Thilo Günther

Die Rolle der Hydrometeorologie für Hochwasservorhersage und Bewirtschaftung der Wasserressourcen

1. Definition des Fachgebietes Hydrometeorologie, Schnittstellen zu Hydrologie und Wasserwirtschaft

Die *Hydrometeorologie* ist ein Teilgebiet der Meteorologie, das sich mit den Wechselwirkungen zwischen atmosphärischen Vorgängen im Wasserkreislauf und den hydrologischen Prozessen befasst (DIN 4049). Ihr fällt damit die Aufgabe zu, sich in Auswertung der Gesetzmäßigkeiten der Wechselwirkungsprozesse zwischen Atmosphäre und Hydrosphäre der Anwendung meteorologischer Informationen auf hydrologische Prozesse zu widmen, entsprechende Informationen auszuarbeiten, zu speichern und in geeigneter Form und Verdichtung nutzerfreundlich bereitzustellen bzw. abrufbereit zu halten. Während die *Hydrologie* die Wissenschaft vom Wasser, seinen Eigenschaften und seinen Erscheinungsformen auf und unter den Landoberflächen sowie in den Küstengewässern ist, beschäftigt sich die *Wasserwirtschaft* mit der zielbewussten Ordnung aller menschlichen Einwirkungen auf das ober- und unterirdische Wasser. Die Trennfläche zwischen den Wissenschaftsgebieten Hydrometeorologie und Hydrologie ist die Erdoberfläche (mit Orographie, Besiedlung, Vegetation. Bodenart usw.), deren Interaktionen mit der Atmosphäre durch die Hydrometeorologie und deren Interaktionen mit dem ober- und unterirdischen Wasser durch die Hydrologie zu untersuchen sind. Damit kann eine eindeutige Schnittstelle zwischen hydrometeorologischen und den hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Aufgaben festgelegt werden.

2. Bedarfsentwicklung und Anwendungsgebiete hydrometeorologischer Arbeitsergebnisse

Die besondere Rolle der Hydrometeorologie für die Wasserwirtschaft ergibt sich aus der Stellung der Größen Niederschlag (einschließlich Schneedecke) und Verdunstung im Wasserkreislauf. Niederschlag und Verdunstung stellen bestimmende Input- und Steuergrößen in wasserwirtschaftlichen Systemen

dar und sind seit jeher Bestandteil meteorologischer Untersuchungen (Abb. 1, Abb. 2).

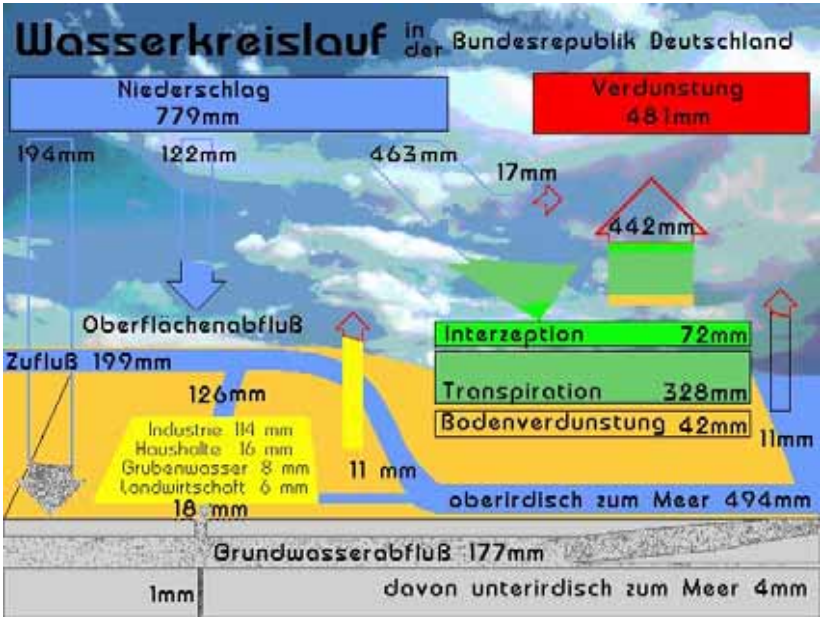
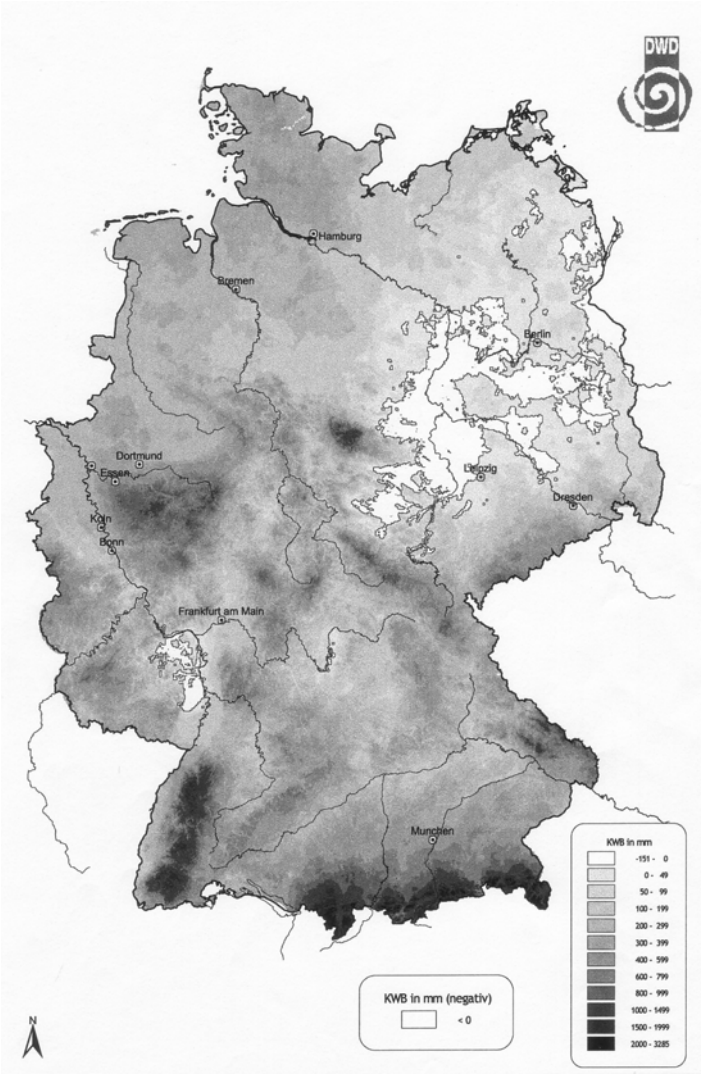


Abb. 1:
Wasserkreislauf in der Bundesrepublik Deutschland

Die zunehmend intensivere Nutzung der Wasserressourcen bei gleichbleibender bis rückläufiger Verfügbarkeit des Wasserdargebots einerseits sowie häufigere Extremereignisse andererseits führen zu ständig weiter steigenden Anforderungen an die hydrometeorologischen Arbeitsergebnisse (Daten, Produkte, Spezialdienstleistungen) und deren Anwendungen. Dies erfordert eine kontinuierliche Verbesserung und Weiterentwicklung der wetterdienstlichen Instrumentarien (Nutzung moderner Datengewinnungs- und -übertragungstechniken, Berechnungs- und Präsentationsverfahren, Gutachtenbausteine und Simulationsmodelle).

Spezielle wasserwirtschaftliche Anwendungsgebiete des hydrometeorologischen Leistungsspektrums sind in der Dimensionierung von wasserwirtschaftlichen Bauwerken, der Flussgebietsmodellierung, der Hoch- und Niedrigwasser-Analyse bzw. -vorhersage sowie in der Wasserbilanzierung zu sehen. Die Leistungen werden sowohl im Echtzeitregime einschließlich Vor-



KWB = Niederschlagshöhe minus Höhe der potentiellen Verdunstung
(Originalkarte in Farbe; vgl. Hydrologischer Atlas für Deutschland [14])

Abb. 2:
Jahreswerte der klimatischen Wasserbilanz KWB (1961-1990)

hersagen als auch im Nicht-Echtzeitregime in ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung rasterorientiert und flächendeckend benötigt. In der Tendenz werden verstärkt auch Aussagen über mögliche Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf das Wasserdargebot bzw. die Verfügbarkeit der Wasserressourcen erwartet.

3. Hydrometeorologische Beiträge zur Hochwasservorhersage

Die meteorologischen Ursachen für Hochwasser sind kurzzeitige Starkregen in kleinen Flusseinzugsgebieten, anhaltende Dauerregen in großen Einzugsgebieten und plötzliche Schneeschmelzen. Häufig treten diese auslösenden Ereignisse auch kombiniert auf. Für die Entstehung und den Ablauf von winterlichen Hochwasserereignissen ist aus hydrometeorologischer Sicht das Zusammenwirken von Niederschlagsgeschehen und Schneedeckenverhalten von besonderer Bedeutung. Aufgrund dieser Ursachenlage wird deutlich, dass die Ergebnissicherheit von Hochwasservorhersagen in hohem Maße von der Qualität und von der rechtzeitigen Verfügbarkeit der hydrometeorologischen Informationen abhängt. Die optimale Bereitstellung dieser Daten kann Hochwasserereignisse zwar nicht verhindern, wohl aber dazu beitragen, die Hochwasservorhersage zu verbessern und auf diese Weise Schäden zu verhüten oder wenigstens zu mindern.

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) hat ein System der Informationsbereitstellung konzipiert und zum Teil schon realisiert, das sich auf gegenseitig ergänzende und aufeinander aufbauende Instrumentarien in Form von Niederschlags- und Schneedeckenmessungen sowie Modellrechnungen stützt.

Die einzelnen Komponenten sind:

- Automatisierung und Reorganisation des Niederschlagsmessnetzes, Aktivierung des Meldesystems
- Aufbau und Weiterentwicklung des Radarverbundnetzes, Bereitstellung quantitativer Niederschlagsdaten aus Radarmessungen (on-line Aneichung)
- Verbesserung der quantitativen Niederschlagsvorhersage mit Regional- und Lokalmodellen
- Quantitative Analyse- und Vorhersage der Schneedeckenentwicklung/ Schmelzwasserabgabe
- Quantitative Ermittlung und Echtzeitbereitstellung von Gebietsniederschlägen

Der DWD unterhält ein umfangreiches Messnetz und ein Meldesystem, durch das Tag für Tag in kurzen Abständen meteorologische Informationen

über spezielle Kommunikationswege weitergegeben werden. Zurzeit (Stand Nov. 2000) umfasst das hauptamtliche synoptisch-klimatologische Mess- und Beobachtungsnetz 123 mit Personal besetzte Wetterstationen, von denen 70 einen 24-stündigen Beobachtungsdienst durchführen und 53 autonom arbeitende automatische Wetterstationen (Wst). Das nebenamtliche Mess- und Beobachtungsnetz umfasste zum Jahresende 2000 450 Klima- und 3468 Niederschlagsstationen. Wegen der hohen räumlichen und zeitlichen Schwankung des Niederschlags reichen die in Echtzeit zu Verfügung stehenden Informationen des synoptisch-klimatologischen Messnetzes nicht aus. Daher wird auch die Automatisierung des nebenamtlichen DWD-Niederschlagsmessnetzes im Rahmen des Projektes MESSNETZ 2000 weiter vorangetrieben. Da für eine rasche Umrüstung und die aus hydrologischer Sicht gewünschte höhere Messnetzdichte die Finanzierungsmöglichkeiten des DWD nicht ausreichen, wird in fachlicher und finanzieller Kooperation mit den Bundesländern zurzeit versucht, die Modernisierung des Netzes gemeinsam zu realisieren. Dabei konzentrieren sich die Anstrengungen zunächst darauf, ein abgestimmtes fernmeldendes *Ombrometermessnetz* (für die automatische Gewinnung hochaufgelöster Niederschlagsdaten) sowie einen speziellen Meldedienst für die Abgabe von Meldungen über starken Niederschlag und den Zustand der Schneedecke insbesondere in Hochwasserentstehungsgebieten einzurichten.

Mit der Inbetriebnahme des Wetterradars in Dresden im März 2000 ist der Aufbau des *Radarverbundnetzes* des DWD abgeschlossen. Damit stehen für Deutschland flächendeckende Informationen von 16 Wetterradars zum aktuellen Niederschlagsgeschehen zur Verfügung (Abb. 3).

Auch wenn die Qualität der Niederschlagsintensitäten dieser in Echtzeit vorliegenden Radarniederschläge in unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Auflösungen für die hohen Anforderungen aus den hydrologischen Anwendungsbereichen noch nicht ausreicht, so ist der Vorteil der flächendeckenden Verfügbarkeit im Vergleich zu den punktuellen konventionellen Niederschlagsmessgeräten nicht von der Hand zu weisen. In Verbindung mit dem im Aufbau befindlichen automatisch fernmeldenden Ombrometermessnetz können die aktuellen Radarniederschlagsbilder, die bis zu einer Auflösung von 1 km² alle fünf Minuten verfügbar sind, für Steuerungen im wasserwirtschaftlichen Bereich, z. B. für die Hochwasservorhersage, genutzt werden. Im Rahmen eines Entwicklungsvorhabens (Projekt RADOLAN) werden gegenwärtig die operationellen Radarniederschlagsanalysen bis zu einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde durch eine Aneichung mit den

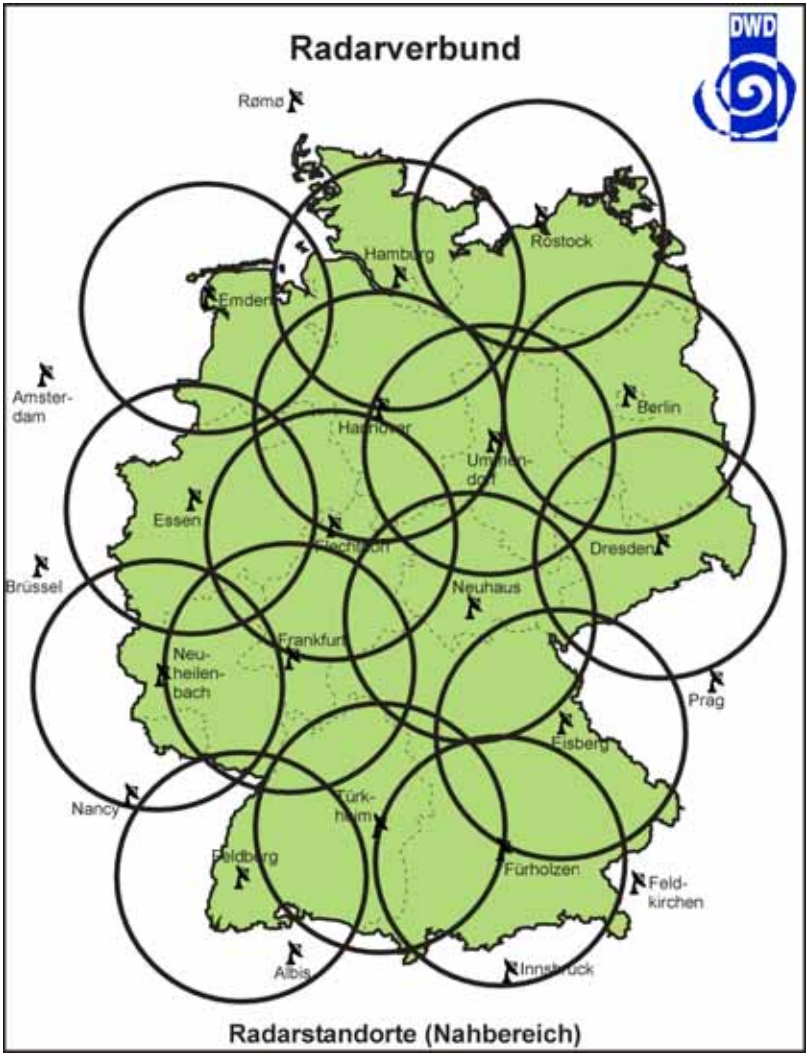


Abb. 3:
Radarverbund der DWD-Radarstandorte (Nahbereich)

Messungen der automatischen Niederschlagsstationen verbessert. Mit erfolgreichem Abschluss des Projektes werden im Jahr 2003 online-angeeichte Radarniederschlagsprodukte mit Stunden- und Tageswerten des Niederschlages

bereitgestellt. Parallel zum schrittweisen Aufbau des automatischen Ombrometermessnetzes durch das Projekt MESSNETZ 2000 wird voraussichtlich bis 2005 eine für Deutschland flächendeckende Radarniederschlagsanalyse verfügbar sein.

Nach dem endgültigen Ausbau dieser beiden Komponenten werden die Niederschlagsgebiete hinsichtlich Lage, Struktur und Intensität in Deutschland überwacht werden können. Die parallel verwendeten Satellitenaufnahmen unterstützen die Wetterüberwachung durch die Information über Typ, Verteilung und Höhe der Bewölkung. Sowohl die Niederschlagsdiagnose als auch die Niederschlagsvorhersage bis etwa 2 Stunden im Voraus profitieren davon.

Ein wichtiges Unterstützungsinstrument für eine möglichst frühzeitige Starkniederschlagswarnung ist die *quantitative Niederschlagsvorhersage* mit Hilfe der numerischen Wettervorhersage (NWV). Ende 1999 wurde im Deutschen Wetterdienst ein neues operationelles NWV-System eingeführt [1]. Es besteht aus einem Global-Modell (GME, Maschenweite 60 km, 31 Schichten) und einem nicht-hydrostatischen Lokal-Modell (LM, Maschenweite 7 km, 35 Schichten). Das LM liefert detaillierte zweitätige Wettervorhersagen für Mitteleuropa. Seit Dezember 2000 wurde durch eine Filterung der Modellorographie eine deutliche Qualitätssteigerung bei den besonders schwierigen Niederschlagsvorhersagen erreicht. An weiteren Verbesserungen der Vorhersage des hydrologischen Zyklus wird gearbeitet.

Ergänzend zu den Aktivitäten, die auf die Verbesserung der Niederschlagsdatenbasis und der numerischen Niederschlagsvorhersage gerichtet sind, wurde im Fachbereich Hydrometeorologie des DWD weiter daran gearbeitet, die Genauigkeit der flächendeckendenden Ermittlung des gefallenen Niederschlages und der Wasserabgabe aus der schmelzenden Schneedecke zu erhöhen. Mit diesem Ziel wurden die Modelle SNOW-D und BONIE entwickelt. Beide Modelle werden seit mehreren Jahren erfolgreich im Routineeinsatz angewendet.

Das *Modell SNOW-D* wurde konzipiert, um kontinuierlich die Entwicklung der Schneedecke zu simulieren und die Wasserabgabe aus der Schneedecke vorherzusagen. Die Berechnung der Schneedeckenentwicklung erfolgt mit Hilfe eines Modells, dessen physikalisch begründete Bausteine die Teilprozesse Aufbau, Umwandlung und Abbau der Schneedecke sowie die Schmelzwasserabgabe beschreiben. Als Input werden Mess- und Vorhersagedaten der meteorologischen Elemente Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag und Globalstrahlung benötigt. Mit SNOW-D werden tägliche

rasterbezogene (7 x 7 km) Werte des Niederschlagsdargebots aus Schneeschmelze und Regen (Vorhersage 6-h-Intervalle) im Echtzeitregime für einen Vorhersagezeitraum von 48 h berechnet. Die rasterbezogenen Ergebnisse können flexibel zu beliebigen Flächenwerten (z. B. Einzugsgebieten) verdichtet werden. Die Ergebnispräsentation kann wahlweise in Kartendarstellung, als Tabelle oder als grafische Darstellung erfolgen. Darüber hinaus ist auch eine Direkteingabe in hydrologische Modelle an den Hochwasservorhersagezentren möglich [2].

Das *Modellkonzept BONIE* beinhaltet die Bestimmung von Gitterwerten der Niederschlagshöhe. Es ist ein Verfahren, das einerseits operationell zur Hochwasservorhersage und andererseits für hydroklimatologische Untersuchungen eingesetzt werden kann. Es bildet eine beliebige Menge an räumlich unregelmäßig vorliegenden Messwerten auf ein regelmäßiges Netz von Gitterpunkten ab, dessen Maschenweite derzeit in Ost-West-Richtung 6' und in Nord-Südrichtung 4' beträgt; die Gitterpunkte haben also einen Abstand von etwa sieben Kilometern. Eine Veränderung der Maschenweite ist möglich. Die Grundlage von BONIE bildet ein aus der Theorie der künstlichen Intelligenz abgeleitetes Lernverfahren. BONIE trennt anhand hinreichend langer Reihen von Tageswerten der Niederschlagshöhe in Abhängigkeit von Relief und Wetterlage verschiedene charakteristische räumliche Verteilungsmuster in einer bestimmten Analyseregion. Es leitet die unterschiedlichen mathematisch-statistischen Eigenschaften dieser Muster - vor allem die räumliche Korrelation, aber auch die Abhängigkeit vom Relief und von der geografischen Lage - ab und "erkennt" anhand der Messwerte eines konkreten Tages das zugehörige Muster. Diese Muster werden als Hintergrundfeld bezeichnet.

Mit der diesem Muster entlehnten Hintergrundinformation ist es möglich, auch bei lokalen Datenausfällen (Lükken) die räumliche Verteilung der Niederschläge genauer als durch andere Verfahren zu bestimmen. Anstelle der aus Klimadaten abgeleiteten Hintergrundfelder lassen sich im operationellen Betrieb auch Radarmessungen verwenden.

Die Analyseregionen haben eine Größenordnung von etwa 10.000 km² und sind meist mit großen Flusseinzugsgebieten bzw. deren Teilen identisch.

Die Gitterpunktwerte werden mit Hilfe des dem *Kriging* verwandten Verfahrens der statistischen Interpolation anhand aller im Gebiet verfügbaren Messwerte (und nicht nur der allernächsten) interpoliert [3].

Ein Beispiel für die mit BONIE im DWD täglich erzeugten Routineplots zeigt die Abbildung 4. Die Gebietswertberechnung erfolgt bei Bedarf durch arithmetische Mittelung der Gitterpunktwerte. Bei hinreichend geringem Git-

terpunktabstand entspricht dieses arithmetische Mittel dem räumlichen Integral der Messungen - dem tatsächlichen Gebietswert.

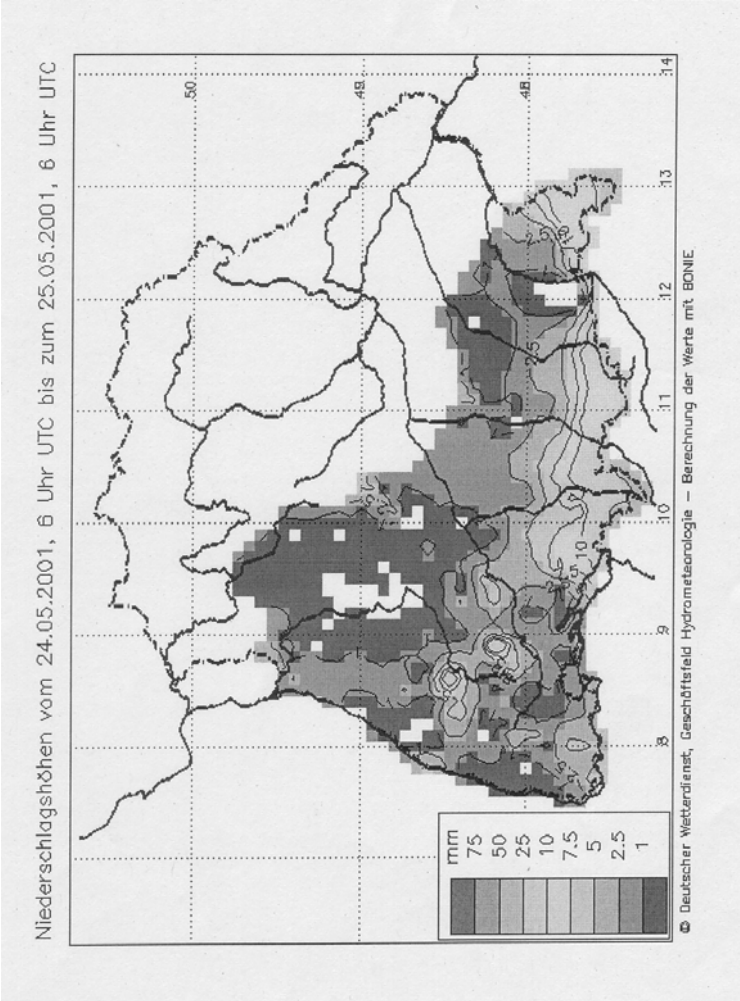


Abb. 4:
Niederschlagsanalyse mit Hilfe des Verfahrens BONIE

Die operationelle Anwendung von BONIE ist vor allem in Hochwasserentstehungsgebieten geplant.

Die jüngsten Erfahrungen in der Zusammenarbeit zwischen dem Geschäftsfeld Hydrometeorologie des DWD und den regionalen Hochwasservorhersagezentren der Bundesländer haben gezeigt, dass die bedarfsgerechte Echtzeit-Bereitstellung der hydrometeorologischen Inputdaten erheblich zur Verbesserung der Hochwasservorhersagen beiträgt.

4. Untersuchungen zu extremen Werten der Niederschlagshöhe und des Niederschlagsdargebots

Neben den Arbeiten für operationelle Zwecke werden im Fachbereich Hydrometeorologie auch statistisch-klimatologische Untersuchungen durchgeführt. Im Rahmen der KOSTRA-Projekte wurden punktuell gültige Auswertungen von Starkniederschlagshöhen vorgenommen. Der extremwertstatistische Ansatz geht von partiellen und jährlichen Serien aus, aus welchen durch Regressionsrechnung Exponential- und Gumbelfunktionen angepasst werden. Auf umfangreichen Punktauswertungen aufbauend, wurde anschließend eine flächendeckende Regionalisierung des extremen Niederschlagsgeschehens vorgenommen, so dass mithilfe der Rasterfeldkarten unmittelbar oder unter Anwendung einer Berechnungsvorschrift bundesweit für jeden Ort extreme Niederschlagshöhen $h_N(D,T)$ - bezogen auf das Jahr oder auf Jahreszeiten und in Abhängigkeit von ihrer Dauer (D) und Wiederkehrzeit (T) - ermittelt werden können [4]. Die Abb. 5 zeigt z. B. die Rasterkarte für die Dauerstufe D = 72 h, die Wiederkehrzeit T = 100 a und die Zeitspanne Mai bis September. Die räumlichen Verteilungen weisen den Alpenbereich, das Alpenvorland und den Schwarzwald als die Regionen mit den deutlich größten Starkniederschlagshöhen aus. In den Mittelgebirgsregionen treten der Höhenlage entsprechend große Werte auf. Mit einer Jährlichkeit von T = 100 a kommen jedoch auch in Tallagen oder im Lee der Mittelgebirge bedeutende Starkniederschlagsereignisse vor. Dafür sorgen außergewöhnliche Wettersituationen in Verbindung mit lokalen topografischen Effekten. Einer gesonderten Erklärung bedürfen die beträchtlichen Starkniederschlagshöhen am östlichen Rand des Bundesgebietes (s. Abb. 5), vor allem in der Lausitz und östlich des Berliner Raums. Sie sind das Ergebnis der von Zeit zu Zeit auftretenden sog. Vb-Wetterlagen, bei denen sich als Folge einer von Polen bis über Norditalien reichenden Tiefdruckzone ein umfangreiches Niederschlagsfeld ausbildet, das aufgrund der gegeneinander strömenden, unterschiedlich temperierten Luftmassen über lange Zeit immer wieder neu generiert wird.

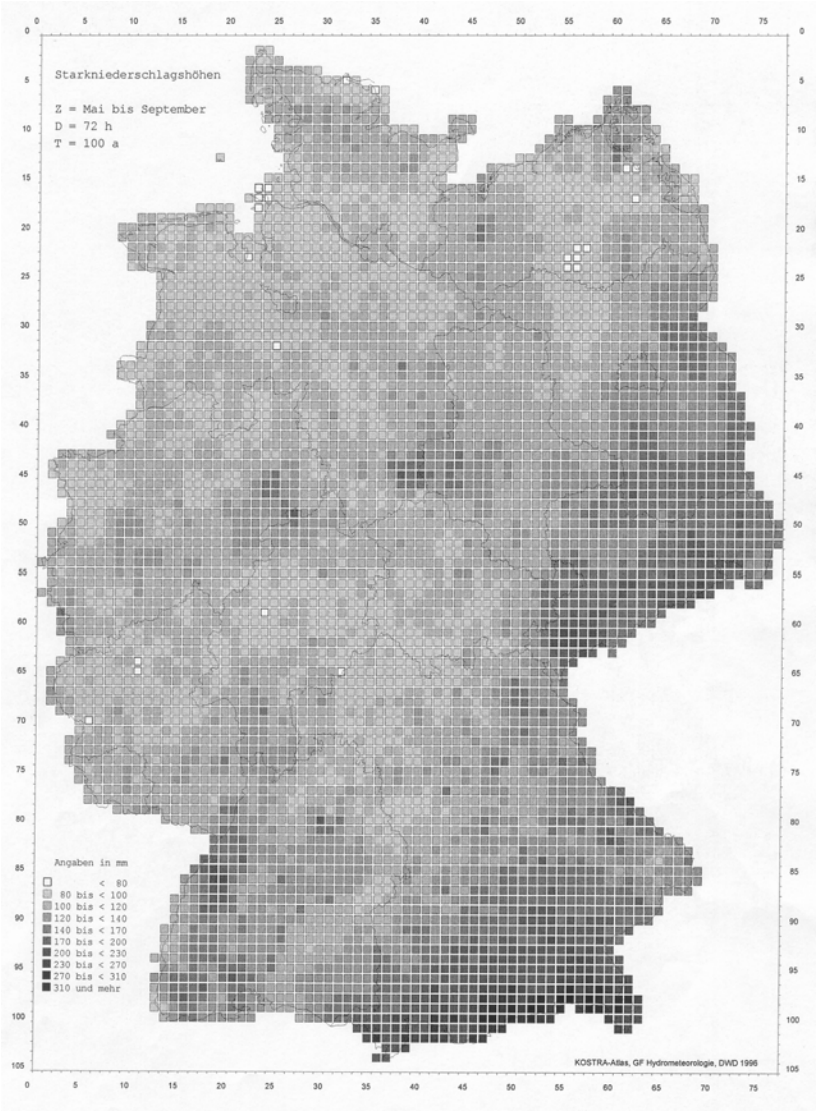
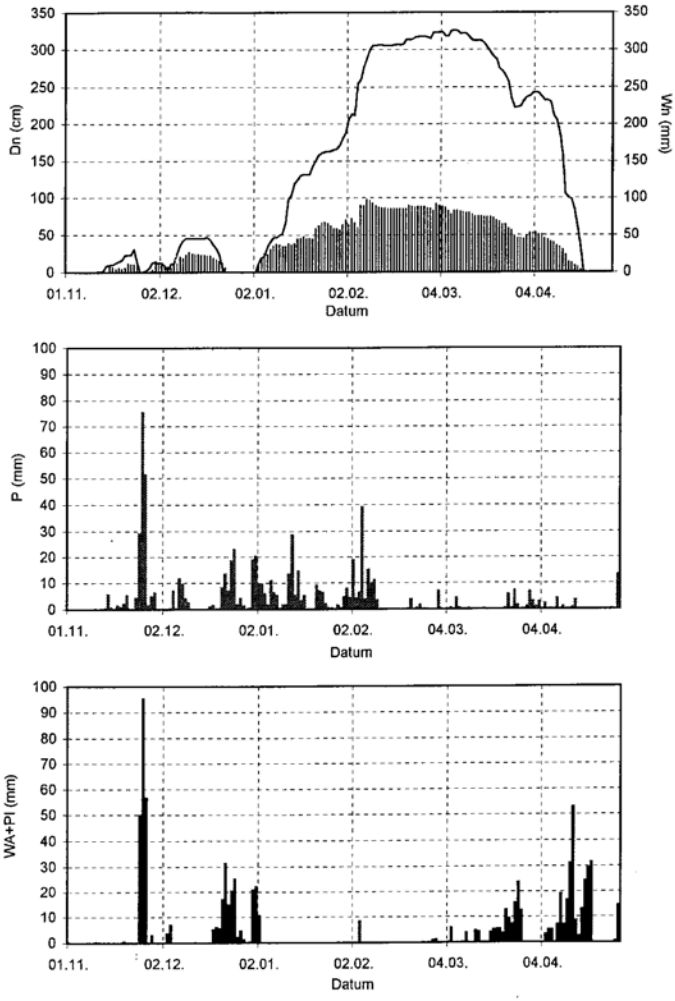


Abb. 5:
Regionalisierte punktuelle Starkniederschlagshöhen für die Zeitspanne Mai bis September, die Dauerstufe 72 h und die Wiederkehrzeit 100 a, Bundesrepublik Deutschland (Originalkarte in Farbe; s. KOSTRA-Atlas [4])

Die Starkniederschlagsauswertungen werden zur Beantwortung ganz unterschiedlicher Fragen herangezogen. Neben den hydrometeorologischen Unterlagen zur Bemessung von Entwässerungskanälen werden beispielsweise standortspezifische Modellregen (theoretische Niederschlagsereignisse mit vorgegebenem Verlauf der Niederschlagsintensität) im Kurzzeitbereich abgeleitet. Ein anderes Anwendungsgebiet ist die Dimensionierung von Regenrückhaltebecken und Talsperren. Oftmals gilt es auch zu beurteilen, inwieweit ein schadenverursachender Niederschlag als "seltenes Ereignis" angesehen werden muss.

Bei hydrologischen Extremwertuntersuchungen für das Winterhalbjahr, z. B. Analysen von winterlichen Hochwasserereignissen, muss der Einfluss der Schneedecke auf den Wasserhaushalt berücksichtigt werden. Da die im Winter fallenden Niederschläge in der Schneedecke gespeichert werden können, kommen sie nicht unmittelbar zum Abfluss, sondern erst nach längerer Zeit (bis zu Monaten). Die hydrologische Wirksamkeit von (extremen) Winterniederschlägen wird somit bei Vorhandensein einer Schneedecke durch die zeitliche Verzögerung von Ablagerungs- und Schmelzprozessen modifiziert. Bei Zusammentreffen intensiver Schneeschmelze mit starken Regenniederschlägen können Extremwerte auftreten, die in ihrer Höhe und auch Intensität vor allem in schneehydrologisch relevanten Gebieten die Extremwertstatistik entscheidend beeinflussen. Das bedeutet, dass die Bemessung von wasserwirtschaftlichen Anlagen, wie z. B. Dämmen, Deichen oder Talsperren auf der unsicheren Seite liegt, wenn der Schmelzwasseranteil vernachlässigt wird. Das trifft auf Gebiete in mittleren und höheren Lagen der Gebirge (> 400 m ü. NN) in besonderem Maße zu.

Abb. 6 veranschaulicht am Beispiel einer ausgewählten Winterperiode die Verteilung des Niederschlags bzw. des Niederschlagsdargebots (Summe von Schmelzwasser und Regen). Deutlich erkennbar sind die Unterschiede in der Verteilung des *gefallenen* Niederschlags P (Abb. 6, Mitte) und des *hydrologisch wirksamen* Niederschlagsdargebots WP (Abb. 6, unten). Die Speicherung des Niederschlags in der Schneedecke über mehrere Monate (Abb. 6, oben) verursacht zwischen Anfang Januar bis Ende Februar 1984 - mit eintägiger Unterberechung - eine aus hydrologischer Sicht ca. 60-tägige "Trockenperiode" mit allen Konsequenzen für das Abflussgeschehen. Die in dieser Periode gespeicherten Wasseräquivalente werden dann in der intensiven Schmelzperiode Anfang April 1984 mit Schmelzbeträgen (verstärkt durch Regen) bis zu 243 mm in zehn Tagen abgebaut.



oben: Schneedeckenhöhe(Dn, Balken) und Wasseräquivalent (Wn, Linie)
Mitte: Niederschlagshöhe (P)
unten: Niederschlagsdargebot (WP): Summe der Wasserabgabe aus der Schneedecke (WA) und Regen (Pl)
Station: Braunlage, Winter 1983/84

Abb. 6:
Verteilung des Niederschlags bzw. des Niederschlagsdargebots in einer Winterperiode

Um den Einfluss der Schneedeckenentwicklung auf die regionale Verteilung extremer Niederschlagsdargebote flächendeckend für ganz Deutschland zu untersuchen, wurde das Projekt "Regionalisierung der Extremwerte der Wasserabgabe aus Niederschlag und Schneedecke (REWANUS)" durchgeführt. Ziel dieses Projekts war - in Anlehnung an die Methodik und Präsentationsform der KOSTRA-Untersuchungen - die Bereitstellung flächendeckender, rasterorientierter Angaben von Extremwerten des Niederschlagsdargebots im hydrologischen Winterhalbjahr in Kartendarstellungen (Rasterung 8,5 x 8,5 km) und als Zugriffsroutine. Die Ergebnisse liegen als REWANUS-Atlas [5] in 21 farbigen Karten (Dauerstufen D = 12, 24, 48, 72, 120, 168, 240 Stunden; Wiederkehrzeiten T = 1, 10, 100 Jahre) vor.

Um die Relevanz der abflusswirksamen Größe Niederschlagsdargebot, die auch die Schmelzwasserabgaben berücksichtigt, zu verdeutlichen, wurden die Abweichungen zwischen den Extremwerten dieser Größen und den KOSTRA-Starkniederschlagshöhen ermittelt. Die Abweichungen - bezogen auf alle Rasterflächen - betrugen im Mittel zwischen +15 % (Dauerstufe D = 1 Tag) und +25 % (Dauerstufe D = 3 Tage). Mit Zunahme der Dauerstufe steigt der Einfluss der Schneedecke auf den Extremwert. In einigen besonders schneehydrologisch relevanten Gebieten können die Abweichungen Werte um + 100 % annehmen [6]. In Abb. 7 wird für den Süden Deutschlands die prozentuale Abweichung der Extremwerte des Niederschlagsdargebots von den KOSTRA-Starkniederschlagshöhen für die Dauerstufe D = 3 Tage und T = 100 Jahre dargestellt. Die REWANUS-Ergebnisse bestätigen die Bedeutung der Größe Niederschlagsdargebot (Summe aus Regen und Schmelzwasserabgabe). Die durch die Schneedeckenentwicklung modifizierte Extremwertverteilung in den Wintermonaten führt zu höheren Extremwerten und veränderten Eintrittswahrscheinlichkeiten, deren Vernachlässigung zu gravierenden Fehleinschätzungen bei der Bemessung von wasserwirtschaftlichen Anlagen und hydrologischen Extremwertuntersuchungen (z. B. extreme Hochwasserabflüsse) führen kann.

Die KOSTRA- und REWANUS-Untersuchungen liefern noch keine Aussagen zu extremen Gebietswerten und keine Aussagen zu oberen Grenzwerten. Daher wurde in einem weiteren Arbeitsschwerpunkt "*Maximierte Gebietsniederschlagshöhen in Deutschland*" ermittelt. Die Ergebnisse liegen ebenfalls in Karten- bzw. Tabellenform vor und stecken die Größenordnung der unter den gegebenen Klimaverhältnissen vermutlich größten Gebietsniederschlagshöhen in Abhängigkeit von der Dauerstufe, der Gebietsgröße und der Jahreszeit ab. Die Ergebnisse wurden mittels einer einheitlichen Methode

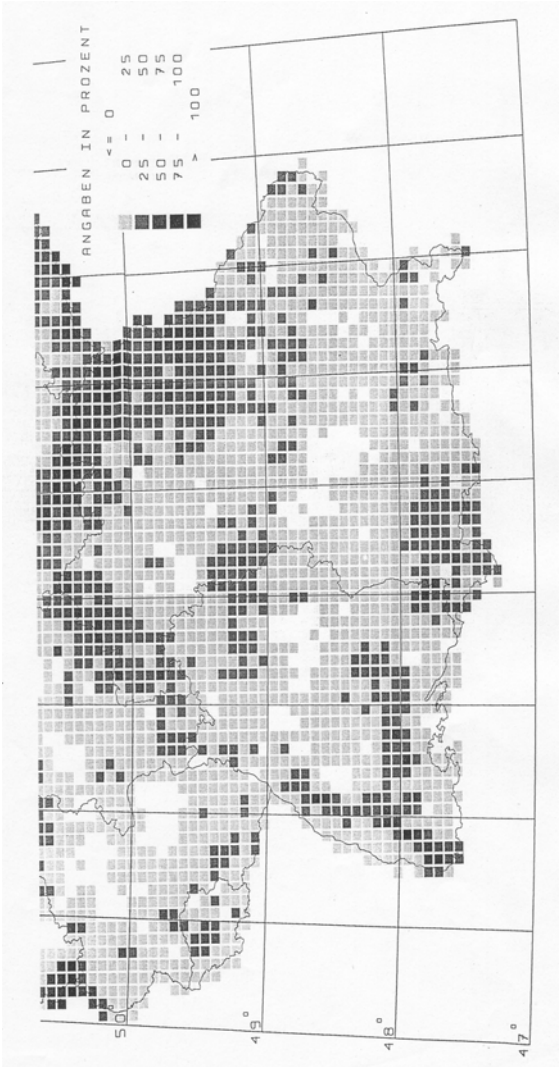


Abb. 7:
Rasterbezogene Differenzen zwischen den Extremwerten des Niederschlagsdargebots (Schmelzwasser und Regen) und den Starkniederschlagshöhen nach KOSTRA (in Prozent).
Winterhalbjahr, Dauerstufe D = 72 h, Wiederkehrzeit T = 100a,
Zeitraum 1951/80 (Ausschnitt Süddeutschland)

auf dem Wege einer physikalisch/klimatologisch sinnvollen Maximierung tatsächlich stattgefundener Starkniederschlagsereignisse erzielt und unter Verwendung eines Regionalisierungskonzeptes auf die gesamte Bundesrepublik übertragen [7, 8].

5. Hydrometeorologische Spezialdienstleistungen zur Wasserhaushaltsüberwachung und Langfristbewirtschaftung

Niederschlag, potentielle und/oder tatsächliche Verdunstung unter Berücksichtigung der Flächennutzung sowie die Bilanzen aus Niederschlag und den genannten Verdunstungsgrößen sind die wichtigsten hydrometeorologischen Basisgrößen für die Wasserhaushaltsmodellierung und die meteorologische Standort- und Gebietsbewertung zur Langfristbewirtschaftung der Wasserressourcen. Die in den Wasserhaushaltsmodellen benötigte zeitliche Auflösung dieses hydrometeorologischen Dateninputs reicht je nach Problemstellung vom Tageswert bis zu mittleren Monats- und Jahreswerten, die räumliche Auflösung vom repräsentativen Punktwert bis zum Flächenmittelwert bzw. zur Darstellung der genannten Größen in Form von Rasterwerten. Die Abhängigkeit des Verdunstungsprozesses von der Art der verdunstenden Oberfläche (Vegetationsdecke, Gewässer, Versiegelung) erfordert zudem eine flächendifferenzierte Berechnungsweise durch Definition von Hydrotopen und Berücksichtigung ihrer verdunstungsrelevanten nichtmeteorologischen Eigenschaften. Zur rationellen Bearbeitung der vielfältigen Anfragen aus Hydrologie und Wasserwirtschaft wurde zur Bereitstellung des benötigten hydrometeorologischen Dateninputs ein umfassendes, in seinen Modulen aufeinander abgestimmtes Modellpaket entwickelt, welches für die Wasserhaushaltskomponente Verdunstung in "GEBVER" zusammengefasst ist. GEBVER ist ein Modellsystem zur Berechnung und Präsentation der Verdunstung (potentielle, tatsächliche Verdunstung), des korrigierten Niederschlags und der Bilanzen auf der Grundlage von Messdaten des meteorologischen Standardmessnetzes [9, 10]. Die Berechnungsmodule umfassen im Bereich der *potentiellen* Verdunstung alle in der hydrologischen Modellierung gebräuchlichen Berechnungsverfahren. Zur Berechnung der *tatsächlichen* Verdunstungshöhen liegen die erforderlichen Module für die verschiedenen Flächennutzungsarten (Vegetationsflächen, versiegelte Flächen, Gewässerflächen) sowie für die Berechnung und Darstellung von Gebietswerten vor. Zur Berechnung der tatsächlichen Verdunstung und zur Berechnung der Bilanzgrößen werden als Modellinput nur Niederschlags-

daten eingesetzt, die um den systematischen Fehler der Niederschlagsmessung (beim Hellmann-Standardgerät immer Verluste infolge Wind-, Verdunstungs- und Benetzungseinfluss) korrigiert wurden. Das Korrekturverfahren ist integraler Bestandteil von GEBVER (s.Abb.8).

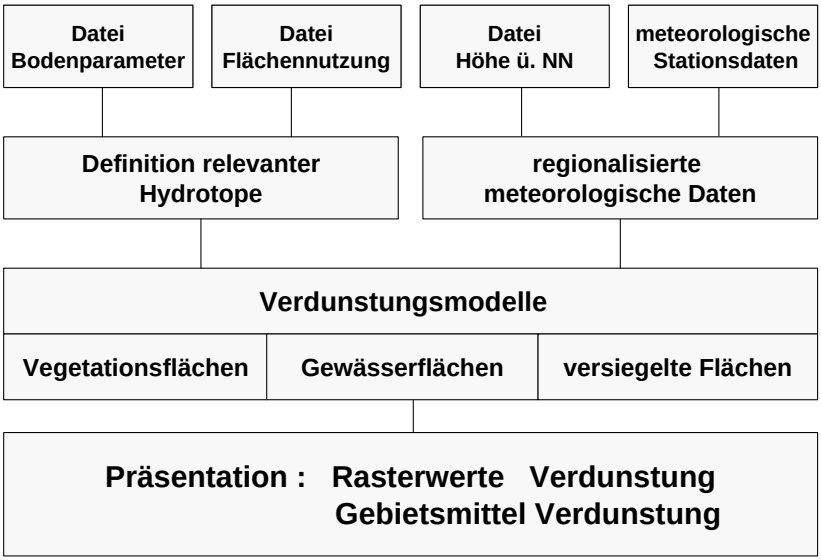


Abb. 8:
GEBVER - Modellsystem zur Berechnung der Gebietsverdunstung

6. Hydrometeorologische Untersuchungen zum Problem Klimaveränderungen

Nach den Feststellungen im "Third Assessment Report-Climate Change 2001 des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wird für die nächsten 100 Jahre mit einer Erhöhung der mittleren globalen Lufttemperatur um 1,4 bis 5,8 K gerechnet [11]. Eine solche signifikante "Klimaveränderung" hat auch spürbare Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, da ein Temperaturanstieg allgemein zu einer Intensivierung des hydrologischen Kreislaufs führt. Die Folgen sind: Erhöhte Verdunstungs- und Niederschlagsraten. Für die Wasserwirtschaft können sich signifikante Veränderungen der mittleren

Größen sowie Veränderungen im Schwankungs- und Extremverhalten ergeben. Betroffen davon wären die Oberflächenabflüsse (Niedrigwasser, Hochwasser) in Größe und Häufigkeit, der Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung.

Im Interesse der Wasserwirtschaft galt es zu untersuchen, ob die sich global abzeichnende Klimaveränderung an den hydrometeorologischen Grundgrößen Niederschlag einschließlich Schneedecke und Verdunstung in Deutschland nachweisen lässt. In einem von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser LAWA geförderten Projekt wurde auf der Basis einer umfangreichen Datengrundlage und unter Einsatz verschiedener statistischer Methoden (Zeitreihenanalyse) eine gründliche Untersuchung des Langzeitverhaltens dieser Größen vorgenommen. Das Gesamtziel des Projektes bestand in der Gewinnung und Bereitstellung detaillierter und regional differenzierter Informationen über die Variabilität der hydrometeorologischen Größen für verschiedene Zeit- und Raumbereiche und die Aufdeckung eventueller systematischer Veränderungen (Trends). Die umfangreichen Ergebnisse der Untersuchungen liegen in vier Teilberichten [12] vor.

Im Langzeit- und Trendverhalten ergaben sich jahreszeitlich differenzierte Bilder und markante Unterschiede zwischen den Stationen in der maritim beeinflussten Klimaregion sowie im Süden einerseits und den östlich gelegenen Stationen im Übergang zum kontinental geprägten Klima. So zeigen die *Jahreswerte der Niederschlagshöhe* im Zeitraum 1891 bis 1997 in Hamburg, Karlsruhe und München einen positiven linearen Trend, in Potsdam und Bamberg keine signifikante tendenzielle Veränderung (Abb. 9, Tab. 1). Die Trendbefunde stehen im Einklang mit den Ergebnissen bei Rapp und Schönwiese [13], die eine Niederschlagszunahme im westlichen und südlichen Teil Deutschlands und keine tendenziellen Veränderungen der jährlichen Niederschlagshöhe im östlichen Teil erkennen lassen.

Von großer Bedeutung für hydrologische Problemstellungen sind neben den Befunden zu den Jahreswerten Änderungen in der *innerjährlichen Verteilung der Niederschlagshöhen*, da Zu- oder Abnahmen der Niederschlagshöhen je nach Jahreszeit unterschiedliche Wirksamkeit im Wasserhaushalt aufweisen. Die Analyseergebnisse zu Niederschlagstrends in den einzelnen Monaten bzw. in den hydrologischen Halbjahren werden in Tab. 1 zusammengestellt. In der jahreszeitlichen Verteilung ist an allen untersuchten Stationen eine Zunahme der Winterniederschläge festzustellen.

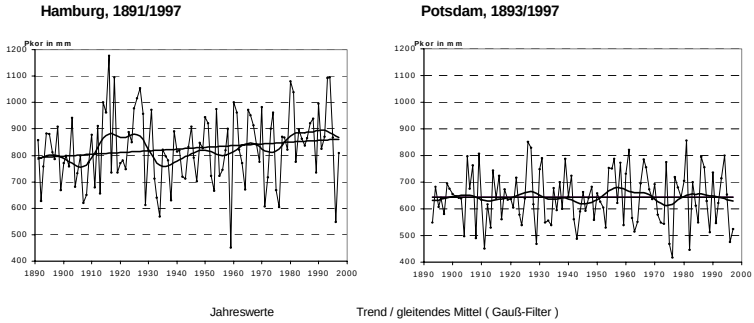


Abb. 9:
Zeitlicher Verlauf der Jahreswerte der korrigierten Niederschlagshöhe (Pkor) von Hamburg und Potsdam, Reihe 1891(93) / 1997

Station	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR	SO	WI
Potsdam	-2,3	+6,6	+2,8	+3,0	+3,3	+16,2	**-36,4**	+2,4	-6,9	-13,4	+7,5	+17,6	+0,6	-34,7	+35,3
Bamberg	-2,4	+4,8	+8,1	0,0	+0,5	+12,8	-7,7	-11,9	-6,6	-5,9	+8,5	+12,8	+12,9	-18,8	+31,7
Hamburg	+6,4	-6,7	+13,7	-5,3	+6,7	+13,7	-10,8	-8,1	+16,8	-8,2	**+30,4**	+21,1	**+69,7**	+10,0	**+59,7**
Karlsruhe	+7,9	+18,1	-3,8	-2,6	+26,3	+20,8	-10,3	-20,9	-25,1	-5,7	**+17,6**	+11,0	+33,4	-14,7	+48,2
München	-8,2	+11,6	+6,9	-7,5	+6,7	+16,9	+6,5	+17,8	-21,1	+0,8	**+28,1**	+12,2	+70,7	+27,6	+43,1

unterstrichene Werte: Irrtumswahrscheinlichkeit < 10 %
fett gedruckte Werte: Irrtumswahrscheinlichkeit < 5 %
So/Wi: hydrologische Halbjahre

Tabelle 1:
Monats-, Halbjahres- und Jahreswerte des linearen Trends der korrigierten Niederschlagshöhe (in mm), 1891/1997

Es wurde auch das langzeitliche Verhalten der *Anzahl der Niederschlagstage* mittels Trendanalysen untersucht. Als zweckmäßiger Grenzwert für eine Unterteilung in Tage mit weniger ergiebigen bzw. ergiebigen Niederschlägen wurde eine tägliche Niederschlagshöhe von 3,0 mm vorgegeben. Die Abb. 10 und 11 zeigen am Beispiel der Station Potsdam das Trendverhalten der Anzahl aller Niederschlagstage und der Niederschlagstage bei Differenzierung nach der täglichen Niederschlagshöhe. Der Trend der Anzahl der Tage mit geringem Niederschlag ($N \leq 3{,}0$ mm Tag) ist signifikant negativ, während er für die Anzahl der Tage mit über 3 mm Niederschlagshöhe praktisch unverändert bleibt.

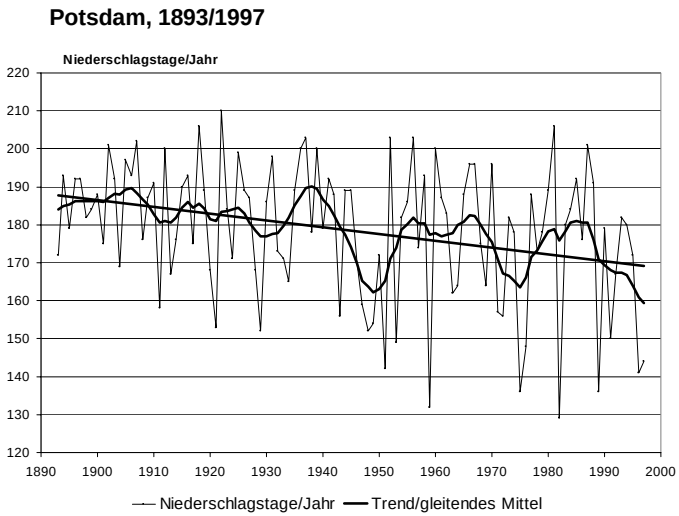


Abb. 10:
Anzahl der Niederschlagstage (N (0 ≥ 1 mm) im Jahr, Potsdam 1893/1997

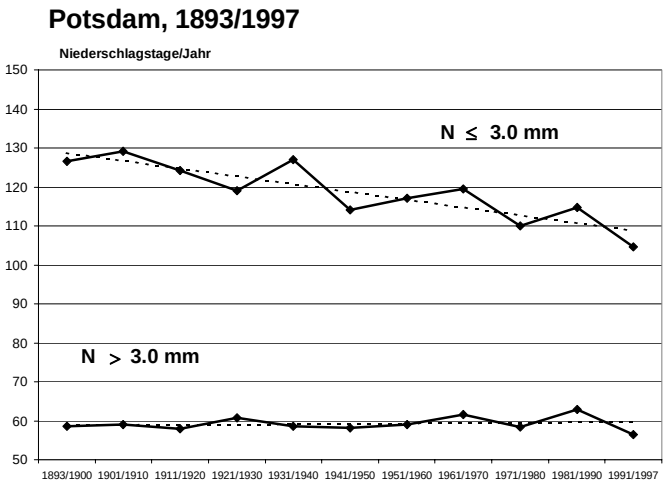


Abb. 11:
Gang der 10-jährig gemittelten Anzahl der Niederschlagstage, getrennt nach der täglichen Niederschlagshöhe (mm), Potsdam 1893/1997

Die *sommerlichen Starkniederschläge* von weniger als einer Stunde Dauer haben im Westen und Süden Deutschlands tendenziell an Intensität zugenommen. Im Osten Deutschlands kam es in den 80er Jahren seltener zu Starkniederschlag als in jedem anderen 10-jährigen Abschnitt des Zeitraums 1951 - 1980. Das Starkniederschlagsgeschehen ab 1991 ist im Osten Deutschlands dadurch charakterisiert, dass die Starkniederschläge im Kurzzeitbereich zwar ebenso selten wie in den 80er Jahren sind, dafür aber mit höherer Intensität. Die Analyse der zeitlich hoch aufgelösten Zeitreihen der Niederschlagshöhe hat für Deutschland kein einheitliches Verhalten bzgl. der sommerlichen Kurzzeitniederschläge ergeben. Auffälligstes Merkmal aller Untersuchungsergebnisse ist, dass Häufigkeit, Dauer und Ergiebigkeit der Niederschlagsereignisse von Jahr zu Jahr großen Schwankungen unterliegen.

Die *potentielle Verdunstung* und die *Verdunstungsverluste von Gewässeroberflächen* zeigen an fast allen untersuchten Stationen (außer Karlsruhe) eine signifikante Zunahme der Jahreswerte mit dem Schwerpunkt des Anstieg im Sommerhalbjahr (Abb. 12, Tab. 2). Starke Zunahmen der potentiellen Verdunstung sind allgemein in den Monaten Juli/August, an der Station Hamburg auch im Januar/Februar, zu verzeichnen.

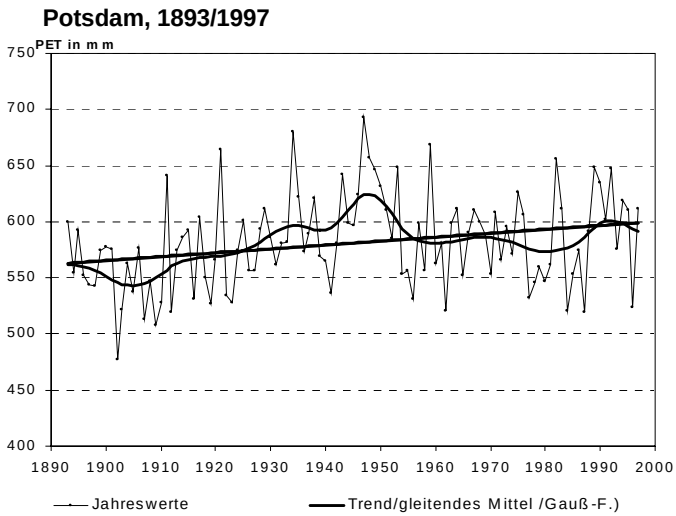


Abb. 12:
Zeitlicher Verlauf der Jahreswerte der potentiellen Verdunstung (Turc/Ivanov) von Potsdam, Reihe 1893/1997

Station	JAN	FEB	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR	SO	WI
Potsdam	+0,6	-0,5	+2,0	+6,0	+2,9	-1,2	+8,8	**+10,2**	+1,6	**+4,2**	+1,1	+0,3	**+36,1**	**+26,6**	**+10,4**
Bamberg	+1,7	-0,9	+1,5	+4,5	+5,3	+0,7	**+11,5**	+6,0	+3,3	+2,4	+0,1	**+1,3**	**+37,4**	**+29,3**	+6,9
Hamburg	**+3,3**	**+3,0**	+2,4	+0,8	+1,5	+1,4	+10,4	**+9,4**	-2,0	**+2,8**	**+3,3**	**+2,3**	**+38,9**	+23,7	**+13,7**
Karlsruhe	+0,4	0,0	+2,2	+1,0	+0,9	-3,0	+7,5	+3,4	+0,7	+1,9	+1,5	+1,5	+18,1	+11,5	+5,8
München	+0,1	**-3,2**	+1,4	+2,2	+7,3	-1,3	+5,1	+5,5	+1,4	+2,7	-0,3	+0,3	+21,3	**+20,7**	-0,9

unterstrichene Werte: Irrtumswahrscheinlichkeit < 10 %
fett gedruckte Werte: Irrtumswahrscheinlichkeit < 5 %
So/Wi - hydrologische Halbjahre

Tabelle 2:
Monats-, Halbjahres- und Jahreswerte des linearen Trends der potentiellen Verdunstung (nach Turc/Ivanov in mm), Reihe 1891/1997

Die *Schneedeckendauer* (Zahl der Tage mit Schneedecke) hat, von Ausnahmen abgesehen, flächendeckend abgenommen. Besonders betroffen davon sind die tieferen Lagen (s. Tab. 3).

Dies gilt in gleicher Weise auch für die Zeitspanne ununterbrochen aufeinander folgender Schneedeckentage (Schneedeckenperiode). Alle diese Veränderungen bestätigen die Annahme, dass die Zahl "kernloser" Winter zugenommen hat, d. h., dass insgesamt die Schneedeckenzeit eine geringere Zahl von Schneeperioden aufweist und diese überwiegend von kürzerer Dauer sind. Wegen der großen Variabilität aller Schneedeckengrößen lässt sich die statistische Signifikanz der Veränderungen meist nicht nachweisen.

Anmerkung: Für die beschriebenen Ergebnisse der Trendanalyse gilt, dass ein beobachteter Trend grundsätzlich nur für den Zeitraum, für den er abgeleitet wurde ("diagnostisch"), gültig ist. Das heißt vor allem, dass eine "prognostische" Auslegung der gewonnenen Ergebnisse unzulässig ist.

Station	Höhe m ü. NN	Stand.-abw. SA	Mittelwert MW	absoluter Trend Tr	relativer Trend Tr / MW
Hamburg-Fuhls.	11	21,26	30,47	-18,96	-0,62
Schwerin	59	25,31	40,76	-25,49	-0,63
Potsdam	81	24,92	43,49	-9,81	0,23
Karlsruhe	112	17,44	21,69	-14,99	-0,69
Göttingen	167	23,62	37,00	-11,13	-0,30
Aachen	202	17,28	23,31	-7,21	-0,31
Görlitz	238	20,90	55,87	-12,25	-0,22
Öhringen	276	20,10	36,47	-11,31	-0,31
Chemnitz	418	19,95	62,67	-3,66	-0,06
Weißenburg/Bay.	422	21,05	46,42	-11,63	-0,25
Weiden/Opf.	438	21,63	62,47	-5,18	-0,08
Ellwangen/Jagst	443	25,00	56,31	-29,92	-0,53
Hof-Hohensaas	567	21,54	81,76	-5,96	-0,07
Ulm	567	24,44	57,29	2,07	0,04
Braunlage	607	24,27	110,67	10,75	0,10
Grebenhain-Herch.	608	24,52	84,80	1,07	0,01
Kleiner Feldberg/Ts.	805	25,55	98,69	-14,70	-0,15
Oberstdorf	810	21,19	127,18	-1,01	-0,01

Tabelle 3:
Langzeitverhalten des Schneedeckenregimes. Trendanalyse für die Schneedeckendauer (Anzahl der Tage mit Schneedecke pro Winterhalbjahr), Reihe 1951/52 bis 1995/96

Literatur

[1] Damrath, U., Doms, G., Frühwald, D., Heise, E., Richter, G., Steppeler, J.: Operational Quatitative Precipitation Forecasting at the German Weather Service. Journal of Hydrology, 239, 2000, S. 260-285

[2] Rachner, M.; Matthäus, H.; Schneider, G.: Projekt SNOW-D. Echtzeitvorhersage der Schneedeckenentwicklung und der Wasserabgabe aus der Schneedecke. Erste Ergebnisse. Dt. Gewässerkundliche Mitteilungen (41), H. 3, 1997, S. 1-10

[3] Reich, R. und G. Wiesner: Bereitstellung von langen Reihen interpolierter Gitterpunktwerte des Niederschlags (Tageswerte) mit Hilfe des Verfahrens BONIE.

DWD/GF Hydrometeorologie, Abschlussbericht Projekt KLIWA-Gitter N), Berlin, 2000, 23 S.

[4] Bartels, H., Malitz, G., Asmus, S., Albrecht, F.M., Dietzer, B., Günther, Th., Ertel, H.: KOSTRA - Starkniederschlagshöhen für Deutschland. DWD/GF Hydrometeorologie, Offenbach am Main, 1997, 29 S., 52 Karten

[5] Günther, Th., Rachner, M., Matthäus, H., Albrecht, F.M., Ertel, H.: Regionalisierte Extremwerte des Niederschlagsdargebots aus Regen und Schneeschmelze für Deutschland (REWANUS-Atlas). DWD/GF Hydrometeorologie, Berlin 2000, 18 S, 21 Karten

[6] Günther, Th. und H. Matthäus: Regionalisierte Extremwerte aus Regen und Schneeschmelze für Deutschland. KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, 2001 (48) Nr. 8, S. 1119-1126

[7] Schmidt, Th.: Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. DVWK-Mitteilungen 29, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, 1997, 128 S.

[8] Malitz, G.: Außerordentlich extreme Niederschlagshöhen in den Flussgebieten Deutschlands (NIEFLUD-Abschlussbericht).DWD/GF Hydrometeorologie, Berlin 2000, 31 S.

[9] Klämt, A.: Konzipierung eines Nutzer-orientierten Modells zur Berechnung aktueller Monatssummen der Gebietsverdunstung unter Berücksichtigung der Art der Landnutzung. Acta hydrophys., 32(1988) 4, 237-250

[10] DVWK-Merkblätter 238 (1996), Bonn: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen.

[11] IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change; Third Assessment Report Part I: The Scientific Basis, Geneva, 2001

[12] Blümel, K., Klämt, A., Malitz, G., Matthäus, H., Rachner, M., Richter, D.: Hydrometeorologische Untersuchungen zum Problem der Klimaveränderungen (Projekt HUK). Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 219, Offenbach am Main, 2001, 371 S.

[13] Rapp, J. und C.-D. Schönwiese: Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1997. Frankf. Geowiss. Arb., Serie B, Bd. 5, 2. Auflage, 1996

[14] Hydrologischer Atlas von Deutschland; 2. Lieferung, Kartentafel 2.14 "Klimatische Wasserbilanz". Herausgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2002