	21,31	3,98	1.952,75	6,39
10	offene Bebauung	11,53	2,15	1.882,91	6,16
11	geschlossene Bebauung	0,68	0,13	253,94	0,83
12	Brachland	0,00	0,00	341,27	1,12
13	Feuchtflächen	0,00	0,00	225,98	0,74
14	Niederwald	1,71	0,32	173,47	0,57
15	Wasserflächen	1,08	0,20	628,53	2,06
Summen		535,58	100,00	30.553,60	100,00

Abb. 4.4: Flächenanteile der für die Simulationsrechnungen verwendeten 15 Hydrotopklassen an der Gesamtfläche von Brandenburg/Berlin



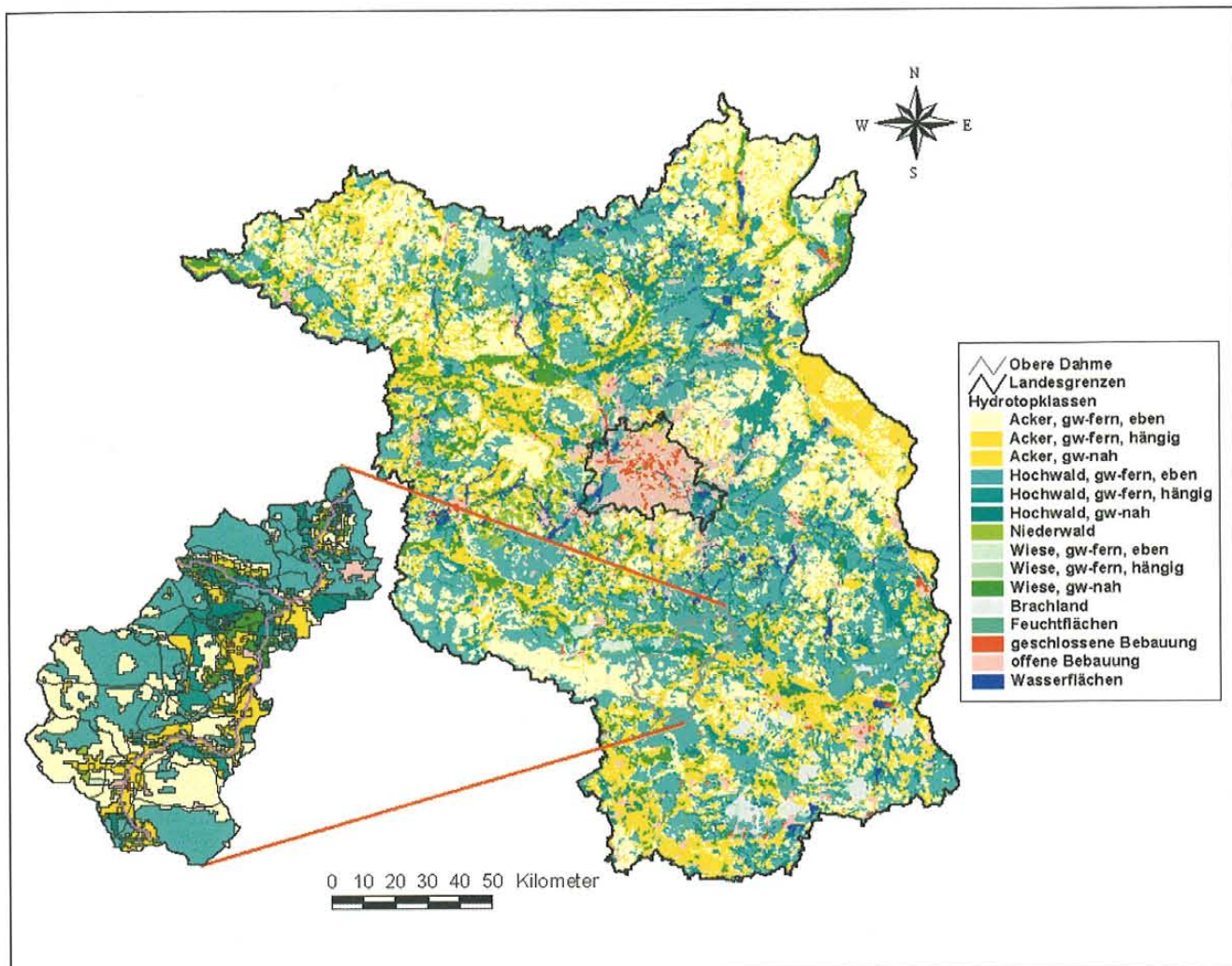


Abb. 4.5: Aggregation des Untersuchungsgebietes (Brandenburg/Berlin) in 1.599 Hydrotope (15 Hydrotopklassen). Der Ausschnitt zeigt zusätzlich die Disaggregation in Elementarflächen (schwarze Linien) im Validierungsgebiet der Oberen Dahme

4.4 Modellvalidierung

Da es sich beim Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin um eine „beliebige“ Landschaftseinheit und nicht um ein Einzugsgebiet mit einem an einem Auslasspegel definierten Abfluss handelt, muss das Modell vor seiner Anwendung in geeigneten Einzugsgebieten kalibriert und validiert werden. Voraussetzungen für diese Modellanpassung sind (i) eine identische räumliche Datenbasis sowie (ii) identische meteorologische Eingangsparameter. Grundsätzlich wurden bei der Auswahl des Validierungsgebietes die gleichen Kriterien zu Grunde gelegt wie für die Anwendung des Modells ABIMO (siehe Kap. 3.1.3). So kommen für die Modellkalibrierung grundsätzlich nur Gebiete in Frage, die gering anthropogen beeinflusst (ohne Einleitungen, Entnahmen, Staustufen etc.), d.h. möglichst „naturbelassen“ sind. Ausgewählt wurde das Einzugsgebiet der Oberen Dahme, 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).

Als Vergleichsgebiet stand daneben das Einzugsgebiet der Stepenitz zur Verfügung, in dem z.T. sowohl höher aufgelöste räumliche Daten als auch ein dichteres meteorologisches Netz verwendet wurden. Dieses im Rahmen des Forschungsvorha-

bens „Dynamische skalenübergreifende Modellierung des Wasser- und Stoffhaushaltes in Gebieten des pleistozänen Tieflandes – Modellgebiet Stepenitz“ als Teil des Projektes „Wasser- und Stoffrückhalt im Tiefland des Elbeinzugsgebietes“ (WaStor) (BORK 1997) intensiv untersuchte Einzugsgebiet stellt eine Teilleistung zur Erreichung der Gesamtzielstellung des Teiles „Landnutzung im Einzugsgebiet“ des BMBF-Forschungsschwerpunktes „Elbe-Ökologie“ dar, in dem Konzepte zur dauerhaft umweltgerechten Landnutzung in unterschiedlichen Natur- und Wirtschaftsräumen im Elbegebiet unter Berücksichtigung ihrer Auswirkungen auf den Gebietswasser- und -stoffhaushalt entwickelt und praktisch umgesetzt werden (BMBF 1995).

Aufbauend auf einer detaillierten Erfassung des „Ist-Zustandes“ wurden in diesem mesoskaligen Einzugsgebiet von 575 km² Größe umfangreiche Szenarioanalysen mit vorgegebenen Landnutzungs- und Bewirtschaftungsalternativen zur Ableitung von Vorschlägen zur Verbesserung der wasserwirtschaftlichen und landschaftsökologischen Situation sowie Analysen zu den Auswirkungen von Klimaänderungen auf den regionalen Wasserhaushalt durchgeführt. Einzelheiten zu den an der Stepenitz durchgeführten Untersuchungen sind LAHMER & BECKER (1998A) (zweiter Zwischenbericht an das BMBF), LAHMER & BECKER (1999) sowie LAHMER ET AL. (1999b) zu entnehmen.

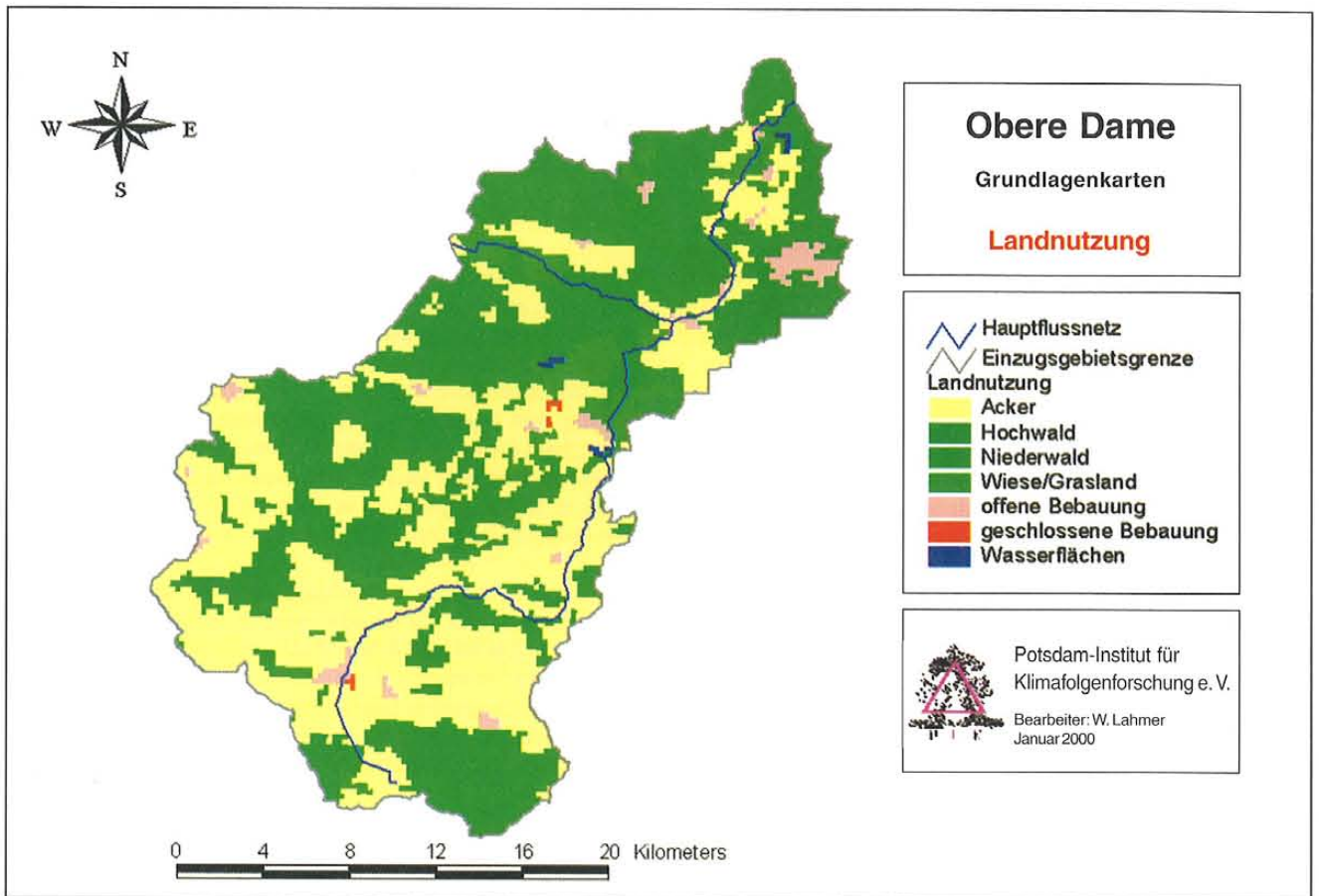


Abb. 4.6: Landnutzungskarte für das Einzugsgebiet der Oberen Dahme

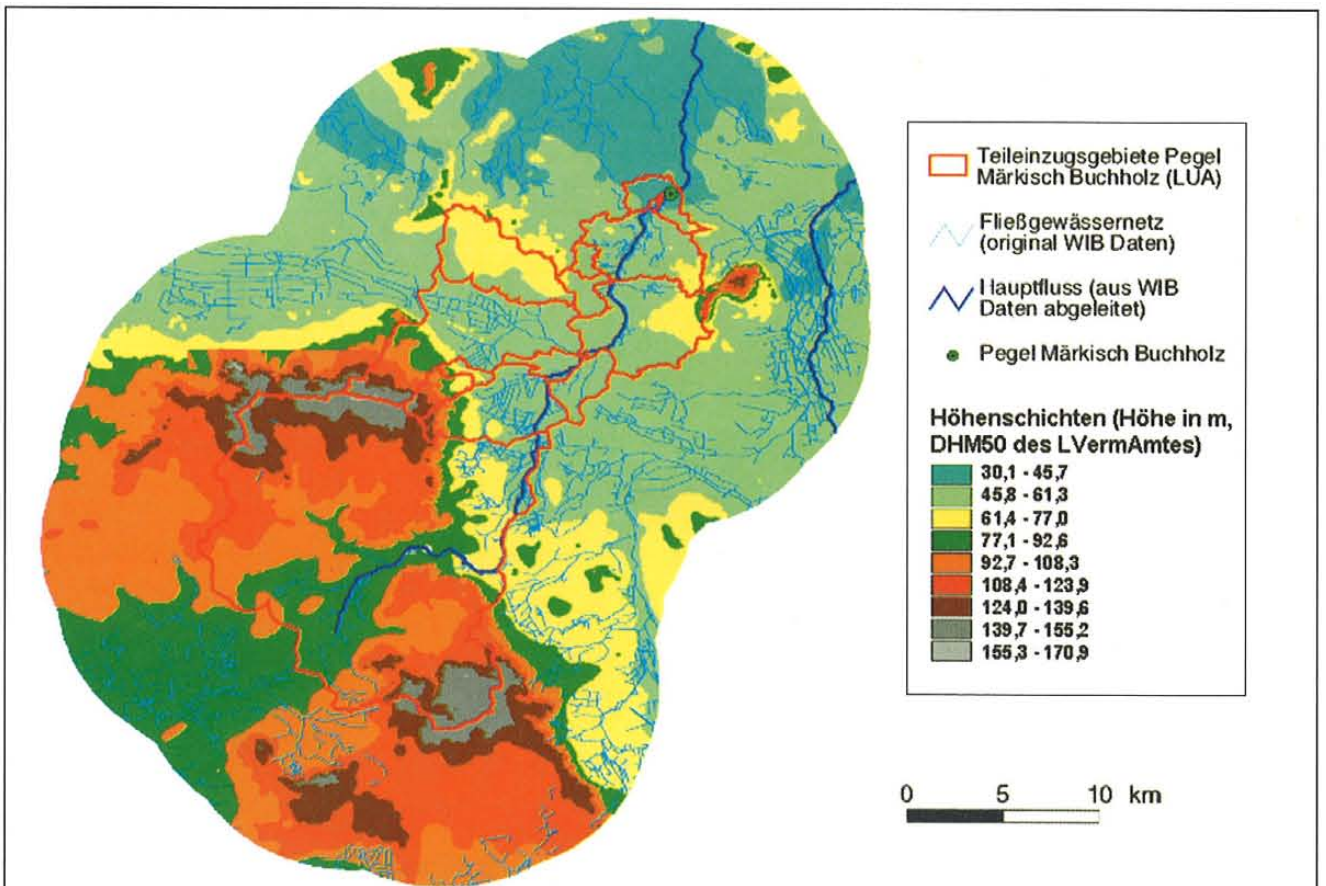


Abb. 4.7: Ausgangsdaten zur Neuausweisung von Teileinzugsgebieten im Einzugsgebiet der Oberen Dahme (Pegel Märkisch-Buchholz)

Im Einzugsgebiet der Oberen Dahme (Quellgebiet der Dahme bis zum Pegel Märkisch Buchholz; Gebietsgröße 535,6 km², mittlere Höhe 87,0 m NN, mittleres Gefälle 1,3 %) wurden zur Anpassung des Modells an die Datenbasis des Landes Brandenburg Niederschlags-Abfluss-Simulationen durchgeführt. Die Kalibrierung erfolgte anhand der am Pegel Märkisch-Buchholz gemessenen täglichen Abflüsse, die für die Periode 01.11.1976–31.10.1994 vom LUA bereitgestellt wurden. Da die meisten der für die Simulation verfügbaren meteorologischen Zeitreihen aber nur bis 1990 reichen (siehe Tabelle 2.2), stand als Kalibrierungs- und Validierungszeitraum lediglich der Zeitbereich 1977–1990 zur Verfügung, der für diesen Zweck aber ausreicht.

Für die Simulationsrechnungen wurden grundsätzlich die gleichen räumlichen Basiskarten wie für den gesamten Untersuchungsraum verwendet. Allerdings kommen von den 9 im Gesamtgebiet definierten Landnutzungsklassen an der Oberen Dahme lediglich 7 vor (es fehlen Brachland und Feuchtfelder) und von den 20 vorkommenden Bodenklassen lediglich 8. Auch wenn dies grundsätzlich eine Einschränkung der landschaftlichen Heterogenität im Vergleich zum gesamten Modellierungsgebiet bedeutet, wird eine Modellanpassung dadurch nicht erschwert oder verhindert. Abbildung 4.6 zeigt die Landnutzungskarte für die Obere Dahme. Die in Tabelle 2.4 angegebenen Flächenanteile an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes verdeutlichen, dass das Validierungsgebiet ei-

nen geringeren Flächenanteil bebauter Flächen (Städte, Dörfer etc.) und einen ca. 16 % höheren Waldanteil besitzt, während der Anteil landwirtschaftlich genutzter Flächen mit 41 % etwa mittleren Brandenburger Verhältnissen entspricht. Alle für die Modellierung der Oberen Dahme verwendeten Grundlagenkarten sind jeweils zusammen mit den entsprechenden Karten für den gesamten Untersuchungsraum dargestellt (siehe Abb. 2.7 bis 2.10).

Um die lateralen Abflussprozesse der Skala angemessen zu beschreiben, wurde eine Einteilung des Gesamtgebietes in insgesamt 6 Teileinzugsgebiete vorgenommen. Die Teileinzugsgebietskarte wurde vom PIK für die hochauflösende Modellierung neustrukturiert, weshalb die vom LUA bereitgestellte Karte nicht zum Einsatz kam. Bei dieser Neustrukturierung wurde eine Überarbeitung der Wasserscheiden und Pegelinzugsgebiete anhand einer am PIK verfügbaren topographischen Karte mit einer Auflösung von 50 m durchgeführt und eine geeignetere Teileinzugsgebietsuntergliederung vorgenommen.

Abbildung 4.7 enthält die verfügbaren Informationen, die den Ausgangspunkt für die Neuausweisung der Teileinzugsgebiete darstellen. Die im nördlichen, flachen Teil der Oberen Dahme befindlichen Strukturen des detaillierten Gewässernetzes sind Anzeichen für grundsätzliche Probleme bei der Ausweisung von Teileinzugsgebieten und die mögliche Bedeutung unterirdischer Einzugsgebietsstrukturen (vgl. Kap. 3.1.3). Abbildung

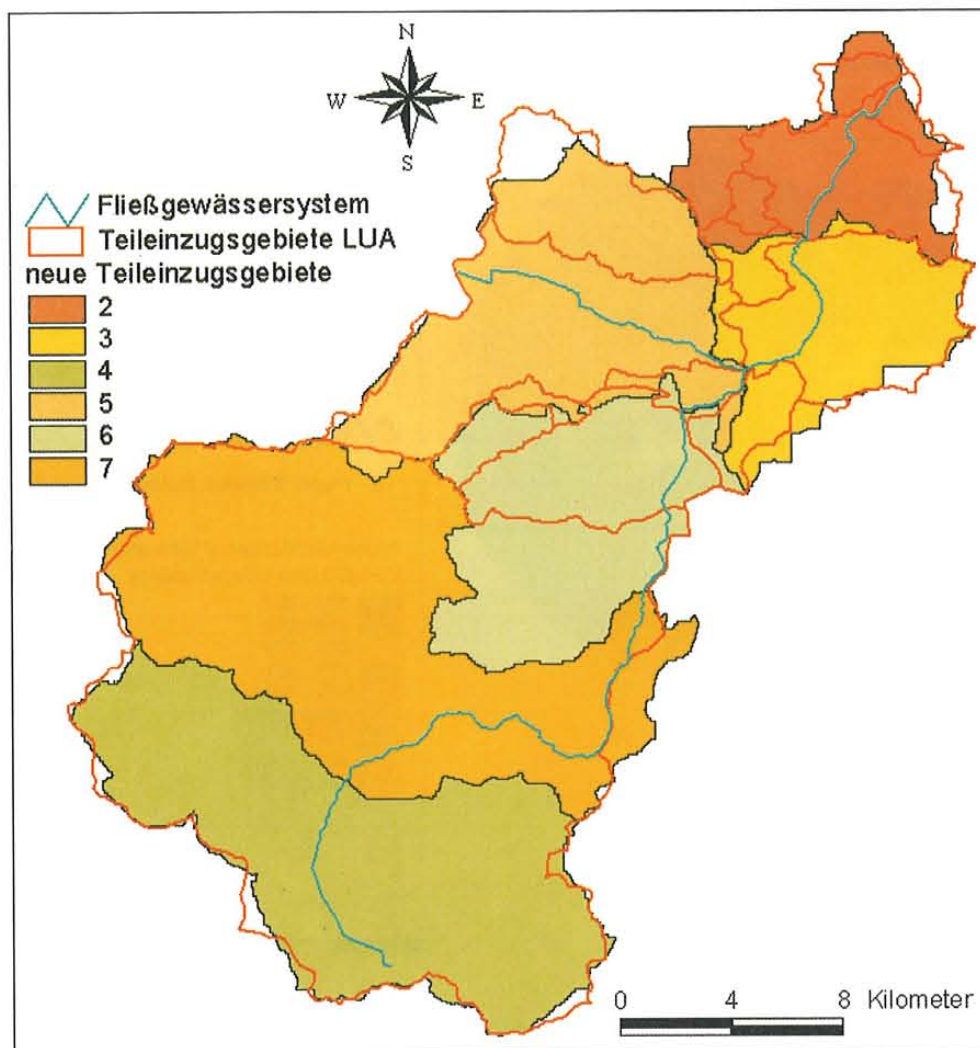


Abb. 4.8: Vergleich der vom LUA bereitgestellten mit der am PIK neu generierten Teileinzugsgebietsstrukturierung der Oberen Dahme

4.8 stellt die vom LUA übergebene und die am PIK neu generierte Teileinzugsgebietsstruktur der Oberen Dahme gegenüber. Die vom LUA bereitgestellte Karte mit insgesamt 14 Teileinzugsgebieten weist mehrere sehr kleine Teileinzugsgebiete im reliefarmen Norden sowie lediglich ein sehr großes Teileinzugsgebiet im morphologisch stärker strukturierten Süden auf. Außerdem enthalten einige der ausgewiesenen Teileinzugsgebiete im Nordwesten und im Zentrum keinerlei Gewässerstrukturen, selbst wenn man das zur Verfügung stehende sehr detaillierte Gewässernetz zugrunde legt.

Demgegenüber enthält die am PIK generierte Karte lediglich 6 Teileinzugsgebiete. Die Gesamtfläche des neu berechneten Einzugsgebietes beträgt 535,58 km² gegenüber 527,40 km² für die LUA-Karte (Differenz von 8,18 km² oder 1,55 %). Die überarbeitete Teilgebietsstruktur entspricht den Erfordernissen des verwendeten Modellierungssystems erheblich besser, da die hohe zuvor im Flachlandbereich vorhandene Anzahl an Teileinzugsgebieten erheblich reduziert und der höher reliefierte südliche Teil weiter unterteilt werden konnte. Die auf der Basis dieser Einzugsgebietsgrenze aus der für den gesamten Modellierungsraum generierten Elementarflächenkarte extrahierte Karte für die Obere Dahme enthält insgesamt 685 Elementarflächen (siehe auch Abb. 4.5).

Für die Simulationsrechnungen im Einzugsgebiet der Oberen Dahme wurde aus den bereits erwähnten Gründen die gleiche

räumliche Aggregation zu 15 Hydrotopklassen verwendet wie für das Gesamtgebiet, die Klassifizierung wurde also nicht den spezifischen Bedingungen des Validierungsgebietes angepasst (wie es sonst üblicherweise geschieht). Da die Landnutzungs-klassen „Brachland“ und „Feuchtfächen“ im Gebiet der Oberen Dahme nicht vorkommen, reduziert sich die Anzahl der Hydrotopklassen gegenüber dem Gesamtgebiet von 15 auf 13.

Diese Klassifizierung ergibt die in Abbildung 4.9 dargestellten, insgesamt 62 georeferenzierten Einheiten (Hydrotope) für die Modellierung (siehe auch Abb. 4.5).

Entsprechend Tabelle 4.1 beträgt der Feuchtfächenanteil (grundwassernahe Flächen sowie Feuchtfächen) ca. 24,5 %, was annähernd identisch ist mit den in KLÖCKING & LAHMER (1999) angegebenen, aber auf der Basis von z.T. anderen räumlichen Grundlagenkarten abgeleiteten 24 %.

Um die Übertragbarkeit des an das Obere Dahme-Gebiet angepassten Modells auf das gesamte Untersuchungsgebiet sicherzustellen, mussten neben identischen räumlichen Daten auch identische zeitliche Eingangsdaten verwendet werden. Für die Simulationsrechnungen wurden deshalb die Zeitreihen der für das Validierungsgebiet relevanten und in Tabelle 2.2 aufgeführten meteorologischen Stationen verwendet.

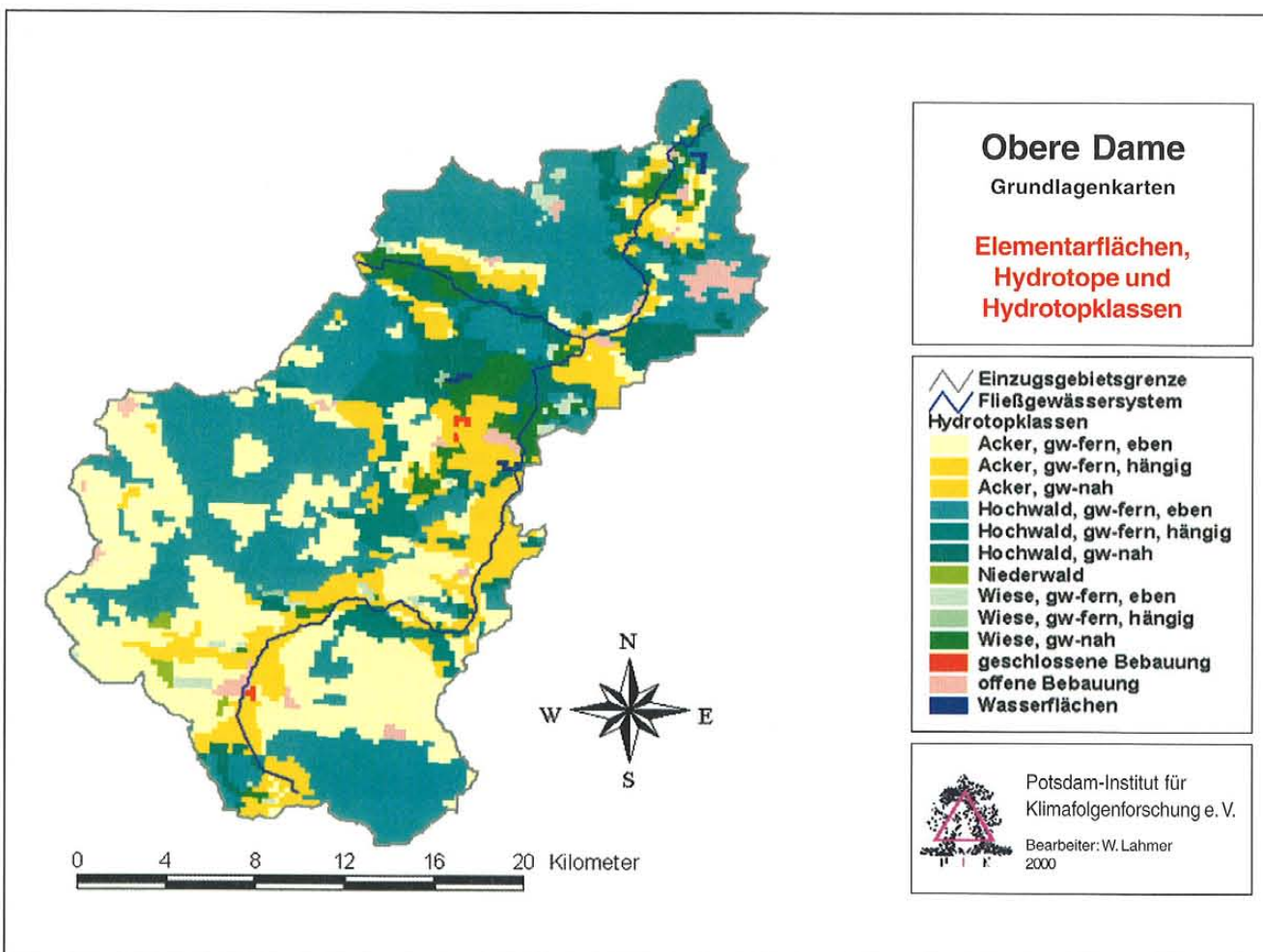


Abb. 4.9: Überblick über die für die Modellierung der Oberen Dahme gewählte Unterteilung des Einzugsgebietes in 685 Elementarflächen, 62 Hydrotope und 13 Hydrotopklassen

Auf der Grundlage der o.g. räumlichen und zeitlichen Basisdaten wurden für das Einzugsgebiet der Oberen Dahme bis zum Pegel Märkisch Buchholz zum Zwecke der Modellkalibrierung und -validierung Simulationsrechnungen für den Zeitraum 1977–1990 durchgeführt. Die für das Einzugsgebiet am Gebietsauslass (Pegel Märkisch Buchholz) gemessenen und simulierten Durchflüsse sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Trotz der für kleinere Einzugsgebiete mit geringen Gebietsabflüssen häufig auftretenden Probleme bei der Nachbildung gemessener Abflüsse ist die Anpassung der simulierten an die gemessene Abflusskurve recht gut, in einigen Jahren sogar sehr gut. Probleme zeigen sich lediglich bei der Nachbildung extremer Abflüsse (April 79, März 81, Winter 82), die teilweise weder in ihrer Höhe noch in ihrer zeitlichen Lage exakt getroffen werden, sowie in einigen Herbstmonaten, in denen die simulierten Werte teilweise erheblich geringer als die gemessenen sind (1977, 1982).

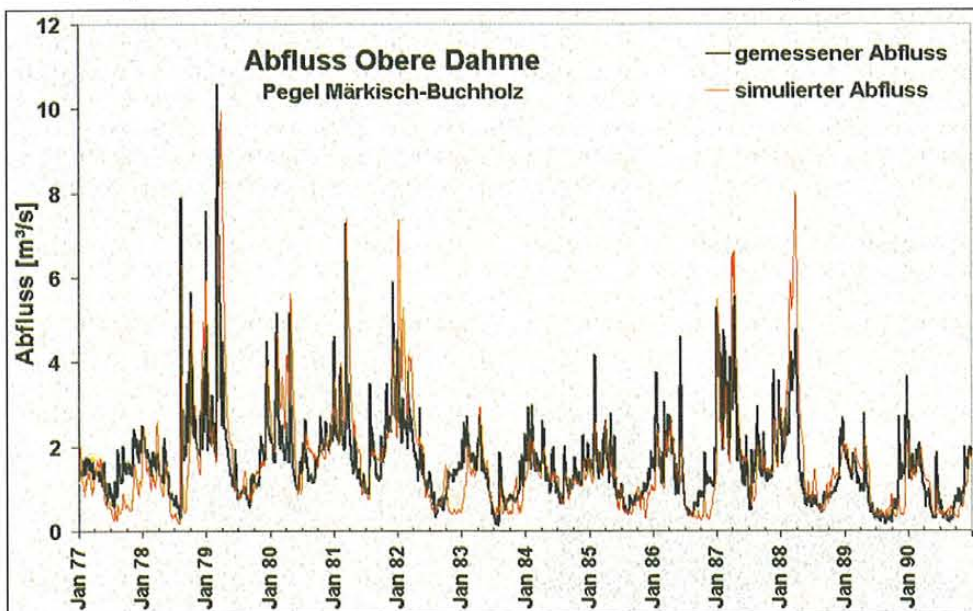


Abb. 4.10: Für das Einzugsgebiet der Oberen Dahme im Zeitraum 1977–1991 gemessene und simulierte Durchflüsse am Pegel Märkisch Buchholz

Auf ähnliche Schwierigkeiten wurde bereits im 2. Zwischenbericht zum Elbeökologie-Projekt hingewiesen (KLÖCKING & LAHMER 1999). Dort wurde vermutet, dass Teile der Grundwasserneubildungsmenge nicht im Einzugsgebiet der Oberen Dahme, sondern zur Nuthe (Hammerfließ) bzw. direkt zur Spree abgeführt werden. Solche in das Gebiet oder aus dem Gebiet abfließenden unterirdischen Abflüsse konnten wegen der fehlenden Ausweisung unterirdischer Einzugsgebietsstrukturen bei der Modellierung genauso wenig berücksichtigt werden wie möglicherweise stattfindende Überleitungen oder Entnahmen. Eine Verbesserung der am Gebietsauslass Märkisch Buchholz oder an weiteren Zwischenpegeln im Gebiet simulierten Abflusszeitreihen ließe sich dann erreichen, wenn neben einer Karte der unterirdischen Einzugsgebiete flächendetaillierte Informationen zu den unterirdischen Abflusskomponenten verfügbar wären, um damit das Grundwassermodell über diese zusätzliche räumliche „Informationsebene“ besser den tatsächlichen Gebietseigenschaften anzupassen.

Insgesamt rechtfertigt die Auswahl des Einzugsgebietes der Oberen Dahme aber dessen Verwendung zur Modellkalibrierung. Darüber hinaus resultierten aus der Anpassung des Modells

Modellparameter, die praktisch identisch zu denen sind, die bei Modellierungsarbeiten im ebenfalls in Brandenburg liegenden Einzugsgebiet der Stepenitz ermittelt wurden. Dieses stellt deshalb – wie bereits erwähnt – ein zusätzliches Validierungsgebiet für die hier dargestellten Untersuchungen dar.

Auf der Grundlage der Modellanpassung wurden (zum Vergleich mit den für das Gesamtgebiet durchgeführten Berechnungen) für die Periode 1961–1990 flächendeckend verschiedene Wasserhaushaltsgrößen für die Obere Dahme berechnet, die am Beispiel der Oberflächenabflussbildung (Abb. 4.21) sowie der Gesamtabflusshöhe (Abb. 4.22) zusammen mit den entsprechenden Ergebnissen für die Länder Brandenburg und Berlin in Form mittlerer Jahressummen dargestellt sind. Abbildung 4.11 zeigt beispielhaft die räumliche Verteilung der Sickerwasserbildung, die im Wesentlichen zur Grundwasserneubildung führt.

4.5 Flächendeckende Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg

Unter Verwendung des in den Einzugsgebieten Obere Dahme und Stepenitz kalibrierten und validierten Modells und der pro Simulationszeitschritt (Tag) interpolierten meteorologischen Eingangsgrößen wurden auf der Basis der in Tabelle 4.1 angegebenen 15 Hydrotopklassen für den Zeitraum 1961–1990 für den Gesamtraum Brandenburg/Berlin flächendeckend die Wasserhaushaltsgrößen Gebietsniederschlag, potenzielle Verdunstung, reale Verdunstung, Sickerwasserbildung,

Oberflächenabflussbildung und Gebietsabfluss berechnet. Die Berechnungen erfolgten sowohl für das Gesamtgebiet als auch getrennt für die Gebiete der wasserwirtschaftlichen Planungsräume, wobei die Ergebnisse für die Gesamtperiode 1961–1990 jeweils zu mittleren Monats- und Jahressummen sowie zu Jahresummen aggregiert wurden. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt nachfolgend sowohl in tabellarischer als auch in kartographischer Form. Die berechneten Wasserhaushaltsgrößen bilden den Referenzzustand für evtl. geplante Analysen zu den Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den regionalen Wasserhaushalt, wie sie im Rahmen des WaStor-Projektes vom PIK bereits für das Stepenitzgebiet durchgeführt wurden (LAHMER & BECKER 1998A).

4.5.1 Ergebnisse für das Gesamtgebiet

Die für die Obere Dahme und das Gesamtgebiet Brandenburg/Berlin berechneten Jahressummen meteorologischer Eingangs- und simulierter Wasserhaushaltsgrößen sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Ein Vergleich der für das Gesamtgebiet und das Validierungsgebiet Obere Dahme berechneten Größen zeigt, dass die Entwicklung dieser Größen regional sehr unterschiedlich ausfällt.

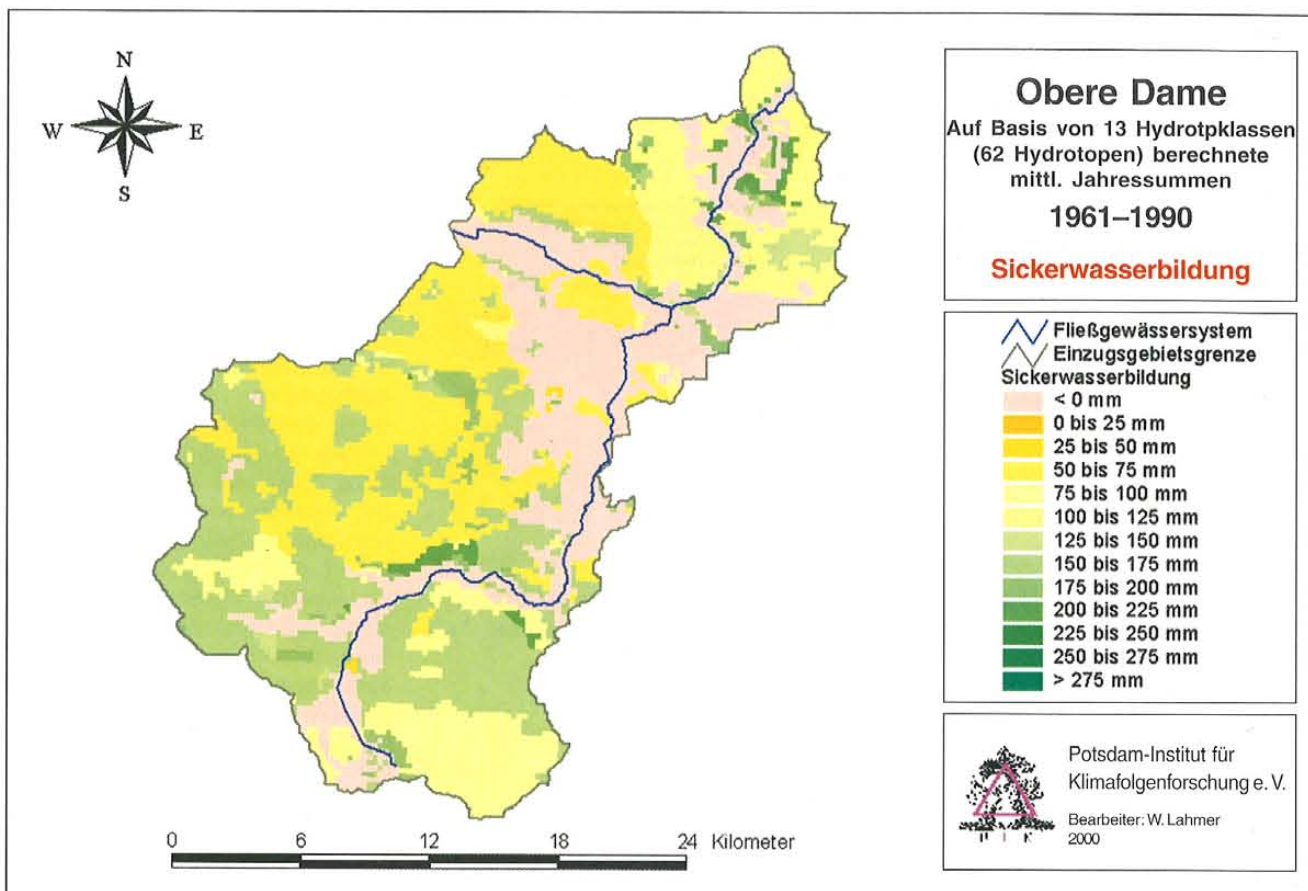


Abb. 4.11: Räumliche Verteilung der im Einzugsgebiet der Oberen Dahme für die Gesamtperiode 1961–1990 berechneten mittleren Jahressummen der Sickerwasserbildung

Tab. 4.2: Überblick über die für das Einzugsgebiet der Oberen Dahme und das gesamte Untersuchungsgebiet (Brandenburg/Berlin) berechneten Jahressummen meteorologischer Eingangs- und simulierter Wasserhaushaltsgrößen (in mm/Jahr bzw. °C für LT)

Jahr	OBERE DAHME								BRANDENBURG/BERLIN							
	Meteorologische Größen				Wasserhaushaltsgrößen				Meteorologische Größen				Wasserhaushaltsgrößen			
	PI	LT	EP	WB	ER	SWB	RO	QC	PI	LT	EP	WB	ER	SWB	RO	QC
1961	703,2	9,23	628,3	74,9	604,1	-35,6	5,2	58,9	733,1	9,12	625,6	107,6	572,8	121,0	20,7	118,9
1962	505,6	7,58	554,1	-48,6	498,9	54,0	3,0	55,2	552,5	7,51	554,8	-2,3	492,8	81,8	13,8	95,4
1963	444,2	7,73	643,6	-199,4	484,6	-38,5	2,5	25,2	482,0	7,59	653,7	-171,7	483,2	-27,1	11,7	21,6
1964	572,7	8,41	664,3	-91,5	534,3	9,0	3,4	19,1	572,1	8,32	662,4	-90,2	511,9	25,3	15,9	58,6
1965	748,8	7,88	598,1	150,7	564,8	157,4	4,8	61,9	722,3	7,74	592,4	129,9	528,1	161,7	20,1	142,7
1966	709,9	8,87	636,3	73,6	566,4	135,1	5,2	89,0	746,1	8,71	631,5	114,5	565,3	148,1	22,7	139,7
1967	751,9	9,54	667,2	84,7	600,6	137,1	5,5	109,2	725,3	9,48	661,4	63,9	571,6	130,1	19,8	139,1
1968	652,2	8,67	634,6	17,6	521,7	127,5	4,5	116,8	668,3	8,62	637,6	30,7	524,1	109,0	19,0	129,0
1969	578,3	7,90	628,2	-49,9	535,0	114,9	4,2	122,5	605,4	7,71	622,7	-17,3	515,3	111,2	19,4	150,0
1970	670,2	7,92	607,7	62,5	492,8	124,1	5,0	115,9	669,8	7,80	613,6	56,2	474,9	134,3	20,6	154,0
1971	532,9	8,95	644,3	-111,4	543,3	21,8	3,7	76,0	488,3	8,94	651,1	-162,8	510,5	-2,4	13,9	56,5
1972	517,1	8,30	605,2	-88,0	560,3	8,1	3,7	63,6	547,8	8,18	592,4	-44,6	542,5	9,6	15,7	40,1
1973	544,8	8,65	635,3	-90,5	497,4	-12,8	3,4	39,3	555,0	8,60	626,8	-71,8	481,9	6,7	16,0	40,5
1974	799,4	9,29	590,8	208,6	540,0	212,7	6,0	70,5	768,0	9,19	590,8	177,2	524,5	193,4	24,2	120,7
1975	497,7	9,52	674,5	-178,8	522,4	32,1	3,2	90,5	470,5	9,45	673,0	-202,5	493,6	8,3	13,9	131,1
1976	393,6	8,79	655,5	-261,8	431,1	-6,4	2,5	55,7	432,8	8,53	652,1	-219,3	415,2	0,2	12,7	68,9
1977	698,3	8,92	576,1	122,2	552,5	75,3	4,7	59,5	687,0	8,90	574,5	112,5	522,0	102,8	21,3	91,3
1978	789,2	8,36	609,3	179,9	513,0	239,3	10,0	105,4	684,9	8,31	595,7	89,3	478,4	153,6	21,1	130,8
1979	666,0	7,99	639,5	26,6	531,1	166,1	5,3	160,2	638,0	7,86	622,2	15,8	512,4	132,9	19,1	161,1
1980	689,0	7,68	611,1	77,9	561,5	128,5	5,5	150,9	687,2	7,57	591,4	95,8	544,4	114,8	20,8	127,1
1981	759,6	8,59	612,6	146,9	565,9	145,6	6,2	151,0	767,3	8,53	607,7	159,6	529,9	181,2	24,9	164,6
1982	413,5	9,63	733,4	-319,9	487,9	39,3	3,1	110,2	431,9	9,34	712,5	-280,6	488,0	6,4	13,4	114,1
1983	590,0	9,76	698,8	-108,9	547,9	28,3	3,9	64,7	627,0	9,57	679,3	-52,3	522,6	59,9	18,8	90,1
1984	645,8	8,36	581,0	64,8	546,9	57,4	4,6	81,0	613,4	8,26	569,1	44,2	522,3	57,2	17,5	76,2
1985	536,2	7,90	608,9	-72,7	532,6	35,2	3,3	65,3	559,1	7,76	599,2	-40,0	503,6	43,5	14,9	63,7
1986	703,2	8,33	647,5	55,7	549,8	102,5	5,4	64,4	709,1	8,18	634,7	74,3	527,5	129,3	22,1	110,8
1987	716,0	7,52	571,7	144,3	540,3	167,2	6,1	134,8	732,5	7,42	560,4	172,1	517,3	182,0	22,3	176,8
1988	612,9	9,45	663,3	-50,5	519,9	136,3	4,4	127,9	596,9	9,38	648,6	-51,7	495,3	116,6	18,7	185,7
1989	537,4	10,08	740,7	-203,4	509,9	-2,8	3,6	59,1	459,6	10,01	720,3	-260,7	468,7	-44,3	12,8	33,0
1990	592,8	10,02	723,2	-130,4	577,9	31,8	3,8	53,8	627,9	9,98	698,7	-70,8	558,7	46,4	17,6	78,4
61-90	619,1	8,66	636,2	-17,1	534,5	79,7	4,5	85,3	618,7	8,54	628,1	-9,4	507,8	86,6	20,2	107,0

PI Niederschlag
 EP potenzielle Verdunstung
 ER Verdunstung
 RO Oberflächenabflussbildung
 LT mittlere Tagestemperatur
 WB klimatische Wasserbilanz
 SWB Sickerwasserbildung
 QC Gebietsabfluss

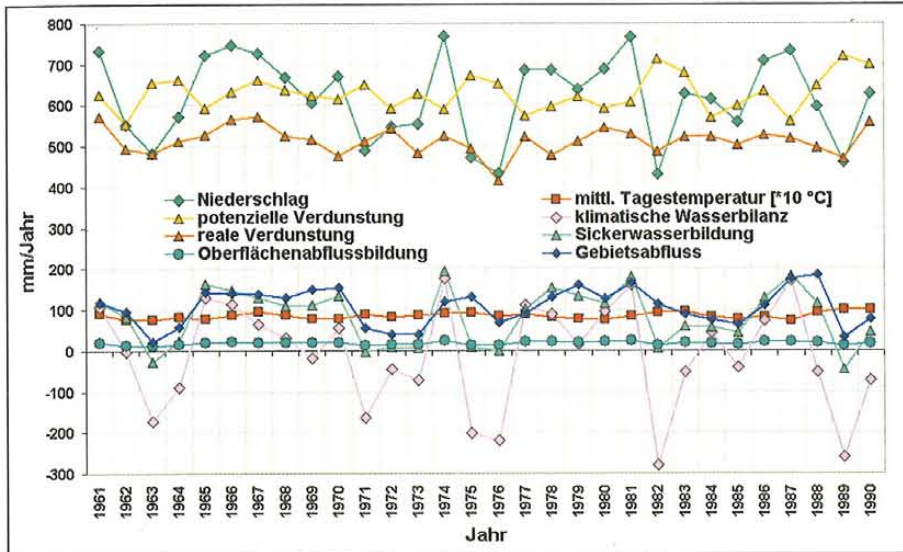


Abb. 4.12: Für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin ermittelte Jahressummen verschiedener meteorologischer Eingangs- sowie berechneter Wasserhaushaltsgrößen für die Gesamtperiode 1961–1990

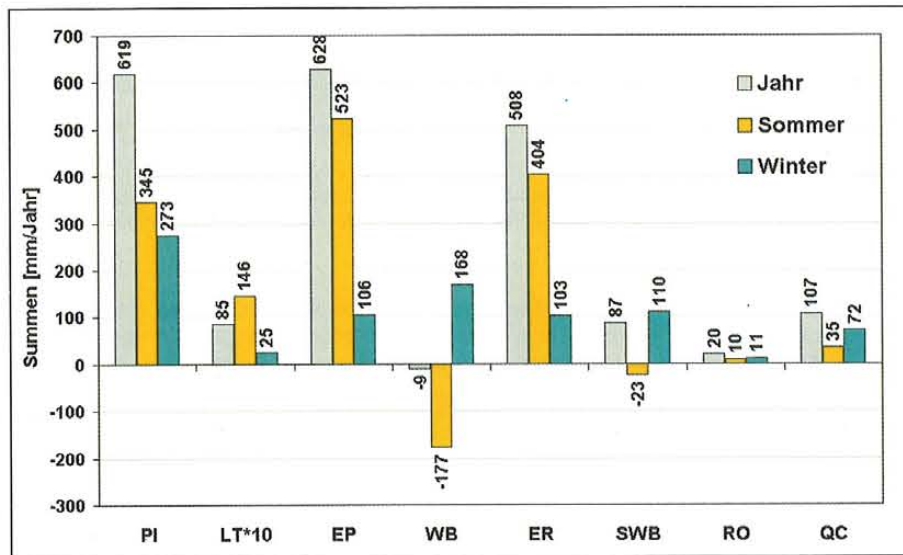


Abb. 4.13: Für die Gesamtperiode 1961–1990 berechnete mittlere Jahres-, Sommer- und Wintersummen der Größen Niederschlag (PI), pot. Verdunstung (EP), klim. Wasserbilanz (WB), reale Verdunstung (ER), Sickerwasserbildung (SWB), Oberflächenabflussbildung (RO) und Gesamtabfluss (QC) im Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin). Im Fall der mittleren Tagestemperatur (LT) wurde jeweils der entsprechende Tagesmittelwert berechnet (°C) und für Darstellungszwecke um den Faktor 10 erhöht

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass im langjährigen Mittel $QC = SWB + RO = PI - ER$ gilt. Geringe Abweichungen sind auf Unterschiede in der Gebietspeicherung ΔS zu Beginn (01.01.1961) und zum Ende (31.12.1990) der Simulationsrechnungen zurückzuführen. Für die Einzeljahre hingegen sind Sickerwasserbildung (SWB) und Landoberflächenflussbildung (RO) durch die jeweils herrschenden meteorologischen Bedingungen geprägt. Dies führt z.B. zu negativen Werten von SWB, wenn in trockenen Jahren starke Ausschöpfungen der Bodenspeicher in Zehrperioden nicht in Wiederauffüllungs-/ (Feucht)perioden ausgeglichen werden, oder zu besonders hohen Werten von RO, die durch einige Starkregenereignisse verursacht werden. Differenzen zwischen SWB und RO auf der

einen und dem berechneten Gesamtabfluss QC auf der anderen Seite sind also Ausdruck von Änderungen in der Gebietspeicherung ΔS , die sich nur bei einer zeitvariablen Wasserhaushaltsmodellierung zeigen.

Abbildung 4.12 zeigt den Verlauf der für das gesamte Untersuchungsgebiet berechneten Jahressummen meteorologischer Eingangs- sowie berechneter Wasserhaushaltsgrößen für die Gesamtperiode 1961–1990. 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 mit überdurchschnittlichen Jahressummen der potenziellen Verdunstung sind (trockene, warme Jahre). Sie verdeutlichen, dass Brandenburg/Berlin verglichen mit den alten Bundesländern durch ein geringes Wasserdargebot charakterisiert ist.

In Abbildung 4.13 sind die mittleren Jahressummen sowie die für das Sommer- (Monate 5 bis 10) und das Winterhalbjahr (Monate 11 bis 4) berechneten mittleren Halbjahressummen für die Gesamtperiode 1961–1990 im Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) dargestellt. Danach fällt in den Jahren 1961–1990 ca. 56 % des Niederschlags in den Sommermonaten. Die potenzielle und reale Verdunstung sind (erwartungsgemäß) mit ca. 83 % bzw. 80 % in den Sommermonaten dominant, während die Oberflächenabflussbildung sich im Mittel fast gleichmäßig auf die beiden Halbjahre verteilt. Eine stark negative klimatische Wasserbilanz im Sommer ergibt mit einem fast ebenso großen positiven Wert für den Winter im langjährigen Jahresmittel einen leicht negativen Wert (ca. -9 mm). Positive Werte der Sickerwasserbildung im Winter überwiegen negative Werte dieser

Wasserhaushaltsgröße im Sommer und führen im langjährigen Mittel zu einem positiven Wert von ca. 87 mm.

Grundsätzlich müssen bei Bilanzbetrachtungen auf Haljbasis die Speicheränderungen über den Betrachtungszeitraum mit einbezogen werden. Dies betrifft vor allem die mittlere Änderung der Bodenkapillar- und Grundwasserspeicherung über das Sommerhalbjahr. Hier ist die Differenz von Niederschlag PI und Verdunstung ER meist negativ (im langjährigen Mittel -59 mm), was bedeutet, dass aufgrund der negativen Wasserbilanz mehr verdunstet als Niederschlag fällt. Das zusätzlich benötigte Wasser wird dann aus dem Bodenkapillarraum der wechselfeuchten Bodenzone bereitgestellt, die

für brandenburgtypische Böden zwischen 80 und 120 mm Wasser speichern kann. Auf grundwasserfernen Böden wird deshalb nur bei extremen Niederschlagsereignissen eine Versickerung ins Grundwasser stattfinden. Auf grundwassernahen Böden findet dagegen ein Kapillaraufstieg aus dem Grundwasser zur Befriedigung des Verdunstungsanspruchs dieser Flächen statt. Dieser Kapillaraufstieg stellt eine Verlustgröße für das Grundwasser dar und kann als negative Grundwasserneubildung interpretiert werden.

Wie Abbildung 4.13 zeigt ist die für das Gesamtgebiet berechnete Sickerwasserbildung (SWB) im Sommerhalbjahr negativ, d.h. die negative Grundwasserneubildung auf den grundwassernahen Flächen übersteigt die gegen Null gehende SWB auf den grundwasserfernen Flächen. Der Gebietsabfluss QC wird im Sommer demzufolge vor allem aus der Grundwasserneubildung im Winter gespeist, die über den Grundwasserpfad verzögert zum Abfluss kommt. Insgesamt fallen in Brandenburg ca. 67 % des Jahresabflusses im Winter an.

Abbildung 4.14 zeigt die für die Periode 1961–1990 im Untersuchungsgebiet 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 – wie bereits in Abbildung 4.13 angedeutet – der in der Periode 1961–1990 auftretende Niederschlag eher in den Sommermonaten (insbesondere Mai bis August), während sich die Wintermonate Januar bis April sowie der Oktober durch unterdurchschnittliche Niederschlagshöhen auszeichnen. Die mittlere Tagestemperatur beträgt im Jahresmittel etwa 8,5° C und zeigt lediglich für die Monate Januar und Februar Werte von oder unter 0° C.

Die potenzielle Verdunstung wird wesentlich durch die innerjährige Niederschlags- und Temperaturverteilung bestimmt, weshalb die langjährige Jahressumme von 628 mm hauptsächlich durch die Sommermonate bestimmt wird, wo Monatswerte von bis zu 122,7 mm auftreten. Das Maximum im Juni ergibt sich trotz der gegenüber dem Juli geringeren Temperaturen aufgrund der höheren Niederschlagsmengen. 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 festzustellen sind. Die Niederschlagsmengen reichen dann nicht aus, die potenzielle Verdunstung zu befriedigen, weshalb im Raum Brandenburg/Berlin in diesen Monaten ein generelles Wasserdefizit herrscht. Als Resultat dieses sommerlichen Defizits ergibt sich für diese meteorologische Sekundärgröße im langjährigen Durchschnitt ein leicht negativer Wert.

Die Wasserhaushaltsgrößen reflektieren das Verhalten der zuvor diskutierten meteorologischen Eingangs- sowie der davon abgeleiteten Sekundärgrößen. So ist der innerjährige Gang der realen Verdunstung dem der potenziellen Verdunstung sehr ähnlich, doch werden hier maximal etwa 100 mm im Mai erreicht, da der für die potenzielle Verdunstung berechnete Wert von 113,4 mm nicht voll ausgeschöpft werden kann. Für die nachfolgenden Sommermonate wird die Lücke zwischen Verdunstungsanspruch und tatsächlicher Verdunstung dann noch erheblich größer und erreicht mit etwa 36 mm im Juli den höchsten Wert. Nur in den Monaten Dezember und Januar entspricht die reale Verdunstung der potenziell möglichen.

Die Monatsmittelwerte der Sickerwasserbildung zeigen einen zur klimatischen Wasserbilanz stark korrelierten Verlauf und weisen für die Sommermonate (Mai bis September) negative 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 können. Im Jahresdurchschnitt ergibt sich eine mittlere Jahressumme von immerhin noch ca. 87 mm für diese Wasserhaushaltsgröße, der aber schon durch geringfügige Änderungen der klimatischen Bedingungen noch geringer werden könnte. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass bei der in bebauten oder teilbebauten Gebieten berechneten Sickerwasserbildung der Versiegelungsgrad dieser Flächen berücksichtigt wurde, der Anschluss an eine Mischkanalisation aber aufgrund nicht flächendeckend vorliegender Informationen nicht berücksichtigt werden konnte. Da die daraus resultierenden Effekte auf diese Nutzungsklassen beschränkt bleiben, werden die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt des Gesamtuntersuchungsraumes jedoch 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. Für die Gesamtabflusshöhe gelten die bereits in Zusammenhang mit Abbildung 4.13 diskutierten Schlussfolgerungen, nach denen diese in den Sommermonaten vor allem durch die hohen Sickerwasserbildungsraten in den Wintermonaten (insbesondere Dezember bis April) gespeist wird, die dann über das Grundwasser verzögert zum Abfluss kommen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass eine Erhöhung des Gebietsrückhaltes im Winter mit dem Ziel, im Sommer mehr Abfluss zur Verfügung zu haben, zwar insgesamt zu einer erhöhten Verdunstung führen und die Defizite in der mittleren Wasserbilanz vergrößern würde, auf der anderen Seite aber zu Entlastungen im Sommer führen könnte.

Die Abbildungen 4.16, 4.17 und 4.18 zeigen die flächenhaften Verteilungen der auf der Basis von 57.836 Elementarflächen für die Periode 1961–1990 berechneten mittleren Jahressummen des Niederschlags sowie der daraus berechneten potenziellen Verdunstung und klimatischen Wasserbilanz. Einer Diskussion dieser Karten sollen zunächst zwei allgemeine Bemerkungen vorausgeschickt werden:

- 1) Bei den flächendeckend berechneten Ergebniskarten der meteorologischen Eingangs- sowie der im Anschluss dargestellten Wasserhaushaltsgrößen handelt es sich wegen der für diese räumliche Skala verfügbaren und verwendeten Basiskarten grundsätzlich um großräumige Übersichtskarten, die Aussagen für regionale Fragestellungen nur eingeschränkt ermöglichen.
- 2) Bei den flächendifferenzierten Darstellungen der meteorologischen Primär- und Sekundärgrößen treten z.T. Strukturen auf, die auf der Flächenübertragung dieser Größen auf die Bezugsflächen (in diesem Fall Elementarflächen) beruhen. Grund dafür ist die im Rahmen des Modellierungskonzeptes notwendige Übertragung von Stationswerten in die Fläche, die unterhalb einer kritischen Anzahl berücksichtigter meteorologischer Stationen an Auflösungsgrenzen stößt. So erzeugt der verwendete Interpolationsalgorithmus (Quadrantenverfahren, siehe Kap. 2.2)

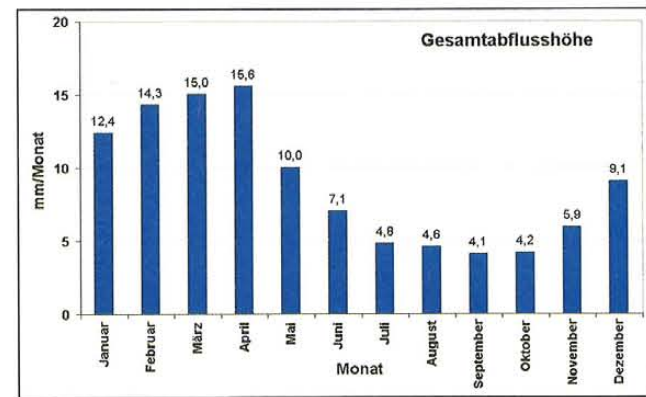
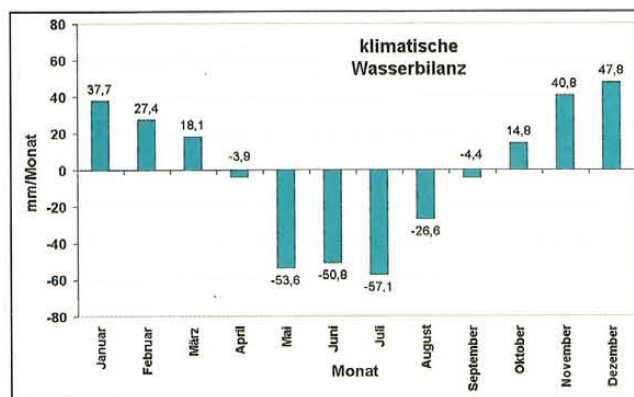
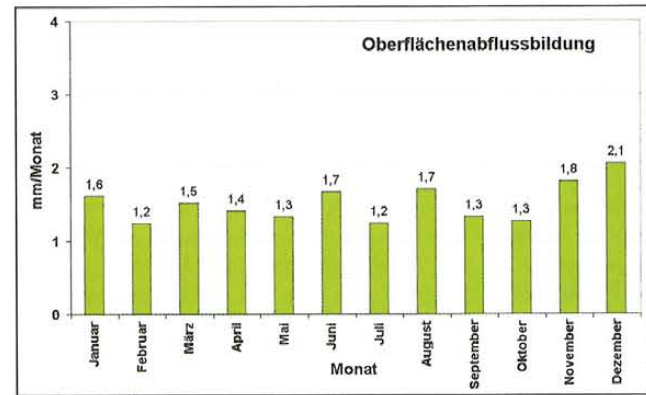
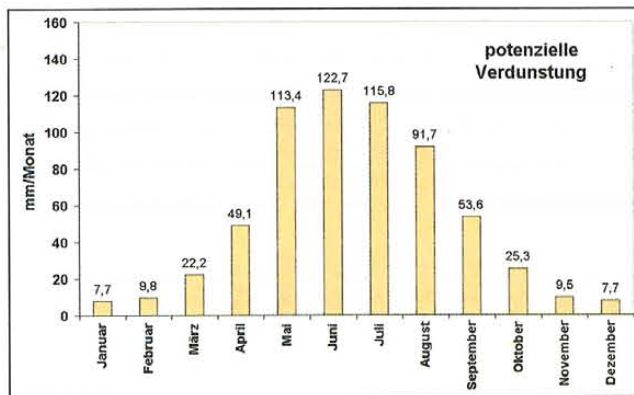
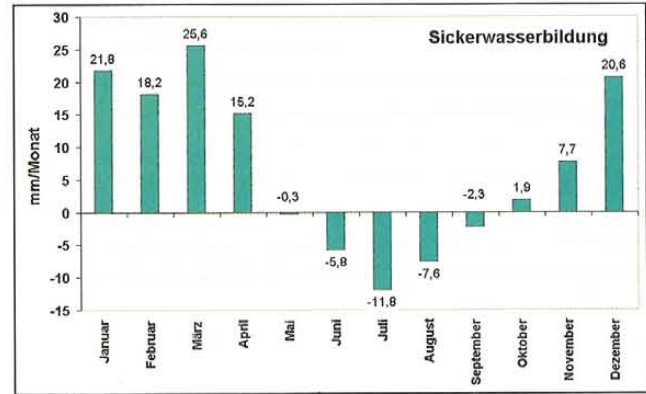
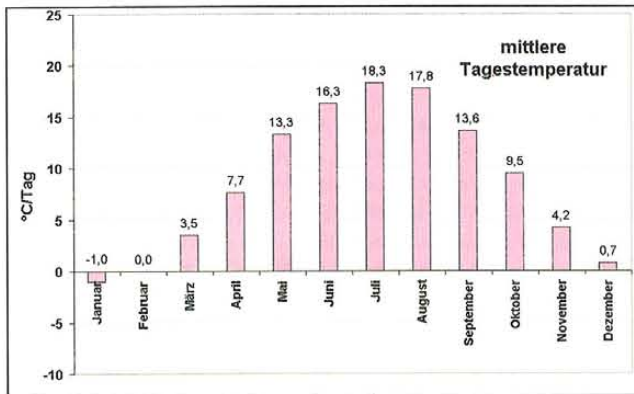
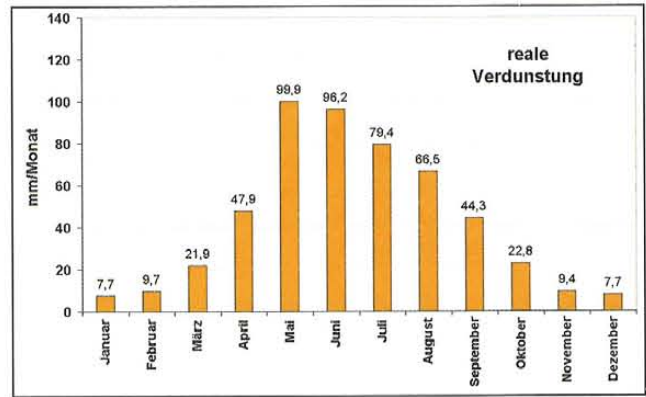
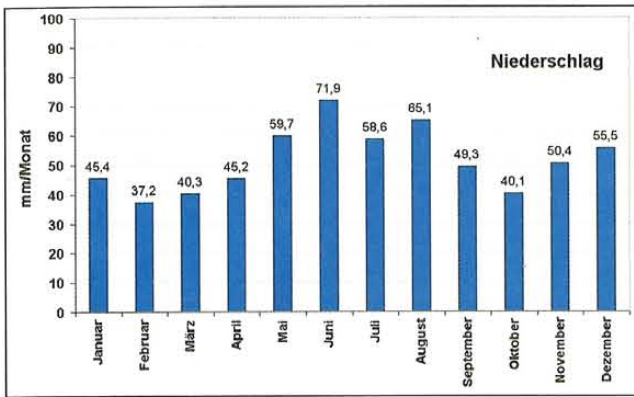


Abb. 4.14: Für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin berechnete mittlere Monatssummen meteorologischer Eingangsgrößen (Niederschlag, mittl. Tagestemperatur) und davon abgeleiteter Größen (potenzielle Verdunstung, klimatische Wasserbilanz) sowie daraus resultierende mittlere Monatssummen der realen Verdunstung, der Sickerwasserbildung, der Oberflächenabflussbildung und der Gesamtabflusshöhe für die Periode 1961–1990

geometrische Strukturen in den Gebieten, in denen besonders wenige meteorologische Stationen zur Verfügung stehen (vgl. Abb. 2.1).

Dieser Effekt würde bei Verwendung eines anderen Interpolationsverfahrens (z.B. Thiessenpolygone) noch erheblich auffälliger ausfallen, da die Anzahl dieser Polygone dann der der Klimastationen entspräche und im vorliegenden Fall zu lediglich 15 „Klimaregionen“ führen würde. Detaillierte Untersuchungen zu diesem Problem zeigen, dass im vorliegenden Fall keine nennenswerten Auswirkungen auf die berechneten Wasserhaushaltsgrößen festzustellen sind.

basis für den Monat Oktober 1986 berechneten Verteilungen des Niederschlags bei Verwendung von jeweils 15 Klimahauptstationen sowie 29 bzw. 62 Niederschlagsstationen. Deutlich wird, dass durch Berücksichtigung von 33 zusätzlichen Niederschlagsstationen (für die im Zeitraum 1961–1980 keine Zeitreihen zur Verfügung stehen) die durch eine zu geringe Stationsdichte hervorgerufenen geometrische Strukturen praktisch verschwinden und sich ein erheblich differenzierteres Bild der Niederschlagsverteilung ergibt, und zwar insbesondere dort, wo die Stationsdichte sich erhöht.

Die in Abbildung 4.17 dargestellte, nach TURC/IVANOV (TURC 1961, WENDLING & SCHELLIN 1986) berechnete potenzielle Ver-

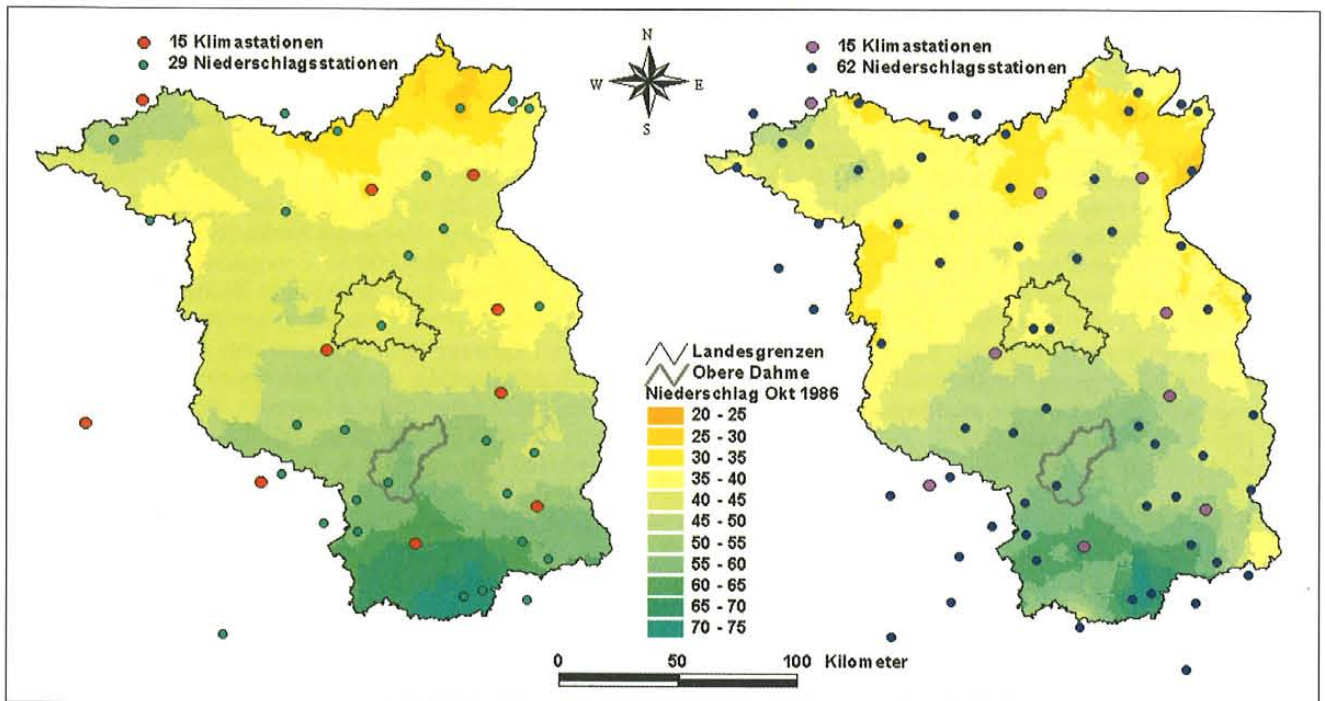


Abb. 4.15: Für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin auf der Basis von 57.836 Elementarflächen für den Oktober 1986 berechnete Monatssummen des Niederschlags unter Verwendung von 29 (links) bzw. 62 (rechts) Niederschlagsstationen sowie 15 Klimahauptstationen (einige liegen außerhalb des Darstellungsbereiches)

Die in Abbildung 4.16 dargestellte Verteilung des Niederschlags weist für das Gesamtgebiet im langjährigen Mittel der Untersuchungsperiode 1961–1990 jährliche Niederschlagssummen zwischen ca. 560 und 730 mm aus. Dabei fallen insbesondere die überdurchschnittlich hohen Niederschlagswerte im Nordwesten und Südosten sowie die niederschlagsärmeren Regionen im Nordosten und Südwesten des Landes auf. Insgesamt bestätigt sich die allgemein bekannte Tatsache, dass im Land Brandenburg (und allgemein in Ostdeutschland) mit einem langjährigen Gebietsmittelwert von etwa 619 mm im Zeitraum 1961–1990 erheblich weniger Niederschlag gefallen ist als z.B. in den alten Bundesländern. Dies hat Folgen für die Wasserverfügbarkeit in diesem Bundesland (z.B. Trinkwasserversorgung und Bewässerungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft), die durch eine seit Jahren diskutierte und durchaus für realistisch gehaltene Klimaänderung noch dramatisch verschärft werden könnten (siehe z.B. BECKER ET AL. 1996, LAHMER 1999A).

Dass sich durch eine Erhöhung der Anzahl meteorologischer Stationen eine Verbesserung der räumlichen Verteilung des Niederschlags erreichen lässt, soll in Abbildung 4.15 demonstriert werden. Gegenübergestellt sind die auf Elementarflächen-

dunstung berechnet sich aus den primären meteorologischen Eingangsgrößen mittlere Tagestemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Sonnenscheindauer. Ihre Werte bewegen sich zwischen 575 und 655 mm (bei einem Gebietsmittel von ca. 629 mm), wobei die höchsten Werte im Südosten (insbesondere bedingt durch die dort vorliegenden höheren Tagestemperaturen) und die niedrigsten im Nordwesten des Landesgebietes auftreten.

In Abbildung 4.18 ist mit der klimatischen Wasserbilanz eine meteorologische Sekundärgröße dargestellt, die als Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung definiert ist und sich somit direkt aus den in Abbildungen 4.16 und 4.17 dargestellten Karten ergibt. Die Karte weist für große Teile des Landesgebietes negative Werte aus, was als direkter Ausdruck für auftretenden „Trockenstress“ gewertet werden kann. Der auf das Gesamtgebiet bezogene mittlere Wert der klimatischen Wasserbilanz beträgt ca. -8 mm. Besonders negative Werte ergeben sich für den Nordosten und den Südwesten des Landes, hervorgerufen durch geringe Niederschlagsmengen und vergleichsweise hohe Temperaturen. Im Nordwesten und Süden dagegen führen die höheren Niederschläge zu positiven Werten.

Unter Verwendung der pro Simulationszeitschritt (Tag) interpolierten meteorologischen Eingangsgrößen wurden auf der Basis der in Tabelle 4.1 angegebenen 15 Hydrotopklassen für den Zeitraum 1961–1990 die Wasserhaushaltsgrößen reale Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gesamtabflusshöhe für das Landesgebiet berechnet. Die Abbildungen 4.19 bis 4.22 zeigen die flächenhaften Verteilungen dieser vier Wasserhaushaltsgrößen für die Länder Brandenburg und Berlin in Form mittlerer Jahressummen. Die relativ feinen Strukturen dieser Karten unterstreichen die Tatsache, dass die berechneten Werte nicht nur durch den meteorologischen Input bestimmt werden, sondern ganz wesentlich auch durch die Unterschiede in den Landnutzungs-, Vegetations- und Bodenverhältnissen.

In Abbildung 4.19 sind die auf Hydrotopklassenbasis berechneten mittleren Jahressummen der realen Verdunstung (ER) für die Periode 1961–1990 dargestellt. Die Flächenverteilung zeigt starke Korrelationen zu den Karten der zugrunde liegenden Gebietseigenschaften. So lassen sich zahlreiche Feinstrukturen auf die unterschiedliche Landnutzung zurückführen. ER weist die höchsten Werte (> 650 mm) für Wasserflächen auf (weshalb diese bei der Datenaufbereitung auch bei einer Flächengröße von weniger als 50.000 m² beibehalten wurden) und sehr hohe Werte für Feucht- und Niederungsflächen. Niedrige Verdunstungsraten von z.T. weniger als 375 mm findet man dagegen für (teil)versiegelte Flächen (Städte, Industriegebiete etc.) sowie für grundwasserferne Standorte mit hohen Versickerungsraten. Der langjährige Jahresmittelwert der Verdunstung beträgt etwa 508 mm (siehe Tab. 4.2).

In der in Abbildung 4.20 dargestellten Karte der Sickerwasserbildung (SWB) werden die ausgeprägten, an unterschiedliche Landbedeckungstypen gekoppelten Korrelationen zur Flächenverteilung der Verdunstung deutlich (hohe Werte von SWB entsprechen niedrigen Werten von ER), wie sie für nicht vorwiegend meteorologisch dominierte Untersuchungsgebiete typisch sind. So weist die Sickerwasserbildung besonders geringe (negative) Werte dort auf, wo die Verdunstungsraten hoch sind, also auf grundwassernahen Flächen sowie Feuchtflächen entlang von Flussläufen (verdunstungsintensive Zehrflächen). Hohe Neubildungsraten findet man dagegen auf grundwasserfernen Flächen und Brachland. Insgesamt ergibt sich für die Periode 1961–1990 ein Jahresmittelwert von ca. 87 mm.

Obwohl ein Großteil des Untersuchungsgebietes im langjährigen Mittel praktisch keine Oberflächenabflussbildung (RO) aufweist, zeigt die räumliche Verteilung dieser Wasserhaushaltsgröße (Abb. 4.21) für viele Flächen im Land Brandenburg starke Korrelationen zur Landnutzungs- und Grundwasserflurabstandskarte. Die Ausbildung von RO ist so stark durch die zugrundeliegende Landnutzungskarte geprägt, dass sich verschiedene Landnutzungstypen relativ einfach identifizieren lassen. So ergeben sich die höchsten Werte für (teil)versiegelte Flächen, wie z.B. Städte (Berlin und Cottbus sind deutlich zu erkennen), vergleichsweise hohe Abflussbildungsraten – insbesondere hervorgerufen durch hohe Niederschlagsraten kurzfristiger Niederschlagsereignisse – auf grundwassernahen Flächen wie Feuchtwiesen und anderen Feuchtgebieten. Die restlichen Gebiete (im Wesentlichen bewaldete, grundwasserferne und Bracheflächen) zeigen dagegen keine bzw. sehr geringe Oberflächenabflussbildung.

Die für offene Gewässer auftretenden höchsten Werte von RO sind wegen der dort nicht vorhandenen „Sickerwasser-

bildung“ nur aus Gründen der internen Prozessabbildung ausgewiesen und werden programmintern geeignet kompensiert. Zur Größenordnung von RO für (teil)versiegelte Flächen sei daran erinnert, dass für „geschlossene Bebauung“ ein mittlerer Versiegelungsgrad von 90 % und für „offene Bebauung“ ein mittlerer Versiegelungsgrad von 20 % angenommen wurde. Insgesamt ergibt sich für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin ein mittlerer Jahreswert von ca. -20 mm für diese Wasserhaushaltsgröße.

Um die Auswirkungen einer höheren räumlichen Auflösung auf die flächendifferenzierte Darstellung von Wasserhaushaltsgrößen zu demonstrieren, ist für den Fall der Oberflächenabflussbildung (sowie der nachfolgend diskutierten mittleren jährlichen Gesamtabflusshöhe) auch die separat für die Obere Dahme berechnete Karte dargestellt. Sie zeigt – analog zu den entsprechenden Karten der anderen Wasserhaushaltsgrößen – wegen der gegenüber dem Gesamtgebiet weitergehenden Unterteilung in Teileinzugsgebiete detailliertere Strukturen.

In Abbildung 4.22 schließlich ist die aus der Summe von Sickerwasserbildung SWB und Oberflächenabflussbildung RO berechnete Gesamtabflusshöhe R dargestellt. Deutlich erkennbar sind die hohen Beiträge bebauter Flächen, von Brachland sowie grundwasserferner Flächen sowie die geringen und z.T. negativen Beiträge grundwassernaher Flächen zu dieser Wasserhaushaltsgröße, die in Zusammenhang mit Abbildung 4.26 und 4.27 näher diskutiert werden. Im langjährigen Jahresmittel werden für den Gesamtabfluss des Untersuchungsgebietes 107 mm ausgewiesen (siehe Tab. 4.2).

In Ergänzung zu den mittleren Jahressummen der Gesamtabflusshöhe R sind in den Abbildungen 4.23 und 4.24 die entsprechenden Flächenverteilungen für das Sommer- und Winterhalbjahr dargestellt. Die in Abbildung 4.23 wiedergegebenen mittleren Sommerwerte betragen im langjährigen Mittel lediglich ca. 35 mm (siehe Tab. 4.4) und unterstreichen die besondere hydrologische Bedeutung der grundwassernahen Flächen für den Gesamtabfluss in Brandenburg. Sie zeigen, dass diese Flächen wegen ihrer hohen Verdunstung in den Sommermonaten als Zehrflächen wirken und deshalb z.T. stark negative Werte aufweisen. Aber auch für die übrigen Flächen weist die Karte in den Sommermonaten relativ geringe Werte auf. Lediglich stark oder moderat bebaute, urbanisierte Flächen heben sich durch überdurchschnittlich hohe R-Werte in der Karte hervor. Die entsprechenden Werte für das Winterhalbjahr (Abb. 4.24) zeigen, dass neben den urbanisierten Flächen insbesondere die grundwasserfernen Ackerflächen den Gebietsabfluss dominieren. Die im Winter stattfindende Wiederauffüllung des Grundwasserkörpers führt dazu, dass die hohen Sickerwassermengen in den Sommermonaten über den Grundwasserleiter zum Abfluss kommen.

4.5.2 Ergebnisse für die Planungsräume

Mit der Einzugsgebietskarte für das Land Brandenburg wurde vom Landesumweltamt eine Einteilung in 18 wasserwirtschaftliche Planungsräume vorgegeben, für die ebenfalls verschiedene Wasserhaushaltsgrößen getrennt bereitgestellt werden sollten. Wie bereits in Zusammenhang mit der Diskussion der Grundlagenkarten erwähnt (siehe Kap. 2), wurden die Simulationsrechnungen wegen der zu groben räumlichen Auflösung nicht auf der Basis der Planungsräume, sondern auf der Basis von Hydrotopen durchgeführt. Die Ausweisung von Wasserhaushaltsgrößen für die Planungsräume er-

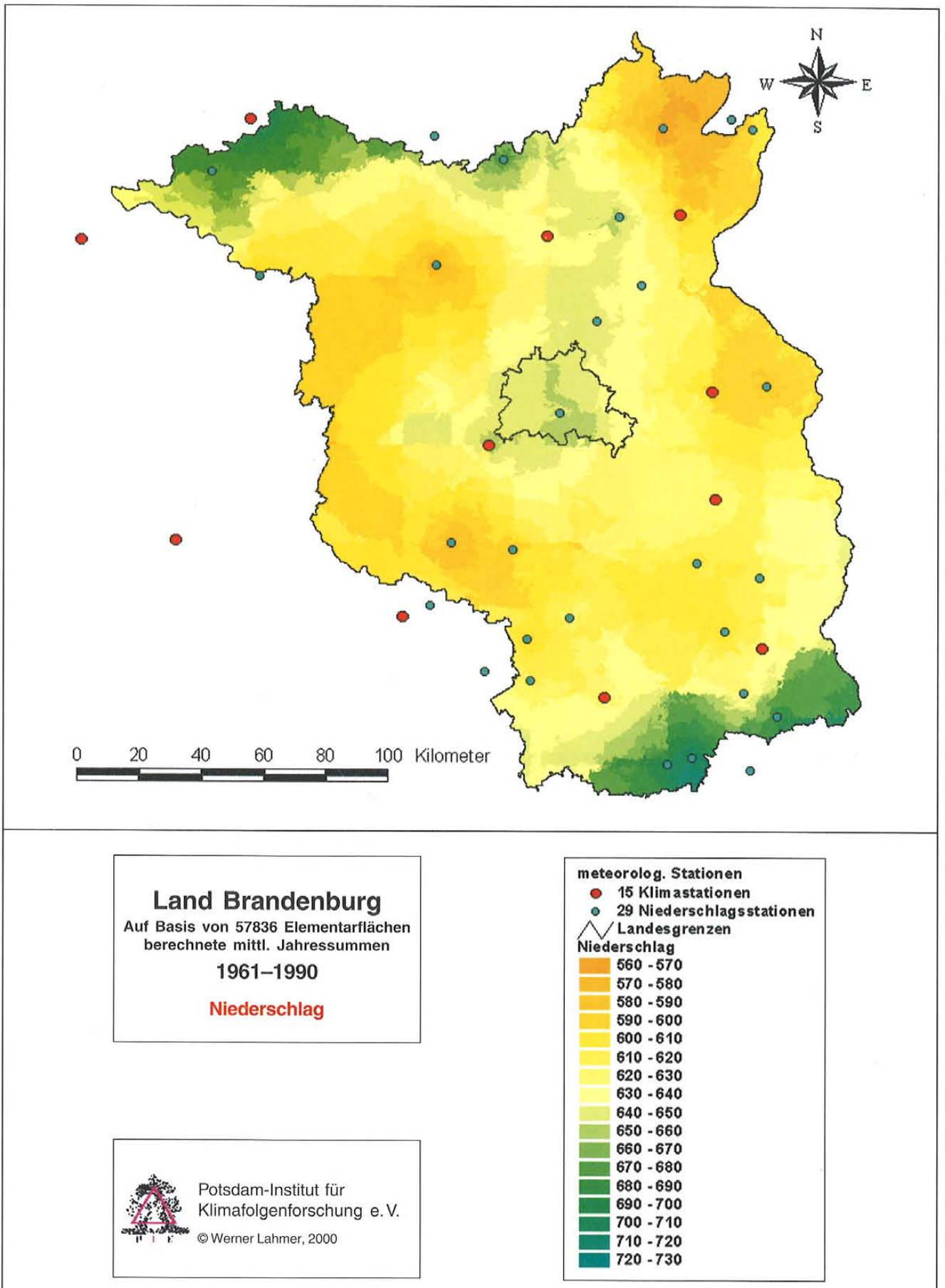


Abb. 4.16: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Jahressummen des Niederschlags PI (in mm) für die Periode 1961–1990 (einige der 15 Klima- und 29 Niederschlagsstationen liegen außerhalb des Darstellungsbereiches)

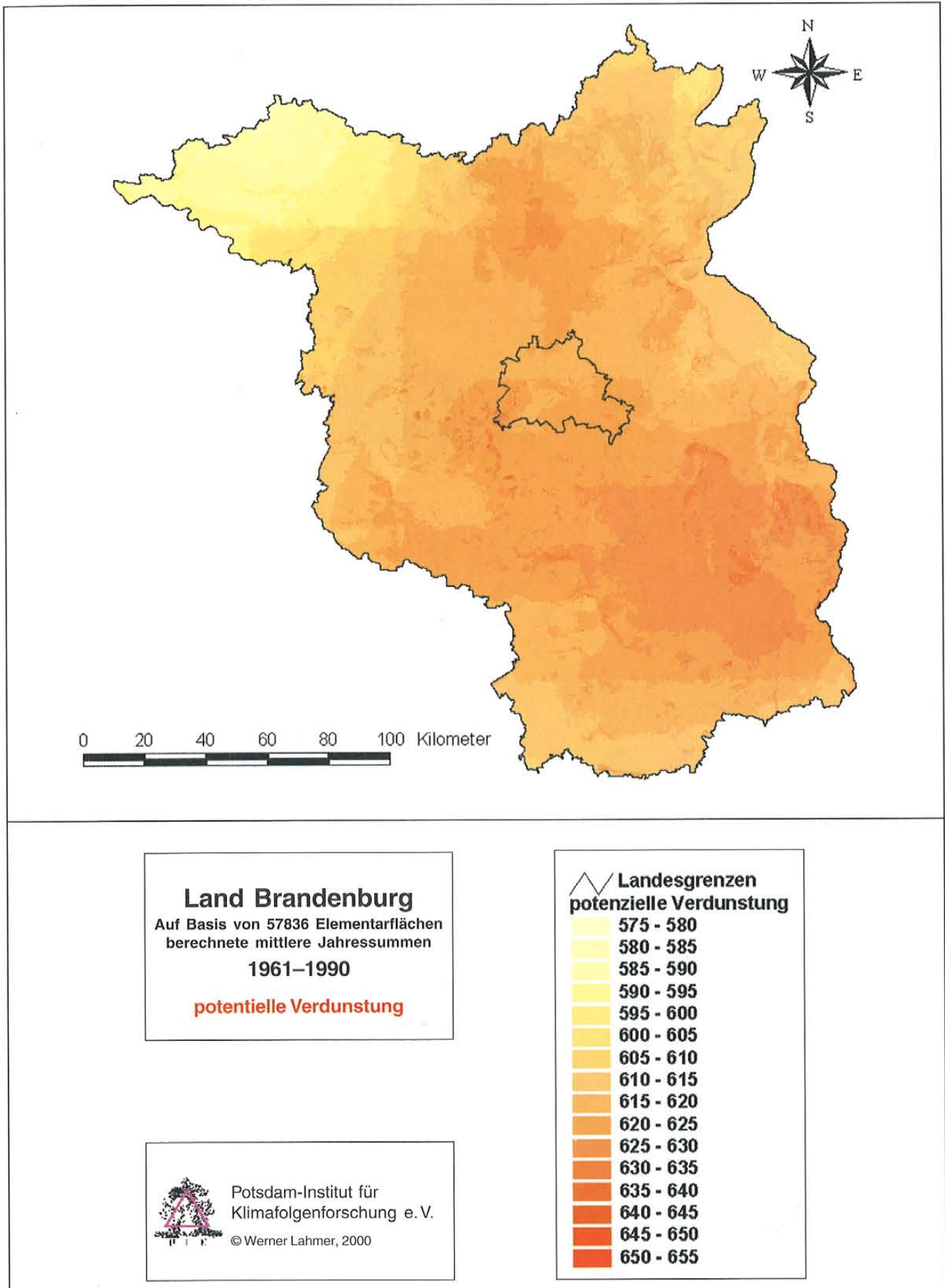


Abb. 4.17: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Jahressummen der potenziellen Verdunstung EP (in mm) für die Periode 1961–1990

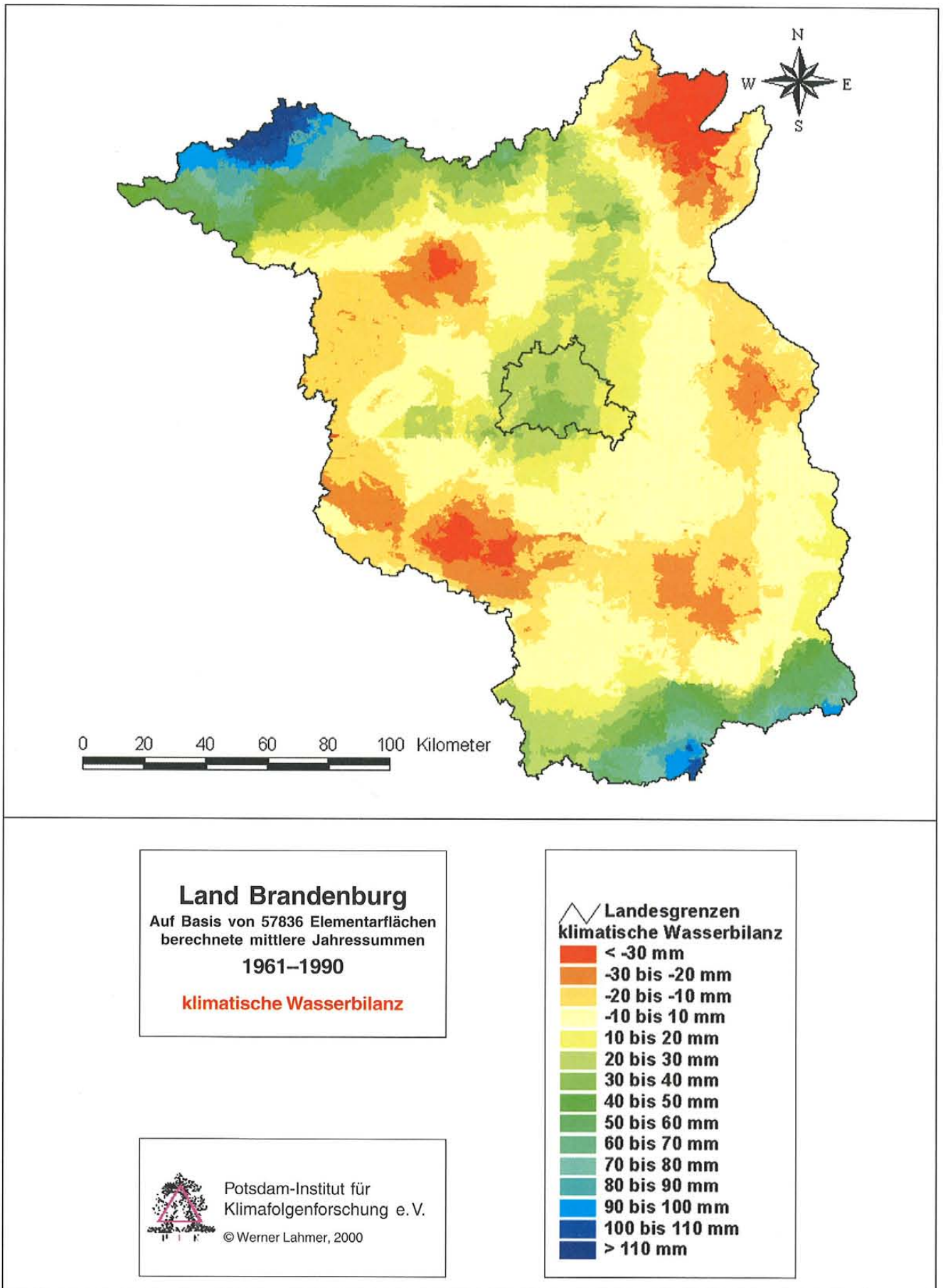


Abb. 4.18: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Jahressummen der klimatischen Wasserbilanz WB (in mm) für die Periode 1961–1990

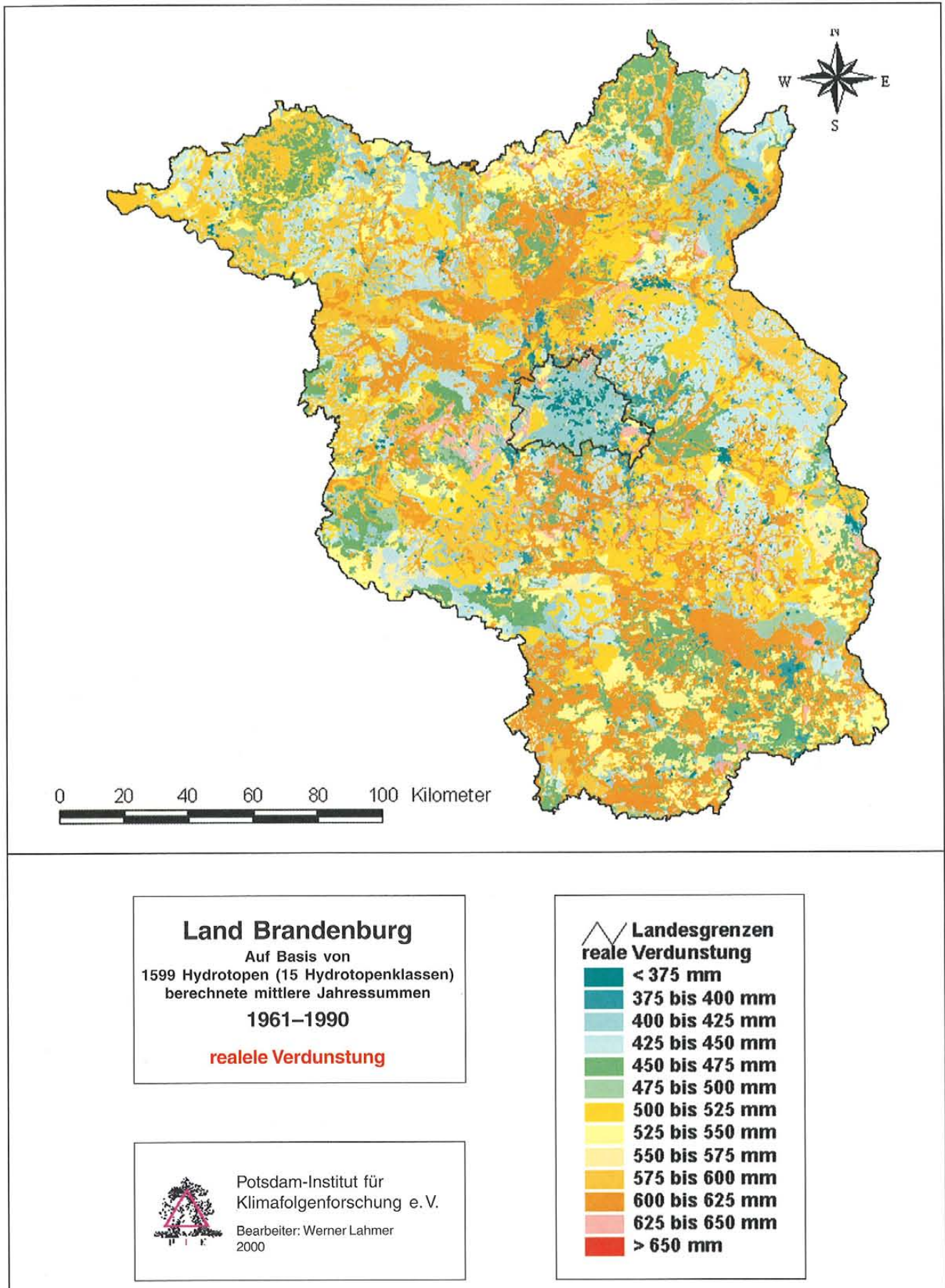


Abb. 4.19: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Jahressummen der realen Verdunstung ER (in mm) für die Periode 1961–1990

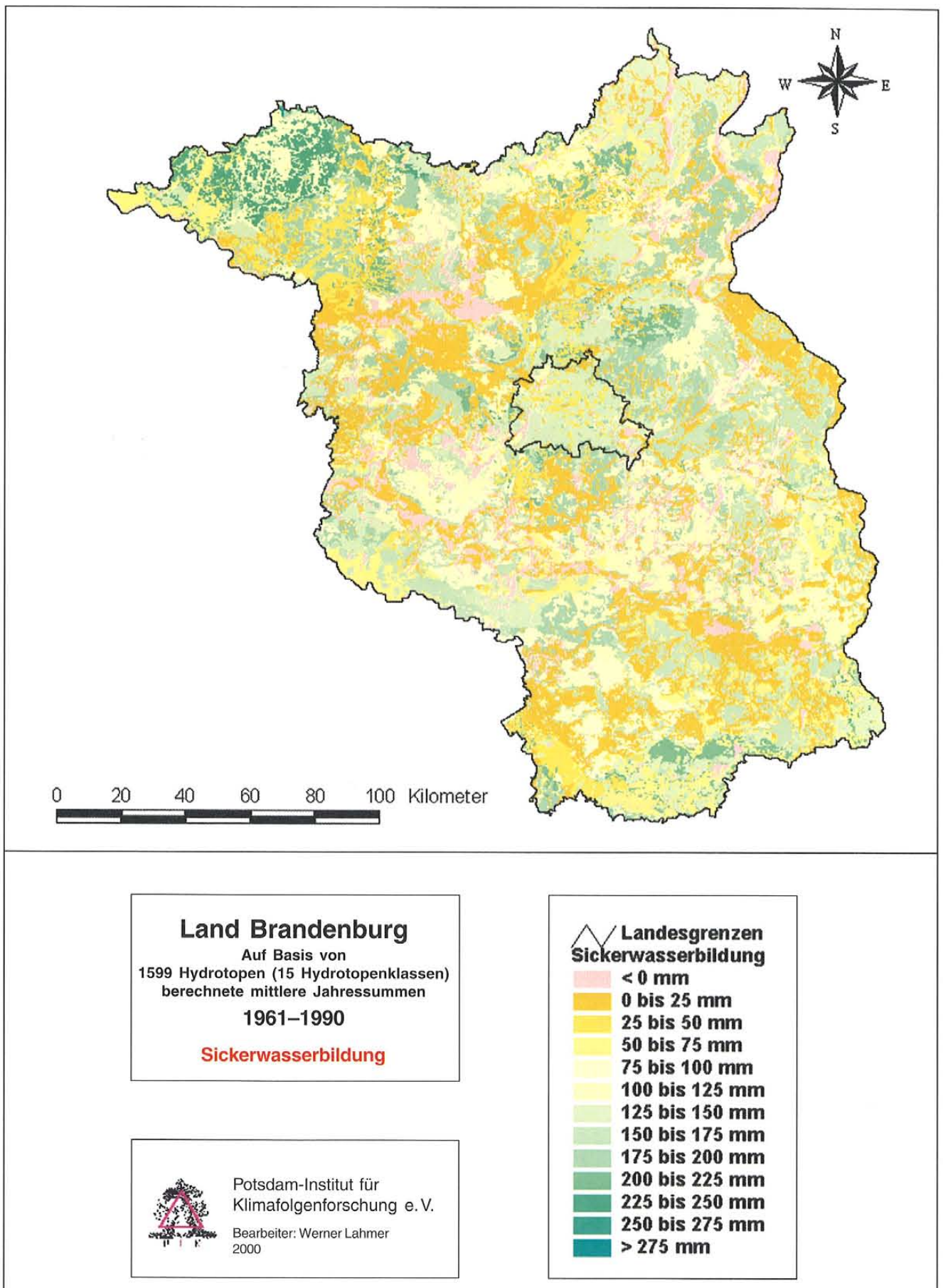


Abb. 4.20: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Jahressummen der Sickerwasserbildung SWB (in mm) für die Periode 1961–1990

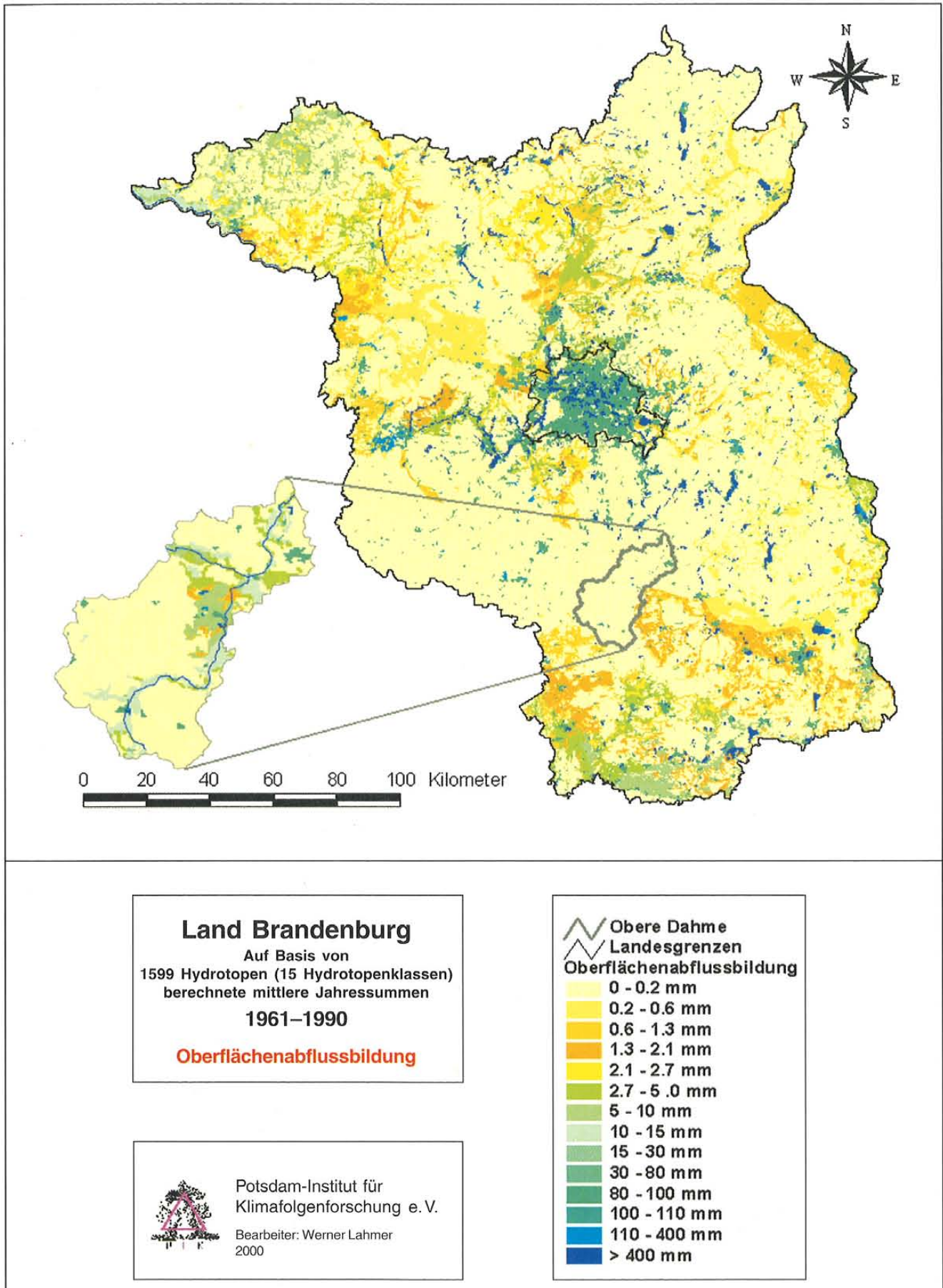


Abb. 4.21: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) und das Validierungsgebiet Obere Dahme berechnete mittlere Jahressummen der Oberflächenabflussbildung RO (in mm) für die Periode 1961–1990

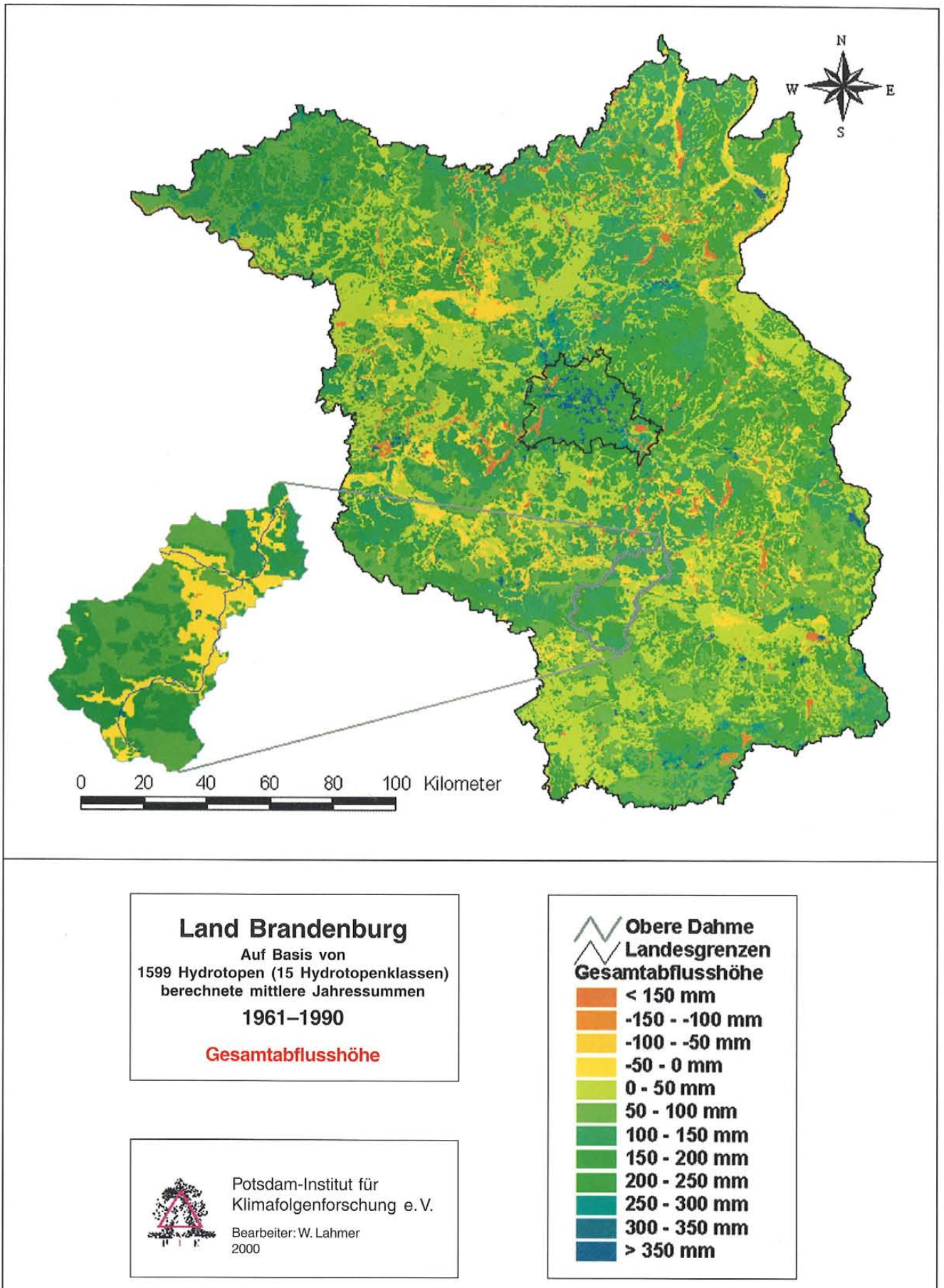


Abb. 4.22: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) und das Validierungsgebiet Obere Dahme berechnete mittlere Jahressummen der Gesamtabflusshöhe R (in mm) für die Periode 1961–1990

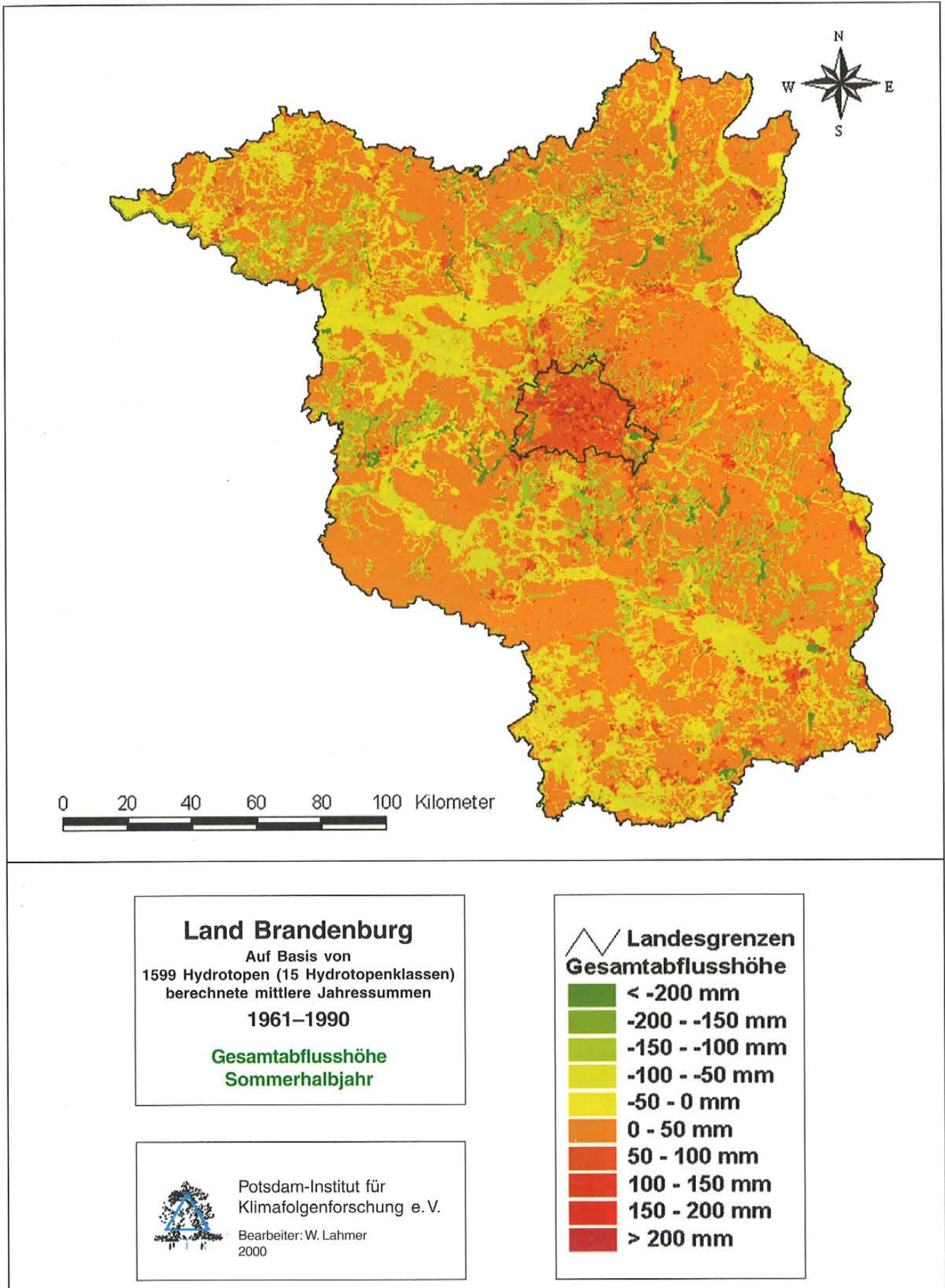


Abb. 4.23: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Sommersummen der Gesamtabflusshöhe R (in mm) für die Periode 1961–1990

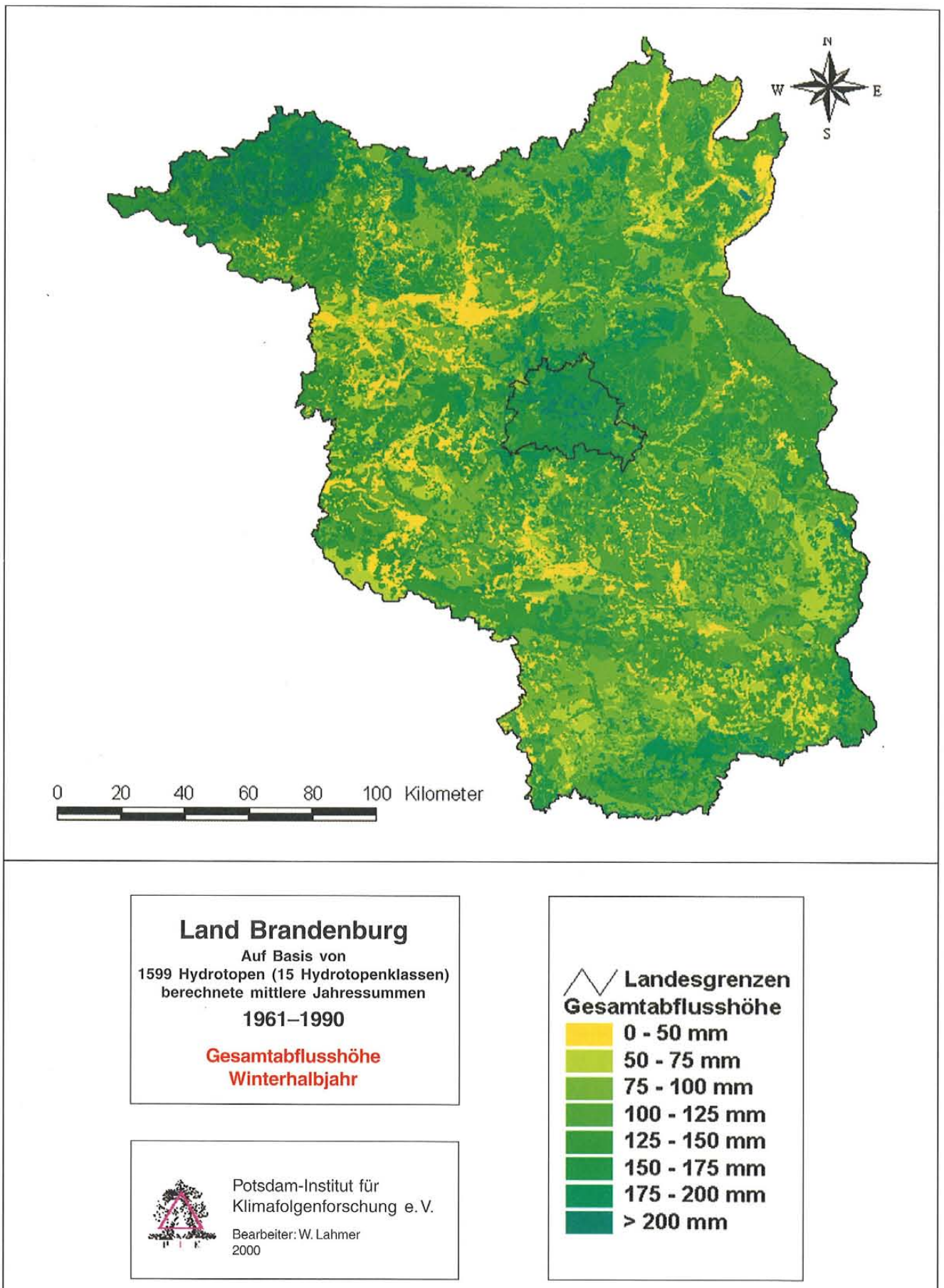


Abb. 4.24: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Wintersummen der Gesamtabflusshöhe R (in mm) für die Periode 1961–1990

Planungsraum-Nr.	Bezeichnung	Anzahl EFL	Fläche km ²	Meteorologische Größen				Wasserhaushaltsgrößen			
				PI	LT	EP	WB	ER	SWB	RO	R
1	Ucker	1.805	1.197,1	584,5	8,32	625,0	-40,4	492,2	71,2	15,1	86,4
2	Untere Spree 2	1.816	1.185,1	624,9	8,45	627,2	-2,3	472,8	131,1	18,8	149,9
3	Untere Spree 1	2.907	1.613,2	620,0	8,67	639,0	-19,0	519,1	84,9	12,2	97,1
4	Untere Oder	1.882	1.276,0	583,0	8,34	621,4	-38,4	482,7	84,2	12,7	97,4
5	Plane - Buckau	1.653	1.219,3	596,4	8,76	628,2	-31,8	501,1	93,0	2,1	95,5
6	Neiße	1.042	589,6	640,7	8,77	635,5	5,2	546,6	81,4	10,6	91,9
7	Finowkanal	1.257	719,6	639,8	8,44	629,7	10,1	501,5	110,3	22,6	132,8
8	Stepenitz	3.776	1.924,4	648,1	8,31	596,4	51,7	514,1	119,5	11,9	131,4
9	Schwarze Elster	5.702	2.858,6	633,2	8,55	630,9	2,3	540,7	76,7	13,2	90,0
10	Mittlere Spree	4.655	2.389,1	616,7	8,82	639,6	-22,8	529,3	71,2	13,7	84,9
11	Rhin	3.890	1.781,6	573,8	8,51	627,5	-53,8	502,5	51,6	14,4	66,3
12	Dosse - Jäglitz	3.051	1.468,5	628,7	8,32	604,2	24,5	502,3	117,7	7,3	125,0
13	Untere Havel	6.494	2.732,3	621,6	8,62	629,5	-7,9	533,2	55,7	25,0	80,7
14	Nuthe	3.731	1.910,8	604,2	8,71	635,3	-31,1	504,9	89,8	8,4	98,5
15	Dahme	4.068	2.111,9	628,7	8,71	636,8	-8,1	522,0	79,1	21,0	100,0
16	Obere Havel	5.267	2.541,5	635,6	8,39	639,2	-3,5	533,0	71,9	23,6	95,6
17	Alte Oder/Oderbruch	1.793	1.458,0	597,8	8,45	623,9	-26,1	507,5	81,0	7,7	88,7
18	Obere Oder	1.181	685,6	625,0	8,49	631,7	-6,7	510,6	92,2	19,4	111,7
0	Berlin	1.866	891,6	652,4	8,59	633,7	18,8	432,3	83,7	125,0	208,6
Mittelwert	Brandenburg	55.970	29.662,0	616,8	8,53	627,8	-11,0	512,0	86,8	14,4	101,3
Mittelwert	Brandenburg + Berlin	57.836	30.553,6	618,7	8,54	628,1	-9,4	507,8	86,6	20,2	107,0

Tab. 4.3: Überblick über die für die wasserwirtschaftlichen Planungsräume des Untersuchungsgebietes (Länder Brandenburg und Berlin) in der Periode 1961–1990 berechneten mittleren Jahressummen meteorologischer Eingangs- und simulierter Wasserhaushaltsgrößen (in mm/Jahr bzw. °C für LT)

PI Niederschlag
 LT mittlere Tagestemperatur
 EP potenzielle Verdunstung
 WB klimatische Wasserbilanz
 ER Verdunstung
 SWB Sickerwasserbildung
 RO Oberflächenabflussbildung
 R Gesamtabflusshöhe

Planungsraum-Nr.	Bezeichnung	Anzahl EFL	Fläche km ²	Meteorologische Größen				Wasserhaushaltsgrößen			
				PI	LT	EP	WB	ER	SWB	RO	R
1	Ucker	1.805	1.197,1	341,7	14,33	523,2	-181,4	391,0	-20,0	7,6	27,8
2	Untere Spree 2	1.816	1.185,1	348,7	14,54	524,5	-175,8	373,0	-2,1	9,0	53,3
3	Untere Spree 1	2.907	1.613,2	347,1	14,83	530,8	-183,8	412,2	-26,9	5,8	34,8
4	Untere Oder	1.882	1.276,0	337,7	14,38	520,9	-183,2	384,3	-7,8	6,3	35,0
5	Plane - Buckau	1.653	1.219,3	325,2	14,75	519,0	-193,9	392,8	-10,7	0,9	39,3
6	Neiße	1.042	589,6	365,5	14,89	524,5	-159,0	436,8	-25,7	5,1	30,7
7	Finowkanal	1.257	719,6	352,8	14,51	526,1	-173,3	399,6	-16,3	10,8	44,3
8	Stepenitz	3.776	1.924,4	349,6	14,11	497,5	-148,0	415,8	-36,4	4,9	40,9
9	Schwarze Elster	5.702	2.858,6	358,1	14,51	521,2	-163,1	432,5	-26,8	6,4	31,8
10	Mittlere Spree	4.655	2.389,1	355,5	14,92	528,1	-172,6	419,6	-26,4	6,9	30,1
11	Rhin	3.890	1.781,6	316,7	14,51	521,8	-205,2	398,0	-28,0	6,8	18,8
12	Dosse - Jäglitz	3.051	1.468,5	341,1	14,15	504,4	-163,3	403,7	-21,6	3,1	43,9
13	Untere Havel	6.494	2.732,3	336,4	14,65	522,6	-186,1	428,1	-39,4	10,8	19,7
14	Nuthe	3.731	1.910,8	333,8	14,79	526,5	-192,7	398,2	-15,3	4,0	39,9
15	Dahme	4.068	2.111,9	351,7	14,80	528,0	-176,3	414,7	-31,8	9,8	29,5
16	Obere Havel	5.267	2.541,5	349,8	14,42	532,8	-183,0	428,0	-39,4	11,1	28,3
17	Alte Oder/Oderbruch	1.793	1.458,0	337,7	14,55	522,2	-184,5	406,5	-30,3	3,6	30,3
18	Obere Oder	1.181	685,6	351,3	14,64	526,7	-175,4	407,9	-14,8	9,3	34,2
0	Berlin	1.866	891,6	359,7	14,68	527,9	-168,2	341,5	-24,8	60,2	55,0
Mittelwert	Brandenburg	55.970	29.662,0	344,5	14,57	522,3	-177,8	407,9	-23,3	6,8	34,0
Mittelwert	Brandenburg + Berlin	57.836	30.553,6	345,3	14,58	522,6	-177,3	404,4	-23,4	9,6	35,1

Tab. 4.4: Überblick über die für die wasserwirtschaftlichen Planungsräume des Untersuchungsgebietes (Länder Brandenburg und Berlin) in der Periode 1961–1990 berechneten langjährigen Mittelwerte meteorologischer Eingangs- und simulierter Wasserhaushaltsgrößen der Sommermonate

Dimensionen und Legende analog Tabelle 4.3

Planungsraum-Nr.	Bezeichnung	Anzahl EFL	Fläche km ²	Meteorologische Größen				Wasserhaushaltsgrößen			
				PI	LT	EP	WB	ER	SWB	RO	R
1	Ucker	1.805	1.197,1	242,8	2,28	101,8	141,0	101,2	91,2	7,4	58,8
2	Untere Spree 2	1.816	1.185,1	276,2	2,33	102,8	173,5	99,8	133,2	9,8	96,9
3	Untere Spree 1	2.907	1.613,2	273,0	2,48	108,2	164,8	107,0	111,7	6,4	62,5
4	Untere Oder	1.882	1.276,0	245,3	2,25	100,5	144,7	98,4	92,0	6,5	62,5
5	Plane - Buckau	1.653	1.219,3	271,2	2,74	109,1	162,1	108,3	103,7	1,2	56,4
6	Neiße	1.042	589,6	275,2	2,61	111,0	164,2	109,9	107,0	5,5	61,4
7	Finowkanal	1.257	719,6	287,0	2,33	103,6	183,4	101,9	126,6	11,8	88,8
8	Stepenitz	3.776	1.924,4	298,5	2,47	98,9	199,7	98,3	155,9	7,0	90,7
9	Schwarze Elster	5.702	2.858,6	275,1	2,55	109,7	165,4	108,3	103,5	6,8	58,4
10	Mittlere Spree	4.655	2.389,1	261,2	2,69	111,5	149,7	109,8	97,6	6,8	55,0
11	Rhin	3.890	1.781,6	257,1	2,47	105,7	151,4	104,4	79,6	7,6	47,6
12	Dosse - Jäglitz	3.051	1.468,5	287,6	2,44	99,8	187,8	98,6	139,3	4,3	81,4
13	Untere Havel	6.494	2.732,3	285,2	2,55	106,9	178,3	105,1	95,1	14,2	61,2
14	Nuthe	3.731	1.910,8	270,3	2,60	108,8	161,5	106,8	105,2	4,4	58,7
15	Dahme	4.068	2.111,9	277,0	2,58	108,9	168,1	107,3	110,9	11,2	70,7
16	Obere Havel	5.267	2.541,5	285,8	2,33	106,3	179,5	105,0	111,2	12,6	67,5
17	Alte Oder/Oderbruch	1.793	1.458,0	260,1	2,30	101,7	158,4	100,9	111,3	4,1	58,6
18	Obere Oder	1.181	685,6	273,7	2,31	105,0	168,7	102,7	107,0	10,1	77,7
0	Berlin	1.866	891,6	292,7	2,45	105,7	187,0	90,8	108,6	64,8	154,1
Mittelwert	Brandenburg	55.970	29.662,0	272,4	2,46	105,6	166,8	104,1	110,1	7,6	67,5
Mittelwert	Brandenburg + Berlin	57.836	30.553,6	273,4	2,46	105,6	167,9	103,4	110,0	10,6	72,0

Tab. 4.5: Überblick über die für die wasserwirtschaftlichen Planungsräume des Untersuchungsgebietes (Länder Brandenburg und Berlin) in der Periode 1961–1990 berechneten langjährigen Mittelwerte meteorologischer Eingangs- und simulierter Wasserhaushaltsgrößen der Wintermonate

Dimensionen und Legende analog Tabelle 4.3

folgte deshalb durch Mittelwertbildung über die jeweils einen Planungsraum bildenden Hydrotope.

Tabelle 4.3 gibt einen Überblick über die für die wasserwirtschaftlichen Planungsräume des Landes Brandenburg in der Periode 1961–1990 berechneten mittleren Jahressummen meteorologischer Eingangs- und simulierter Wasserhaushaltsgrößen. Neben der Fläche der Planungsräume ist auch die Anzahl der Elementarflächen angegeben, die in den Planungsräumen liegenden Hydrotope bilden. Wie in Zusammenhang mit Tabelle 4.2 diskutiert, werden auch im vorliegenden Fall die Werte für die Gesamtabflusshöhe R im langjährigen Mittel sehr gut durch die Summe von Sickerwasserbildung (SWB) und Oberflächenabflussbildung (RO) wiedergegeben. Auch hier führt die nach $PI-ER-R \pm \Delta S = 0$ berechnete Wasserhaushaltsbilanz für das Gesamtgebiet (Brandenburg/Berlin) im 30-jährigen Mittel zu einem Wert von $\Delta S = 3,9 \text{ mm}$, der Ausdruck von Speicheränderungen im Gebiet zwischen dem Anfangs- und Endzustand der Simulationsperiode ist. Demgegenüber zeigt die Differenz von Niederschlag PI und Verdunstung ER für die einzelnen Planungsräume Abweichungen von bis zu 10 % gegenüber den berechneten R-Werten, weshalb diese Differenz nur näherungsweise dem auf die Einzugsgebietsfläche bezogenen Abfluss von Fließgewässern gleichgesetzt werden kann.

In den Tabellen 4.4 und 4.5 sind die für die Planungsräume in der Periode 1961–1990 berechneten langjährigen Mittelwerte für das Sommer- (Monate Mai bis Oktober) bzw. das Winterhalbjahr (Monate November bis April) getrennt aufgeführt.

In Abbildung 4.25 sind die mittleren Jahres-, Sommer- und Wintersummen der Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung, Sickerwasserbildung und Gesamtabflusshöhe für die einzelnen Planungsräume sowie die Regionen Brandenburg, Berlin und Brandenburg/Berlin dargestellt.

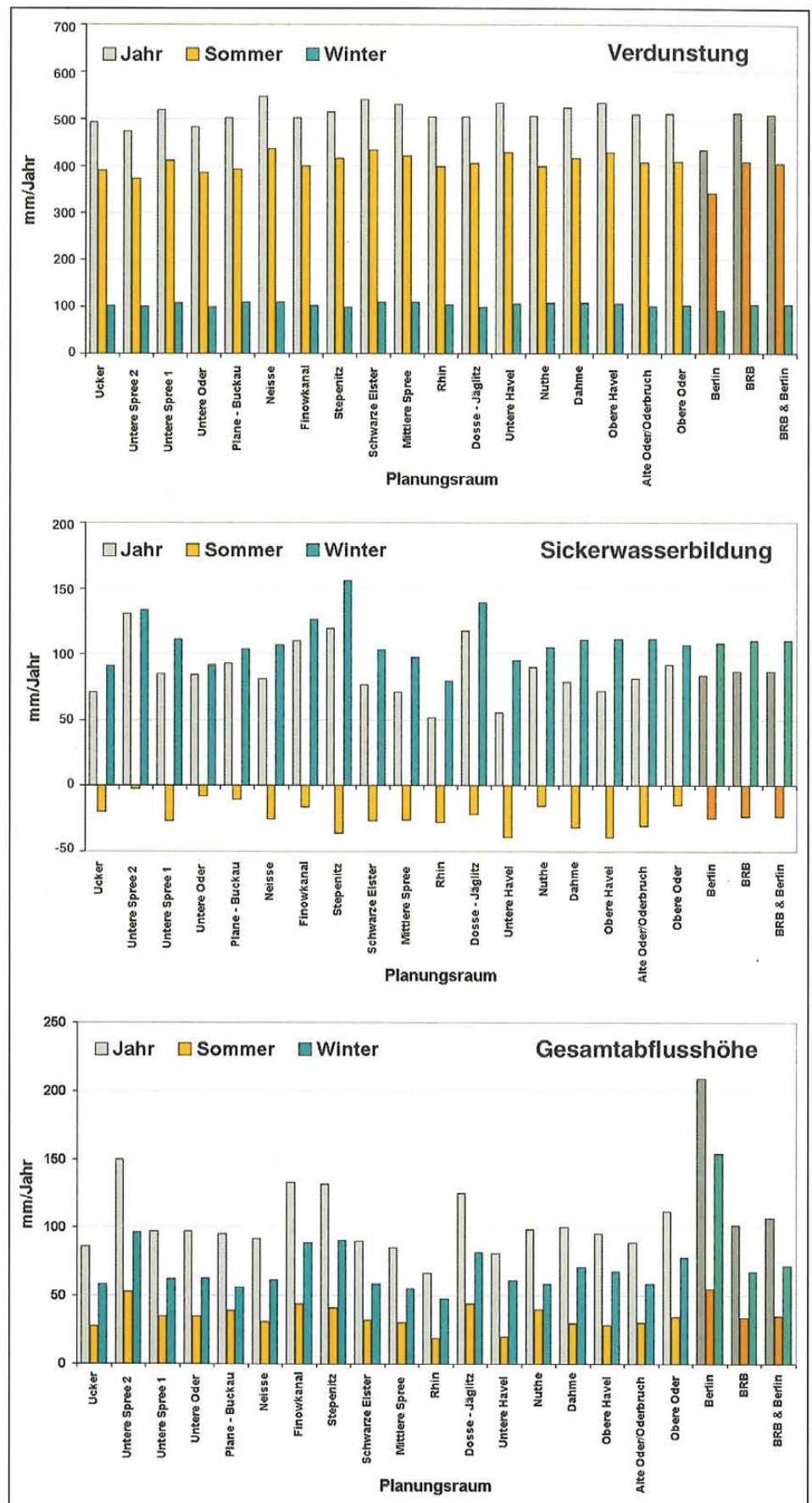


Abb. 4.25: Mittlere Jahres-, Sommer- und Wintersummen der Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung, Sickerwasserbildung und Gesamtabflusshöhe für die 18 Planungsräume sowie die Regionen Brandenburg, Berlin und Brandenburg/Berlin

4.5.3 Ergebnisse für verschiedene Hydrotopklassen

Um die Frage zu beantworten, welche Flächen im Land Brandenburg die größte Bedeutung für die Grundwasserneubildung und -zehrung haben oder allgemein besonders stark zu einzelnen Wasserhaushaltskomponenten beitragen, wurden die in Tabelle 4.2 angegebenen, alle Hydrotopklassen einschließenden Wasserhaushaltsgrößen weiter differenziert. Betrachtet man die Wasserhaushaltsgrößen getrennt für die den Simulationsrechnungen zugrunde gelegten 14 Hydrotopklassen (Wasserflächen wurden wegen ihrer Sonderrolle weggelassen), so lassen sich Rückschlüsse auf Teilflächen im Untersuchungsgebiet ziehen, die verschiedene Teilprozesse des Wasserhaushaltes dominieren. Zu beachten ist dabei allerdings, dass die Hydrotopklassen sehr unterschiedliche Flächenanteile besitzen (siehe Tab. 4.1) und sehr unterschiedlich im Untersuchungsgebiet verteilt sein können (siehe Abb. 4.5). So findet man einige Klassen (wie z.B. Ackerland und Hochwald) mehr oder weniger gleichmäßig über das Landesgebiet verteilt vor, wohingegen z.B. die Klasse "bebaut" eine sehr heterogene räumliche Verteilung zeigt. Folge davon ist, dass die für einzelne Hydrotopklassen ermittelten mittleren Jahressummen der Wasserhaushaltsgrößen sehr stark von den meteorologischen Bedingungen dominiert sein können und/oder einen großen Wertebereich aufweisen. Dieser verdeutlicht damit die grundsätzliche Problematik bei der Mittelwertbildung von Eigenschaften heterogener Einheiten.

Abbildung 4.26 zeigt, wie die ausgegliederten Hydrotopklassen in der Gesamtperiode 1961–1990 zu den Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung, Oberfläch-

abflussbildung sowie Gesamtabflusshöhe beitragen. Dargestellt sind die mittleren Jahressummen sowie als „Fehlerbalken“ die im Gesamtgebiet auftretenden Minimal- und Maximalwerte. Verdunstung tritt auf allen Hydrotopklassen auf, ist jedoch besonders gering für stark bebaute Flächen und besonders hoch für offene Wasserflächen (nicht dargestellt; dort entspricht sie der potenziellen Verdunstung). Diese Flächen spielen deshalb trotz ihres geringen Flächenanteils (ca. 0,8 % bzw. 2,1 %) eine wichtige Rolle für den Gesamtwasserhaushalt. Grundwasserferne Flächen zeigen grundsätzlich geringere Verdunstungswerte als grundwassernahe Flächen, für die die Verdunstungsraten wegen der in Trockenperioden ausgeprägten Gebietszehrung besonders hoch sind.

Im Hinblick auf eine Verbesserung der insbesondere aufgrund der klimatischen Bedingungen bereits angespannten Wasserbilanz im Land Brandenburg (nach Tab. 4.2 beträgt die klimatische Wasserbilanz für die Periode 1961–1990 im Mittel etwa - 9 mm/Jahr) spielt auch das Verhältnis Wald-Offenlandschaft-Versiegelung eine wichtige Rolle. So ist die mittlere jährliche Verdunstung für bewaldete Gebiete nach Abbildung 4.26 grundsätzlich höher als für vergleichbare, nicht bewaldete Gebiete, da die Transpiration einen wesentlichen Beitrag zur aktuellen Verdunstung liefert. Im Hinblick auf die Stabilisierung oder Verbesserung der Wasserhaushaltsbilanz für Brandenburg erscheint deshalb unter den gegebenen klimatischen Bedingungen eine Erhöhung des Waldanteils durch Aufforstungsmaßnahmen unangebracht, auch wenn dies unter dem Aspekt des Hochwasserschutzes in einigen Teilregionen durchaus wünschenswert erscheint (z.B. Stepenitz) (LAHMER & BECKER 1998A).

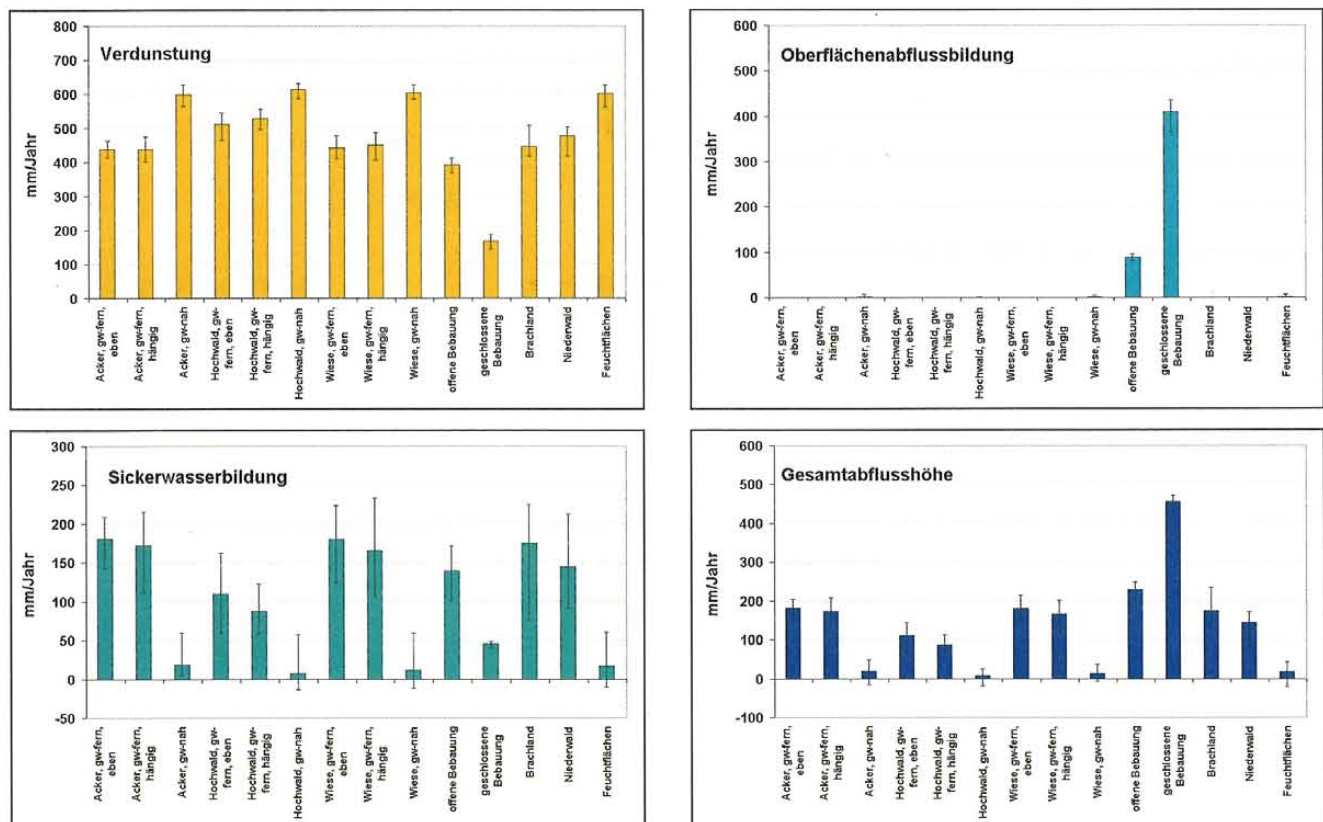


Abb. 4.26: Mittlere Jahressummen (Gesamtperiode 1961–1990) von Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gesamtabflusshöhe für die im Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin definierten Hydrotopklassen. Die im Gesamtgebiet auftretenden Minimal- und Maximalwerte sind als „Fehlerbalken“ angegeben

Die in Abbildung 4.26 ebenfalls dargestellten mittleren Jahressummen der Sickerwasserbildung zeigen für grundwasserferne Flächen durchweg die höchsten Werte, für grundwassernahe und Feuchtfächen dagegen wegen der Gebietszehrung in Trockenperioden sehr geringe (oder sogar negative) Werte. Auf stark bebauten Flächen tritt erwartungsgemäß nur wenig Sickerwasserbildung auf. Herausragende Bedeutung für die Grundwasserneubildung (und damit für einen Mindestdurchfluss in den Flüssen Brandenburgs und die Sicherung der Trinkwasserversorgung) haben also die grundwasserfernen Flächen, auf denen es wegen der raschen Versickerung des Niederschlags zu hohen Grundwasserneubildungs- und relativ geringen Verdunstungsraten kommt. Demgegenüber stellen grundwassernahe Flächen (wie z.B. Feuchtwiesen und Uferandstreifen) Zehrgebiete dar, die in Trockenperioden der Umgebung Feuchtigkeit entziehen und letztendlich zu der geringen Sickerwassermenge von ca. 87 mm/Jahr für den gesamten Untersuchungsraum führen. Auf der anderen Seite stellen diese Flächen i.d.R. besonders schützenswerte Biotope mit einem hohen Landschafts- und Erholungswert dar, deren Flächenanteil nicht weiter verringert werden sollte.

Die höchsten Werte der Oberflächenabflussbildung treten nach Abbildung 4.26 für stark und mäßig bebaute urbanisierte Flächen auf (wo neben der geringen Versickerung lediglich ein Verdunstungsverlust während des Abflusses auftritt). Grundwasserferne Flächen sowie die nicht nach dem Grundwasserflurabstand differenzierten Klassen Brachland und Niederwald weisen wegen des hohen Bodenversickerungsvermögens keine Oberflächenabflussbildung auf, wohingegen für grundwassernahe Flächen z.T. Werte ungleich Null auftreten können (im Wesentlichen hervorgerufen durch Stark-

niederschlag auf gesättigtem Boden). Negative Einflüsse auf diese Wasserhaushaltskomponente würden sich also im Wesentlichen aus einer Erhöhung des Anteils versiegelter Flächen ergeben, auf denen Niederschlag in seiner Höhe mehr oder weniger unverändert entweder in unversiegelte Umgebungsflächen oder in die Kanalisation abfließt. Insbesondere der letztgenannte Anteil, der in kurzer Zeit den Vorfluter erreicht, ist für den Landschaftswasserhaushalt (insbesondere die Grundwasserneubildung) mehr oder weniger „verloren“ und sollte deshalb möglichst gering gehalten werden. Im Rahmen der flächenmäßigen Erweiterung versiegelter Flächen (Siedlungen, Städte, Flughäfen usw.) sollte deshalb darauf geachtet werden, die regionale Sickerwasserbildung durch eine „aufgelockerte“ Bebauung und Maßnahmen der Niederschlagswasser-Versickerung soweit möglich nicht zu stark zu beeinträchtigen.

Die höchsten Werte der Gesamtabflusshöhe liefern nach Abbildung 4.26 bebaute Flächen, Brachland und grundwasserferne Flächen unterschiedlicher Nutzung. Demgegenüber tragen grundwassernahe Flächen aufgrund ihres hohen Verdunstungspotentials erheblich geringer zum Gesamtabfluss des Untersuchungsgebietes bei.

Bei der Interpretation von Abbildung 4.26 ist allerdings zu beachten, dass es sich um relative Beiträge der Hydrotopklassen zu den dargestellten Wasserhaushaltsgrößen handelt. Die absoluten Werte, die sich durch die Berücksichtigung der entsprechenden Flächenanteile am Gesamtgebiet ergeben, sind in Abbildung 4.27 dargestellt. Danach dominieren in Brandenburg/Berlin grundwassernahe Ackerflächen mit 22,4 % die Gebietsverdunstung, gefolgt von grundwasserfernem ebenem Hochwald (18,5 %), grundwasserfernen ebenen Ackerflächen

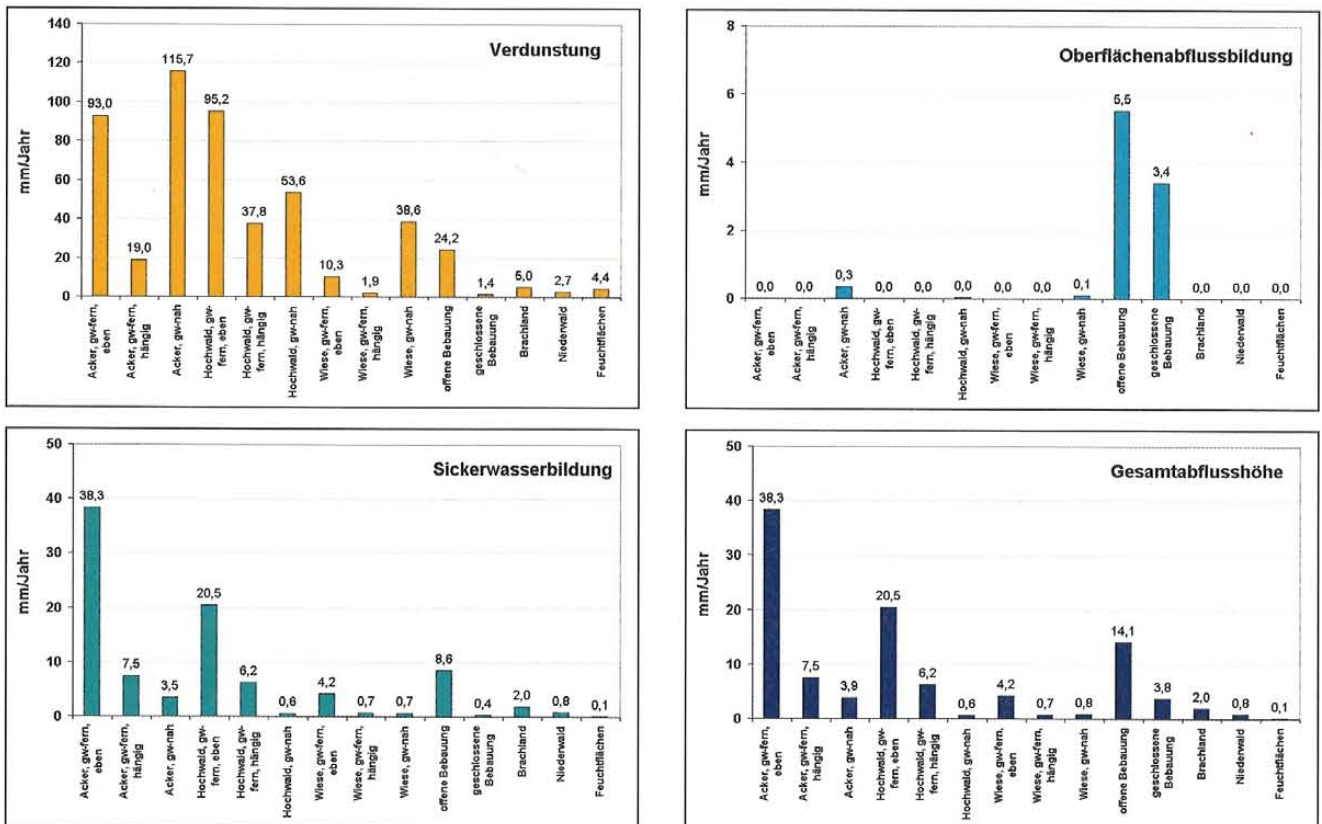


Abb. 4.27: Absolute Beiträge der im Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin definierten Hydrotopklassen zu den mittleren Jahressummen (Gesamtperiode 1961–1990) von Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gesamtabflusshöhe

(18,0 %) sowie grundwassernahem Hochwald (10,4 %). Die höchsten Beiträge zur Sickerwasserbildung liefern grundwasserferne ebene Ackerflächen (47,2 %), gefolgt von grundwasserfernem ebenem Hochwald (25,2 %). Die Oberflächenabflussbildung wird fast ausschließlich von den stark oder schwach

urbanisierten Flächen gespeist. Die Gesamtabflusshöhe des Untersuchungsgebietes schließlich wird im Wesentlichen durch grundwasserferne ebene Ackerflächen (38,6 %), grundwasserfernen ebenen Hochwald (20,6 %) sowie offene Bebauung (14,2 %) bestimmt.

5 Vergleich der angewandten Modelle und Ergebnisse

Wie in Kapitel 2 erwähnt, wurden die Modellierungsrechnungen mit den hydrologischen Modellsystemen ABIMO und ARC/EGMO unter Verwendung identischer Basisdaten

durchgeführt. Dennoch liefern die Modelle z.T. sowohl unterschiedliche Berechnungsgrößen als auch unterschiedliche Ergebnisse für vergleichbare Größen. Ein Vergleich beider Modelle und der mit ihnen erzielten Ergebnisse liegt deshalb nahe.

5.1 Vergleich der Modellansätze

In Tabelle 5.1 sind die Eigenschaften und Anwendungsbereiche der Modelle ABIMO und ARC/EGMO zusammengefasst gegenübergestellt. Während sich ABIMO auf die Darstellung der vieljährig mittleren Wasserhaushaltsgrößen in beliebigen Skalen des Lockergesteinsbereichs beschränkt, ist mit ARC/EGMO eine dynamische Modellierung aller auf der regionalen Skala relevanten hydrologischen Prozesse möglich. Damit sind die Anwendungsmöglichkeiten beider Modelle unterschiedlich zu beurteilen.

ARC/EGMO bietet demgegenüber mit der realisierten hohen zeitlichen Auflösung von einem Tag (oder weniger) die geeignete Modellumgebung für Aufgabenstellungen, die eine höher aufgelöste Beschreibung der Dynamik des Wasserhaushaltes erfordern. Während der Aufwand für die Bereitstellung der statischen räumlichen Variablen für beide Modelle bei der Nutzung des GIS vergleichbar ist, stellt die dynamische Modellierung mit ARC/EGMO jedoch erheblich höhere Anforderungen an die Realisierung der dynamischen Datenbasis und an die benötigte Rechenleistung. Um den Rechenaufwand bei großen Gebieten, wie im vorliegenden Beispiel der Landesfläche Brandenburgs, in realisierbaren Grenzen zu halten, sind bei Anwendung von ARC/EGMO deshalb in der Regel höhere räumliche Aggregationen notwendig.

ABIMO liefert auf der Grundlage weniger statischer und zeitlich hochaggrierter räumlicher Variablen Aussagen über die mittleren jährlichen Verhältnisse des Wasserhaushaltes in beliebig großen Gebieten. Dabei ist eine sehr hohe räumliche Auflösung möglich. Durch die Anwendung der in Kapitel 3.1.4 dargestellten Methodik kann eine Aufteilung der mittleren jährlichen Bilanzgrößen auf hydrologische Halbjahre erfolgen. Jährliche oder innerjährliche Schwankungen des Wasserhaushaltes können mit ABIMO auf Grund des stationären Ansatzes nicht detaillierter beschrieben werden.

Während ARC/EGMO eine integrierte bidirektionale Schnittstelle zu ARC/INFO besitzt, ist der direkte Zugriff auf GIS-Daten in ABIMO nicht vorgesehen. Er wird erst durch die Anwendung einer Schnittstelle möglich (STEIDL ET AL. 1999), mit der die für ABIMO benötigten Datensätze aus einer definierten Menge von Geodaten aus dem GIS ARC/INFO erzeugt und die Berechnungsergebnisse wieder auf die GIS-Umgebung portiert werden.

Tab. 5.1: Überblick über die Eigenschaften und Anwendungsbereiche der im Rahmen der Projektarbeiten verwendeten Modelle ABIMO und ARC/EGMO

	ABIMO	ARC/EGMO
Prozesse	Abflussbildung und Wasserhaushalt im Lockergesteinsbereich	Abflussbildung und -konzentration, Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen.
Modelltyp	vieljährige Mittelwerte des Wasserhaushaltes mit räumlich beliebiger Aggregation	dynamische Modellierung aller regional relevanten hydrologischen Prozesse mit zeitlich und räumlich beliebiger Aggregation
Räumliche Modellierungseinheiten	beliebige Raumelemente (Polygone oder Raster)	beliebige Raumelemente (Polygone oder Raster)
Raumskala	beliebig	beliebig (validiert für 10 - 20.000 km ²)
Zeitskala	vieljährige Mittelwerte (> 20 bis 25 Jahre)	beliebig (üblicherweise einige Monate bis ca. 100 Jahre)
Zeitschrittweite	keine	beliebig (5 min, 15 min, 1 h, 1 d, 1 Monat)
besondere Eigenschaften	GIS-Anbindung zur direkten Verwendung digitaler Daten (im ZALF entwickelt)	GIS-Anbindung zur direkten Verwendung digitaler Daten und zur Ergebnisvisualisierung, räumliche Interpolation von Klimawerten, Modellierung auf beliebigen aggregierten Raumeinheiten durch Verwendung variabler Aggregierungsmethoden, Verwendung intern berechneter Verteilungsfunktionen

Nr.	PLANRAUM Bezeichnung	ABIMO						ARC/EGMO					
		Fläche km ²	P mm	ET mm	R mm	P mm	ET mm	R mm	LT °C	EP mm	WB mm	SWB mm	RO mm
1	Ucker	1.197	592,3	481,1	111,3	584,5	492,2	86,4	8,32	625,0	-40,4	71,2	15,1
2	Untere Spree 2	1.185	637,9	501,2	136,7	624,9	472,8	149,9	8,45	627,2	-2,3	131,1	18,8
3	Untere Spree 1	1.613	613,6	514,1	99,5	620,0	519,1	97,1	8,67	639,0	-19,0	84,9	12,2
4	Untere Oder	1.276	590,8	490,1	100,7	583,0	482,7	97,4	8,34	621,4	-38,4	84,2	12,7
5	Plane - Buckau	1.219	626,9	515,0	112,0	596,4	501,1	95,5	8,76	628,2	-31,8	93,0	2,1
6	Neiße	590	653,3	530,2	123,2	640,7	546,6	91,9	8,77	635,5	5,2	81,4	10,6
7	Finowkanal	720	629,7	520,2	109,4	639,8	501,5	132,8	8,44	629,7	10,1	110,3	22,6
8	Stepenitz	1.924	647,6	499,2	148,5	648,1	514,1	131,4	8,31	596,4	51,7	119,5	11,9
9	Schwarze Elster	2.859	635,6	519,6	116,0	633,2	540,7	90,0	8,55	630,9	2,3	76,7	13,2
10	Mittlere Spree	2.389	619,4	502,9	116,5	616,7	529,3	84,9	8,82	639,6	-22,8	71,2	13,7
11	Rhin	1.782	608,9	516,4	92,5	573,8	502,5	66,3	8,51	627,5	-53,8	51,6	14,4
12	Dosse - Jäglitz	1.469	618,3	493,0	125,4	628,7	502,3	125,0	8,32	604,2	24,5	117,7	7,3
13	Untere Havel	2.732	593,4	512,7	80,7	621,6	533,2	80,7	8,62	629,5	-7,9	55,7	25,0
14	Nuthe	1.911	594,0	500,7	93,3	604,2	504,9	98,5	8,71	635,3	-31,1	89,8	8,4
15	Dahme	2.112	605,3	520,8	84,5	628,7	522,0	100,0	8,71	636,8	-8,1	79,1	21,0
16	Obere Havel	2.542	630,5	524,1	106,4	635,6	533,0	95,6	8,39	639,2	-3,5	71,9	23,6
17	Alte Oder/Oderbruch	1.458	626,4	499,0	63,3	597,8	507,5	88,7	8,45	623,9	-26,1	81,0	7,7
18	Obere Oder	686	620,0	521,5	98,5	625,0	510,6	111,7	8,49	631,7	-6,7	92,2	19,4
	Berlin	892	632,5	447,3	185,2	652,4	432,3	208,6	8,59	633,7	18,8	83,7	125,0
	Brandenburg	29.662	614,6	509,2	105,3	616,8	512,0	101,3	8,53	627,8	-11,0	86,8	14,4
	Brandenburg + Berlin	30.554	615,1	507,4	107,6	618,7	507,8	107,0	8,54	628,1	-9,4	86,6	20,2

Tab. 5.2: Vergleich der mit ABIMO und ARC/EGMO für die Planungs-räume berechneten jährlichen mittleren Wasserhaushalts-größen Niederschlag (P), Evapotranspiration (ET) und Gesamtabflusshöhe (R). Der Vollständigkeit halber sind auch die mit ARC/EGMO berechneten Größen mittlere Tagestemperatur (LT), potenzielle Verdunstung (EP), klimatische Wasserbilanz (WB), Sickerwasserbildung (SWB) und Oberflächenabflussbildung (RO) angegeben

Nr.	PLANRAUM Bezeichnung	ABIMO						ARC/EGMO					
		Fläche km ²	P mm	ET mm	R mm	P mm	ET mm	R mm	LT °C	EP mm	WB mm	SWB mm	RO mm
1	Ucker	1.197	335,7	346,0	46,7	341,7	391,0	27,8	14,33	523,2	-181,4	-20,0	7,6
2	Untere Spree 2	1.185	349,0	359,6	35,7	348,7	373,0	53,3	14,54	524,5	-175,8	-2,1	9,0
3	Untere Spree 1	1.613	343,1	369,5	18,5	347,1	412,2	34,8	14,83	530,8	-183,8	-26,9	5,8
4	Untere Oder	1.276	337,9	352,5	44,8	337,7	384,3	35,0	14,38	520,9	-183,2	-7,8	6,3
5	Plane - Buckau	1.219	332,5	371,3	10,6	325,2	392,8	39,3	14,75	519,0	-193,9	-10,7	0,9
6	Neiße	590	361,9	383,1	21,5	365,5	436,8	30,7	14,89	524,5	-159,0	-25,7	5,1
7	Finowkanal	720	348,5	380,8	13,5	352,8	399,6	44,3	14,51	526,1	-173,3	-16,3	10,8
8	Stepenitz	1.924	345,6	363,8	31,8	349,6	415,8	40,9	14,11	497,5	-148,0	-36,4	4,9
9	Schwarze Elster	2.859	354,4	371,5	33,0	358,1	432,5	31,8	14,51	521,2	-163,1	-26,8	6,4
10	Mittlere Spree	2.389	349,9	355,1	45,7	355,5	419,6	30,1	14,92	528,1	-172,6	-26,4	6,9
11	Rhin	1.782	327,1	378,7	5,9	316,7	398,0	18,8	14,51	521,8	-205,2	-28,0	6,8
12	Dosse - Jäglitz	1.469	327,1	356,6	22,0	341,1	403,7	43,9	14,15	504,4	-163,3	-21,6	3,1
13	Untere Havel	2.732	321,9	370,5	7,5	336,4	428,1	19,7	14,65	522,6	-186,1	-39,4	10,8
14	Nuthe	1.911	325,2	355,9	21,4	333,8	398,2	39,9	14,79	526,5	-192,7	-15,3	4,0
15	Dahme	2.112	336,5	376,4	2,5	351,7	414,7	29,5	14,80	528,0	-176,3	-31,8	9,8
16	Obere Havel	2.542	345,8	386,9	4,2	349,8	428,0	28,3	14,42	532,8	-183,0	-39,4	11,1
17	Alte Oder/Oderbruch	1.458	324,2	357,5	28,3	337,7	406,5	30,3	14,55	522,2	-184,5	-30,3	3,6
18	Obere Oder	686	346,0	377,7	18,1	351,3	407,9	34,2	14,64	526,7	-175,4	-14,8	9,3
	Berlin	892	326,7	305,4	61,4	359,7	341,5	55,0	14,68	527,9	-168,2	-24,8	60,2
	Brandenburg	29.662	339,2	367,4	22,2	344,5	407,9	34,0	14,57	522,3	-177,8	-23,3	6,8
	Brandenburg + Berlin	30.554	338,8	365,6	23,4	345,3	404,4	35,1	14,58	522,6	-177,3	-23,4	9,6

Tab. 5.3: Vergleich der mit ABIMO und ARC/EGMO für die Planungs-räume berechneten mittleren Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (P), Evapotranspiration (ET) und Gesamtabflusshöhe (R) für das Sommerhalb-jahr. Der Vollständigkeit halber sind auch die mit ARC/EGMO berechneten Größen mittlere Tagestemperatur (LT), potenzielle Verdunstung (EP), klimatische Wasserbilanz (WB), Sickerwasserbildung (SWB) und Oberflächenabflussbildung (RO) angegeben

Nr.	PLANRAUM Bezeichnung	ABIMO						ARC/EGMO					
		Fläche km ²	P mm	ET mm	R mm	P mm	ET mm	R mm	LT °C	EP mm	WB mm	SWB mm	RO mm
1	Ucker	1.197	256,7	135,1	64,5	242,8	101,2	58,8	2,28	101,8	141,0	91,2	7,4
2	Untere Spree 2	1.185	288,9	141,6	101,0	276,2	99,8	96,9	2,33	102,8	173,5	133,2	9,8
3	Untere Spree 1	1.613	270,5	144,6	81,0	273,0	107,0	62,5	2,48	108,2	164,8	111,7	6,4
4	Untere Oder	1.276	252,8	137,6	55,9	245,3	98,4	62,5	2,25	100,5	144,7	92,0	6,5
5	Plane - Buckau	1.219	294,5	143,7	101,4	271,2	108,3	56,4	2,74	109,1	162,1	103,7	1,2
6	Neiße	590	291,5	147,1	101,7	275,2	109,9	61,4	2,61	111,0	164,2	107,0	5,5
7	Finowkanal	720	281,2	139,4	96,0	287,0	101,9	88,8	2,33	103,6	183,4	126,6	11,8
8	Stepenitz	1.924	302,0	135,3	116,7	298,5	98,3	90,7	2,47	98,9	199,7	155,9	7,0
9	Schwarze Elster	2.859	281,2	148,1	83,0	275,1	108,3	58,4	2,55	109,7	165,4	103,5	6,8
10	Mittlere Spree	2.389	269,5	147,8	70,8	261,2	109,8	55,0	2,69	111,5	149,7	97,6	6,8
11	Rhin	1.782	281,8	137,7	86,6	257,1	104,4	47,6	2,47	105,7	151,4	79,6	7,6
12	Dosse - Jäglitz	1.469	291,3	136,3	103,4	287,6	98,6	81,4	2,44	99,8	187,8	139,3	4,3
13	Untere Havel	2.732	271,4	142,1	73,2	285,2	105,1	61,2	2,55	106,9	178,3	95,1	14,2
14	Nuthe	1.911	268,8	144,9	71,9	270,3	106,8	58,7	2,60	108,8	161,5	105,2	4,4
15	Dahme	2.112	268,9	144,4	82,0	277,0	107,3	70,7	2,58	108,9	168,1	110,9	11,2
16	Obere Havel	2.542	284,7	137,2	102,2	285,8	105,0	67,5	2,33	106,3	179,5	111,2	12,6
17	Alte Oder/Oderbruch	1.458	238,2	141,5	35,1	260,1	100,9	58,6	2,30	101,7	158,4	111,3	4,1
18	Obere Oder	686	273,9	143,8	80,4	273,7	102,7	77,7	2,31	105,0	168,7	107,0	10,1
	Berlin	892	288,4	141,8	123,9	292,7	90,8	154,1	2,45	105,7	187,0	108,6	64,8
	Brandenburg	29.662	275,9	141,8	83,1	272,4	104,1	67,5	2,46	105,6	166,8	110,1	7,6
	Brandenburg + Berlin	30.554	276,2	141,8	84,3	273,4	103,4	72,0	2,46	105,6	167,9	110,0	10,6

Tab. 5.4: Vergleich der mit ABIMO und ARC/EGMO für die Planungs-räume berechneten mittleren Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (P), Evapotranspiration (ET) und Gesamtabflusshöhe (R) für das Winterhalb-jahr. Der Vollständigkeit halber sind auch die mit ARC/EGMO berechneten Größen mittlere Tagestemperatur (LT), potenzielle Verdunstung (EP), klimatische Wasserbilanz (WB), Sickerwasserbildung (SWB) und Oberflächenabflussbildung (RO) angegeben

5.2 Vergleich der Ergebnisse

Die Simulationen mit beiden Modellsystemen wurden auf einer für die statischen räumlichen Variablen identischen Datenbasis durchgeführt (vgl. Kap. 2). Bei den meteorologischen Daten wurde von diesem Prinzip abgewichen, da durch die von ARC/EGMO geforderte hohe zeitliche Auflösung lediglich 15 Klima- und 29 Niederschlagsmessstationen für den Zeitbereich 1961–1990 genutzt werden konnten (siehe Abb. 2.1). Das entspricht einer mittleren Stationsdichte von etwa einer Station pro 694 km². Demgegenüber liegt den DWD-Karten, die für ABIMO verwendet wurden, durch Reduktion der Zeitreihen von Niederschlagsmessstationen mit kürzeren Messreihen auf die 30jährige Bezugsreihe eine mittlere Stationsdichte von einer Station pro 98 km² zugrunde (HAD 1999).

Weitere Unterschiede ergaben sich auch durch die notwendige Aggregation der Elementarflächen zu Hydrotopen für die Berechnungen mit ARC/EGMO, auf die zugunsten der höheren räumlichen Auflösung bei ABIMO verzichtet werden konnte. So sind in der Berechnung mit ABIMO 173.661 Polygone berücksichtigt worden, die durch die Verschneidung der Elementarflächenkarten mit den Karten des Niederschlages und der potenziellen Verdunstung entstanden sind. Mit ARC/EGMO wurden die Simulationen auf der Basis von 1.599 Hydrotopen durchgeführt, auf die alle meteorologischen Eingangsgrößen während der Simulationsläufe auf täglicher Basis durch Interpolation übertragen wurden.

Ein direkter Vergleich der Ergebnisse der Modelluntersuchungen ist lediglich für die langjährigen mittleren Wasserhaushaltsgrößen in ihren absoluten Werten und deren räumlichen Verteilungsmustern möglich. Diese Wasserhaushaltsgrößen sind die mittlere Evapotranspiration ET und der mittlere Gesamtabfluss R.

Tabelle 5.2 gibt eine vergleichende Übersicht über die für die Planungsräume im Land Brandenburg mit beiden Modellen berechneten langjährigen Mittelwerte von Niederschlag P, Verdunstung ET und Gesamtabfluss R (die übrigen – mit ARC/EGMO berechneten – Größen sind der Vollständigkeit halber mit angegeben). Danach weichen die mit beiden Modellen berechneten langjährigen Jahresmittelwerte für das Gesamtgebiet Brandenburg/Berlin im Fall des Niederschlags P, der Evapotranspiration ET und der Gesamtabflusshöhe R lediglich um 0,6 %, 0,1 % und 0,2 % voneinander ab. Für einzelne Planungsräume ergeben sich allerdings z. T. erhebliche Unterschiede. So unterscheiden sich die Werte von P, ET und R z.B. für das Land Berlin um 3,2 %, 3,4 % und 12,7 %. Andere Planungsräume (wie z.B. Rhin oder Neiße) zeigen noch größere Abweichungen (insbesondere für R). Diese dürften zum einen auf die unterschiedliche Berücksichtigung der meteorologischen Eingangsgrößen (insbesondere des Niederschlags) und der landschaftstypischen Eigenschaften (aggregierte Einheiten auf der Basis der Landnutzung, Böden und Grundwasserflurabstände) bei der Modellierung, zum anderen auf die unterschiedlichen Prozessbeschreibungen beider Modelle zurück-

zuführen sein. Im Hinblick auf die mit ARC/EGMO berechneten R-Werte und ihren Bezug zur Wasserhaushaltsbilanz des Untersuchungsgebietes sei auf die Diskussionen in Zusammenhang mit den Tabellen 4.3 und 5.2 verwiesen.

In den Tabellen 5.3 und 5.4 sind die entsprechenden Größen für das Sommer- und Winterhalbjahr gegenüber gestellt. Im Fall des Sommerhalbjahres ergeben sich für das Gesamtgebiet (Brandenburg/Berlin) Unterschiede von 1,9 %, 10,6 % bzw. ca. 50 % für die mit ARC/EGMO berechneten und aus den ABIMO-Ergebnissen für die mittleren Jahressummen abgeleiteten Größen P, ET und R. Im Winterhalbjahr betragen diese Unterschiede 1,0 %, 27,1 % und 14,5 %. Wesentliche Ursache für diese – verglichen mit den mittleren Jahreswerten – großen Abweichungen insbesondere für die Gesamtabflusshöhe R sind die z.T. sehr unterschiedlichen Werte der Verdunstung. So wird von ARC/EGMO im langjährigen Mittel für das Sommerhalbjahr eine Verdunstung berechnet, die ca. 80 % der Jahressumme darstellt. Dem gegenüber werden im ABIMO-Ansatz für das Sommerhalbjahr Verdunstungswerte angenommen, die nur ca. 72 % des mittleren Jahreswertes ausmachen. Dies bedeutet, dass mit ARC/EGMO im langjährigen Mittel für das Sommerhalbjahr erheblich höhere Werte und für das Winterhalbjahr erheblich geringere Werte der Evapotranspiration ET berechnet werden als mit Hilfe von ABIMO.

Als **Schlussfolgerung** ist somit festzuhalten, dass sich trotz der bei Anwendung von ARC/EGMO in der Regel notwendigen höheren räumlichen Aggregation für zeitlich hoch aggregierte Wasserhaushaltsgrößen (mittlere Jahressummen) für das Gesamtgebiet sehr ähnliche Werte ergeben (vgl. Tab. 5.2), für die Planungsräume oder noch kleinere Gebietsteile aber z.T. beträchtliche Unterschiede auftreten können.

Daneben liefert ARC/EGMO auch auf dieser zeitlichen Aggregationsstufe Informationen zu weiteren Wasserhaushaltsgrößen wie Sickerwasserbildung und Oberflächenabflussbildung.

Der größte Unterschied gegenüber ABIMO sind aber Informationen, die aus der zeitlich höher aufgelösten dynamischen Modellierung resultieren. So lassen sich die Jahreswerte prinzipiell nicht nur auf Sommer- und Winterwerte herunterbrechen, sondern auch auf Werte für einzelne Monate oder Tage sowie entsprechende Mittelwerte für die gesamte Simulationsperiode (vgl. Abb. 4.14).

Der Modellansatz erlaubt darüber hinaus Untersuchungen zur Bedeutung hydrologisch unterschiedlich reagierender Einzelflächen für verschiedene Wasserhaushaltsgrößen, wie sie z.B. in den Abbildungen 4.26 und 4.27 zum Ausdruck kommt, und damit Aussagen zur hydrologischen Bedeutung verschiedener Landschaftseinheiten und deren Sensitivität gegenüber Änderungen des Globalen Wandels, wie z.B. Landnutzungsänderungen.

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

- 2.1: Überblick über die 15 Klima- und 29 Niederschlagsstationen des DWD, die für den Zeitbereich 1961–1990 Tagesreihen der erforderlichen Klimavariablen liefern und für die Simulationsrechnungen mit ARC/EGMO im Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin sowie im Validierungsgebiet Obere Dahme verwendet wurden
- 2.2: Strukturierung des Untersuchungsgebietes Brandenburg/Berlin in Teileinzugsgebiete und Planungsräume
- 2.3: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (korrigiert) der Reihe 1961–1990 (Quelle: DWD 1999)
- 2.4: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe (korrigiert) im Winterhalbjahr der Reihe 1961–1990 (Quelle: DWD 1999)
- 2.5: Mittlere jährliche Gras-Referenzverdunstungshöhe der Reihe 1961–1990 (Quelle: DWD 1999)
- 2.6: Mittlere jährliche Gras-Referenzverdunstung im Winterhalbjahr der Reihe 1961–1990 (Quelle: DWD 1999)
- 2.7: Landnutzungskarte für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin und das Validierungsgebiet Obere Dahme (Quelle: CORINE) mit Hauptflussnetz
- 2.8: Bodenkarte für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin und das Validierungsgebiet Obere Dahme (M 1:1000000; BUEK1000) mit Hauptflussnetz
- 2.9: Auf der Basis von Karten der WASY GmbH überarbeitete und vorklassifizierte Grundwasserflurabstandskarte für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin und das Validierungsgebiet Obere Dahme
- 2.10: Digitales Höhenmodell und Gefälle für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin und das Validierungsgebiet Obere Dahme (Quelle: Landesvermessungsamt Brandenburg)
- 3.1: Darstellung der Bagrov-Gleichung für ausgewählte Werte des Effektivitätsparameters und Abhängigkeit dieses Parameters von Landnutzung und Bodenart (nach GLUGLA & KRAHE 1995)
- 3.2: Linien gleicher mittlerer Potenzialhöhen des Grundwassers (nach HYKA 50)
- 3.3: Grundwassereinzugsgebiete der Pegel an der Oberen Dahme
- 3.4: Anteile der mittleren monatlichen Gras-Referenzverdunstungshöhe am Jahreswert (Quelle: HAD 1998)
- 3.5: Potenzielle Verdunstung und Boden-/Grundwasserspeicherauffüllung im Winterhalbjahr
- 3.6: Langjährig mittlere Verdunstung für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin
- 3.7: Langjährig mittlerer Gesamtabfluss für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin
- 3.8: Langjährig mittlerer Gesamtabfluss im Winterhalbjahr für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin
- 3.9: Langjährig mittlerer Gesamtabfluss im Sommerhalbjahr für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin
- 3.10: Größen der Wasserbilanz für die Gesamtregion Brandenburg/Berlin
- 3.11: Gesamtabfluss für die Hauptnutzungsarten der Gesamtregion Brandenburg/Berlin
- 3.12: Mit RASTER berechneter mittlerer Gesamtabfluss der Reihe 1951–1980 für das Land Brandenburg (DANNOWSKI & FRITSCHKE 1993)
- 3.13: Differenz $R_{\text{RASTER}} - R_{\text{ABIMO}}$ der Gesamtabflusswerte nach RASTER (DANNOWSKI & FRITSCHKE 1993) und ABIMO (vorliegende Studie)
- 4.1: Schematische Darstellung des für die Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen eingesetzten hydrologischen Modellierungssystems ARC/EGMO mit dem darin umgesetzten Mehr-Ebenen-Modellkonzept
- 4.2: Schematische Darstellung hydrologischer Prozesse an der Schnittstelle Atmosphäre-Landoberfläche, die bei der großskaligen Modellierung berücksichtigt werden müssen
- 4.3: Durch GIS-basierte Verschneidung der Basiskarten für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin generierte Elementarflächenkarte mit 57.836 quasi-homogenen Einzelflächen („Elementarflächen“)
- 4.4: Flächenanteile der für die Simulationsrechnungen verwendeten 15 Hydrotopklassen an der Gesamtfläche von Brandenburg/Berlin
- 4.5: Aggregation des Untersuchungsgebietes (Brandenburg/Berlin) in 1.599 Hydrotope (15 Hydrotopklassen). Der Ausschnitt zeigt zusätzlich die Disaggregation in Elementarflächen (schwarze Linien) im Validierungsgebiet der Oberen Dahme
- 4.6: Landnutzungskarte für das Einzugsgebiet der Oberen Dahme
- 4.7: Ausgangsdaten zur Neuausweisung von Teileinzugsgebieten im Einzugsgebiet der Oberen Dahme (Pegel Märkisch Buchholz)
- 4.8: Vergleich der vom LUA bereitgestellten mit der am PIK neu generierten Teileinzugsgebietsstrukturierung der Oberen Dahme
- 4.9: Überblick über die für die Modellierung der Oberen Dahme gewählte Unterteilung des Einzugsgebietes in 685 Elementarflächen, 62 Hydrotope und 13 Hydrotopklassen
- 4.10: Für das Einzugsgebiet der Oberen Dahme im Zeitraum 1977–1991 gemessene und simulierte Durchflüsse am Pegel Märkisch Buchholz
- 4.11: Räumliche Verteilung der im Einzugsgebiet der Oberen Dahme für die Gesamtperiode 1961–1990 berechneten mittleren Jahressummen der Sickerwasserbildung
- 4.12: Für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin ermittelte Jahressummen verschiedener meteorologischer Eingangs- sowie berechneter Wasserhaushaltsgrößen für die Gesamtperiode 1961–1990

- 4.13: Für die Gesamtperiode 1961–1990 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 Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin). Im Fall der mittleren Tagestemperatur (LT) wurde jeweils der entsprechende Tagesmittelwert berechnet (°C) und für Darstellungszwecke um den Faktor 10 erhöht
- 4.14: Für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin berechnete mittlere Monatssummen 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 für die Periode 1961–1990
- 4.15: Für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin auf der Basis von 57.836 Elementarflächen für den Oktober 1986 berechnete Monatssummen des Niederschlags unter Verwendung von 29 (links) bzw. 62 (rechts) Niederschlagsstationen sowie 15 Klimahauptstationen (einige liegen außerhalb des Darstellungsbereiches)
- 4.16: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Jahressummen des Niederschlags PI (in mm) für die Periode 1961–1990 (einige der 15 Klima- und 29 Niederschlagsstationen liegen außerhalb des Darstellungsbereiches)
- 4.17: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Jahressummen der potenziellen Verdunstung EP (in mm) für die Periode 1961–1990
- 4.18: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Jahressummen der klimatischen Wasserbilanz WB (in mm) für die Periode 1961–1990
- 4.19: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Jahressummen der realen Verdunstung ER (in mm) für die Periode 1961–1990
- 4.20: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Jahressummen der Sickerwasserbildung SWB (in mm) für die Periode 1961–1990
- 4.21: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) und das Validierungsgebiet Obere Dahme berechnete mittlere Jahressummen der Oberflächenabflussbildung RO (in mm) für die Periode 1961–1990
- 4.22: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) und das Validierungsgebiet Obere Dahme berechnete mittlere Jahressummen der Gesamtabflusshöhe R (in mm) für die Periode 1961–1990
- 4.23: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Sommersummen der Gesamtabflusshöhe R (in mm) für die Periode 1961–1990
- 4.24: Für das Untersuchungsgebiet (Länder Brandenburg und Berlin) berechnete mittlere Wintersummen der Gesamtabflusshöhe R (in mm) für die Periode 1961–1990
- 4.25: Mittlere Jahres-, Sommer- und Wintersummen der Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung, Sickerwasserbildung und Gesamtabflusshöhe für die 18 Planungsräume sowie die Regionen Brandenburg, Berlin und Brandenburg/Berlin
- 4.26: Mittlere Jahressummen (Gesamtperiode 1961–1990) von Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gesamtabflusshöhe für die im Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin definierten Hydrotopklassen. Die im Gesamtgebiet auftretenden Minimal- und Maximalwerte sind als „Fehlerbalken“ angegeben
- 4.27: Absolute Beiträge der im Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin definierten Hydrotopklassen zu den mittleren Jahressummen (Gesamtperiode 1961–1990) von Verdunstung, Sickerwasserbildung, Oberflächenabflussbildung und Gesamtabflusshöhe

Tabellen

- 2.1: Überblick über die für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin vorhandenen räumlichen Grundlagenkarten, die in die Datenaufbereitung einbezogen wurden
- 2.2: Überblick über die für die Modellierung des Untersuchungsgebietes Brandenburg/Berlin und des Validierungsgebietes Obere Dahme verwendeten Zeitreihen meteorologischer Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD)
- 2.3: Aggregation der CORINE-Landnutzungskarte in 9 Landnutzungsklassen
- 2.4: Überblick über die Flächenanteile der aggregierten Landnutzungsklassen an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes Brandenburg/Berlin und des Validierungsgebietes Obere Dahme
- 2.5: Überblick über die aus dem Digitalen Höhenmodell abgeleiteten Gefälleklassen im Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin
- 2.6: Zuordnung der mittleren Grundwasserflurabstände zu den Hydromorphieflächentypen der Standortregionaltypen nach MMK
- 2.7: Für das Untersuchungsgebiet Brandenburg/Berlin ausgewiesene Grundwasserflurabstandsklassen
- 2.8: Überblick über die Unterteilung des Untersuchungsgebietes Brandenburg/Berlin in 18 Planungsräume und die Anzahl der sie bildenden Teileinzugsgebiete (das Land Berlin ist durch einen eigenen „Planungsraum“ 0 ausgewiesen)
- 3.1: Kennzahlen der gewählten Pegel
- 3.2: Grundwassereinzugsgebiete für die Pegel an der Oberen Dahme
- 3.3: Vergleich der mittleren jährlichen Niederschlagssummen (unkorrigiert) für verschiedene Jahresreihen ($\Delta P = P_{x/y} - P_{1961/90}$)
- 3.4: Validierungsergebnisse
- 3.5: Ermittlung der Gesamtabflusshöhe im Winterhalbjahr (in mm)
- 3.6: Bodenabhängige Auffüllung des Boden-/Grundwasserspeichers im Winterhalbjahr

- 3.7: Komponenten der Abflussbildung nach Planungsräumen
- 3.8: Vergleich der mit RASTER und ABIMO berechneten Werte der Gesamtabflusshöhe
- 4.1: Überblick über die Flächenanteile der 15 für die Modellierung verwendeten Hydrotopklassen an der Gesamtfläche des Validierungsgebietes Obere Dahme und des Untersuchungsgebietes Brandenburg/Berlin
- 4.2: Überblick über die für das Einzugsgebiet der Oberen Dahme und das gesamte Untersuchungsgebiet (Brandenburg/Berlin) berechneten Jahressummen meteorologischer Eingangs- und simulierter Wasserhaushaltsgrößen (in mm/Jahr bzw. °C für LT)
- 4.3: Überblick über die für die wasserwirtschaftlichen Planungsräume des Untersuchungsgebietes (Länder Brandenburg und Berlin) in der Periode 1961–1990 berechneten mittleren Jahressummen meteorologischer Eingangs- und simulierter Wasserhaushaltsgrößen (in mm/Jahr bzw. °C für LT)
- 4.4: Überblick über die für die wasserwirtschaftlichen Planungsräume des Untersuchungsgebietes (Länder Brandenburg und Berlin) in der Periode 1961–1990 berechneten langjährigen Mittelwerte meteorologischer Eingangs- und simulierter Wasserhaushaltsgrößen der Sommermonate (Dimensionen und Legende analog Tabelle 4.3)
- 4.5: Überblick über die für die wasserwirtschaftlichen Planungsräume des Untersuchungsgebietes (Länder Brandenburg und Berlin) in der Periode 1961–1990 berechneten langjährigen Mittelwerte meteorologischer Eingangs- und simulierter Wasserhaushaltsgrößen der Wintermonate (Dimensionen und Legende analog Tabelle 4.3)
- 5.1: Überblick über die Eigenschaften und Anwendungsbereiche der im Rahmen der Projektarbeiten verwendeten Modelle ABIMO und ARC/EGMO
- 5.2: Vergleich der mit ABIMO und ARC/EGMO für die Planungsräume berechneten **jährlichen** mittleren Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (P), Evapotranspiration (ET) und Gesamtabflusshöhe (R). Der Vollständigkeit halber sind auch die mit ARC/EGMO berechneten Größen mittlere Tagestemperatur (LT), potenzielle Verdunstung (EP), klimatische Wasserbilanz (WB), Sickerwasserbildung (SWB) und Oberflächenabflussbildung (RO) angegeben
- 5.3: Vergleich der mit ABIMO und ARC/EGMO für die Planungsräume berechneten mittleren Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (P), Evapotranspiration (ET) und Gesamtabflusshöhe (R) für das **Sommerhalbjahr**. Der Vollständigkeit halber sind auch die mit ARC/EGMO berechneten Größen mittlere Tagestemperatur (LT), potenzielle Verdunstung (EP), klimatische Wasserbilanz (WB), Sickerwasserbildung (SWB) und Oberflächenabflussbildung (RO) angegeben
- 5.4: Vergleich der mit ABIMO und ARC/EGMO für die Planungsräume berechneten mittleren Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (P), Evapotranspiration (ET) und Gesamtabflusshöhe (R) für das **Winterhalbjahr**. Der Vollständigkeit halber sind auch die mit ARC/EGMO berechneten Größen mittlere Tagestemperatur (LT), potenzielle Verdunstung (EP), klimatische Wasserbilanz (WB), Sickerwasserbildung (SWB) und Oberflächenabflussbildung (RO) angegeben

Literaturverzeichnis

- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. (1986): An Introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, „SHE“, 1: History and Philosophy of a Physically based Distributed Modelling System. *J. of Hydrology*, 87:45-59.
- ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PERRIER, A.; PEREIRA, L. S. (1994): An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICIC Bulletin* 43(2), 1–34.
- BAGROV, N. A. (1953): O srednem mnogoletnem isparenii s poverkhnosti sushi. *Meteorologija i gidrologija*, 10.
- BALLA, H.; DANNOWSKI, R.; QUAST, J. (1993): Gefährdungspotenzial diffuser Stoffausträge aus landwirtschaftlichen Nutzflächen. In: Bestandsaufnahme und -bewertung sowie Erarbeitung von Zielkonzepten für die Naturgüter Boden und Wasser im Landschaftsprogramm Brandenburgs – Schutzgut Wasser. Institut für Hydrologie, ZALF e.V., Müncheberg, unveröffentlicht.
- BECKER, A. (1975): EGMO-Einzugsgebietsmodelle zur Abflussberechnung, -vorhersage und -simulation, *WWT* 25, 9.
- BECKER, A. & PFÜTZNER, B. (1986): Identification and Modelling of River Flow Reductions caused by Evapotranspiration Losses from Shallow Groundwater Areas. 2nd Scientific Assembly of the IAHS, Symposium S2, Budapest, July 1986. IAHS Publication No. 156.
- BECKER, A. & PFÜTZNER, B. (1987): EGMO-System Approach and Subroutines for River Basin Modelling. *Acta Hydrophysica*, Berlin, Bd. 31, H. 3/4.
- 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. & 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.
- BERGSTÖM, S. (1972): Utveckling och tillämpning av en digital avrinningsmodell. (Entwicklung und Anwendung eines digitalen Abflussmodells, in schwedisch). SMHI, Notiser og preliminära rapporter, serie HYDROLOGI, No. 22, Norrköping.
- BEVEN, K. & KIRKBY, M. (1979): A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24, 43–69.
- BMBF (1995): Forschungskonzeption „Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe (Elbe-Ökologie)“. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie. Bonn, August 1995.
- BONTA, J. V. & MÜLLER, M. (1999): Evaluation of the Glugla method for estimating evapotranspiration and groundwater recharge. *Hydrol. Sci. J.* 44(5): 743–761.

- BORK H.-R. (1997): „Wasser- und Stoffrückhalt im Tiefland des Elbeinzugsgebietes“ (WaStor). Antrag an das BMBF.
- DANNOWSKI, R. & FRITSCHKE, S. (1993): Grundwasserneubildung aus Niederschlägen. In: Bestandsaufnahme und -bewertung sowie Erarbeitung von Zielkonzepten für die Naturgüter Boden und Wasser im Landschaftsprogramm Brandenburgs – Schutzgut Wasser –. Institut für Hydrologie, ZALF e. V., Müncheberg, unveröffentlicht.
- DANNOWSKI, R.; J. QUAST; H. BALLA & S. FRITSCHKE (1994): Diffuse Stickstoff- und Phosphoreinträge durch Übertritt von Grundwasser und durch Bodenerosion – Eintragspfad Grundwasser im Lockergesteinsbereich. In: WERNER, W. & H.-P. WODSAK (Hrsg.): Stickstoff- und Phosphateintrag in die Fließgewässer Deutschlands unter besonderer Berücksichtigung des Eintragsgeschehens im Lockergesteinsbereich der ehemaligen DDR. Dachverband Agrarforschung, Schriftenreihe Agrarspectrum, Bd. 22, Verlagsunion Agrar, 243 S.
- DANNOWSKI, R.; J. STEIDL; J. QUAST; S. FRITSCHKE; M. BEHRENS; D. DEUMLICH; L. VÖLKER; W. MIODUSZEWSKI & I. KAJEWSKI (1999): Diffuse entries in rivers of the Oder Basin. Final Report Phase II. Eds.: H. Okruszko & W. Dirksen, Polska Akademia Nauk (PAN), Warszawa, und Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK), Bonn. – DVWK-Materialien Nr. 9, ISSN 1436–1639, Bonn: WVGW.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK), Bonn. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft; H. 238, ISBN 3-89554-034-X. Bonn: WVGW.
- DWD (1999): Mittlere Jahres- und Halbjahreswerte von Niederschlag, Lufttemperatur und Gras-Referenzverdunstung (Reihe 1961/90) im Raster 1 km x 1 km. Bereitgestellt vom Deutschen Wetterdienst, Geschäftsfeld Hydrometeorologie.
- DYCK, S. & G. PESCHKE (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3. stark bearb. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- FREYDANK, E.; H. GLANDER; E. GLOS & G. GLUGLA (1983): Karten der Wasserhaushaltsgrößen für das Gebiet der DDR. Ein Beitrag zum Internationalen Hydrologischen Programm der sozialistischen Länder Europas. Z. Meteor., 33 (4): 244–257, Berlin.
- GLUGLA, G. (1985): Anwenderrichtlinie zur Nutzung der neuen Karten des Gesamtabflusses M 1:200.000 (Deckfolien zur Abflusskarte des N-A-U-Kartenwerkes über das Gebiet der DDR. Institut für Wasserwirtschaft, Bereich Wasserbewirtschaftung Berlin, unveröffentlicht.
- GLUGLA, G.; R. ENDERLEIN & A. EYRICH (1976): Das Programm RASTER – ein effektives Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Lockergestein. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 26 (11): 377–382, Berlin.
- GLUGLA, G. & G. FÜRTIG (1997): Berechnung langjähriger Mittelwerte des Wasserhaushalts für den Lockergesteinsbereich. Dokumentation zur Anwendung des Rechenprogramms ABIMO. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin, Februar 1997, 19 S. + Anh.
- GLUGLA, G. & B. KÖNIG (1989): Der mikrorechnergestützte Arbeitsplatz Grundwasserdargebot. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 39 (8): 178–181, Berlin.
- GLUGLA, G. & P. KRAHE (1995): Abflussbildung in urbanen Gebieten. Schriftenreihe Hydrologie/Wasserwirtschaft 14, Ruhr-Universität Bochum, 140–160.
- HAD (1998): Hydrologischer Atlas von Deutschland. (Hrsg.): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- HAUDE, W. (1958): Über die Verwendung verschiedener Klimafaktoren zur Berechnung der potentiellen Evapoartion und Evapotranspiration. Meteorol. Rundschau 11/3, 1958.
- HOLTAN, H. N. (1961): A concept for infiltration estimates in watershed engineering. U.S. Dept. Agr., Agr. Res. Service Pub., pp. 41–51.
- Hydrographisches Kartenwerk der DDR, M 1:200.000 (1963): Meteorologischer Dienst der DDR, Forschungsinstitut für Hydrometeorologie, Berlin.
- IfW (1958): N-A-U-Karte über das Gebiet der DDR: Niederschlag – Abfluss – Unterschiedsgröße (M 1:200.000). Institut für Wasserwirtschaft, Berlin.
- IH (Institute of Hydrology) (1987): The Institute of hydrology distributed model. IH Report No. 98, Wallingford/GB.
- KADEN, S. & M. SCHRAMM (1994): Planungs- und Bewirtschaftungsmodelle in Bergbaugebieten – eine kritische Bestandsaufnahme. Lausitzer Wissenschaftstage, Fachgespräch Wasserhaushalt Lausitz, Cottbus 09.06.1994, Aktuelle Reihe TUC 11/94, 26–46.
- KAPPES, R., J. QUAST & R. DANNOWSKI (1993): Großflächige hydromeliorative Maßnahmen. In: Bestandsaufnahme und -bewertung sowie Erarbeitung von Zielkonzepten für die Naturgüter Boden und Wasser im Landschaftsprogramm Brandenburgs – Schutzgut Wasser –. Institut für Hydrologie, ZALF e.V., Müncheberg, unveröffentlicht
- KLÖCKING, B. & LAHMER, W. (1999): Dynamische Modellierung des Wasserhaushaltes und der Abflusskomponenten im Elbe-Einzugsgebiet mit ARC/EGMO. In: BECKER & BEHRENDT (1999). Anlage zum 2. Zwischenbericht des Forschungsvorhabens „Auswirkungen der Landnutzung auf den Wasser- und Stoffhaushalt der Elbe und ihres Einzugsgebietes“. PIK, Juni 1999.
- KÖNIG, B. & G. GLUGLA (1988): Anwenderdokumentation zum „Arbeitsplatz GW-Dargebot“ (GWD), Vers. 3.0. Wasserwirtschafts-direktion Berlin, Institut für Wasserwirtschaft, Berlin, Oktober 1988, unveröffentlicht.
- KORTÜM, F. (1965): Beiträge zum Wärmehaushalt und zur Energetik der Atmosphäre. Forschungsbericht, Geophysikalisches Institut Karl-Marx-Universität Leipzig, unveröffentlicht.
- KORTÜM, F. (1966): Beiträge zur Klimatologie des Wärmehaushaltes der Erdoberfläche im norddeutschen Flachland. Habil.-Schrift, HU Berlin.
- LAHMER, W. (1998A): Macro- and Mesoscale Hydrological Modelling in the Elbe River Basin. In: Proceedings of the International Conference 'Catchment Hydrological and Biochemical Processes in Changing Environment' in Liblice, Czech Republic, September 22–24, 1998, p.57–61.
- LAHMER, W. & BECKER, A. (1998A): Zweiter Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben „Dynamische skalenübergreifende Modellierung des Wasser- und Stoffhaushaltes in Gebieten des pleistozänen Tieflandes, Modellgebiet Stepenitz“. PIK, Oktober 1998.
- LAHMER, W. & BECKER, A. (1998B): 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. & BECKER, A. (1998c): 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. (1999b): Wie wirken sich Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt Brandenburgs aus? Posterbeitrag zu einer vom PIK gestalteten Ausstellung im Landtag Brandenburg, 18. Mai bis 24. Juni 1999.
- LAHMER, W. & 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.; MÜLLER-WOHLFEIL, D.-I. & PFÜTZNER, B. (1999A): A GIS-based Approach for Regional Hydrological Modelling. In: B. Dieckkrüger, M.J. Kirkby, U. Schröder (Eds.): *Regionalization in Hydrology*. IAHS publication no. 254, ISSN 0144–7815, 33–43.
- LAHMER, W.; BECKER, A.; PFÜTZNER, B. (1999b): 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. (1999c): Großskalige hydrologische Modellierung von Landnutzungsänderungen vor dem Hintergrund unsicherer Eingangsdaten. In: N. FOHRER UND P. DÖLL (Hrsg.): *Modellierung des Wasser- und Stofftransports 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. (1999): 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.; PFÜTZNER, B.; BECKER, A. (2000): Assessment of Land Use and Climate Change Impacts on the Mesoscale. *Proceedings of the XXV General Assembly of the European Geophysical Society, Millenium Conference on Earth, Planetary & Solar System Sciences*, Nice, France, 25–29 April 2000. *Geophysical Research Abstracts*, Volume 2, 2000, CD-ROM.
- MÜLLER, L., R. DANNOWSKI, U. SCHINDLER, F. EULENSTEIN & R. MEIßNER (1996): Gebietsabflüsse aus Agrarlandschaften Nordost- und Mitteleuropas. *Arch. Acker- Pfl. Boden*, 40 (9): 345–362.
- MUNR & SENSTADTUM (1995): Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg & Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin (1995): *Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Berlin und Umland – Entwurf*. Berlin.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1995): Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 193, 17 S. Offenbach.
- PFÜTZNER, B.; LAHMER, W. & BECKER, A. (1997): ARC/EGMO – Programmsystem zur GIS-gestützten hydrologischen Modellierung, überarbeitete Kurzdokumentation zur Version 2.0.
- PFÜTZNER, B.; LAHMER, W.; BECKER, A.; KLÖCKING, B. (1998): ARC/EGMO – GIS-gestützte hydrologische Modellierung, Programmdokumentation.
- QUAST, J. & J. STEIDL (1999): Wasser- und Stoffrückhalt im Tiefland des Elbeinzugsgebietes. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt im BMBF-Forschungsverbund Elbe-Ökologie, FKZ 0339585. Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Müncheberg, unveröffentlicht.
- RACHIMOV, C. (1996): ABIMO 2.1, Abflussbildungsmodell, Algorithmus zum Bagrov-Glugla-Verfahren für die Berechnung langjähriger Mittelwerte des Wasserhaushalts. *Programmbeschreibung; pro data consulting*, Rangsdorf, im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin, unveröffentlicht.
- SCHMIDT, R. & R. DIEMANN (Hrsg.) (1991): *Erläuterungen zur Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standorterkundung (MMK)*. Müncheberg, Eberswalde.
- STEIDL, J.; R. DANNOWSKI; S. FRITSCH & M. BEHRENS (1999): GIS-based analysis of the subsurface flow of dissolved nitrogen into ground and surface waters. In: DANNOWSKI, R.; J. STEIDL; J. QUAST; S. FRITSCH; M. BEHRENS; D. DEUMLICH; L. VÖLKER; W. MIODUSZEWSKI & I. KAJEWSKI: *Diffuse entries in rivers of the Oder Basin*. Final Report Phase II. [Eds.]: Okruszko, H. & W. Dirksen, Polska Akademia Nauk (PAN), Warszawa, und Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Bonn. – DVWK-Materialien 9, ISSN 1436–1639, Bonn (WVGW), XVI + 132 pp.
- TURC, L. (1961): Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. *Ann. Agron.* 12, 13–49.
- WENDLING, U. & SCHELLIN, H.G. (1986): Neue Ergebnisse zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration. *Z. für Meteorologie* 36, 3, 214–217.
- WENDLING, U. (1995): Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung. *Wasserwirtschaft* 85 (12): 602–604.
- WWD (1973): *Teilabschlußbericht zum FA Niederschlags-/Abflussbeziehung in kleinen Einzugsgebieten*. Einzugsgebiet: Obere Dahme. Wasserwirtschaftsdirektion Spree – Oder – Neiße. Cottbus. 70 S. + Anl. (unveröffentlicht)

Schriftenreihe „Studien und Tagungsberichte“ (ISSN 0949-0838)

- Band 1 **Geotechnik im Deponiebau**
Ausgewählte Beiträge aus den Geotechnischen Seminaren des Landesumweltamtes Brandenburg 1992/94 (1994)
- Band 2 **Abwasserbeseitigung im Land Brandenburg**
Abwasserbeseitigung im Land Brandenburg – dezentrale Lösungen – Tagungsbericht über das Abwassersymposium am 21.10.1992 (1993)
- Band 3 **Das Trockenjahr 1992 im Land Brandenburg**
Eine Modellbetrachtung aus wasserwirtschaftlicher Sicht – Studie (1994)
- Band 4 **Abfallwirtschaft und Bergbau**
Beiträge der Fachtagung „Abfallwirtschaft/Kreislaufwirtschaft – Herausforderung für die Region Cottbus und die Braunkohlenindustrie“ am 05./06.04.1995 (1995)
- Band 5 **Luftqualität 1975 bis 1990**
Ein Rückblick für das Gebiet des heutigen Landes Brandenburg – Studie (1995)
- Band 6 **Wasserbeschaffenheit in Tagebaurestseen**
Bergbaubedingte Wasserbeschaffenheit in Tagebaurestseen – Analyse, Bewertung und Prognose – Untersuchungen im Lausitzer Braunkohlenrevier - Studie (1995)
- Band 7 **Rüstungsalllasten**
Beiträge des Fachseminars „Rüstungsalllasten“ am 22.06.1995 in Potsdam (1995)
- Band 8 **Die Havel**
Naturwissenschaftliche Grundlagen und ausgewählte Untersuchungsergebnisse – Studie (1995)
- Band 9 **Rieselfelder Brandenburg-Berlin (1995)**
– Fachtagung „Rieselfelder Brandenburg-Berlin“ im Februar 1995
– Bericht des Wissenschaftlich-technischen Beirates Rieselfelder (WTB) von 12/1995
- Band 10 **Ausweisung von Gewässerrandstreifen**
Studie zur Erarbeitung von Grundlagen für die Ausweisung von Gewässerrandstreifen – Studie (1996)
- Band 11 **Brandenburger Ökologietage I: Natur- und Ressourcenschutz durch nachhaltige Landnutzung: Fachtagung des Landesumweltamtes am 06.11.1996 – Tagungsbericht (1996)**
- Band 12 **Radioaktive Altlasten auf WGT-Flächen**
Erfassung und Sanierung radioaktiver Belastungen auf ehemaligen WGT-Liegenschaften im Land Brandenburg – Studie (1996)
- Band 13/14 **Rieselfelder südlich Berlins**
Altlast, Grundwasser, Oberflächengewässer/Gemeinsamer Abschlußbericht 1996
- Band 15 **Die sensiblen Fließgewässer und das Fließgewässerschutzsystem im Land Brandenburg – Studie (1998)**
- Band 16 **Das Sommerhochwasser an der Oder 1997 – Fachbeiträge anlässlich der Brandenburger Ökologietage II – Studie (1998)**
- Band 17 **Naturschutz in der Bergbaufolgelandschaft – Leitbildentwicklung – Studie (1998)**
- Band 18 **Landschaftsökologische Untersuchungen an einem wiedervernässten Niedermoor in der Nuthe-Nieplitz-Niederung – Studie (1998)**
- Band 19 **Umweltradioaktivität – Bericht 1998 für das Land Brandenburg (1999)**
- Band 20/21 **Untersuchungen der Oder zur Belastung der Schwebstoff- bzw. Sedimentphase und angrenzender Bereiche – Forschungsbericht 1998 (Anlagenband gesondert) 1999**
- Band 22 **Schadstoffbelastung von Böden im Nationalpark „Unteres Odertal“ vor und nach dem Oderhochwasser 1997 – Studie 1999**
- Band 23 **Geogen bedingte Grundbelastung der Fließgewässer Spree und Schwarze Elster und ihrer Einzugsgebiete – Studie 1999**
- Band 24 **Brandenburgisches Symposium zur bodenschutzbezogenen Forschung – Tagungsbericht vom 22. Juni 2000 (2000)**
- Band 25 **Humanarzneimittel in der Umwelt – Erhebung von Humanarzneimittelmengen im Land Brandenburg 1999 (Studie 2000)**
- Band 26 **Endokrin wirksame Stoffe in der Umwelt – Literaturstudie zur Bedeutung dieser Stoffe im Land Brandenburg (Studie 2000)**
- Band 27 **Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg Studie (2000)**
- Band 28 **Ökologietage Brandenburg III – Landschaftswasserhaushalt in Brandenburg Tagungsbericht vom 09. November 2000 (2001)**

Herausgeber: Landesumweltamt Brandenburg (LUA), Berliner Str. 21-25, 14467 Potsdam

Tel.: 0331/23 23 259

Fax: 0331/29 21 08

e-mail: infoline@lua.brandenburg.de