

MÜNSTERSCHE GEOGRAPHISCHE ARBEITEN

Ekkehard Petzold

Einsatzmöglichkeiten EDV - gestützter
räumlicher Informationssysteme
für hydrologische Planungszwecke

Bilanzierung des Wasserdargebotes
auf kleinräumiger Basis

SCHÖNINGH

Einsatzmöglichkeiten EDV - gestützter räumlicher Informationssysteme für hydrologische Planungszwecke

**Bilanzierung des Wasserdargebotes
auf kleinräumiger Basis**

Ekkehard Petzold

FERDINAND SCHÖNINGH · PADERBORN · 1982

Die vorliegende Arbeit wurde von der Mathematisch - Naturwissenschaftlichen
Fakultät der Westfälischen Wilhelms - Universität - Fachbereich Geowissenschaften –
als Dissertation 1982 angenommen.

Alle Rechte, auch das der auszugsweisen photomechanischen Wiedergabe, vorbehalten.
© 1982 by Ferdinand Schöningh, Paderborn, ISBN 3 - 506 - 73214 - 5

Gesamtherstellung: Buchdruckerei Regensberg, Daimlerweg 58, 4400 Münster

Vorwort

Für die Anregung und Förderung dieser Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr. U. Streit (Münster); von ihm wurde freundlicherweise ein Großteil der benutzten Daten zur Verfügung gestellt.

Von Herrn Prof. Dr. K.-F. Schreiber (Münster) erhielt ich Unterstützung im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 26 / Teilprojekt M6 'Das ökologische Potential als Engpaßfaktor in der Regionalplanung', wofür ich ihm herzlich danke.

Den Herren H.J. Heineke, F. Schwentker und G. Wieneke sei für wertvolle Hinweise bei der Diskussion der Arbeitsergebnisse gedankt, und Frau C. Weidhaas und Herr E. Otto waren mir freundlicherweise bei der Beschaffung von Literatur und Daten behilflich.

Danken möchte ich ferner Herrn Prof. Dr. F.-K. Holtmeier und Herrn Prof. Dr. A. Mayr für technische Hinweise bei der Erstellung des Manuskripts. Darüberhinaus gilt mein besonderer Dank den Herausgebern der Münsterschen Geographischen Arbeiten, daß diese Arbeit in ihrer Reihe erscheinen konnte.

Alle Berechnungen wurden im Rechenzentrum der Universität Münster und auf den Rechenanlagen des Instituts für Geographie in Münster durchgeführt.

Münster, im November 1982

Ekkehard Petzold

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	5
Verzeichnis der Abbildungen	7
Verzeichnis der Tabellen	8
1. Problemstellung	9
Erster Teil: Informationssysteme	
2. Informationssysteme und Datenbanken	11
2.1. Begriffsabgrenzung: Informationssysteme - Datenbanken - EDV-Kataster	11
2.2. Bereitstellung hydrologisch relevanter Daten durch EDV-gestützte räumliche Informationssysteme	12
2.3. Datenerfassung und Datenspeicherung	14
2.3.1. Raster und Polygone	14
2.3.2. Flächen-, Linien-, Punktdaten	16
2.3.3. Räumliche Bezugsbasis	16
3. Prüfung vorhandener/geplanter EDV-gestützter räumlicher Informationssysteme zwecks Einsatz für die hydrologische Planung	17
3.1. Überblick	17
3.2. Vorhandene und geplante Informationssysteme	17
3.2.1. Landschaftsinformationssysteme	18
3.2.2. Regional- und Landesinformationssysteme	22
3.2.3. Geowissenschaftliche Informationssysteme	23
3.2.4. Hydrologische Informationssysteme	24
3.3. Vergleich der vorgestellten Informationssysteme	26
3.3.1. Ausbaustand	26
3.3.2. Datenauswahl	26
3.3.3. Datenerfassung	28
3.3.4. Datenspeicherung	28
3.3.5. Datenausgabe	28
3.3.6. Auswertungs- und Simulationsprogramme	29
4. Konsequenzen für die Entwicklung eines verbesserten raumbezogenen Informationssystems	31
4.1. Anforderungen an die Datenbasis	31
4.2. Anforderungen an das Informationssystem	31
Zweiter Teil: Wasserdargebot	
5. Einsatz EDV-gestützter räumlicher Informationssysteme zur Ausweisung von Naturraumpotentialen, insbesondere des Wasserdargebotspotentials	33
5.1. Wasserdargebotspotential	33
5.2. Ziele und Rahmenbedingungen	33
5.3. Statistische Verfahren	35
5.3.1. Korrelation, Normalverteilung	35
5.3.2. Hauptkomponentenanalyse	36
5.3.3. Regression	36
5.4. Datenbasis	37
6. Aufbereitung der Daten	39
6.1.1. Niederschlag: Regression	39
6.1.2. Niederschlag: Quadrantenverfahren	39
6.1.3. Niederschlag: Sonstige Verfahren	40
6.2. Lufttemperatur	41
6.3. Sättigungsdampfdruck	41
6.4. Partialdruck	41
6.5. Sättigungsdefizit	42

6.6. Relative Luftfeuchte	42
6.7. Potentielle Verdunstung	42
6.7.1. - nach THORNTHWAITE	42
6.7.2. - nach ALBRECHT	43
6.7.3. - nach HAUDE	43
6.7.4. - nach PENMAN	43
6.7.5. - nach LEEPER	43
6.7.6. Vergleich der Verfahren zur Berechnung der potentiellen Verdunstung	44
6.8. Aktuelle Verdunstung	45
6.9. Aktuelle Verdunstung von Flussgebieten / Wasserhaushaltsbilanz	45
6.10. Grundsätzliches zur Abflussberechnung	46
6.11. Mittlere Abflusshöhe	50
6.12. Niedrigwasserabfluss	51
6.13. Direktabfluss	52
6.14. Zusammenwirken der Einzelmodelle	53
7. Wasserdargebot: Bilanzierung und Simulation	55
7.1. Klimatische Wasserbilanz	55
7.2. Wasserhaushaltsbilanzen	57
7.3. Bilanzmodell zur Ermittlung des Wasserdargebotes	58
7.3.1. Simulation natürlicher Einwirkungen auf das Wasserdargebot	60
7.3.2. Simulation anthropogener Einwirkungen auf das Wasserdargebot in Flussgebieten	61
7.4. Übertragung der Modelle auf Rasterflächen	62
7.5. Gesamtbetrachtung der eingesetzten Bilanz- und Simulationsverfahren	64
8. Ausblick	65
8.1. Digitales Geländemodell	65
8.2. Isothermenkarten	66
8.3. Pedologisch-geologische Daten	66
8.4. Überlagerungsprogramme	67
8.5. Synthetische Zeitreihen	67
9. Zusammenfassung	69
Summary	72
Literaturverzeichnis, Quellen; benutzte Karten- und Tabellenwerke; EDV-Programme; Daten	74
Anhang	79

Verzeichnis der Abbildungen

1-8 Erfassung quantitativer und qualitativer Variablen	15
9 Quadrantenverfahren	40
10 Übersichtskarte: Benutzte Flussgebiete	47
11 Bodenphysikalische Kennwerte	66
12 Ablaufschema: Bilanzierung und Simulation des Wasserdargebotes	70

Verzeichnis der Tabellen

1	Zeitinvariante Variable	13
2	Raumzeitvariante Variable	13
3	Liniendaten	13
4	Informationssysteme und ihre Daten	13
5	Zeitinvariante Primärdaten für Meßpunkte/Flußgebiete bzw. Hektarrasterflächen	27
6	Zeitvariante Primärdaten für Meßpunkte/Flußgebiete	37
7	Zeitvariante Sekundärdaten	37
8	Zeitinvariante Sekundärdaten	37
9	Mittelwerte, Standardabweichungen des Niederschlags; Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (3)	39
10	Korrelationskoeffizienten zwischen berechneten und gemessenen Niederschlagshöhen	40
11	Korrelationskoeffizienten zwischen Residuen der Monatsniederschläge und Meereshöhe	40
12	Mittelwerte, Standardabweichungen der Temperatur; Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (5)	41
13	Lufttemperatur und Sättigungsdampfdruck	41
14	Mittelwerte, Standardabweichungen des Partialdrucks; Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (7)	42
15	Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (8)	42
16	Korrekturfaktoren für THORNTHWAITE-Formel	43
17	Koeffizienten für HAUDE-Formel	43
18	Verdunstungsformeln und Eingangsdaten	44
19a	Verknüpfung der Berechnungsverfahren	44
19b	Hydrometeorologische Daten für Pegel Eigen; Monats-, Jahresmittelwerte (T,E,D,SD,RF)	44
19c	Hydrometeorologische Daten für Pegel Eigen; Mittlere Monatssummen, Jahressummen (VP,N,A,VF)	45
20	Wasserhaushaltsbilanz für den Pegel Eigen	45
21	Korrelationskoeffizienten zwischen Abflußhöhe und nichtvariablen Gebietsparametern	46
22	Varimaxrotierte Hauptkomponentenmatrix	48
23	Gemessene und nach SCHUMACHER berechnete Abflußhöhen für Ratingen und Eigen	49
24	Mittlere Abflußhöhe, Standardabweichung; Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (30)	50
25	Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (31)	50
26	Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (32)	51
27	Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (33)	51
28	Mittelwerte, Standardabweichungen des Niedrigwasserabflusses; Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (35)	52
29	Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (37)	52
30	Mittelwerte, Standardabweichungen des Direktabflusses; Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (38)	53
31	Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße für GI. (39)	53
32	Bodenwasserbilanz (nach STRASSER) für den Raum Eigen (Kreis Mettmann)	58
33	Wasserdargebot: Bilanzmodell für den Pegel Eigen	58
34a	Niederschlag, Verdunstung, Abflußkomponenten für den Pegel Eigen: Jahressummen, Minima, Maxima bei einer Abnahme der monatlichen Niederschläge um 0, 10 und 20 %	61
34b	Absoluter Rückgang der Werte aus Tab. 34a bei 10 und 20 % Niederschlagsabnahme	61
35	Bodenfeuchte, Verdunstung und Restbestand	61
36a	Aenderung der Wasserbilanz bei zunehmender Flächenversiegelung im Bereich des Pegels Eigen	63
36b	Wie Tab. 36a, jedoch bei 10 %igem Rückgang der monatlichen Niederschläge	63
37	Verdunstung und Sickerwasser bei unterschiedlicher Vegetation im Raum Frankfurt: Quotienten Verdunstung/Niederschlag (VN), Sickerwasser/Niederschlag (SN)	63
38	WV-Koeffizienten	63
39	Verzeichnis der Flußgebiete	Anhang

1. Problemstellung

Die in den letzten Jahren stark angestiegene Inanspruchnahme der natürlichen Umwelt durch menschliche Aktivitäten erfordert eine vorausschauende Planung, um die natürlichen Ressourcen optimal zu nutzen und zu schonen. Eine Überbeanspruchung kann zu irreversiblen Schäden führen; als Beispiele seien hier die Änderung des Fischbestandes der Weser auf Grund des gestiegenen Salzgehaltes oder die Austrocknung des Hessischen Rieds durch zu hohe Grundwasserförderung genannt.

Aufgabe der Planungsstellen auf Orts-, Regional- und Landesebene ist es daher:

- die natürlichen Ressourcen (quantitativ) zu erfassen;
- ihre derzeitige Belastung und Belastbarkeit zu ermitteln;
- Nutzungskonzepte zu entwickeln, die (möglichst) vielen Ansprüchen gerecht werden, gleichzeitig aber die Ressourcen schonend behandeln.

Dies kann z.B. durch Ausweisung von Vorrangnutzungen oder sich gegenseitig nicht beeinträchtigende Mehrfachnutzungen einer Fläche geschehen. Derartige Untersuchungen werden u.a. im Sonderforschungsbereich 26 'Raumordnung und Raumwirtschaft', Teilprojekt M6 'Das Ökologische Potential als Engpaßfaktor in der Regionalplanung' durchgeführt (SFB 26, 1979; PETZOLD 1981c).

Um die natürliche Ausstattung einer Region, ihre derzeitige Belastung und Belastbarkeit quantitativ ermitteln zu können, werden naturräumliche und soziökonomische Daten benötigt, die in der Regel aber nicht in der gewünschten räumlichen und/oder zeitlichen Auflösung zur Verfügung stehen. So müssen vorhandene Daten meist aus verschiedenen Quellen - z.B. Statistiken, Jahrbüchern oder Karten - mehr oder weniger mühsam zusammengestellt werden, so daß - besonders bei akuten Problemen - die Landschaftsplanung nicht schnell genug reagieren kann. SCHREIBER (1976, S.262) weist zu Recht darauf hin, daß zwar der Einfluß von Vegetation und Boden auf Grundwasserneubildung und Wassergewinnung unbestritten ist, daß aber andererseits keine genauen Anhaltspunkte bzw. 'meist nur halbquantitative Vorstellungen über die Größenordnung einer möglichen Wassernutzung' vorliegen. Die Aufstellung von ökologischen Lastplänen als Planungsgrundlage für die Wasserentnahme in land- und forstwirtschaftlich unterschiedlich genutzten Landschaften scheint daher erst nach Verbesserung der Datenbasis möglich.

Daher wird von verschiedenen Stellen die Einrichtung von 'Landschaftsinformationssystemen' bzw. 'Landschaftsdatenbanken' gefordert, in der Bundesrepublik Deutschland seit Anfang der siebziger Jahre, in Nordamerika schon vor 1960. Diese EDV-gestützten Informationssysteme sollten in der Lage sein, für einen 'beliebigen' Raum gewünschte naturräumliche und soziökonomische Daten bereitzustellen und in einem weiteren Schritt nach Vorgabe des Benutzers eine Auswertung und Bewertung vorzunehmen. Eine Konzeption für ein Landschaftsinformationssystem wird von KOEPEL (1975) vorgestellt; es soll für die Landschaftsplanung eingesetzt werden und benutzt als Datengrundlage eine Landschaftsdatenbank.

Da nicht nur die Landschaftsplanung, sondern auch andere Fachplanungen möglicherweise auf Landschaftsdatenbank und Landschaftsinformationssystem zugreifen wollen, sollte dies beim Aufbau berücksichtigt werden. In der Literatur finden sich nur wenig Hinweise darauf, ob eine Datenbank nur einer oder mehreren, durchaus unterschiedlichen, Benutzergruppen zur Verfügung stehen soll. Nach HITZ (1979, S.33) 'kann ein Informationssystem immer nur für eine Klasse von Problemen und häufig nur für eine Klasse von Akteuren ausgelegt werden'. GRESCH (1977, S.33) hingegen stellt fest: 'Eine Datenbank stellt eine Sammlung von Informationen dar, welche abgerufen werden können. Wesentlich dabei ist, daß die Daten für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt werden können'. Diese Auffassung ist durchaus sinnvoll: So benötigt z.B. der Raumplaner zur Ausweisung von Siedlungs- oder Gewerbegebieten Daten über Flächennutzung, Bodenverhältnisse und Oberflächenformen, während der Landschaftsplaner zur Ausweisung von Naturschutzgebieten neben diesen Daten auch auf floristische und faunistische Verzeichnisse zurückgreift. Die wasserwirtschaftliche Planung hingegen wird bei der Anlage von Talsperren nicht nur die oben genannten statischen Größen in Betracht ziehen, sondern auch zeitlich veränderliche Daten wie Niederschlag, Verdunstung und Abfluß.

Somit lassen sich die Ziele der vorliegenden Arbeit abstecken:

- a) Können die flächendeckend vorliegenden räumlichen Informationen einer Landschaftsdatenbank bei wasserwirtschaftlichen Planungsvorhaben von Nutzen sein?
- b) Welche Anforderungen werden von hydrologischer Seite an Landschaftsinformationssysteme bzw. -datenbanken gestellt?

- c) Wie läßt sich mit Hilfe dieser Daten und einfacher strukturierter Modellansätze das Wasserdargebot für eine 'beliebig' abgegrenzte Region abschätzen?
- d) Wie kann die Veränderung des Wasserdargebotes bei menschlichen Eingriffen in den Naturhaushalt simuliert werden?

Zur Beantwortung dieser Fragen muß vorweg geklärt werden:

- e) Was unterscheidet Datenbanken von Informationssystemen? (Kap. 2.)
- f) Welche Informationssysteme/Datenbanken existieren im Bereich 'Landschaftsplanung' und in Nachbardisziplinen? (Kap. 3.)
- g) Enthalten diese vorhandenen/geplanten räumlichen Informationssysteme hydrologisch relevante Daten? (Kap. 3.)

Was ein verbessertes EDV-gestütztes räumliches Informationssystem berücksichtigen sollte, wird in Kap. 4. erläutert. Während der erste Teil der Arbeit (Kap. 2.-4.) dem Komplex 'Informationssysteme' gewidmet ist, werden im zweiten Teil (Kap. 5. ff) Möglichkeiten des Einsatzes dieser Systeme zur Bilanzierung des Wasserdargebotes in seiner raumzeitlichen Verteilung untersucht, wobei auch der Simulation natürlicher oder anthropogener Einwirkungen auf den Naturhaushalt Beachtung geschenkt wird.

Erster Teil: Informationssysteme

2. Informationssysteme und Datenbanken

2.1. Begriffsabgrenzung: Informationssysteme - Datenbanken - EDV-Kataster

Neben den Begriffen '(Landschafts-) Informationssystem' und '(Landschafts-) Datenbank' werden in der Literatur auch Begriffe wie 'EDV-Kataster' oder 'Maschinenlesbares Flächenkataster' verwandt. Im folgenden soll versucht werden, o.g. Begriffe gegeneinander abzugrenzen. Definitionen hierzu finden sich in der Literatur bei DURHEN & GENKINGER (1979, S.7-10) und bei BELING & WERSIG (1973, S.61 ff): Danach ist eine Datenbank eine redundanzfreie Integration mehrerer Dateien, die direkten Zugriff zu und direkte Kombination von beliebigen Datenelementen sowie weitere Auswertungen nach vorgegebenen Auswertungsmodellen zuläßt. Ein Informationssystem hingegen steuert den Ablauf von Kommunikationsprozessen durch räumliche, zeitliche und/oder inhaltliche Transformation, Verbreitung und Weiterleitung von Daten, damit ein bestimmter Kreis von Rezipienten informiert wird.

Nach KOEPPEL (1975, S.329) ist eine (Landschafts-) Datenbank - aus verschiedenen Dateien bestehend - die Grundlage eines (Landschafts-) Informationssystems, d.h., es besteht eine Hierarchie: Datei - Datenbank - Informationssystem.

Weitere Angaben zur Unterscheidung von Informationssystemen und Datenbanken finden sich in der Literatur kaum, und eine Trennung zwischen beiden Begriffen scheint nicht richtig vollzogen zu werden. So z.B. sprechen GUPTA & SOLOMON (1977, S.614-616) von einem Informationssystem und verstehen darunter ein Programm paket zur Berechnung und Umrechnung physisch-geographischer Variablen auf Rasterbasis. Die so ermittelten Daten werden auf dem Drucker ausgegeben, auf Magnetplatte o.ä. gespeichert und dienen als Datenbasis zur Erstellung deterministischer Abflussmodelle. Im Gegensatz dazu sehen KOEPPEL & ARNOLD (1980, S.22) in einem Informationssystem die Möglichkeit, neben der Verknüpfung von Daten auch unterschiedliche Bewertungen dieser Verknüpfungsvarianten mit einfließen zu lassen. Ähnlich formulieren BISCHOFF et al. (1980, S.6), sprechen aber nicht von einer Bewertung, sondern von einer problembezogenen Auswertung unter Einsatz eines Analyse- und Prognosesystems. EHMK & MÖLLER (1979, S. 191) fordern 'innerhalb der Landschaftsdatenbank neben Datenerfassung, Datenverwaltung und Datenausgabe auch ein Methodenbankpaket... . Die Methoden-

bank muß imstande sein, die Verknüpfung von Ausgangsgrößen nach dem jeweiligen Stand der Kausalforschung....zu leisten'. Nach HARTENSTEIN & SCHAAF (1974, S.217) soll 'ein Informationssystem für Raumordnung und Landesplanung nicht optimale Problemlösungen am laufenden Band liefern, sondern vor allem aktuelle und aussagekräftige Unterlagen für die planungspolitische Diskussion'. Das 'Canada Geographic Information System'/CGIS (TOMLINSON et al., 1976, S.27-73) benutzt Daten, die bereits bei der Erhebung bewertet wurden (unterschiedliche Eignung der Flächen für Landwirtschaft, Tierzucht, Erholung etc.). Die Auswertung ist statistisch-deskriptiv; außerdem sind Oberlagerungen und Vergleiche der aktuellen/potentiellen Nutzung möglich.

Eine weitere Definition eines Informationssystems findet sich bei DURHEN & GENKINGER (1979, S.10). Danach ist ein Informationssystem '...Teil des langfristigen Bemühens, die zur Beschreibung spezifischer Umweltphänomene geeigneten Daten auszuwählen, systematisch und rationell zu beschaffen und in einer solchen Form bereitzuhalten, daß kurzfristig nicht nur Auskunft über Zustände und Entwicklungstrends gegeben werden kann, daß Zusammenhänge damit erforscht werden können, sondern daß auch mit ihnen alternative Einflußmöglichkeiten auf ihre Konsequenz hin untersucht werden können'. Hierzu ist anzumerken, daß Datenauswahl und -beschaffung (= Datenaufnahme) Aufgaben des Planers sind, Datenbereithaltung und Auskunft über Zustände jedoch von einem Datenbanksystem übernommen werden können. Analyse von Trends und Zusammenhängen ist aber wiederum Sache des Planers; ER muß entscheiden, welcher Ordnung etwa die Trendflächenanalyse sein soll, oder ob Zusammenhänge mit einer Faktorenanalyse aufgedeckt werden sollen. Auch der Einsatz von Simulationsverfahren zum Durchspielen verschiedener Möglichkeiten muß vom Planer gesteuert werden. Ob alle hierzu erforderlichen Berechnungs- und Simulationsverfahren nebst Datenbank zu einem Informationssystem vereinigt werden können - ohne daß die Oberschaubarkeit leidet - , darf bezweifelt werden.

RASE (1981) schließlich formuliert wie folgt: 'WIR (die Bundesanstalt für Raumordnung und Landesplanung; der Verf.) sind das Informationssystem'. Mit anderen Worten: Daten und Begleitinformationen werden dem Anfragenden wie gewünscht bereitgestellt; das kann mit Unterstützung durch den Computer geschehen, falls es sich um eine EDV-gerechte Aufgabe handelt (SCHÄFER, 1974, S.244).

Abschließend lässt sich feststellen:

- Auf eine Trennung der Begriffe 'Datenbank' und 'Informationssystem' wird nicht immer geachtet. Sie könnten jedoch wie folgt abgegrenzt werden:
- Datenbank = Datenaufnahme, -speicherung und -bereitstellung; evtl. deskriptiv-statistische Auswertung.
 - Informationssystem = Datenbank + Möglichkeit, Auswertungs- und Bewertungsprogramme anzuhängen + EDV-gestützte Literaturdokumentation + EDV-gestützte Sachinformation.
 - EDV-gestütztes raumbezogenes Informationssystem = Datenbank (raumbezogener Daten) + Datenbereitstellung für Auswertungs- und Simulationsprogramme. Diese Programme könnten z.B. als SPSS-system vorliegen.

Die Definition unter a) und b) entspräche etwa dem UMPLIS des Umweltbundesamtes in Berlin, lässt sich aber auch in ähnlicher Form bei KOEPPEL (1975) oder WEIHS (1978) finden. Der Punkt c) beinhaltet praktisch eine erweiterte Datenbank, die es erlaubt, Daten z.B. auf der Basis der Deutschen Grundkarte (= normierte Schnittstelle) bereitzustellen. Diese Daten gehen in Auswertungs- und Simulationsprogramme ein, können aber auch zum Schließen räumlicher Datenlücken durch räumliche Prognoseverfahren verwandt werden. Diesem Konzept entspricht das 'Landschaftsökologische Informationssystem' LÖKIS, welches am Lehrstuhl Landschaftsökologie in Münster unter Mitarbeit des Verfassers entwickelt wurde. Eine detaillierte Beschreibung findet sich bei DURWEN & GENKINGER (1979). Auch HITZ (1979, S.32) sieht in einem Informationssystem eine Datenbank plus Auswertungsverfahren; besonders geeignet sind seiner Meinung nach statistische Schätzverfahren und Bilanzierungsverfahren bzw. Markov-Prozesse (S.33).

Die Begriffe 'Datenbank' und 'Informationssystem' sind nicht an eine bestimmte Art der Datenspeicherung gebunden. So können Flächendaten auf Rasterbasis oder als Polygonzug (= flächenscharf) gespeichert werden und durch entsprechende Programme mehr oder weniger sinnvoll hin- und herkonvertiert werden. Beide Arten der Datenspeicherung in einer Datenbank sollten möglich sein; vgl. hierzu auch Kap. 2.3.. Unter 'EDV-Kataster' und 'Maschinenlesbares Flächenkataster' wird man vorrangig die flächenscharfe Speicherung von Arealgrenzen und Informationen verstehen (z.B. Grundstücke oder größere Einheiten mit zugehörigen Nutzungsdaten); es handelt sich also um eine 'Digitale Katasterkarte'.

Im Kapitel 3. sollen verschiedene EDV-gestützte räumliche Informationssysteme vorgestellt werden, die der Landschafts- und Regionalplanung im weitesten Sinne zuzurechnen sind. Aufgrund der teilweise unscharfen Trennung der Begriffe 'Datenbank' und 'Informationssystem' werden beide unter der Bezeichnung 'EDV-gestützte räumliche Informationssysteme' subsumiert. Vorweg soll jedoch erläutert werden, bei welchen hydrologischen Planungsvorhaben EDV-gestützte räumliche Informationssysteme Hilfestellung leisten könnten.

2.2. Bereitstellung hydrologisch relevanter Daten durch EDV-gestützte räumliche Informationssysteme

Die Aufgaben der wasserwirtschaftlichen Planung lassen sich in drei große Teilebereiche gliedern:

- Bestimmung des Wasserbedarfs der verschiedenen Nutzer.
 - Abschätzung des ober- und unterirdischen Wasserdargebotes nach Menge und Güte (Hydrologie i.e.S.).
 - Bilanzierung und Entwicklungsplanung.
- Punkt a) soll hier nicht Gegenstand der Untersuchungen sein. Zur Bestimmung des Wasserdargebotes in seiner raumzeitlichen Verteilung wurden verschiedene hochentwickelte Ansätze erstellt, die eine Vielzahl steuernder Größen, wie Niederschlag, Verdunstung, Reliefparameter, Vegetation, Bodenverhältnisse und anthropogenen Einfluß, berücksichtigen. Als Beispiele seien hier genannt das Stanford Watershed Model (CRAWFORD & LINSLEY 1966), das numerische Modell zur Abschätzung von Abfluß und Sedimenttransport von GUPTA & SOLOMON (1977), und mathematische Modelle zur Simulation von Abflußganglinien (STREIT 1973) bzw. zur Vorhersage von Abflußbereignissen im Bereich der Anden Kolumbiens (SCHRIMPFF 1975).

Derartige Modelle basieren meist auf Einzelereignissen oder Tageswerten von Niederschlag und Abfluß und sind in der Lage, den zeitlichen Ablauf hydrologischer Prozesse im Fließbeinzugsgebiet gut darzustellen. Ein Nachteil besteht jedoch darin, daß sie 1. nur auf der Basis bestimmter Fließgebiete arbeiten, und 2. auf Eingangsdaten hohen Ni-veaus angewiesen sind, die nicht überall in der gewünschten räumlichen und/oder zeitlichen Auflösung zur Verfügung stehen.

Auch für einfach strukturierte Modelle zur Abschätzung von Abfluß, Grundwasserneubildung oder Bodenfeuchtevorrat mangelt es an leicht und flächendeckend verfügbaren Daten (SFB 26, 1978, S.202; PETZOLD, 1981a, 1981b). Morphometrische Größen z.B. müssen zeitaufwendig aus Karten ermittelt werden, Abfluß- und Niederschlagsmeßwerte etwa liegen nur für bestimmte Meßstationen vor, und pedologisch-geologische Informationen wie nutzbare Feldkapazität oder Transmissivität sind oft aufgrund fehlender Karten überhaupt nicht zu bekommen.

Daher bietet es sich an, vorhandene oder geplante EDV-gestützte räumliche Informationssysteme (bes. aber Landschaftsdatenbanken) daraufhin zu untersuchen, ob sie 1. die benötigten zeitinvarianten Größen wie Vegetationsverhältnisse, Untergrundeigenschaften, Morphometrie oder Oberflächenbedeckung, und 2. auch raumzeitvariante Variable wie Niederschlag, Abfluß und Verdunstung für die o.g. Modelle flächendeckend als Eingangsdaten zur Verfügung stellen können. Eine Rational- oder Intervallskalierung dieser Daten sollte gegeben sein, da dies in der Regel bei Simulationsmodellen erforderlich ist. Bei zeitvarianten Größen sollte die jahreszeitliche Komponente berücksichtigt sein, z.B. als mittlere Monatswerte.

Die Datenbanken sollen auf Vorhandensein und Dimensionierung der in den Tabellen 1, 2 und 3 aufgelisteten Variablen geprüft werden. Einen Überblick über die Ergebnisse gibt die Tabelle 4. Die in den Tabellen 1 - 3 aufgeführten Variablen stellen nur eine Grobauswahl hydrologisch relevanter Größen dar. Sie orientiert sich jedoch an den Daten, die in einschlägigen hydrologischen Arbeiten zur quantitativen Erfassung des Wasserdargebotes in seiner raumzeitlichen Verteilung benutzt werden; vgl. u.a. GUPTA & SOLOMON (1977); HERRMANN (1965, 1971); PENTLAND & CUTHBERT (1971); RUMP (1976); SCHRIMPFF (1975); STREIT (1973, 1979); SYMADER (1976). An dieser Stelle muß auf das generelle Problem der (richtigen) Variablenauswahl hingewiesen werden. Selbstverständlich haben Klima, Relief und Untergrund einen Einfluß auf hydrologische Prozesse. Es ist jedoch nur bedingt möglich, für diese Faktoren geeignete Variable zu definieren, zu quantifizieren, und trotzdem bei vertretbarem Arbeitsaufwand möglichst alle hydrologisch bedeutsamen Größen zu berücksichtigen.

Zeitvariante Größen lassen sich für eine Vielzahl von Stützstellen (Rasterflächen) kaum als Zeitreihen speichern, falls die Zeitschrittweite kleiner als ein Jahr sein soll. Dazu würde ein zu umfang-

reicher Speicherplatz benötigt. In diesem Falle sollte auf langjährige Mittelwerte dieser Zeitreihen ausgewichen werden. Variable, die z.B. Dauer oder Intensität von Einzereignissen charakterisieren, fehlen daher in der folgenden Aufstellung. Bei verschiedenen Informationssystemen werden oft nur allgemeine Angaben zu den erfaßten Daten gemacht; dies ist in den Tabellen 1 - 3 berücksichtigt (z.B. Var. 4, 12, 19).

Wald kann auch differenziert als Laub-, Misch- und Nadelwald erfaßt sein. Der Versiegelungsgrad ließe sich in 5 Klassen einteilen: keine, leichte, mittlere, starke und völlige Versiegelung (Genaugenommen müßte man trennen: Stärke der Versiegelung und räumlicher Umfang der versiegelten Fläche; in der Praxis jedoch kaum durchführbar). Statt Feldkapazität, nutzbarer Feldkapazität und Porenvolumen kann die Bodenartenzusammensetzung (Ton/Schluff/Sand) angegeben werden; Berechnungsmöglichkeiten siehe Kap. 8.3..

Tab. 1: Zeitinvariante Variable

Nr. Variable	Dimension
1 Höhe ü. NN	Meter
2 Exposition	Grad, Richtung
3 Hangneigung	Grad, Prozent
4 Topographie allgem.	
5 Wald	Prozent oder absolut
6 Grünland	" " "
7 Acker	" " "
8 Wasserfläche	" " "
9 Versiegelte Fläche	" " "
10 Ohne Vegetation	" " "
11 Sonstige (Nutzung)	
12 Flächennutzung allgem.	
13 Feldkapazität	Millimeter
14 Nutzbare Feldkapazität	Millimeter
15 Porenvolumen	Vol.-Prozent
16 Tiefe des Lockergesteins	Meter
17 Durchwurzelungstiefe	Meter
18 Sonstige (Pedologie, Geologie)	
19 Boden allgem.	

Tab. 2: Raumzeitvariante Variable

20. Niederschlag	Millimeter
21. Potentielle Verdunstung	Millimeter
22. Aktuelle Verdunstung	Millimeter
23. Abfluß	Millimeter, Menge/Zeit
24. Lufttemperatur	Grad Celsius
25. Gewässergüteparameter	Verschiedene
26. Grundwasserstände	Meter
27. Grundwasserneubildung	Millimeter, Menge/Zeit
28. Sonstige	

Tab. 3: Liniendaten

29. Kreisgrenzen	x/y-Koordinatenpaare
30. Gemeindegrenzen	" " "
31. Wasserscheiden	" " "
32. Gewässernetz	" " "
33. Sonstige Liniendaten	" " "

Die Tabellen 1 - 3 wurden speziell zum Vergleich der untersuchten Datenbanken zusammengestellt und beinhalten keine Bewertung der Variablen.

2.3. Datenerfassung und Datenspeicherung

Zur Begriffsabgrenzung:

Raster ist im eigentlichen Sinne ein regelmäßiges Gitternetz. Die Zellen eines Rasters sind Rasterflächen, ggf. Rasterquadrate, jedoch wird in der Literatur gelegentlich unter 'Raster' eine Rasterfläche verstanden. Dreieck-, Quadrat-, Rechteck- oder auch Sechseckraster sind üblich. Für Informationssysteme werden meist Quadratraster verwandt; quadratische Rasterzellen entsprechen exakt der Matrixspeicherung eines Rechners. Ein Polygon ist ein Vieleck beliebiger Form, ein Polygonzug besteht aus endlich vielen Koordinatenpaaren. Umgrenzt er ein Polygon, sind Anfangs- und Endkoordinaten identisch.

2.3.1. Raster und Polygone

Bei der Erhebung und Speicherung von Flächendaten für EDV-gestützte räumliche Informationssysteme lassen sich zwei Verfahren grundsätzlich unterscheiden:

1. Speicherung auf Polygonbasis
2. Speicherung auf Rasterbasis.

ad 1.:

Die Aufnahme und Speicherung von Flächendaten als Polygonzug - auch flächenscharfe Aufnahme genannt - erfordert die Erfassung der Flächengrenzen als x- und y-Vektoren mit n Koordinatenpaaren. Der Flächeninhalt wird als homogen (= eine Klasse bzw. Ausprägung) angesehen; eine Differenzierung innerhalb der Fläche ist nicht möglich, eine Interpolation zwischen zwei Flächen problematisch. Die Flächen bzw. Polygone sind immer geschlossen, z.T. über die Randbegrenzung des Kartenblattes. Vgl. hierzu die Abb. 1, 2, 4, 7 a-d.

ad 2.:

Dem aufzunehmenden Kartenblatt wird ein (quadratisches) Raster aufgelegt. Die Lage jeder Rasterfläche ist durch die Matrixposition definiert. Die Datenerhebung erfolgt für jede Rasterfläche durch Feststellung entweder:

- a) der Hauptausprägung der Rasterfläche (Abb. 3, 4),
- b) der prozentualen Ausprägungen der Rasterfläche (Abb. 7 bzw. 8, a-d), oder durch Interpolation:
- c) zwischen Isolinien (Abb. 5) oder
- d) zwischen Meßpunkten (Abb. 6).

Das Problem der Datenauswahl und -erfassung wird in den Kap. 3.3., 4. und 5.4. wieder aufgegriffen.

Vorteile des Polygonverfahrens sind:

- a) Hohe Flächentreue, da die natürlichen Grenzlinien mit dem Plotter genau wiederzugeben sind;

b) Eine teilweise Automatisierbarkeit der Datenaufnahme durch den Einsatz eines Digitalisiergerätes (Koordinatengeber), die allerdings bei starker Zersplitterung der aufzunehmenden Flächen nicht mehr voll zum Tragen kommt;

c) Einsatzmöglichkeit von Scannern (Geräten zum automatischen Abtasten bzw. Erkennen von Linien oder Mustern in Karten und Luftbildern).

Nachteile des Polygonverfahrens:

- d) Aufwendige Programme zur Überlagerung zweier oder mehrerer Polygone;
- e) Stark ansteigende Datenmengen bei Zersplitterung eines Merkmals in viele kleine Einzelflächen oder bei wachsendem Verhältnis Umfang:Fläche.

Vorteile des Rasterverfahrens (spez. Quadratraster):

- f) Leicht an bestehende Kartenbasis (Deutsche Grundkarte 1:5000) und Koordinatenbasis (Gauß-Krüger-Netz) anzupassen;
- g) einfache Überlagerungsprogramme (z.B. IMGRID);
- h) vorausberechenbarer Speicherplatzbedarf, der nur von der Zahl der Variablen, der Rastergröße und der Zahl aufzunehmender Karten abhängt;
- i) aufgrund der Position in der Matrix ist jede Rasterfläche eindeutig räumlich definiert.

Nachteile des Rasterverfahrens:

- j) Mit zunehmender Rastergröße abnehmende Flächentreue.

Zusätzliches Problem bei der Erfassung nur qualitativ zu differenzierender Variabler (z.B. Flächennutzung): Wird nur die Hauptausprägung jeder Rasterfläche erfaßt, so geht ein großer Teil der Information verloren. Dies gilt besonders für Ausprägungen, die selten großflächig auftreten, z.B. Sumpf- oder Seeflächen oder Flächen mit besonders starken Hangneigungen. Gerade diese Ausprägungen sind hydrologisch wichtig: Sumpfe und Seen sind Oberflächen speicher und erreichen hohe Verdunstungsraten, und stark geneigte Flächen bewirken einen hohen Oberflächenabfluß, sind erosionsanfällig und haben nur geringe Tiefenversickerung.

Daher ist bei der Aufnahme qualitativer Flächendaten (z.B. Geologie, Böden, Flächennutzung bzw. Be deckung) trotz erhöhten Erhebungsaufwandes die Erfassung als prozentualer Anteil an der Rasterfläche zu favorisieren (sofern die Erfassung auf Polygonbasis nicht bevorzugt wird). In der Dimension 'prozentualer Anteil des Einzugsgebietes' finden diese Flächendaten Verwendung in mathematisch-statistischen Modellen zur Abfluß- und Gewässergüte vorhersage (vgl. u.a. HERRMANN 1971; RUMP 1976; STREIT 1979; SYMADER 1976).

Abb. 1-8: Erfassung quantitativer und qualitativer Variablen. Beispiel: Deutsche Grundkarte (1:5000) mit 500 m-Raster (unmaßstäblich):

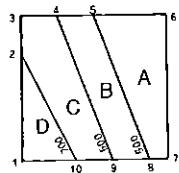


Abb.1: Flächenscharfe Erfassung (Polygon) klassifizierter quantitativer Variablen (Niederschlag als Isohyeten-darstellung). Es entstehen die Polygone A, B, C und D:

Polygon	Niederschlag	Eckpunkte
A	bis 500 mm	5 - 6 - 7 - 5
B	bis 600 mm	4 - 5 - 7 - 8 - 9 - 4
C	bis 700 mm	2 - 3 - 4 - 9 - 10 - 2
D	bis 800 mm	1 - 2 - 10 - 1

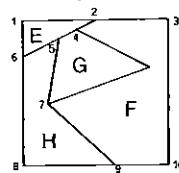


Abb.2: Flächenscharfe Erfassung (Polygon) qualitativer Variablen (Flächen-nutzung). Es entstehen die Polygone E, F, G und H:

Polygon	Nutzung	Eckpunkte
E	Wald	6 - 1 - 2 - 4 - 5 - 6
F	Grünland	2 - 3 - 10 - 9 - 7 - 4 - 2
G	Ackerland	4 - 7 - 5 - 4
H	Siedlung	5 - 7 - 9 - 8 - 6 - 5

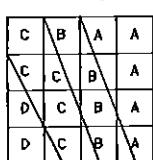


Abb.3: Gerasterte Erfassung klassifizierter quantitativer Variablen (Niederschlag als Isohyetendarstellung). Zuordnungs-kriterium: Größter Flächenanteil der Ausprägung A, B, C oder D an der Ra-sterfläche. Vgl. auch Abb. 7 und 8.

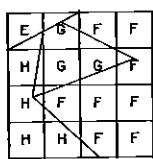


Abb.4: Gerasterte Erfassung qualitativer Variablen (Flächennutzung). Zuordnungskri-terium: Größter Flächenanteil der Aus-prägung E, F, G oder H an der Raster-fläche.

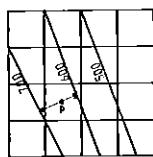


Abb.5: Gerasterte Erfassung klassifizierter quantitativer Variablen: Niederschlags-berechnung für Punkt P in Rasterflächen-mitte durch Interpolation zwischen Iso-hyeten.

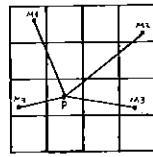


Abb.6: Gerasterte Erfassung quantitativer Vari-abler: Niederschlagsberechnung für Punkt P in Rasterflächenmitte durch Interpo-la-tion zwischen Meßpunkten M1, M2, M3 und M4.

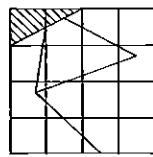


Abb. 7a, 8a: Variable E (Wald): Prozentualer Anteil an jeder Rasterfläche.

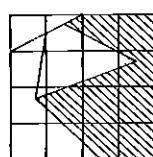
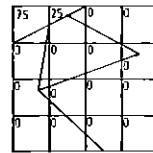


Abb. 7b, 8b: Variable F (Grünland): Prozentualer Anteil an jeder Rasterfläche.

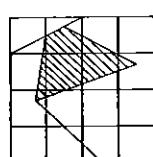
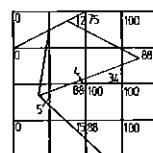


Abb. 7c, 8c: Variable G (Ackerland): Prozentualer Anteil an jeder Rasterfläche.

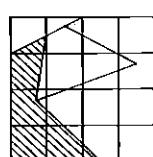
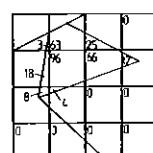
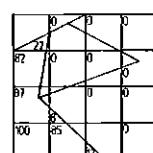


Abb. 7d, 8d: Variable H (Siedlung): Prozentualer Anteil an jeder Rasterfläche.



2.3.2. Flächen-, Linien- und Punktdaten

Drei Datenarten können auf Raster- oder Polygonbasis vorliegen:

- a) Flächendaten (auf Raster- oder Polygonbasis), unterschieden in:
 - aa) Qualitative Daten (nominalskaliert): z.B. Wald, Acker, Löß, Quartäres Lockermaterial;
 - bb) Quantitative Daten (rational-, intervall-, rangskaliert): z.B. Niederschlagshöhe, Lufttemperatur, NFK-Klassen.

Bei quantitativen Daten muß noch grundlegend nach Raster- und Polygonerfassung unterschieden werden: Wird Rastererfassung gewählt, so gilt der für die Rasterflächenmitte gültige Wert (mm Niederschlag, m Höhe) für die ganze Rasterfläche. Wird Polygonerfassung gewählt, so müssen Flächen gleicher Ausprägung definiert werden. Das setzt z.B. eine Klassifizierung quantitativer Daten voraus: Man umgrenzt Flächen z.B. mit Niederschlag bis 500, 600, 700 mm usw. oder mit Höhen bis 100, 200, 300 m usw.. Das Erzeugen derartiger Isoliniendarstellungen bedeutet einen zusätzlichen Arbeitsschritt, die (richtigen) Klassengrenzen müssen gefunden werden, und obendrein bewirkt die Klassifizierung einen Informationsverlust, besonders unter dem Aspekt unsicherer Daten und Rundungsfehler.

Daher erscheint es sinnvoll, wie folgt zu verfahren: Qualitative Flächendaten ("schlechtere" Information) werden flächenscharf auf Polygonbasis erhoben, da eine Interpolation nicht möglich bzw. wenig sinnvoll ist (z.B. Wald - Grünland). Quantitative Daten ("bessere" Information) werden für Rasterflächenmitten bzw. Gitterschnittpunkte erfaßt und können für Zwischenpunkte interpoliert oder der jeweiligen Rasterfläche zugeordnet werden (z.B. Meereshöhe).

b) Liniendaten:

Diese Daten werden als Polygonzüge erhoben (in der Regel durch Digitalisierung): z.B. Flüsse, Straßen, Grenzen. Diesen Linien lassen sich Eigenschaften zuordnen, z.B. Gefälle oder Fließgeschwindigkeit für bestimmte Flussabschnitte, oder Gemeinde-, Kreis- oder Landesgrenzen.

c) Punktdaten:

Punktdaten liegen als x/y-Koordinaten vor, z.B. zur Lagebeschreibung von Meßstationen oder Pegeln. Auch Punktdaten lassen sich Eigenschaften zuordnen, etwa Gewässergüteparameter für bestimmte Meßpunkte.

Wird auf Basis der Deutschen Grundkarte gearbeitet, so werden sinnvollerweise Gauß-Krüger-Koordinaten benutzt. Die Zuordnung von Linien- oder Punktdaten

zu Rastern sollte nicht erfolgen, da diese Art von Daten dann zu Flächendaten umgewandelt wird und einen Teil ihrer Aussagekraft verliert.

2.3.3. Räumliche Bezugsbasis

Bei der Datenerfassung auf Rasterbasis lassen sich unterschiedliche Rastermaschenweiten anwenden. Gebräuchlich bzw. bereits angewandt sind quadratische Rasterflächen mit Seitenlängen von 50, 100, 250, 500, 1000, 2000 und 10000 Metern. Je engmaschiger das Gitternetz, desto besser läßt es sich einem Polygonzug bzw. den natürlichen Grenzen anpassen. Verschiedentlich wurde mit nichtquadratischen Rasterzellen gearbeitet, die sich jedoch nicht durchsetzten. Versuche mit Hexagonen werden z.Zt. in der Tschechoslowakei durchgeführt (HYNEK 1981); für Vergleichszwecke liegen noch zu wenig Informationen vor. Auch ERGENZINGER et al. (1982) arbeiten versuchswise u.a. mit Hexagonen. Grundsätzlich ist es unerheblich, ob quadratische oder rechteckige Rasterzellen gewählt werden; quadratische Rasterflächen scheinen jedoch Vorteile in Verbindung mit dem quadratischen Blattschnitt der Deutschen Grundkarte zu bieten.

Bei der Datenerfassung und -speicherung ist es sinnvoll, Daten zu Blöcken zusammenzufassen. Suchprogramme können dann gezielt bestimmte Blöcke anspringen; das zeitintensive Durchlaufen aller Einzelsätze entfällt. Ein solcher Block kann etwa einer Grundkarte entsprechen, d.h., alle Daten einer bestimmten Grundkarte gehören zu diesem Block; er wird eindeutig durch die Blattnummer (Rechts- und Hochwert) identifiziert. Die Deutsche Grundkarte liegt für die Bundesrepublik Deutschland flächendeckend vor und basiert auf dem vielfach benutzten Gauß-Krüger-Netz. Der Maßstab 1:5000 ermöglicht eine gute Auflösung. Das o.g. LÜKIS benutzt ein auf der Deutschen Grundkarte aufgebautes Quadratgitternetz mit Maschenweiten von 2 km (entspricht einer Grundkarte), 1000, 500 und 100 Metern. Einer Aggregation nach oben sind keine Grenzen gesetzt. Für kleinräumige Untersuchungen (Geländeklimatologie, Feuchtflächenausweisung) müßten evtl. kleinere Rasterzellen definiert werden, was in der LÜKIS-Konzeption berücksichtigt ist. Auch Polygone bzw. Polygonzüge (oder Teile davon) werden grundkartenweise erfaßt und gespeichert. Leider wird zu diesem Thema in der Literatur kaum Stellung genommen; lediglich bei den (mit großen Rasterzellen arbeitenden) nordamerikanischen Systemen finden sich Hinweise darauf.

3. Prüfung vorhandener/geplanter EDV-gestützter räumlicher Informationssysteme zwecks Einsatz für die hydrologische Planung

3.1. Oberblick

Bei der Prüfung vorhandener, im Aufbau befindlicher oder geplanter räumlicher Informationssysteme wurden folgende Punkte berücksichtigt:

- aa) Welche der unter 2.2. aufgelisteten hydrologisch relevanten Variablen sind gespeichert oder dafür vorgesehen? Dimensionierung der Variablen?
- bb) Räumliche Auflösung (z.B. Rastergröße, Meßstellen-dichte)
- cc) Bei zeitvarianten Variablen: zeitliche Auflösung
- dd) Räumlicher Bezug/erfaßtes Gebiet
- ee) Raster- oder Polygonerfassung, Liniendaten, Punktdaten
- ff) Anwendung in der Hydrologie erfolgt/geplant?

Zum Punkt aa) siehe auch Tabelle 4.

Die zu untersuchenden Informationssysteme lassen sich in vier Gruppen aufteilen:

- a) Landschaftsinformationssysteme mit Daten der Bereiche Landschaftsplanung/Landschaftsökologie/Physiogeographie
- b) Regional- bzw. Landesinformationssysteme mit vorwiegend sozioökonomischen Daten
- c) Geowissenschaftliche Informationssysteme für geologische, bodenkundliche und morphometrische Daten
- d) Hydrologische Informationssysteme mit wenigen geologischen, pedologischen und morphometrischen Daten.

Darüberhinaus existieren noch sog. 'Sachinformationssysteme' (eine Art Karteikasten), z.B. zur Literaturdokumentation (IVS Geowissenschaften/Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover) oder zur Information über das Verhalten von Schadstoffen in Luft und Wasser (DABAWAS, INFUCHS/Umweltbundesamt, Berlin). Diese haben aber wegen des fehlenden Raumbezugs nur lexikalischen Charakter und scheiden daher aus der Betrachtung aus. Nicht berücksichtigt werden ferner räumliche Informationssysteme aus dem Bereich Luftreinhal tung/Luftüberwachung (Emissions-/Immissionskataster), wie sie z.B. unter Beteiligung des Technischen Überwachungsvereins Rheinland in Köln für Ballungsräume in Nordrhein-Westfalen (u.a. Köln) und für den Raum Mannheim/Ludwigshafen erstellt wurden. Der Eintrag von Schadstoffen aus der Luft in Boden- und Wasserkörper ist bekannt: eine Versauerung durch schwefeldioxidhaltige Niederschläge oder eine Schwermetallanreicherung sind die Folge (u.a. SCHRIMPFF & HERRMANN 1978; THOMAS 1981). Eine Einbeziehung dieses Kom-

plexes würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Die unter a) und b) genannten räumlichen Informationssysteme sind meist flächendeckend konzipiert, d.h., es soll in der Regel keine 'weißen Flecken auf der Landkarte' des jeweiligen Erfassungsraumes geben. Andererseits handelt es sich bei den aufgenommenen Daten um Variable, die die Oberflächenausstattung einer Landschaft bzw. Region beschreiben. Die zeitliche Variabilität dieser Größen ist sehr gering, die saisonale Komponente fehlt ganz. Lediglich über längere Zeitabschnitte können Veränderungen festgestellt werden, z.B. Abnahme der land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen, Zunahme bebauter Gebiete. Dieser Langzeitrend wird normalerweise von diesen Informationssystemen nicht erfaßt. Häufig ist von einer Fortschreibung der Daten die Rede, d.h., es ist immer nur der aktuelle Stand verfügbar, was in der Landschaftsplanung durchaus als sinnvoll erscheint. Natürlich ist zu prüfen, ob alle Datenquellen einen einheitlichen Bearbeitungsstand haben.

Im Gegensatz dazu erfassen die Informationssysteme der Punkte c) und d) in der Regel Punktdaten, Liniendaten oder nur für bestimmte Areale gültige Flächendaten: Niederschlagsmeßwerte etwa für Meßstationen; Abflußdaten, die für bestimmte Flußabschnitte oder Fließeinzugsgebiete gelten, oder geologische Schichtenverzeichnisse, die sich auf ein Bohrloch beziehen. Der zeitlichen und saisonalen Variabilität der Daten wird – zumindest bei hydrologischen Informationssystemen – Rechnung getragen, da Zeitreihen als Tages-, Monats- oder Jahreswerte gespeichert werden können. Eine Schwachstelle dieser Informationssysteme liegt jedoch im Fehlen flächendeckender Daten. Zum Schließen dieser räumlichen Datenlücken lassen sich sog. 'räumliche Prognoseverfahren' einsetzen. Darunter ist die Inter- bzw. Extrapolation bekannter Werte durch mathematisch-statistische oder deterministische Verfahren zu verstehen. Einen Überblick gibt STREIT (1981a). Das Problem der 'räumlichen Prognose' wird in der vorliegenden Arbeit in den Kap. 5. ff wieder aufgegriffen.

3.2. Vorhandene und geplante Informationssysteme

Insgesamt werden 27 vorhandene, im Aufbau befindliche oder geplante räumliche Informationssysteme untersucht. Diese Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit; vielmehr soll ein (hof-

fentlich) repräsentativer Oberblick darüber gegeben werden, was diese Systeme für die Hydrologie leisten könnten bzw. können.

a) Landschaftsinformationssysteme:

- (1) CGIS Canada Geographic Information System
- (2) LUNR The Land Use and Natural Resources Inventory of New York State
- (3) MLMIS Minnesota Land Management Information System
- (4) ORRMIS The Oak Ridge Regional Modelling Information System
- (5) PIOS The Polygon Information Overlay System (California)
- (6) FRUN Flächenkataster Region Unterer Neckar
- (7) LDBBW Landschaftsdatenbank Baden-Württemberg
- (8) LDBBAY Landschaftsdatenbank Bayern
- (9) LDBFNL Landschaftsdatenbank der Bundesforschungsanstalt für Naturschutz und Landespflege (Bonn / Nordrhein-Westfalen)
- (10) RDBELF Regionale Datenbank im Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
- (11) RPU Regionale Planungsgemeinschaft Untermain/Informations- und Planungssystem
- (12) UEG Umweltinformationssystem der Europäischen Gemeinschaft

b) Regional- und Landesinformationssysteme:

- (13) HAMREGIS Hamburger Regionales Informationssystem
- (14) ORL Informationsraster (Schweiz)
- (15) ROLAND Informationssystem für Raumordnung und Landesplanung (BR Dtld.)

c) Geowissenschaftliche Informationssysteme:

- (16) IGW Informationssystem Geowissenschaften/Wasserwirtschaft
- (17) DASP (aus GRASP und DASCH) Dateiverwaltungssystem für geologische Daten (Niedersachsen)
- (18) DBNS Datenbanken in Niedersachsen: Geologie, Geokartographie, Geohydrologie, Lagerstätten, Ingenieurgeologie
- (19) TDMS Topographisches Datenbank- und Verarbeitungssystem der Deutschen Bundespost (BR Dtld.)
- (20) TKRP Transmissivitätskataster Rheinland-Pfalz

d) Hydrologische Informationssysteme:

- (21) WA The Water Archive (Großbritannien)
- (22) STORET Gewässergütedatenbank (USA)
- (23) NAQUADAT Gewässergütedatenbank (Canada)
- (24) HYDABA Hydrologische Datenbanken (BR Dtld.)

- (25) DBW Datenbank Wasserwirtschaft (Bayern)
- (26) AWK Abwasserkataster (BR Dtld.)
- (27) IGS Informationssystem (GUPTA & SOLOMON, Canada).

Die Abkürzungen der Informationssysteme 1-5, 13, 15, 17, 19, 22-24 finden bereits in der Literatur Verwendung. Alle anderen Kürzel wurden zwecks leichterer Unterscheidung vom Verfasser vergeben und werden im weiteren Verlauf der Arbeit benutzt. Die genannten 27 Informationssysteme und Datenbanken werden im folgenden kurz beschrieben und Angaben zu den unter 3.1., aa) bis ff) aufgeführten Prüfpunkten gemacht.

3.2.1. Landschaftsinformationssysteme

(1) CGIS - Canada Geographic Information System

Dieses Informationssystem erfaßt weite Teile Canadas und gibt Auskunft über derzeitige Flächennutzungen und mögliche Flächeneignung (TOMLINSON et al. 1976, S.27-73). Bei der Datenaufnahme wurden die Flächen hinsichtlich ihrer Eignung für Wald, Erholung, wildlebende Tiere, Landwirtschaft etc. bewertet, und bei Anfragen an das System läßt sich prüfen, ob Eignung und derzeitige Nutzung optimal übereinstimmen. Suchverfahren ermitteln geeignete Flächen innerhalb vorzgebender administrativer Grenzen, Wasserscheiden oder sonstiger Polygone. Alle Flächendaten werden als Polygon gespeichert; die Daten wurden aus Karten und Luftbildern mit einem Scanner erfaßt.

ad aa) Bodeneignung für Landwirtschaft, Landeignung für Wald/Erholung/Landtiere/Wassertiere (je 7 Klassen); Wassereignung für Sportfischerei (4 Klassen); Landnutzung (5 Klassen); administrative Grenzen, Wasserscheiden, Küstentlinien

ad bb) Kleinste Flächen: 2,6 ha

ad cc) Keine zeitvarianten Daten

ad dd) Süd. Teil Canadas (Ost- bis Westküste)

ad ee) Polygone

ad ff) Nein.

(2) LUNR - The Land Use and Natural Resources Inventory of New York State

Die naturräumliche Ausstattung, d.h. Landnutzung, Böden und Geologie, des Bundesstaates New York wird von diesem Informationssystem erfaßt (TOMLINSON et al. 1976, S.110-124). Die Datenerfassung und -speicherung erfolgt auf der Basis eines Quadratkilometerrasters, wobei als Zuordnungskriterium die Hauptausprägung einer Variablen in einem

Quadrat gewählt wurde. In besonderen Fällen kann zusätzlich eine subdominante Ausprägung aufgenommen werden. Die kleinste erfaßbare Einheit sind 0,4 ha (= 0,4 % eines Quadrates). Bei der Variablen 'Boden' sind 214, bei der Geologie 11 und bei der Landnutzung 51 verschiedene Ausprägungen möglich; hinzu kommen 68 mögliche Ausprägungen von Punktdaten. Zur Überdeckung des Staates New York sind 114 000 Rasterflächen nötig; alle Daten wurden aus Karten und Luftbildern entnommen. Die Daten können bereitgestellt werden: für alle gewünschten Rasterflächen; für alle Rasterflächen in einem beliebigen Polygon; für Rasterflächen in bereits definierten administrativen Einheiten; für bereits definierte Fließgebiete. Die Datenausgabe erfolgt als Tabelle mit einfacher statistischer Auswertung oder als Schnelldruckerkarte.

ad aa) Böden, Geologie, Landnutzung mit 214/11/51 möglichen Ausprägungen

ad bb) Quadratkilometerraster; kleinste erfaßbare Einheit: 0,4 ha

ad cc) Keine zeitvarianten Daten

ad dd) US-Bundesstaat New York

ad ee) Raster; Punkt-, Liniendaten

ad ff) Nein.

(3) MLMIS - Minnesota Land Management Information System

Dieses nordamerikanische Informationssystem (TOMLINSON et al. 1976, S.90-109) arbeitet auf der Basis eines 16 ha-Quadratgitternetzes (=400 m Seitenlänge) und hat flächendeckend für Minnesota 2 Variable gespeichert: Landnutzung mit 9 und 'Wasser-Orientierung' mit 7 möglichen Ausprägungen. Letztere ist speziell auf den Untersuchungsraum zugeschnitten: mögliche Ausprägungen sind z.B.: Quadrat auf einer Insel; Quadrat an mäandrierendem/nicht mäandrierendem/perennierendem/zeitweilig trockenfallendem Fließ. Bei der Variablen 'Landnutzung' wird nach dem Kriterium 'größter Flächenanteil des Quadrates' entschieden. Als Datenausgabe ist primär die Erstellung von Schnelldruckerkarten in Graustufen vorgesehen. Für einen Teil der Rasterflächen wurden zu Testzwecken die Besitzverhältnisse und die politisch-administrative Zugehörigkeit erhoben.

ad aa) Landnutzung (9 Klassen); 'Wasser-Orientierung' (7 Klassen)

ad bb) 400 x 400 m-Raster

ad cc) Keine zeitvarianten Daten

ad dd) Minnesota/USA

ad ee) Raster

ad ff) Nein.

(4) ORRMIS - The Dak Ridge Regional Modelling Information System

Von diesem Informationssystem wird ein Beitrag zur Erstellung eines Regionalmodells erwartet, um den Einfluß politischer oder ökonomischer Entscheidungen auf Landnutzung und Ökologie darstellen zu können (TOMLINSON et al. 1976, S.125-139). Zu dem Modell gehört ein sozioökonomisches, ein landnutzungs-, ein ökologisches und ein soziopolitisches Submodell. Die Daten werden vorwiegend mit einem Scanner aus Karten erhoben und auf der Basis eines nichtquadratischen Rasters gespeichert. 5 verschiedene Rastergrößen sind möglich; hinzu kommt als kleinste Einheit eine 10 x 10 m-Fläche. Zur Regionalisierung und Typisierung werden Faktoren- und Clusteranalysen benutzt; hierzu finden sich leider keine weiteren Angaben. Die Datenausgabe erfolgt in Tabellenform und als Plotterkarte.

ad aa) Flächennutzung: 9 Hauptklassen mit vielen Unterteilungen

ad bb) Rastergrößen: 10 x 10, 95 x 113, 380 x 460, 760 x 920, 3800 x 4600, 11400 x 13800 Meter

ad cc) Keine Angaben über zeitvariante Daten

ad dd) Tennessee/USA

ad ee) Nichtquadratisches Raster

ad ff) Nein.

(5) PIOS - The Polygon Information Overlay System

PIOS erfaßt in seiner ersten Version Bodendaten und Verkehrswegenetze (sprich: Straßen). Da das System vorwiegend in der Verkehrsplanung im Raum San Diego/Cal. Verwendung finden soll, wurden zusätzlich Flächennutzungsdaten erhoben (TOMLINSON et al. 1976, S.74-89). Die Daten wurden aus Karten und Luftbildern digitalisiert und als Polygon gespeichert; die Landnutzungsdaten sollen möglicherweise für die Planung von Überschwemmungsgebieten und Kanalisationen sowie für die Modellierung des Abflußverhaltens genutzt werden.

ad aa) Landnutzung (20 Kategorien)

ad bb) Keine Angaben

ad cc) Keine zeitvarianten Daten

ad dd) San Diego County/Cal./USA

ad ee) Polygon

ad ff) Möglicherweise ja.

(6) FRUN - Flächenkataster Region Unterer Neckar

Für den Testraum Mannheim-Heidelberg sind die Flächennutzung und die Ortsteilgrenzen als Polygonzüge erfaßt und gespeichert. Diese Art der Datenerfassung wurde gewählt, weil sie 'Genauigkeit und Wirklichkeitstreue bietet, die von der Stadt- und Regionalplanung verlangt wird' (LOCH et al. 1978, S.154). Die Polygone verschiedener Merkmale können

überlagert werden, und die Ergebnisse lassen sich auf dem Plotter ausgeben. Ein Programm ermöglicht die Oberführung von Polygondaten in Rasterdaten für 10 x 10 m-Quadrate. Die Aufnahme sozioökonomischer und politisch-administrativer Daten wird angestrebt. Die Datenausgabe erfolgt als Tabelle, als Plot oder als Mikrofilmplot.

- ad aa) Ortsteilgrenzen; Flächennutzung (36 Merkmale)
- ad bb) 10 x 10 m-Raster; bei Polygonen keine Angabe
- ad cc) Keine zeitvarianten Daten
- ad dd) Raum Mannheim-Heidelberg
- ad ee) Polygone; Umsetzung auf Raster möglich
- ad ff) Nein.

(7) LDBBW - Landschaftsdatenbank Baden-Württemberg

Die Landschaftsdatenbank Baden-Württemberg befindet sich seit ca. 1977 im Aufbau (MOLLER & EHMKE 1978; EHMKE & MOLLER 1979). Daher sind Angaben zu den aufzunehmenden Daten noch z.T. wenig detailliert: z.B. sollen 'Einzelfaktoren festgestellt ... werden, um Belastung und Belastbarkeit der Landschaft zu bewerten', oder Merkmale mit ökologischer und planerischer Relevanz erhoben werden (MOLLER & EHMKE 1978, S.15D). Hierzu gehören die Variablen Meereshöhe und, daraus abgeleitet, Hangneigung und Exposition. Bei Vorüberlegungen zur Ermittlung des Grundwasserdargebotspotentials wird wegen des lückenhaften Datenmaterials lediglich mit Rangplätzen gearbeitet (EHMKE & MOLLER 1979, S.193). Das ermöglicht nur allgemeine Aussagen über verfügbare Grundwassermengen, die sich zwischen 9 = sehr günstig und 1 = sehr ungünstig bewegen; die saisonale Variabilität des Wasserhaushalts wird überhaupt nicht angesprochen.

Die Wahl von 9 Klassen zur Erfassung des Grundwasserpotentials ist auf den Einsatz des Auswertungsprogrammes IMGRID (KOEPEL 1978) zurückzuführen; es erwartet vorzugsweise eine einstellige Anzahl von Ausprägungen. Vgl. hierzu auch LDBFNL und UEG. Die Datenaufnahme soll teils als Polygon, teils auf Rasterbasis erfolgen. Flechten wurden im Quadratkilometerraster kartiert und linear auf Hektarraster interpoliert. Zur Auswertung von Höhendaten soll ein 'Digitales Geländemodell' auf Rasterbasis zum Einsatz gelangen; Angaben zur Rastergröße und zu angewandten Algorithmen fehlen jedoch.

- ad aa) Meereshöhe (m); sonst keine Angaben
- ad bb) Quadratraster; Seitenlänge 1000, 100, 25 m
- ad cc) Keine Angaben
- ad dd) Baden Württemberg; Testgebiete: Mannheim, Stuttgart, Freiburg, Karlsruhe
- ad ee) Raster und Polygone
- ad ff) Ansatz zur Erfassung des Grundwasserdargebotspotentials; sonst keine Angaben.

(8) LDBBAY - Landschaftsdatenbank Bayern

Die Landschaftsdatenbank Bayerns - auch LDB 377 genannt - ist 'als integraler Bereich des Umweltinformationssystems des Bayrischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen konzipiert'. Es sollen 'nur solche Daten erfaßt werden, die zur Lösung bestimmter Fachaufgaben erforderlich sind' (WEIHS 1978, S.146). Bereits in die Datenbank eingespielt wurden Daten der Biotopkartierung und des Forschungsprojekts 'Münchener Norden' Über Belastung der Landschaft und Erholungsmöglichkeiten. Vorgesehen ist die Aufnahme von Nutzungsarten, Bodenprofilen, Freizeiteinrichtungen, Kiesgruben. Generell werden vier Datenblöcke unterschieden: a) Topographische Daten, b) Emissions- und Immissionsdaten, Fachdaten Boden/Wasser/Luft, c) Infrastrukturdaten, d) projektbezogene Daten. Ein digitales Geländemodell wird erwähnt, detaillierte Angaben zu Variablen und Dimensionen fehlen jedoch.

- ad aa) Topographie, Umweltbelastung, Boden, Wasser, Luft, Infrastruktur, Sonstige. Keine weiteren Angaben zu Variablen und Dimensionen
- ad bb) Keine Angaben
- ad cc) Keine Angaben
- ad dd) Münchener Norden; Bayern
- ad ee) Raster und Polygone
- ad ff) Keine Angaben.

(9) LDBFNL - Landschaftsdatenbank der BFAHL

Diese Landschaftsdatenbank wurde an der Bundesforschungsanstalt für Naturschutz und Landespflege in Bonn/Bad Godesberg zu Testzwecken erstellt und ist Teil des konzipierten Landschaftsinformationssystems mit den weiteren Teilbereichen Literaturdokumentation und Landschaftsstatistik. Von allen in der Bundesrepublik Deutschland konzipierten Landschaftsinformationssystemen bzw. -datenbanken scheint diese am weitesten über das Versuchsstadium hinaus gediehen zu sein. Auch ist eine relativ detaillierte Merkmals- bzw. Variablenliste vorhanden (KOEPEL & ARNOLD 1980, S.41f und Anhang). Dimensionen und Angaben zur raumzeitlichen Auflösung der hydrologisch relevanten Variablen fehlen jedoch weitgehend. Für verschiedene Daten und Auswertungsprogramme werden Anwendungsbeispiele aufgeführt.

Variable werden vorwiegend qualitativ erhoben. Z.B. wird die Variable 'Festgestein' wie folgt belegt:

- | | | |
|--------------|---------------|----------------------|
| 1 = Basalt | 2 = Andesit | 3 = Trachyt |
| 4 = Schiefer | 5 = Grauwacke | 6 = Quarzitsandstein |
- d.h. eine rein nominale Zuordnung. Für die Variable 'Lockergestein' gilt:
- | | | |
|----------|-----------------|--------------------------|
| 1 = Kies | 4 = Löß | 7 = Basalt-/Andesittuff |
| 2 = Sand | 5 = Ton | 8 = Schlacke |
| 3 = Lehm | 6 = Trachyttuff | 9 = Künstl. Aufschüttung |

Für die Klassen 1 bis 5 ist eine Stufung im Korngrößenpektrum erkennbar, darüberhinaus ist die Zuordnung willkürlich. Die Variable 'Jahresniederschlag' (in mm) wird in Klassen unterschiedlicher Bandbreite eingeteilt, die anschließend rangskaliert gespeichert werden. Für überregionale Zwecke wird eine andere Skala gewählt als für die Testregion (DIES., S.46):

Regional		Überregional / BR Deutschland		
Rang Niedersch.	Rang Niedersch.	Rang Niedersch.	Rang Niederschlag	
1 500 mm	0	550 mm	5 800- 900 mm	
2 600 mm	1	550-600 mm	6 900-1000 mm	
3 650 mm	2	600-650 mm	7 1000-1150 mm	
4 700 mm	3	650-700 mm	8 1150-1300 mm	
5 750 mm	4	700-800 mm	9 über 1300 mm	

Wegen des durch die Klassifizierung entstehenden Informationsverlustes ist die Verwendung dieser Variablen in einem mathematisch-statistischen Simulationsmodell kaum noch möglich: Wie leicht zu sehen ist, bedeutet Rang 6 nicht einen doppelt so hohen Niederschlag wie Rang 3.

Die Variable 'Meereshöhe' wird in Metern über NN erfaßt und gespeichert, aber bei der Ausgabe - ähnlich wie der Niederschlag - einer Klasse zugeordnet. Klimadaten werden rechnergestützt generiert (DIES., S.52), wobei z.B. Flächen in der Kölner Bucht mit Höhen unter 100 m ü. NN die Jahresmitteltemperatur 9,5 °C, Flächen unter 100 m der Wert 9,0 °C zugeordnet wird. Diese Werte werden nun verschlüsselt: 9,0 °C erhält den Rang 3, und 9,5 °C den Rang 4.

Fast alle qualitativen Daten werden vor der Speicherung einer Verschlüsselung unterworfen, wobei meist nicht mehr als 10 Klassen vergeben werden (0 bis 9); lediglich bei der Erhebung in 'Prozent der Rasterfläche' werden die Prozentwerte unverschlüsselt gespeichert. Quantitative Variable werden mit Ausnahme der Variablen 'Meereshöhe' zunächst klassifiziert (max. 10 Klassen) und in dieser Form gespeichert. Es wird bemerkt, daß 'fast für jedes Merkmal eine andere Methode der Informationsaufteilung und der Datencodierung (Verschlüsselung) gefunden werden muß' (DIES., S.53). Zu diesen Methoden und zur Fixierung der Klassengrenzen werden weitere Hinweise nicht gegeben. Wegen des Informationsverlustes durch Klassifizierung sind diese Daten nur eingeschränkt in der Hydrologie verwendbar. Außerdem fehlt die saisonale Komponente dieser Größen.

ad aa) Meereshöhe (m) in Rasterflächenmitte; Wald, Grünland, Acker, Wasserfläche (% der Rasterfläche); Jahresmitteltemperatur (0,5 °C-Stufen); Jahresniederschlagssumme (bis zu 10 Klassen); Grundwassergleichen (53 Klassen in 0,5 m-Stufen); Sonstige quantitative Daten; klassifiziert und codiert. Sonstige qualita-

tive Daten (toposkopische Variable zur Beschreibung der räumlichen Lage und Ausstattung): codiert.

Die Zahl der Klassen bzw. Codierungen wurde nach Möglichkeit kleiner als 10 gewählt, um eine einstellige Codierung zu ermöglichen und das Auswertungsprogramm IMGRID (KOEPPEL 1978) einzusetzen. Vgl. auch LDBBW und UEG.

- ad bb) Testgebiet Raum Bonn: 250 x 250 m-Raster
- ad cc) Niederschlag, Temperatur: Jahresmittelwerte. Sonst keine Angaben
- ad dd) Testraum Bonn (812 km²)
- ad ee) Raster. Datenaufnahme als Polygon und Konvertierung in Rasterdaten möglich
- ad ff) Bereitstellung von Daten zum Vilicher Bach (bei Bonn Beuel): Grenzen bzw. Flächen des Einzugsgebietes.

(10) RDBELF - Regionale Datenbank im BMELF (Bonn)

Diese Datenbank - im Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten entwickelt - soll 'grobräumige, das Gebiet der Bundesrepublik abdeckende, Strukturanalysen' durchführen (HECKMANN 1978, S.143). Sozioökonomische Daten wie Betriebsgröße und -einkommen oder Erträge werden auf der Basis von Landkreisen erhoben und als Rasterdaten (Hauptausprägung der Rasterfläche) gespeichert. Natürliche Gegebenheiten wie Niederschlagsmenge, Höhenlage, Böden, Temperatur, Vegetation werden aus Karten entnommen und als Rasterinformation gespeichert; Rastergröße ist 1 Quadratkilometer. Die Daten sollen bundesweit erhoben werden. Detaillierte Angaben zu Daten, Dimensionen und Ausbaustand des Systems werden nicht gemacht.

- ad aa) Niederschlagsmenge, Höhenlage, Bodenart, Bodentyp, Durchschnittstemperatur, Vegetationsdauer, Naturschutzparks. Keine Dimensionsangaben
- ad bb) Quadratkilometerraster
- ad cc) Keine Angaben
- ad dd) Bundesrepublik Deutschland
- ad ee) Quadratkilometerraster
- ad ff) Nein.

(11) RPU - Informations- und Planungssystem

Erste Voraarbeiten für dieses - im Rahmen des erdwissenschaftlichen Flugzeugmeßprogramms konzipierte - System wurden 1970 durch Auswertung von Infrarot-Luftbildern zwecks Erkennung von Bodentemperaturen und Kaltluftbildung geleistet. Inzwischen sind durch Fernerkundung Flächennutzungsdaten für die Testräume Neu-Isenburg und Kelkheim erfaßt. Eine Ausweitung auf das Gesamtgebiet der RPU (Regionale Planungsgemeinschaft Untermain/Frankfurt; 1400 km²)

ist geplant. Das Informations- und Planungssystem soll in der Lage sein, alternative Planungsvorschläge durchzuspielen und die wechselseitigen Einflüsse zwischen Planungsraum und Nachbargebieten abzuschätzen. Eine zusammenfassende Beschreibung des Systems gibt OEST (1980, S.130-133, nach RPU, 1977).

- ad aa) Flächennutzung, Topographie, Infrastruktur, Bevölkerungsdichte. Keine Dimensionsangaben
- ad bb) Keine Angaben
- ad cc) Keine zeitvarianten Daten
- ad dd) Regionale Planungsgemeinschaft Untermain; 1400 km²
- ad ee) Keine Angaben. Wegen Scanner-Einsatz vermutlich flächenscharfe Erfassung
- ad ff) Keine Angaben.

(12) UEG - Umweltinformationssystem der EG

Das Umweltinformationssystem der Europäischen Gemeinschaft existiert z.Zt. nur als Konzept. Es soll 'mittels eines rasterförmigen Katasters die Leistungs- und Belastungsfähigkeit der verschiedenen Regionen in ihrer Entwicklung darstellen' (WEIHS 1981, S.18). Hierzu werden Daten der Bereiche Lufthaushalt, Oberflächengewässer, Grundwasser, Boden, Freizeit, Fauna und Flora erhoben und in 9-stufige Skalen transponiert. Eine Datenerhebung im Polygonverfahren wird zusätzlich in Betracht gezogen, um die Daten sowohl für problembezogene Sachentscheidungen (Abgrenzungen) als auch für Trendrechnungen, Korrelationen u.ä. zu benutzen (DERS., S.19). Genaue Angaben zur Durchführung dieser Berechnungen fehlen. Die 9-stufige Skalierung läßt vermuten, daß auch hier das IMGRID-Auswertungsprogramm (KOEPEL 1978) eingesetzt werden soll. Vgl. auch LDBBW und LDBFN.

- ad aa) Allgemein: Luftaushalt, Oberflächengewässer, Grundwasser, Boden, Freizeit, Fauna, Flora. Keine Dimensionsangaben
- ad bb) Rastergröße 1 km²
- ad cc) Keine Angaben
- ad dd) Staaten der Europäischen Gemeinschaft
- ad ee) Raster und Polygone
- ad ff) Keine Angaben.

3.2.2. Regional- und Landesinformationssysteme

(13) HAMREGIS - Hamburger Regionales Informationssystem

Das Hamburger Regionale Informationssystem dient der Unterstützung der Regionalplanung und verwaltet Daten aus dem Großraum Hamburg (BISCHOFF et al. 1980). Neben der Datenbank existieren verschiedene

Programme zur statistischen Auswertung, zur Verknüpfung von Variablen, zur Koordinatentransformation, zur Datenauswahl und -bereitstellung, und zur Erzeugung von Schnelldruckerkarten. Die gespeicherten Daten sind sozioökonomischer Art und beziehen sich auf Bevölkerung, Erwerbstätigkeit, fiskalische Aspekte und Landwirtschaft; hier gehen auch Flächennutzungsdaten mit ein. Die Daten werden auf Rasterbasis erfaßt; im Stadtzentrum wird ein engmaschigeres Gitternetz als in den Außenbereichen benutzt. Dieses, für eine Stadt und ihr Umland erstellte, Informationssystem steht stellvertretend für ähnliche kommunale Informationssysteme (z.B. Bochum, Köln, München). Hydrologische Aspekte werden bei diesen Systemen nicht berücksichtigt, jedoch könnten die Flächennutzungsdaten für hydrologische Belange interessant sein.

- ad aa) Gemeindefläche (ha), Bevölkerung, Pendler, Erwerbstätige, Arbeitsstätten (Anz./Klasse), Landwirtschaft/Flächennutzung
- ad bb) Rastergrößen: 2500, 1250, 625 m Seitenlänge
- ad cc) Keine saisonal veränderlichen Daten. Bei langfristiger Veränderung erfolgt 'Updating'
- ad dd) Großraum Hamburg
- ad ee) Quadratraster
- ad ff) Nein.

(14) ORL - Informationsraster der Schweiz

Das Institut für Orts-, Regional- und Landesplanung (ORL) der ETH Zürich baute dieses Raumplanungsinformationssystem zu Beginn der siebziger Jahre auf. Inzwischen hat es das Eidgenössische Statistische Amt in Bern übernommen und stellt es den Planern in Bund, Kantonen und Gemeinden zur Verfügung (HIDBER 1972; ZDST 1976). Es speichert vorwiegend demografische Daten, aber auch morphometrische Größen wie Höhe, Hangneigung und Exposition. Die Daten werden auf Hektarrasterbasis gespeichert; eine weitere Datei enthält die Zugehörigkeit einer Gemeinde zu bestimmten Rasterflächen (HASE 1972, S.9). Auswertungsprogramme sehen Überlagerungen einzelner Rasterflächen und Abfragen nach vorgegebenen Ausprägungen vor; die Datenausgabe erfolgt in Tabellenform und als Schnelldruckerkarte. Die Höhendaten werden zur Erstellung eines digitalen Geländemodells bzw. zur dreidimensionalen graphischen Darstellung auf dem Plotter benutzt (ZOST 1976; TCHANG 1972). Eine Nachführung bzw. Aktualisierung der sozioökonomischen Daten ist u.a. durch Luftbildauswertung vorgesehen (VONDERHORST 1972).

- ad aa) Meereshöhe (m), Hangneigung (%), Exposition (8 Klassen); sozioökonomische Daten; Gemeindezugehörigkeit
- ad bb) Rastergröße: 100 und 250 m Seitenlänge

- ad cc) Keine saisonal veränderlichen Daten; demografische Variable mit Langzeittrend werden ggf. aktualisiert
- ad dd) Schweiz
- ad ee) Raster
- ad ff) Keine Angaben (Nein).

(15) ROLAND - Informationssystem für Raumordnung und Landesplanung

ROLAND ist konzipiert als ein bundesweites EDV-gestütztes Informationssystem für die Raumordnung und Landesplanung (HARTENSTEIN & SCHAAF 1974). Die aufgenommen Daten sind vorwiegend sozioökonomischer Art und beziehen sich z.B. auf Infrastruktur, Erreichbarkeit, Wanderungsverhalten, Arbeitsmarkt, Siedlungstätigkeit etc.. Die Erfassung erfolgt flächenscharf; es werden Flächen-, Linien- und Punktdata aufgenommen. Alle Daten sind politisch-administrativen Gebieten (z.B. Gemeinden, Gemeindeteilen) zugeordnet. Auf der Basis der vorhandenen Informationen lassen sich verschiedene Planungsvarianten durchspielen und alternative Konzepte erarbeiten. Es wird jedoch betont, daß letztlich die Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung das eigentliche Informationssystem ist, welches Teilaufgaben durch EDV bearbeiten läßt (SCHÄFER 1974, S. 244).

- ad aa) Flächennutzung, politisch-administrative Zugehörigkeit, sozioökonomische Daten. Keine Dimensionsangaben
- ad bb) Gemeindeteile
- ad cc) Keine Angaben zu zeitvarianten Daten
- ad dd) BR Deutschland; Pilotanwender: Bayern
- ad ee) Polygone; Linien-, Punktdata
- ad ff) Nein.

3.2.3. Geowissenschaftliche Informationssysteme

(16) IGW - Informationssystem Geowissenschaften / Wasserwirtschaft

Mit diesem System sollen Daten der Bereiche 'Geowissenschaft' und 'Wasserwirtschaft' in einem System vereinigt werden; die Daten stammen aus dem Land Hessen. Neben der geologischen Landesaufnahme ist geplant, alle nutzbaren Rohstoffe zu erfassen. Die Aufnahme von Wassermengen- und Wassergütedaten ist geplant; darüberhinaus soll ein Baugrundkataster erstellt werden. Eine summarische Beschreibung des Systems gibt OEST (1979, S.185-189). Ober Ausbaustand und Datenausgabemöglichkeiten liegen keine Informationen vor.

ad aa) Grundwasserstände, Niederschlag, Bodenfeuchte, Versickerung, Wasserstände, Abfluß, Gewässergüte. Keine Dimensionsangaben

ad bb) Keine Angaben

ad cc) Keine Angaben

ad dd) Hessen

ad ee) Keine genauen Angaben

ad ff) Ja.

(17) DASP - Dateiverwaltungssystem für geologische Daten

DASP ist ein speziell für pedologisch-geologische Daten konzipiertes Dateiverwaltungssystem und entstand durch Kombination von DASCH und GRASP. DASCH (Dokumentations- und Abfrageprogramm für Schichtenverzeichnisse) wurde am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung erstellt (MUNDRY 1973), und GRASP (Geological Retrieval and Synopsis Program) ist eine ähnliche Entwicklung aus den USA (BOWEN & BOTBOL 1975). Alle drei Systeme sind für das Speichern von Punktdata ausgelegt; Auswertungs- und Interpolationsprogramme ermöglichen neben der tabellarischen Datenausgabe das Zeichnen horizontaler Profilschnitte auf dem Plotter, deren Richtung frei wählbar ist (BARCKHAUSEN 1973, S.27). Eine räumliche Blockung der Daten ist vorgesehen; sie erfolgt auf der Basis des topographischen Kartenwerkes 1:25000 (MUNDRY 1973, S.27) und - bei der Verarbeitung von Bodendaten der Reichsbodenschätzung - auf der Basis des Deutschen Grundkartenwerkes 1:5000 (HEINEKE & OELKERS 1983).

Mit Hilfe von DASP bzw. DASCH wurde bes. im norddeutschen Raum eine Vielzahl pedologisch-geologischer Daten gespeichert. Ein Einsatz dieser Verarbeitungssysteme ist im Rahmen des Forschungsprojektes 'Neue Kommunikationswege in den Geowissenschaften mit Hilfe der ADV' - auch in anderen Regionen - vorgesehen (HEINEKE 1981). Derzeit befindet sich ein Weiterverarbeitungsprogramm in der Testphase, welches von DASP bereitgestellte bohrpunktbezogene Daten zu Flächendarstellungen verarbeitet (KUEHNE 1981, S.13). Das Programm arbeitet nach einem Rasterverfahren und erlaubt eine variable Rastergröße; z.Zt. sind max. 400 x 400 Rasterzellen möglich. Vorgegebene Grenzen können bei der Flächenkonstruktion berücksichtigt werden.

ad aa) Meereshöhe (m), pedologisch-geologische Horizonte bzw. Schichten, Bodenkennwerte (Var. 14-19 in Tab. 1)

ad bb) Variabel. Bei BARCKHAUSEN (1973): 20-200 m

ad cc) Keine zeitvarianten Daten

ad dd) Bisher vorwiegend Norddeutschland

ad ee) Punktdata (bohrlochbezogen)

ad ff) Keine Angaben.

(18) DBNS - Datenbanken in Niedersachsen

Das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung beschäftigt sich seit 1978 mit der systematischen Aufbereitung pedologisch-geologischer Daten, um sie in EDV-gestützte Datenbanken zu überführen (OEST 1979, S.203). Fünf Datenbanken sind vorgesehen: Geologie, Geokartographie, Hydrogeologie, Lagerstätten, Ingenieurgeologie. Bei der Erstellung der Datenbanken wird das DASP-System eingesetzt (KUEHNE 1981, S.2). Die derart bereitstehenden Daten sollen zur Ausweisung und kartographischen Darstellung von Naturraumpotentialen dienen und bei Nutzungskonflikten Entscheidungshilfen aus geologischer Sicht liefern (LOTTIG & PFEIFFER 1974).

- ad aa) Geologische und bodenkundliche Daten (vgl. DASP)
- ad bb) Keine Angaben
- ad cc) Keine zeitvarianten Daten
- ad dd) Niedersachsen
- ad ee) Punktdaten (bohrlochbezogen)
- ad ff) Ja (Hydrogeologie).

(19) TDMS - Topographisches Datenbank- und Verarbeitungssystem der Deutschen Bundespost

TDMS dient zur Erfassung und Verarbeitung digitalisierter Höhenlinien, Bewuchs- und Bebauungsinformationen (OEST 1979, S.179-182 nach SCHMELING 1977). Durch Rechenprogramme lassen sich Profile in beliebiger Himmelsrichtung legen, um Richtfunkstrecken zu planen und zu optimieren. Das System ist für die Bundesrepublik konzipiert; die Daten wurden aus Meßtischblättern digitalisiert, und die Ausgabe erfolgt vorwiegend als Schnelldruckerkarte.

- ad aa) Meereshöhe (m); Bewuchs, Bebauung
- ad bb) Keine Angaben bei OEST
- ad cc) Keine zeitvarianten Daten
- ad dd) BR Deutschland
- ad ee) Keine Angaben bei OEST
- ad ff) Nein.

(20) TKRP - Transmissivitätskataster Rheinland-Pfalz

Nach OEST (1980, S.330) plant das Landesamt für Geowissenschaften in Mainz ein Transmissivitätskataster, d.h., es soll flächendeckend für Rheinland-Pfalz das Transportvermögen des Untergrundes für Wasser erfaßt werden. Weitere Angaben werden nicht gemacht, jedoch scheint es sich hier um ein Projekt zu handeln, das der niedersächsischen Datenbank 'Hydrogeologie' vergleichbar ist (vgl. DBNS).

- ad aa), bb), cc) Keine Angaben bei OEST
- ad dd) Rheinland-Pfalz
- ad ee) Keine Angaben
- ad ff) Ja.

3.2.4. Hydrologische Informationssysteme

(21) WA - The Water Archive (GB)

Das 'Water Archive' soll qualitative und quantitative Gewässerdaten aller Art erfassen. Die z.Zt. in Betrieb befindliche 'Phase 2' (RODDA et al. 1978) arbeitet jedoch nur mit Wassergütedaten. Diese Daten stammen von beliebigen Meßpunkten und können eine unterschiedliche zeitliche Auflösung besitzen. Gleichermaßen gilt für später aufzunehmende Abfluß- und Niederschlagsdaten. Eine zweite Datei enthält ergänzende und erläuternde Rauminformationen, z.B. Koordinaten der Meßstelle, Wasserscheiden, politisch-administrative Grenzen, Umgebungsbeschreibung, Informationen zu durchgeführten wasserbaulichen Maßnahmen, Daten über Kläranlagen, etc.. Die Datenbereitstellung erfolgt nach Wunsch:

- für alle Meßstellen oberhalb eines anzugebenden Flusskilometers,
- für alle Meßstellen in einem vorzugebenden Polygon,
- für bestimmte Zeiträume,
- bei Überschreitung vorzugebender Schwellenwerte.

Kombinationen dieser Kriterien sind möglich. Das System wird in weiten Teilen Großbritanniens eingesetzt.

- ad aa) Z.Zt. nur Wassergütedaten
- ad bb) Variabel
- ad cc) Variabel
- ad dd) Großbritannien
- ad ee) Punkt-, Liniendaten
- ad ff) Ja.

(22) STORET - Gewässergütedatenbank (USA)

Die STORET-Datenbank (STORE and RETrieval) dient vorwiegend zur Erfassung von Wassergütedaten von Oberflächengewässern (STORET User Handbook, o.J.). Bis 1976 waren ca. 200 000 Meßstellen aus allen Teilen der USA mit ca. 1800 verschiedenen Wassergüteparametern und ca. 40 Mio. Einzelbeobachtungen gespeichert. Hinzu kommt eine Datei mit Lagekoordinaten und sonstigen Angaben zu den Probenahmestellen. Die Daten entstammen Stichprobenmessungen oder Dauerregistrierungen. Meßstationen können durch Angabe der geographischen Koordinaten, der laufenden USA-internen Nummer, der Flusskilometer, der Einzugsgebietsordnungsnummer oder eines Suchrahmens gefunden werden und die zugehörigen Daten mit einfacher statistischer Auswertung auf Drucker, Magnetplatte oder Magnetband ausgegeben werden. Die Verwendung eigener Auswertungsprogramme ist möglich.

Zusätzliche Dateien enthalten Informationen über Menge und Art kommunaler Abwasser, Kläranlagen einschließlich Angaben über staatliche Subventionierung sowie Daten über Zeit, Ort und Ursache von Fisch-

sterben. Wassermengendaten werden zur Berechnung der Schadstofffracht gespeichert. Genauere Angaben zur raumzeitlichen Auflösung der Daten finden sich nicht; sie ist unterschiedlich aufgrund der Vielzahl von Meßstellen in allen Teilen der USA. Ob Daten zur natüräumlichen Ausstattung der Meßstellenumgebung aufgenommen sind, geht aus dem Handbuch nicht hervor.

ad aa) Gewässergütedaten, Wassermengendaten
 ad bb) Variabel
 ad cc) Variabel
 ad dd) USA und grenznahes Ausland
 ad ee) Punktdaten (Meßstellen)
 ad ff) Ja.

(23) NAQUADAT - Gewässergütedatenbank (CDN)

Bei NAQUADAT (Computerized NAtional Water QUALITY DATA Bank) handelt es sich um das kanadische Gegenstück zu STORET in den USA. Eine Beschreibung des Systems geben DEMAYO & HUNT (1976). Vorrangig erfaßt NAQUADAT Gewässergütedaten von Oberflächen- und unterirdischen Gewässern, die aus Dauerbeobachtungen, Kurzzeitreihen oder Stichproben stammen können. Hinzu kommen Abflußmengendaten, um aus der Schadstoffkonzentration (ppm oder mg/l) die Schadstofffracht pro Zeiteinheit berechnen zu können. Die Daten stammen aus ganz Canada und beziehen sich auf Probenahmestellen bzw. Pegel, die nach einem festgelegten Schlüssel nummeriert sind. Daten können nach folgenden Kriterien abgerufen werden:

- Stationsnummer(n)
- Zeit bzw. Zeitperiode der Messung(en)
- Code-Nummer(n) der Variablen.

Neben den Daten werden einfache statistische Kennwerte ausgegeben. Ein weiterer Bestandteil von NAQUADAT sind der 'Dictionary File' und der 'Station File'. Ersterer enthält u.a. Rechenverfahren, Konvertierungsfaktoren, Umrechnungsformeln (z.B. von anglo-amerikanischen in metrische Einheiten) und Informationen zu chemischen Testverfahren. Der 'Station File' ordnet jeder Meßstelle eine eindeutige Stationsnummer zu; auf diese beziehen sich Lagekoordinaten, Lage im Fließgebiet, politisch-administrative Zuordnung und sonstige beschreibende Informationen.

ad aa) Abflußmengen und Gewässergüteparameter
 ad bb) Variabel
 ad cc) Variabel
 ad dd) Canada
 ad ee) Punktdaten (Meßstellen)
 ad ff) Ja.

(24) HYDABA - Hydrologische Datenbanken

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz beschäftigt sich seit 1973 mit dem Aufbau gewässerkundlicher Datenbanken (SCHUMACHER 1979). HYDABA I

(HYdrologische DAtenBAnk) dient zur Speicherung von Daten der Wassermengenwirtschaft und ist für sich allein funktionsfähig; HYDABA II erfaßt Gewässergütedaten und ist im Anwendungsfalle von HYDABA I abhängig. Eine Einbeziehung beider Dateien in UMPPLIS (Umweltplanungs- und Informationssystem des Umweltbundesamtes Berlin) ist geplant.

Die gespeicherten Daten stammen von Pegeln bzw. Meßstellen und beziehen sich somit auf bestimmte Einzugsgebiete oder Fließstrecken; eine Flächendeckung ist nicht vorgesehen. Außer Lageparametern der Meßstellen/Pegel sind nur zeitvariante Daten erfaßt. Die zeitliche Auflösung beginnt bei Tageswerten; nach oben hin sind der Aggregation keine Grenzen gesetzt. Die Modellierung hydrologischer Prozesse ist angesprochen; im zugehörigen Informations- und Dateiverwaltungssystem finden sich neben Routinen zur einfachen deskriptiv-statistischen Auswertung auch Programme zur Korrelations- und Regressionsrechnung für zwei Meßstellen. Die Datenausgabe erfolgt als Tabelle und in Form von Plotterkurven und Diagrammen.

- ad aa) Wasserstand, Abfluß, Wassergüteparameter
 ad bb) Variabel
 ad cc) Tages-, Monats-, Jahreswerte
 ad dd) BR Deutschland
 ad ee) Punktdaten (Pegel, Meßstellen)
 ad ff) Ja.

(25) DBW - Datenbank Wasserwirtschaft

Die Datenbank Wasserwirtschaft wurde vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft aufgebaut, ursprünglich mit der Vorstellung, die EDV bei der Erstellung des Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuches zu nutzen (JUCKEL 1980). Daher gingen zunächst nur Wassermengendaten (Wasserstände, Abflüsse) in die Datenbank ein. Auswertungsprogramme erzeugen Monats- und Jahreskennwerte. Die Einbeziehung von Daten der Gewässergütewirtschaft und der Wasserversorgung (Grundwasserdaten) ist vorgesehen. Die Datenausgabe erfolgt in Tabellenform. Ähnliche Datenbanksysteme finden sich bei anderen Landesämtern für Wasserwirtschaft. Einen detaillierten Überblick über diesbezügliche Aktivitäten gibt WEIDHAAS (1982).

- ad aa) Abfluß, Wasserstand
 ad bb) Variabel (Vgl. Dt. Gewässerkdl. Jahrbuch)
 ad cc) Tages-, Monats-, Jahreswerte
 ad dd) Bayern
 ad ee) Punktdaten (Pegel)
 ad ff) Ja.

(26) AWK - Abwasserkataster

Das Abwasserkataster basiert auf den hydrologischen Flächenverzeichnissen für die BR Deutschland und enthält u.a. Einzugsgebietsgrößen, Abflußdaten und Pegelkennziffern. Ein weiterer Teil des Katasters umfaßt Abwassereinleiter, eingeleitete Stoffe und die Zuordnung der Einleiter zu politisch-administrativen Einheiten. Die zugehörigen Auswertungs- und Überlagerungsprogramme ermöglichen die Abschätzung der Gewässerbelastung für politisch-administrative Regionen oder für die in den hydrologischen Flächenverzeichnissen definierten Fließgebiete. Kleinste hydrologische Einheit ist der kleinstmögliche Vorfluterabschnitt in den hydrologischen Flächenverzeichnissen, kleinste politisch-administrative Einheit die Gemeinde. Eine Aggregation nach oben ist bis hin zu Stromgebieten bzw. Bundesländern möglich.

Die Selbstreinigungskraft der Fließgewässer wird mit dem STREETER-PHELPS-Ansatz berücksichtigt, und das Abflußverhalten durch Fließgeschwindigkeiten und Abflußhauptwerte erfaßt. Durch Vorgabe unterschiedlicher Abwassermengen und Reinigungsgrade kann der Gütezustand der Fließgewässer bei unterschiedlichen Gebietsentwicklungen simuliert werden. Das Programmsystem wurde in einem Forschungsvorhaben entwickelt (GDNTHER et al. 1979); über Umfang und regionalen Bezug der bereits gespeicherten Daten liegen keine Angaben vor.

- ad aa) Abfluß, Gewässergüteparameter (u.a. BSB)
- ad bb) Fließbeinzugsgebiete, Gemeinden
- ad cc) Keine Angaben
- ad dd) BR Deutschland
- ad ee) Punktdaten (Pegel, Einleiter), Liniendaten (Fließstrecken), Flächendaten (Gemeinden, Fließgebiete)
- ad ff) Ja.

(27) IGS - Informationssystem (GUPTA & SOLOMON)

GUPTA & SOLOMON (1977, 1.) verstehen unter ihrem Informationssystem ein Programm paket, das aus einer geringen Anzahl von Basisdaten unter Berücksichtigung ihres räumlichen Verhaltens 'neue Informationen erzeugt'. Es handelt sich nicht um ein Informationssystem im üblichen Sinne, welches mit Hilfe eines Dateiverwaltungssystems den Benutzern die gewünschten Daten bereitstellt. Vielmehr werden Daten durch Umrechnung und Verknüpfung in neue Daten überführt, die einem Abfluß- und Sedimenttransportmodell als Eingangsdaten dienen. Die Berechnung erfolgt jeweils für Rasterflächen von 1 Quadratkilometer bei einer Gesamtgröße des Untersuchungsgebietes von ca. 1000 km².

Durch räumliche Interpolation werden aus pedologischen und geologischen Daten, Flächennutzung und Meereshöhe unter Berücksichtigung erprobter Zuordnungskriterien Daten zur Infiltration, Perkolation, Feldkapazität und Erosivität ermittelt. Niederschlag und Lufttemperatur können mit einem Interpolationsverfahren der gewichteten räumlichen Mittelbildung berechnet werden, und aus der (auf Rasterbasis vorliegenden) Meereshöhe lassen sich für jedes Quadrat die Hangneigung, Exposition und Reliefenergie gewinnen. Leider fehlt eine genaue Beschreibung der angewandten Algorithmen. Ziel dieses Informationssystems ist die Bereitstellung quantitativer Steuergrößen, um das Abflußgeschehen in einem Einzugsgebiet gut modellieren zu können. Dies geschieht durch Erstellung einer Wasserbilanz für jede Rasterfläche mit anschließender Aggregation für das Gesamteinzugsgebiet. Die Eichung des Modells erfolgt mit Tageswerten der genannten hydrometeorologischen Variablen.

- ad aa) Es werden alle unter 2.2. genannten Variablen mit Ausnahme der Gewässergüteparameter und der politisch-administrativen Grenzen benutzt
- ad bb) Quadratkilometerraster
- ad cc) Tageswerte
- ad dd) Fließgebiete (ca. 1000 km², Süd-Ontario/Can.)
- ad ee) Polygon-, Rastererfassung; Rasterspeicherung
- ad ff) Ja.

3.3. Vergleich der vorgestellten Informationssysteme

3.3.1. Ausbaustand

Bei den meisten Informationssystemen wird nicht angegeben, bis zu welchem Grade das System ausgebaut und/oder die Daten erfaßt sind; oft handelt es sich nur um Konzepte und Vorstellungen, was das System alles leisten soll und welche Daten für wichtig erachtet werden (z.B. UEG, TKRP). Lediglich bei den Systemen 1-5, 9, 13, 14, 17, 21-23, 27 (CGIS, LUNR, MLMIS, ORRMIS, PIOS, LDBFNL, HAMREGIS, ORL, DASP, WA, STORET, NAQUADAT, IGS) finden sich Hinweise auf tatsächlich erfolgte Anwendungen, Ausbaustand oder Testläufe.

3.3.2. Datenauswahl

In erster Linie richtet sich die Variablenauswahl nach der Art des Informationssystems: Hydrologische Systeme erfassen vorrangig wasserwirtschaftliche, geowissenschaftliche Systeme vorrangig pedologisch-geologische Daten, und Regional- bzw. Landesinformationssysteme sind auf sozioökonomische und politisch-

Tab. 4: Informationssysteme und ihre Daten (vgl. Tab. 1-3):

		1 Hölle	2 Exposition	3 Hangneigung	4 Topographie allg.
5 Wald		x x x x x	x x x x x	x x x x x	
6 Grünland		x x x x x	x x x x x	x x x x x	
7 Ackerland		x x x x x	x x x x x	x x x x x	
8 Wasserfläche		x x x x x	x x x x x	x x x x x	
9 Versteigte Fl.		x x x x x	x x x x x	x x x x x	
10 Ohne Vegetation		x x x x x	x x x x x	x x x x x	
11 Sonstige Nutzung		x x x x x	x x x x x	x x x x x	
12 Nutzung allg.		x x x x x	x x x x x	x x x x x	
13 Feldkapazität		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
14 Nutzbare Feldkap.		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
15 Porenvolumen		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
16 Tiefe Lockersch.		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
17 Wurzelraumtiefe		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
18 Sonstige Boden		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
19 Boden allg.		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
20 Niederschlag		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
21 por. Verdunstung		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
22 Akt. Verdunstung		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
23 Abfluß		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
24 Lufttemperatur		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
25 Gewässergröße		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
26 Grundwasserstand		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
27 Grundwasserbildung		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
28 Sonstige/allg.		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
29 Kreisgrenzen		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
30 Gemeindegrenzen		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
31 Wasserscheiden		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
32 Gewässernetz		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
33 Sonst.Liniedaten		x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x x
Datenspeicherung	P R R R P P B B R R K B R R P K M M K K M M M M R I				

Datenspeicherung: P = Polygon, R = Raster, B = Beides; M = für Meßstationen, K = Keine Angaben.
In dieser Übersicht wird nicht unterschieden, ob die Datenerhebung erst geplant oder bereits vollzogen ist.

administrative Daten ausgerichtet. Je nach Ausbau-stand wird eine mehr oder weniger ausführliche Variablenliste vorgestellt. Bei Landschaftsinformationssystemen, die den Bereichen Landschaftsplanung, Naturschutz, Ökologie, Umweltschutz etc. dienen sollen, findet sich eine derartige Liste jedoch selten. Ausnahmen bilden hier die nordamerikanischen Systeme, die allerdings schon länger existieren und sich fast nur mit Landnutzungsdaten befassen, meist in kleineren Maßstäben. Auch die Datenbank LDBFN besitzt eine Variablenliste, die neben Flächennutzungsdaten auch Topographie, Pedologie, Geologie, Klima, Hydrologie und politisch-administrative Zugehörigkeit umfaßt. Die restlichen Landschaftsinformationssysteme befinden sich noch im Planungszustand; in der Literatur werden nur allgemeine Angaben zu den zu erhebenden Daten gemacht, wie z.B. 'Fachdaten Boden/Wasser/Luft' (LDBBAY: WEIHS 1978, S.147) oder 'Merkmale mit ökologischer und planerischer Relevanz' (LOBBW: MÖLLER & EHMKE 1978, S.150). Eine Übersicht über die Informationssysteme und ihre Variablenauswahl gibt Tabelle 4 auf dieser Seite.

Das Problem der Variablenauswahl wird von BTERHALS (1978, S.34) erkannt; er fordert die flächendeckende Erfassung von Naturraumpotentialen, wie sie von NEEF (1966), HAASE (1978) oder JÄGER & HRABOWSKI (1976) definiert werden:

- Naturschutspotential/Biotisches Regulationspot.
 - Klimatisches Regenerationspotential
 - Biotisches Ertragspotential
 - Wasserdargebotspotential
 - Rohstoffpotential
 - Erholungspotential
 - Entsorgungspotential
 - Bebauungspotential

Es ist fraglich, ob die von BIERMALS (1978, S.34) vorgeschlagene Kartierung von Naturraumpotentialen möglich und sinnvoll ist. Zwar existieren für das Wasserdargebotspotential Karten der Grundwasserhöf-figkeit oder der Gewässergüte; zur Erfassung des Wasserdargebotspotentials gehört jedoch mehr. Eine Vielzahl von Variablenkomplexen ist zu beachten: Niederschlag, Abfluß, Verdunstung, Wasserbewegung im Boden, der Einfluß nichtvariabler Gebietsparame-ter auf diese Größen, sowie die jahreszeitliche Va-riation und das langjährige Verhalten dieser hydro-

meteorologischen Variablen. Ob derart vielschichtige Vorgänge durch eine Karte abgebildet werden können, darf bezweifelt werden. Das Problem der (richtigen) Variablenauswahl bleibt also bestehen. Eine quantitative Erfassung des Wasserdargebotspotentials durch möglichst wenige Variable und mit Hilfe einfacher strukturierter Verfahren wird in dieser Arbeit in Kap. 5. ff demonstriert.

Der saisonalen Variabilität naturräumlicher Größen wird nur bei den hydrologischen Informationssystemen Rechnung getragen. Gerade bei Landschaftsinformationssystemen wäre es wichtig, einen 'mittleren Jahresverlauf' beschreiben zu können. So sagen z.B. Jahreswerte von Niederschlag, Verdunstung und Abfluss nichts aus über mögliche Engpässe in der Wasserversorgung.

3.3.3. Datenerfassung

Die Unterschiede zwischen Raster- und Polygonerfassung und zwischen qualitativen und quantitativen Daten wurden bereits in Kap. 2.3. dargestellt. In der Literatur wird hier nicht immer getrennt. MÜLLER & EHMKE (1978, S.152) digitalisieren Höhenlinien, um anschließend per Programm Höhenwerte für jede Rasterfläche zu berechnen. Sie sehen in diesem Vorgehen einen Zeitvorteil gegenüber der rasterweisen Erfassung. Konsequenter wäre es, von wenigen Stützstellen mit bekannten Höhen (Höhenknoten) der Geodäsie auszugehen und durch Interpolationsprogramme die Höhen für alle Rasterflächen bzw. Schnittpunkte des Gitternetzes zu berechnen; ähnlich arbeitet das 'Topographische Aufnahme- und Auswertesystem der Univ. Hannover' TASH (HEINEKE 1982, mdI.Mitt.). Auch die Erzeugung von Isohypsen und deren Ausgabe auf dem Plotter wird möglich. Ein derartiges Vorgehen würde weitaus zeitsparender sein.

Auch KOEPPEL & ARNOLD (LDBFNL: 1980, S.133 f) und WEIHS (LDBBAY: S.148) trennen nicht genau Raster- und Polygonverfahren bzw. quantitative und qualitative Daten. WEIHS (UEG: 1981, S.19) unterscheidet quantitative und qualitative Daten wie folgt:

Quantitative Daten:

- Mittlere Windgeschwindigkeit (m/s), oder
- Schwefeldioxidemission (t/km²);

Qualitative Daten:

- Gewässergüte (in Güteklassen), oder
- Bodengüte (als Ertragsmeßzahl).

Letztere sind zwar qualitätsbeschreibende Variable, aber dennoch keine qualitativen Variable. Eine Einteilung in Güteklassen folgt einem oder mehreren

Kriterien. Im Hydrologischen Atlas der BR Deutschland (1978, Kartenband S.52) werden 7 Gewässergüteklassen gebildet (unbelastet bis übermäßig verschmutzt); die Klassifizierung erfolgte vorwiegend aufgrund saprobiologischer Befunde. Eine ähnliche 'semiquantitative Rangskalierung' stellen die Bodenzahlen der Reichsbodenschätzung zur Beschreibung von Bodengüte und Ertrag dar.

Bei mehreren Informationssystemen werden die Daten bereits bei der Aufnahme klassifiziert oder bewertet. CGIS erfaßt z.B. die Landeignung für verschiedene Nutzungen, und LDBFNL klassifiziert z.B. Niederschlagshöhen bei der Erfassung. Ähnlich verfahren auch LDBBW und UEG. Ein derartiges Vorgehen ist nicht immer nachvollziehbar und schränkt den Anwendungsbereich der Daten ein. Nach MORMANN (1979, S. 261) sollte statt wenig systematischer progressiver Klasseneinteilung, wie KOEPPEL & ARNOLD (LDBFNL: 1980, S.46) sie verwenden, eine logarithmische Progression der Klassengrenzen gewählt werden.

3.3.4. Datenspeicherung

Die unter 2.3.3. geforderte räumliche Blockung wird nur in DASP angesprochen, hier allerdings auf der Basis der Topographischen Karte 1:25 000. Auch bei den Systemen HYDABA, DBW und AWK liegt eine gewisse räumliche Blockung vor, wobei hier Fließgebiete bzw. hydrologische Flächenverzeichnisse benutzt werden.

3.3.5. Datenausgabe

Die Datenausgabe als Tabelle mit einfacher statistischer Auswertung ist die Regel. In vielen Fällen werden Schnelldruckerkarten erzeugt. Diese sind zwar besonders bei Rasterdaten - einfach und schnell zu erstellen, aber ungenau, maßstabsverzerrt und für einen ungeübten Betrachter schwer lesbar. Auch dem häufigen Anwender fällt die Orientierung nicht immer leicht. Der Einsatz eines Plotters wird seltener erwähnt. Falls vorhanden, dient er vorwiegend zum Zeichnen von Diagrammen und Trendkurven; zur Kartenherstellung wird er nur von ORRMIS, PIOS, FRUN und DASP benutzt. Da die Daten anderen Benutzern - auch in anderen Orten - bereitgestellt werden sollen, sind Ausgabeschnittstellen zu definieren; möglich ist die Datenausgabe auf Liste (Papier), Diskette, Magnetband oder Lochkarte. Hinweise dazu finden sich bei keinem System; auch über den internen Dateiaufbau fehlen Informationen.

3.3.6. Auswertungs- und Simulationsverfahren

Einfache, statistisch-deskriptive Auswertung ist fast überall vorgesehen; Verfahren der multivariaten Statistik wie Faktoren- und Clusteranalyse werden jedoch nur selten angesprochen (u.a. bei HAMREGIS, ORRMIS). Im Zusammenhang mit der Variablen 'Meereshöhe' fällt mehrfach das Stichwort: Digitales Geländemodell. Darunter wird meist ein dreidimensional-plottergezeichnetes Blockbild der auf einem Gitternetz vorliegenden Höhenwerte verstanden (u.a. FRUN, LDBBW, LDBFNL). Ein digitales Geländemodell sollte jedoch mehr leisten, nämlich die Bereitstellung bzw. Berechnung einer Vielzahl morphometrischer Variabler wie Hangneigung, Exposition, Reliefenergie, Luv/Le-Lage, Dränrichtung etc. (vgl. HORMANN 1969). Derartige Größen können als Steuervariable in mathematisch-statistische Modelle zur Abflußberechnung einge- gehen (vgl. IGS: GUPTA & SOLOMON 1977; PENTLAND & CUTHBERT 1971).

Solange Flächennutzungsdaten aus topographischen Karten erhoben werden, sind diese Daten flächendeckend, denn topographische Karten weisen gemeinhin keine 'weißen Flecken' aus. Anders verhält es sich bei der Extrapolation von Punktdaten auf eine - noch zu definierende - zugehörige Fläche, z.B. von Niederschlagswerten oder Bodenhorizonttiefen auf ein umgebendes Areal. Zum Schließen dieser 'räumlichen Datenlücken' werden 'räumliche Prognoseverfahren' benötigt. Dieser Aspekt wird nur selten angesprochen. Das DASP-System ermöglicht das Berechnen und Zeichnen beliebiger Längsprofile durch Interpolation zwischen vorgegebenen Bohrpunkten (BARCKHAUSEN 1973, S.27); auch Flächendarstellungen sind geplant (KUEHNE 1981, S.13). Das Transmissivitätskataster Rheinland-Pfalz (TKRP) soll flächendeckend erstellt werden, d.h., man wird geeignete räumliche Prognoseverfahren zur Verarbeitung der pedologisch-geologischen Punktinformationen anwenden müssen. Das Problem der räumlichen Extrapolation wird in dieser Arbeit in den Kap. 5. ff wieder aufgegriffen; einen Überblick über mögliche Verfahren gibt STREIT (1981a).

HYDABA I sieht die Möglichkeit vor, von einem Pegel A per Regression den Abfluß für einen flußabwärts gelegenen Pegel B zu schätzen. Dies ist ein erster Schritt, um mit mathematisch-statistischen Verfahren für beliebige Punkte eines Flusses ohne Meßstellen die gewünschten Wassermengendaten zu berechnen. Die Extrapolation hydrometeorologischer Informationen von Einzugsgebieten auf Teileinzugsgebiete oder auf benachbarte Räume andersartiger Abgrenzung wird nicht angesprochen, wäre jedoch wichtig zur Ermitt-

lung des Wasserdargebotes beliebig abzugrenzender Planungsregionen. Ein zweiter, darauf aufbauender Schritt ist die Simulation anthropogener Eingriffe in den Naturhaushalt, um unterschiedliche Planungsvarianten durchspielen und kritische Situationen vorab erkennen zu können. Lediglich das AWK (GON- THER et al. 1979) und WA (RODDA et al. 1978) versuchen, hydrologische (= einzugsgebietsbezogene) und sozioökonomische Informationen (= auf der Basis politisch-administrativer Regionen) miteinander zu verknüpfen. Simulationsmodelle werden zwar angesprochen und für wünschenswert erachtet, jedoch finden sich (mit Ausnahme der LDBFNL) kaum konkrete Beispiele und Verfahrenshinweise.

Für die Verknüpfung hydrologischer und sozioökonomischer Informationen ist es unerlässlich, die Daten möglichst 'wertfrei' zu erheben, z.B. Niederschlag in Millimeter statt Angabe einer Klasse oder eines Ranges. Die Datenspeicherung und -bereitstellung muß nach einem einheitlichen System erfolgen, damit z.B. hydrologische Zeitreihen einem Landschaftsinformationssystem oder landschaftsökologische Daten einem Regionalinformationssystem bei Bedarf zur Weiterverarbeitung bereitgestellt werden können. Ein Beispiel für eine mögliche Dateistruktur, wie sie in ähnlicher Form auch bei DASP verwandt wird, geben HEINEKE & PETZOLD (1982). Ein solches Vorgehen würde die Informationen auch anderen Benutzern erschließen, die Nachvollziehbarkeit der Datenerhebung erleichtern und schließlich auch eine Quantifizierung der o.g. Naturraumpotentiale in ihrer raumzeitlichen Beschaffenheit ermöglichen.

4. Konsequenzen für die Entwicklung eines verbesserten raumbezogenen Informationssystems

Von diesen Kritikpunkten und Oberlegungen ausgehend lassen sich Kriterien für ein verbessertes EDV-gestütztes räumliches Informationssystem aufstellen. Es soll der Landschaftsplanung im weitesten Sinne dienen, wobei die Daten auch Nachbardisziplinen wie der Wasserwirtschaft, Luftreinhaltung oder Regionalplanung zur Verfügung stehen. Als erster Anhaltspunkt kann der Landschaftsdatenkatalog von KOEPEL & ARNOLD (1980, S.41) herangezogen werden; eine Überarbeitung ist jedoch erforderlich. Die Daten sollen Aspekte des Umwelt- und Naturschutzes berücksichtigen und dazu beitragen, Belastung und Belastbarkeit des Naturhaushaltes zu erkennen. Nachfolgend werden die Anforderungen an die – vorwiegend aus dem physisch-geographischen Bereich stammenden – Daten und an das Informationssystem zusammengestellt.

4.1. Anforderungen an die Daten

- (1) Die Daten müssen flächendeckend vorliegen; sie beschreiben die natürliche und anthropogene Ausstattung eines Gebietes.
- (2) Zeitvariable Daten werden als langjährige Monatsmittelwerte erfaßt. Das ermöglicht einerseits die Darstellung der saisonalen Variabilität, zum anderen läßt sich der Speicherplatz in Grenzen halten.
- (3) Zeitreihen werden wegen des hohen Speicherplatzbedarfs nicht gespeichert, sondern bei Bedarf von einem Fachinformationssystem (Hydrologie, Meteorologie) bereitgestellt.
- (4) Bohrlochbezogene pedologisch-geologische Detailinformation (z.B. Bodenhorizonte) wird ebenfalls bei Bedarf von einem Fachinformationssystem bereitgestellt, ebenso sozioökonomische und demographische Daten.
- (5) Die Datenspeicherung erfolgt räumlich geblockt auf Basis der Deutschen Grundkarte (1:5000, 2x2 km); sie eignet sich wegen des quadratischen Blattschnittes besser zur Einpassung eines Quadratgitternetzes als die trapezförmigen Meßtischblätter. Der Maßstab 1:5000 ermöglicht eine hohe Auflösung (vgl. 2.3.3.).
- (6) Die x/y-Koordinaten von Punkt- und Liniendaten (z.B. politisch-administrativen Grenzen) werden als Gauß-Krüger – Rechts- und Hochwerte gespeichert.
- (7) Qualitative Daten (vgl. Kap. 2.3.) werden als Polygonzug (in Gauß-Krüger-Koordinaten) gespeichert. Dies ermöglicht eine flächenscharfe Wie-

dergabe auf dem Plotter; die Konvertierung von Polygonen in Rasterzellen ist bei entsprechendem Genauigkeitsverlust möglich.

- (8) Quantitative Daten werden auf Rasterbasis gespeichert; sie lassen sich für beliebige Zwischenpunkte interpolieren. Mögliche Gittermaßen (z.B. bei LÜKIS) z.Zt. 100, 500, 1000 oder 2000 Meter; die Definition kleinerer Raster (10 oder 20 m) ist möglich. Eine Rasterzelle von 2000 m Seitenlänge entspricht genau einer Deutschen Grundkarte.
- (9) Die Speicherung von Rasterdaten und Polygonzügen bedingt das Anlegen zweier Dateien, da bei Rasterdaten die Datenmenge im voraus bekannt ist, bei Polygondaten jedoch nicht (vgl. 2.3.1.).

4.2. Anforderungen an das Informationssystem

- (1) Die Datenbereitstellung erfolgt je nach Datenart auf Rasterbasis oder auf Polygonbasis.
- (2) Ein Konvertierungsprogramm ermittelt die Zugehörigkeit einer Rasterzelle zu einem Polygon und ordnet den Zellen das entsprechende Polygonmerkmal zu. Ein zweites Programm ermittelt für ein vorgegebenes Polygon alle zugehörigen Rasterflächen. Zugehörigkeitskriterium kann die Lage der Zellenmitte oder der Flächenanteil der Rasterzelle im Polygon sein. Mit Hilfe geeigneter räumlicher Prognoseverfahren – im einfachsten Falle Mittelwert- oder Summenbildung – läßt sich für das Polygon ein repräsentativer Gebietswert aggregieren. Diese Programme werden nicht aktiviert, wenn nur mit Raster- oder nur mit Polygondaten gearbeitet wird.
- (3) Die Überlagerung zweier quantitativer Variablen erfolgt rasterweise durch einfache Abfrage; die Überlagerung zweier qualitativer Variablen durch Bildung der Schnittmenge ihrer Polygone (= eine zwei Polygone gemeinsame Fläche). Bei Mischdaten (Raster und Polygon) wird zunächst nach (2) verfahren.
- (4) Die Bereitstellung der Daten erfolgt nach Wunsch:
 - a) grundkartenweise, oder
 - b) für alle vorzugebenden Rasterflächen, oder
 - c) für alle vorzugebenden Polygone, oder
 - d) äquidistant für ein beliebig zu legendes Horizontalprofil (unter Verwendung räumlicher Prognoseverfahren), oder
 - e) nach Variablen oder Variablenkombinationen. Mischformen dieser Kriterien sind möglich.
- (5) Die Weitergabe der Daten erfolgt auf Liste, Lochkarte, Diskette, Magnetband, ggf. Lochstreifen, wobei die genaue Formatierung noch zu klären ist.

- (6) Um mathematisch-statistische Auswertungsverfahren und Simulationsmodelle einsetzen zu können, müssen die Daten in Matrixform bereitgestellt werden; hierzu sind Daten auf Polygonbasis weniger geeignet, da sie zunächst einer entsprechenden Aufbereitung bedürfen. Die Matrix enthält spaltenweise die Variablen, zeilenweise die 8-Beobachtungen (= Raster). Auch das IMGRID-Programm (KOEPPEL 1978) erwartet Rasterdaten in ähnlicher Aufbereitung.
- (7) Ein 'Digitales Geländemodell' berechnet aus der Variablen 'Meereshöhe' verschiedene Formparameter als Eingangsdaten für Simulationsmodelle.
- (8) Da die aufzunehmenden Daten flächendeckend vorliegen sollen (vgl. 4.1., (1)), sind eventuelle räumliche Datenlücken durch den Einsatz (einfach strukturierter) räumlicher Prognoseverfahren zu schließen.
- (9) Das Informationssystem stellt nur die Daten in der gewünschten Form und Auswahl bereit; außerdem werden statistisch-deskriptive Kennwerte ausgegeben (Mittelwert, Varianz, Spannbreite etc.). Weitergehende Auswertungen und Bewertungen sind je nach Problem und Benutzer unterschiedlich; entsprechende Programme stehen in der Regel am jeweiligen Rechenzentrum zur Verfügung, z.B. SPSS, NAG, IMGRID. Auch Programme zur (karto-)graphischen Darstellung werden bereitgestellt; am Rechenzentrum der Universität Münster z.B. GEOMAP, CHOROPLOT, BLOCKPLOT, PLOT3D. Die Erzeugung von Plotterkarten als Deckfolie für topographische oder Grundkarten sollte im Gegensatz zu den schwer lesbaren Schnelldruckerkarten favorisiert werden.
- (10) EDV-gestützte Literaturdokumentation und Sachinformation als Bestandteil eines raumbezogenen Informationssystems sind zwar wünschenswert, aber auch aufwendig und daher nachrangig zu implementieren. Außerdem steht ähnliches am Umweltbundesamt in Berlin als UMPLIS oder auch als Literaturinformationssystem bei anderen Institutionen zur Verfügung.

Ein Teil der Anforderungen wurde bereits im 'Landschaftsökologischen Informationssystem LÜKIS' berücksichtigt, welches unter Mitarbeit des Verfassers am Lehrstuhl Landschaftsökologie in Münster aufgebaut wurde; eine Beschreibung geben DURWEN & GENKINGER (1979). Im Folgenden werden knapp die Grundvorstellungen wiedergegeben:

Die Datenspeicherung erfolgt räumlich geblockt auf der Basis der Deutschen Grundkarte (1:5000). Mögliche Seitenlängen der quadratischen Rasterzellen sind z.Zt. 2000 m (= eine Grundkarte), 1000, 500

und 100 m; kleinere Zellen sind möglich. Eine Speicherung von Polygonzügen ist derzeit nicht vorgesehen, jedoch können die Flächengrenzen qualitativer Daten digitalisiert und per Programm den Rasterzellen zugeordnet werden. Die Überlagerung von Rasterflächen ist möglich; es lassen sich z.B. alle Rasterzellen ausgeben, die eine Höhe zwischen 50 und 100 m haben und von Wald bedeckt sind (Programm IMGRID). Zur Überlagerung von Polygonen steht das Programm ARIADNE bereit. Es ermittelt die zwei oder mehr Polygonen gemeinsame Fläche. Darüber hinaus lassen sich diese Flächen hinsichtlich ihrer Eignung bewerten, worauf in dieser Arbeit aber nicht eingegangen werden soll. Die Bereitstellung und Ausgabe der Daten wird nach den unter Punkt 4.2., (4), (5), (6) genannten Kriterien erfolgen. Zur Auswertung stehen die unter (9) genannten Programme zur Verfügung.

Neben der rasterbezogenen und polygonalen Datenspeicherung gibt es noch die Möglichkeit, punktbezogene Daten in beliebiger Reihenfolge unter Mitführung ihrer räumlichen Lagekoordinaten zu speichern. Dieses Konzept wird von DASP verfolgt und bietet durchaus Vorteile, solange für jeden räumlichen Block (Deutsche Grundkarte) viele Punkte (Meßstellen, Bohrlöcher) zur Verfügung stehen (z.B. ca. 230 Bohrpunkte auf einem Grundkartenblatt; vgl. HEINEKE & PETZOLD 1982). Geht es jedoch um die Speicherung von z.B. Niederschlagsdaten, die zunächst nur für wenige Stützpunkte/Meßstellen vorliegen, erscheint das DASP-Konzept als weniger geeignet, da häufig in einem räumlichen Block (Grundkarte) keine Stützpunkte vorliegen und die Interpolation dann unter gleichzeitiger Berücksichtigung einer - möglicherweise schwer handhabbaren - Vielzahl von Grundkartenblättern erfolgen muß. Eine weitere Diskussion dieses Problems soll hier jedoch nicht erfolgen, da noch zu wenig Vergleichserfahrungen vorliegen.

Zweiter Teil: Wasserdargebot

5. Einsatz EDV-gestützter räumlicher Informationssysteme zur Ausweisung von Naturraumpotentialen, insbesondere des Wasserdargebottspotentials

5.1. Wasserdargebottspotential

Unter Beachtung der Punkte (6) bis (8) in Kap. 4.2. wird versucht, mit den zur Verfügung stehenden Daten als Beispiel das unter 3.3.2. genannte Wasserdargebottspotential quantitativ zu erfassen. Im Anschluß daran sollen menschliche Eingriffe in den Naturhaushalt simuliert und sein Verhalten hinsichtlich des Wasserdargebotes prognostiziert werden, um Engpässe rechtzeitig zu erkennen und die Grenzen der Inanspruchnahme zu definieren. Unter menschlichen Eingriffen in den Naturhaushalt sind irreversible Veränderungen zu verstehen, also Entwaldung und/oder zunehmende Überbauung (zumindest kurz- bis mittelfristig irreversibel). Reversible Eingriffe wie eine kurzfristig überhöhte Grundwasserförderung oder die Umwidmung von Acker in Grünland sind hier nicht Gegenstand der Betrachtungen.

HAASE (1978, S.119) zählt zum Wasserpotential (= Wasserdargebottspotential) fließende und stehende, ober- und unterirdische nutzbare Wasserkörper. Er weist darauf hin, daß die Verfügbarkeit und Regenerierbarkeit aufgrund der hohen zeitlichen Variabilität im Gegensatz zu anderen Potentialen stark eingeschränkt ist (S.120). MANNSFELD (1978) versucht, für ein Testgebiet (Dresden-Nord, 300 km²) Ertrags-, Wasser-, Entsorgungs- und Bebauungspotential zu erfassen und verwendet dazu eine vierstufige Rangskala (S.20): Gut - mittel - mäßig - gering. In einem weiteren Schritt stellt er Potentialbeziehungen her (S.24), um Flächen abzugrenzen, auf denen Mehrfachnutzungen stattfinden bzw. stattfinden könnten. Die saisonale Komponente des Wasserpotentials wird von MANNSFELD nicht mit einbezogen, und quantitative Angaben zu den im Untersuchungsgebiet umgesetzten Wassermengen (Niederschlag - Abfluß - Verdunstung) fehlen. Um eine Quantifizierung des Wasserdargebottspotentials zu ermöglichen, sind daher hydrologisch relevante Daten in ihrer raumzeitlichen Variation in das Informationssystem aufzunehmen und durch geeignete Verfahren miteinander zu verknüpfen. Unter Wasserdargebot soll in den weiteren Ausführungen das Wassermengendargebot verstanden werden; Wassergüteaspekte können aufgrund der unsicheren Datenlage z.Zt. noch nicht betrachtet werden.

5.2. Ziele und Rahmenbedingungen

Bei der modellhaften quantitativen Abbildung des Wasserdargebottspotentials sind folgende Rahmenbedingungen zu beachten:

- a) Es ist das ober- und unterirdische Wassermengendargebot flächendeckend zu erfassen.
- b) Die saisonale Komponente wird durch langjährige Monatsmittelwerte beschrieben.
- c) Die Aussagen sollen für kleinere Räume (z.B. Planungsregionen bis ca. 500 km²) gelten, deren Grenzen nicht notwendigerweise mit denen von Fließgebieten übereinstimmen.
- d) Die zu verwendenden Daten müssen allgemein verfügbar sein (z.B. in Karten oder Jahrbüchern); besondere Meßreihen können nicht durchgeführt werden.
- e) Die Datenverwaltung und -bereitstellung erfolgt durch ein EDV-gestütztes räumliches Informationssystem unter Beachtung der im ersten Teil dieser Arbeit aufgestellten Kriterien.
- f) Zum Einsatz kommende Berechnungsverfahren sollen einfach strukturiert sein, um auch bei schlechter Datenbasis oder geringer EDV-Kapazität noch brauchbare Ergebnisse zu liefern.

Auf diesen Vorstellungen aufbauend ergibt sich folgendes Konzept zur quantitativen Erfassung des Wassermengendargebotes (Alle Variablenkürzel werden in dieser Arbeit in EDV-technisch günstiger Schreibweise - Großbuchstaben - dargestellt):

Die Grundlage bildet die Wasserhaushaltsgleichung für Fließgebiete in der allgemeinen Form:

$$N = A + V \pm SU \quad (1a)$$

mit: N = Gebietsniederschlag, A = Abfluß, V = Gebietsverdunstung, SU = Untergrundspeicherung.

Eine Erweiterung dieser Gleichung durch Zerlegung in Abflußkomponenten ergibt:

$$N = AO + AZ + AU + AGW - ZGW + V \pm SU \quad (1b)$$

$$\text{wobei gilt: } A = AO + AZ + AU \quad (1c)$$

mit:

AO = Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluß

AZ = Anteil des Interflow am Gesamtabfluß

AU = Grundwasserbürtiger Abflußanteil im Vorfluter

AGW = Grundwasserabstrom aus dem Einzugsgebiet

ZGW = Grundwasserzustrom in das Einzugsgebiet.

AGW wird in dieser Arbeit als vernachlässigbar klein angenommen; ohnehin ist seine Bestimmung sehr schwierig (vgl. DORBAUM & LILLICH 1969). Gleicher gilt für ZGW. Ein etwaiger oberflächiger Zu- bzw. Abstrom wird bei Einzugsgebieten in der Regel nicht angenommen.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der Direktabfluß AOB als Summe von Oberflächenabfluß AO und Interflow AZ benutzt. Mit obigen Gleichungen läßt sich für Flußeinzugsgebiete die Wasserhaushaltsbilanz auf der Basis langjähriger Monatsmittelwerte für einen Standardjahresgang erstellen. Ein Beispiel gibt HERRMANN (1977, S.105), wobei die aktuelle Verdunstung nach dem empirischen Schlüssel von FRIEDRICH (o.J.) auf die einzelnen Monate verteilt wird; vgl. auch Kap. 6.9. in dieser Arbeit. Da das Verfahren für Flußgebiete gedacht ist, kann es in dieser Form nicht auf politisch-administrative Planungsregionen angewandt werden, denn dafür liegen z.B. keine Abflußwerte vor; außerdem gelten Gl. (1a, 1b, 1c) nur für Flußgebiete.

Für anderweitig abzugrenzende Gebiete (\neq Flußgebiete), z.B. für die bereits mehrfach angesprochenen Quadratrasterflächen von 1 ha, müßte die Wasserbilanz wie folgt aufgestellt werden:

$$N + ZO + ZZ + ZU + AE = V + WD + WZ + WU \\ + AA \pm SU \quad (1d)$$

mit:

ZO = Oberflächiger Zustrom in die Fläche

ZZ = Oberflächennaher Zustrom in die Fläche/Interflow

ZU = Grundwasserzustrom in die Fläche

AE = Zufluß im Vorfluter in die Fläche

WD = Oberflächiger Abstrom von der Fläche

WZ = Oberflächennaher Abstrom von der Fläche/Interf.

WU = Grundwasserabstrom von der Fläche

AA = Abfluß im Vorfluter.

Die quantitative Bestimmung einiger dieser Größen ist selbst bei hohem technischen und finanziellen Aufwand teilweise kaum möglich. Um trotzdem zumindest angenähere Aussagen über das verfügbare Wasserdargebot in Planungsregionen, die nicht mit Flußgebieten übereinstimmen, machen zu können, soll versucht werden, Wasserbilanzen unter Benutzung von Gl. (1b, 1c, 1d) für o.g. Rasterflächen aufzustellen. Hierzu müssen einige - vereinfachende - Randbedingungen gesetzt werden:

- Ein oberflächiger Zustrom in das Einzugsgebiet kann ebenso wie ein oberflächiger Abstrom aus dem Gebiet nahezu ausgeschlossen werden. Bei Rasterflächen (oder sonstigen Flächen) ist beides - besonders bei zunehmender Hangneigung - vorhanden. Im einfachsten - hier angenommenen Falle - sind beide Größen einander gleich und werden sich somit in Gl. (1d) gegenseitig aufheben (ZO/WD).
- Analoges soll für den unterirdischen Zu- und Abstrom (ZU/WU) und für den Interflow (ZZ/WZ) gelten.

Somit würde sich Gl. (1d) reduzieren auf:

$$N + AE = V + AA \pm SU \quad (1e)$$

Nimmt man ferner an - sofern ein Vorfluter in der betrachteten Fläche vorhanden ist -, daß der Zustrom im Vorfluter (AE) nicht größer als der Abstrom im Vorfluter (AA) ist:

$$AG = AA - AE \geq 0 \quad (1f)$$

so ergibt sich:

$$N = V + AG \pm SU \quad (1g)$$

AG ist der Zugewinn, der von der Fläche für den Abfluß im Vorfluter zur Verfügung steht. Dieser Zugewinn läßt sich nach (1c) wieder aufspalten in Oberflächen-, Zwischen- und grundwasserbürtigen Abflußanteil. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird - wie bereits gesagt - der Direktabfluß als Summe von Oberflächenabfluß und Interflow betrachtet:

$$AOB = AZ + AO \quad (1h)$$

Nach diesen - stark vereinfachenden - Annahmen konnte der Versuch gewagt werden, von Flußgebieten auf eine - bereits angesprochene - 'Einheitsfläche' von 1 ha zu schließen (vgl. Kap. 7.).

Natürlich kann die Wasserbewegung von einer Fläche zur nächsten nicht verfolgt werden, und durch die getroffenen Annahmen wird die Möglichkeit ausgeschlossen, daß in der ersten Rasterzelle dem Direktabfluß zugeschlagener Niederschlag nach Übertritt in das benachbarte Rasterquadrat wieder verdunstet oder in die Tiefenversickerung/Grundwasserneubildung geht. Aufgrund der benutzten Daten (langjährige Monatsmittelwerte) erscheint eine derartige Differenzierung ohnehin nicht angebracht, und die im Falle einer Differenzierung erforderliche Komplexität der Modelle würde der eingangs gestellten Forderung nach 'in der Planungspraxis handhabbaren Modellen' zuwiderlaufen. Für genauere Aussagen stehen bereits komplexere Modelle zur Verfügung (z.B. das USDAHL-Modell: PREUSS 1978a,b), die allerdings auf - nicht überall verfügbare - Eingangsdaten hohen Niveaus angewiesen sind und daher meist dort nicht angewandt werden können, wo z.B. von regionalplanerischer Seite Aussagen zum Wasserdargebot gewünscht sind.

Niederschlag, Abfluß und Verdunstung lassen sich in der Dimension: Liter/sec (l/s) auf Flußgebiete beziehen, aber auch auf eine Einheitsfläche; die Dimension lautet dann: l/s * m² oder auch: mm/s (gebräuchlichere Einheiten sind: l/s * km² oder mm/Monat). Günstig erscheint es, eine quadratische Einheitsfläche von 1 ha zu wählen, und als Dimension: mm/Monat. Alle hydrologischen Variablen werden in dieser Di-

mension benutzt und – beim Einsatz von Informationssystemen – auf diese Fläche bezogen gespeichert. Diese Hektarflächen bilden ein auf der Deutschen Grundkarte bzw. dem Gauß-Krüger-Netz basierendes Raster, wie es auch vom Landschaftsökologischen Informationssystem LÜKIS (DURWEN & GENKINGER 1979) benutzt wird. Ein Hektarraster erlaubt noch ohne großen Informationsverlust das Anpassen an einen Polygonzug, andererseits hält sich der Speicherplatzbedarf noch in Grenzen (für 100 km² werden 10 000 Rasterflächen bzw. Speicherplätze benötigt). Werden Aussagen zu Niederschlag oder Abfluß für eine beliebig abgegrenzte Planungsregion benötigt, ermittelt ein Programm (vgl. 8.4.) alle zu dieser Region gehörigen Rasterflächen. Zur Berechnung eines mittleren Gebietsniederschlags etwa werden die Werte aller Flächen entsprechend gemittelt. Zur Abschätzung der Grundwasserneubildung und des Bodenfeuchtevorrats können die in Kap. 7. beschriebenen Verfahren eingesetzt werden; auch hier werden die Berechnungen rasterflächenweise durchgeführt und zu Gebietswerten aggregiert.

Auch GUPTA & SOLOMON (1977) erstellen Wasserbilanzen für Rasterquadrate und aggregieren diese für Fließgebiete; sie arbeiten jedoch mit Tageswerten und nur wenigen größeren Einzugsgebieten von ca. 1000 km². SOLOMON et al. (1968) berechnen Jahresmittelwerte bzw. -summen für Lufttemperatur, potentielle Verdunstung, Niederschlag und Abfluß auf einem 10 x 10 km-Raster für Fließgebiete zwischen 80 und 9300 km² in Neufundland/Canada. PENTLAND & CUTHBERT (1971) arbeiten mit einem 10 x 10 km-Raster und Fließgebieten von 230 bis 38000 km² in Neu-Braunschweig/Canada, um Monatswerte von Niederschlag, Lufttemperatur, Verdunstung und Abfluß mit einem rechenaufwendigen iterativen Verfahren zu ermitteln. Diese kanadischen Arbeiten zur Ermittlung der Wasserressourcen auf Einzugsgebietsbasis arbeiten alle mit großen Rastern, großen Fließgebieten und für große Regionen. Eine Übertragbarkeit auf mitteleuropäische Verhältnisse scheint daher wegen des kleinen Maßstabs kaum möglich.

Die Abschätzung des Wassermengendargebotes soll daher in der vorliegenden Arbeit in wesentlich größerem Maßstab und auch für nicht einzugsgebietsbezogene Regionen erfolgen. Dazu ist zunächst die Aufbereitung der hydrometeorologischen Daten erforderlich. Die Erstellung und Eichung der dazu benutzten räumlichen Prognoseverfahren erfolgt auf der Basis von Fließgebieten bzw. Meßstationen.

Fast immer liegen hydrologische oder meteorologische Daten als punktuelle Information 'beliebig' im Raum verstreuter Meßstellen vor. Um diese Werte auf Flächen zu beziehen oder räumliche Datenlücken aufgrund fehlender Meßstellen zu schließen, bedarf es

räumlicher Prognoseverfahren, die es ermöglichen, für jede Rasterfläche einen repräsentativen Wert zu schätzen. Hierzu eignen sich regressionsanalytische Verfahren. Sie sind einfach strukturiert und erfüllen die immer wieder von Seiten der Planungspraxis vorgetragene Forderung nach einfachen, handhabbaren Verfahren; vgl. auch SFB 26 (1978, S.201), STREIT (1973, S.34), PETZOLD & STREIT (1980). Zu ihrer Anwendung reichen Kleincomputer oder auch Taschenrechner aus. Auch NEULAND (1975, S.47) weist in seiner Arbeit zur Vorhersage von Hangrutschungen auf diesen Punkt hin.

Die benutzten Daten wurden – soweit nötig – in einer ersten Analyse auf Normalverteilung geprüft und anschließend einer Hauptkomponentenanalyse zur Ermittlung interkorrelierter Variablen zugeführt.

5.3. Statistische Verfahren

Die benutzten statistischen Verfahren werden im folgenden kurz erläutert. Für eine detaillierte mathematische Beschreibung sei auf die einschlägigen Lehrbücher verwiesen.

5.3.1. Korrelation, Normalverteilung

Sowohl bei der Hauptkomponentenanalyse als auch bei der multiplen schrittweisen linearen Regression wird der Produktmoment-Korrelationskoeffizient nach PEARSON berechnet, um die Stärke des Zusammenhangs zweier Variablen darzustellen. Dies bedingt genaugenommen eine zweidimensional normalverteilte Grundgesamtheit beider Variablen. Ist dies der Fall, so besagt ein Korrelationskoeffizient von Null, daß weder ein linearer noch ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen beiden Variablen besteht. Der Nachweis der Binormalverteilung ist jedoch statistisch schwer möglich. Ist jede Variable für sich normalverteilt, so kann zwar eine Binormalverteilung nicht als völlig gesichert angenommen werden, sie ist jedoch möglich. Andererseits ist Binormalverteilung ausgeschlossen, wenn nur eine Variable nicht normalverteilt ist. In diesem Falle ist die Anwendung des Produktmoment-Korrelationskoeffizienten problematisch; vgl. hierzu BAHRENBERG/GIESE (1975, S.149 f.).

Der Test auf Normalverteilung wird für alle Variable mit dem Programm JGNVT (GOSSEFELDT, o.J.) durchgeführt; es benutzt den Kolmogorov-Smirnov-Test (SACHS 1974, S.256). Dieser Test ist verteilungsfrei und prüft, wie gut sich eine beobachtete einer theoretischen Verteilung anpaßt. Wird der kritische Wert

DELTASIG vom berechneten Prüfwert DELTAMAX unterschritten, so wird die Hypothese auf Normalverteilung (= Nullhypothese) beibehalten. Als Irrtumswahrscheinlichkeit wird $\alpha = 0,05$ gewählt. Das Programm prüft 13 mögliche Transformationen der Daten auf Normalverteilung.

5.3.2. Hauptkomponentenanalyse

Ziel der Hauptkomponentenanalyse ist es, Gruppen interkorrelierter (informationsähnlicher) Variablen zu finden. Hierzu werden neue, orthogonale Dimensionen, die Hauptkomponenten, gebildet. Deren Korrelationen mit den ursprünglichen Variablen sind die Hauptkomponentenladungen. Hohe Ladungen ($>/0,5/$) in derselben Hauptkomponente bedeuten eine hohe Korrelation zwischen diesen Variablen, was sich anhand der Korrelationsmatrix leicht prüfen lässt. Die erste Hauptkomponente erklärt den größten Teil der Varianz, die zweite den größten Teil der Restvarianz, u.s.w.. Die Gesamtvarianz wird durch die Gesamtheit der Hauptkomponenten erklärt; die Zahl der Hauptkomponenten entspricht der Zahl der Variablen. Im Verlauf der Arbeit zeigte sich, daß bei der gegebenen Datenbasis spätestens ab der 11. Hauptkomponente keine Ladungen $>/0,5/$ mehr auftraten.

Mit einer anschließenden Varimaxrotation wird versucht, die gefundenen orthogonalen Dimensionen so zu rotieren, daß die Korrelation zwischen ihnen und den Variablen maximal wird. Eine solche rotierte Ladungsmatrix ist wegen der besseren Zuordnung zwischen Hauptkomponenten und Variablen und den somit höheren Hauptkomponentenladungen meist besser zu interpretieren.

Nach ANDERSON (1958, S.273) ist Normalverteilung nicht unbedingt nötig, da in der Praxis auch bei nichtnormalverteilten Daten brauchbare Ergebnisse erzielt werden. Nach GIESE (1978) sind bei Nichtnormalverteilung verzerrte Faktorenwerte zu erwarten. Die im Rahmen der Hauptkomponentenanalyse durchgeführte Berechnung von Produktmoment-Korrelationskoeffizienten setzt strenggenommen Normalität voraus. Eine ausführliche Beschreibung der Hauptkomponenten- bzw. Faktorenanalyse geben OBERLA (1971) und BAHRENBERG/GIESE (1975, S.202 f). Das benutzte FORTRAN-Programm FAKTO ist VELDMANN (1967) entnommen.

5.3.3. Regression

Mit Hilfe regressionsanalytischer Verfahren läßt sich die Art des Zusammenhangs zwischen zwei oder mehr Variablen quantitativ darstellen, während die Stärke des Zusammenhangs durch den Korrelationskoeffizienten ausgedrückt wird. Im einfachsten Falle wird der Zusammenhang zwischen einer unabhängigen (= Steuer- oder Prädiktor-)Variablen X und einer abhängigen Variablen Y (= Zielgröße) durch eine lineare Einfachregression beschrieben:

$$Y = a + bX + e \quad (2)$$

a = Regressionskonstante, b = Regressionskoeffizient, e = Residuum.

Treten weitere Prädiktorvariable hinzu, wird aus dem zwei- ein mehrdimensionales Problem; es handelt sich dann um eine Mehrfach- oder multiple Regression.

Bei einer schrittweisen multiplen Regression werden alle vorhandenen Steuervariablen nicht gleichzeitig einbezogen. Vielmehr geht zunächst diejenige Variable ein, die den größten Teil der noch nicht erklärten Varianz beschreibt. Dieses schrittweise Vorgehen wird bis zur letzten Variablen wiederholt, falls nicht ein Stop-Kriterium vorgegeben wurde. Als Gütekriterium dient das erreichte multiple Bestimmtheitsmaß B bzw. dessen Zuwachs. Strebt dieser gegen Null, so trägt die jeweilige Variable nur mehr unwesentlich zur Varianzerklärung bei; hier wird sinnvollerweise das Verfahren abgebrochen. (Es gilt: Quadrat des multiplen Korrelationskoeffizienten = multiples Bestimmtheitsmaß = erklärte Varianz).

Eine nichtlineare Regression wird im Rahmen dieser Arbeit nicht in Betracht gezogen, da zum einen die Auswahl und Begründung einer bestimmten nichtlinearen Funktion bzw. Funktionsklasse problematisch ist (vgl. BAHRENBERG/GIESE 1975, S.169), zum anderen aber auch die Beziehungen zwischen den benutzten (physisch-geographischen) Variablen - auch aus Gründen der Handhabbarkeit der Modelle - weitgehend als Linear angenommen werden.

Strenghalten sollten die Prädiktorvariablen unkorreliert sein. Dies ist jedoch im Bereich der Physiogeographie und Hydrologie fast nicht erreichbar, da verständlicherweise Variable wie Niederschlag, Abfluß, Verdunstung, Temperatur und Relief miteinander in Wechselbeziehung stehen. Außerdem wird in allen Fällen eine schrittweise Regression benutzt, so daß der Zuwachs an erklärter Varianz bei Einbeziehen interkorrelierter Prädiktoren überwacht werden kann. BAHRENBERG/GIESE (1975) geben eine detaillierte Beschreibung der Verfahren. Alle Berechnungen wurden mit einem BMD-Programm durchgeführt.

5.4. Datenbasis

Zeitvariante Primärdaten stammen von Meßstationen, sind monatliche Mittelwerte auf der Basis langjähriger Meßreihen und finden sich in Veröffentlichungen bzw. Datensammlungen zuständiger Behörden. Zeitinvariante Primärdaten wurden aus amtlichen Kartenwerken kartiert (DGK, TK 25, TK 50, TK 50 OH). Ein Teil der in dieser Arbeit benutzten Daten ist einer Arbeit von STREIT (1979) entnommen. Räumliche Prognoseverfahren werden auf der Basis von Primärdaten gecichtet und danach zur Berechnung der Sekundärdaten auf Rasterbasis benutzt. Die Verfahren werden in Kap. 6. vorgestellt. Alle Daten stammen aus Nordrhein-Westfalen und ggf. angrenzenden Gebieten, da die Ergebnisse für diesen Raum, spez. für den Raum Mettmann, gelten sollen. Eine Übertragbarkeit auf andere Regionen soll nicht - z.B. durch Verwendung spezieller Daten - ausgeschlossen werden. Zeitvariante Daten werden auf der Basis des hydrologischen Jahres verarbeitet. Die Indizes ($i = 1, \dots, 12$ bzw. Nov., ..., Okt.) wurden in den Tabellen 6 und 7 fortgelassen. Weitere, im Verlauf der Arbeit benutzte und hier nicht aufgeführte, Variable werden bei Auftreten erklärt. In allen Fällen wird eine EDV-technisch günstige Schreibweise gewählt.

Tab. 5: Zeitinvariante Primärdaten für Meßpunkte/Flußgebiete bzw. Hektarrasterflächen:

a) Lageparameter:

Kurz Dim. Variable

H m Höhe über NN
 RW m Rechtswert (Gauß-Krüger-Koordinaten)
 HW m Hochwert (Gauß-Krüger-Koordinaten)
 RW, HW dienen zur Beschreibung von Faktoren wie Kontinentalität, Abstand zum Meer, großräumige Luv/Lee-Lage; außerdem Lageparameter für Trendflächenanalysen.

b) Flächennutzung, -ausstattung (toposkopische Var.):

Kurz Dim. Variable

RF15 % Flächenanteil mit Hangneigung $> 15^\circ$ (erhöhter Direktabfluß, verringerte Versickerung)
 WALD % Waldanteil (abflußdämpfende Wirkung)
 SIEG % Anteil versiegelter Flächen. Absolutwert:
 $ASIEG = 0,8 DB + 0,4 LB + 1,0 WEG (km^2)$
 LB = Lockerbebau; Ortsrandbereich
 DB = Dichtbebau; Ortskern
 WEG = Versiegelte Straßenfläche (bis IIa).
 Vgl. STREIT (1979, S.54); SCHLOSS (1977)
 SEEF % Anteil stehender Wasserflächen
 SUMP % Feuchtfächenanteil
 SUSE % SEEF + SUMP (erhöhte Verdunstung; Oberflächenspeicher)
 NFK mm nutzbare Feldkapazität; pflanzenverfügbarer Teil des im Wurzelraum gegen die Schwerkraft gespeicherten Wassers mit Bindungskräften von $pF 1,8$ bis $pF 4,2$ ($\log 10 \text{ cm WS}$); aus Bodenkarten 1:50 000 entnommen.

Tab. 6: Zeitvariante Primärdaten für Meßpunkte/Flußgebiete:

Kurz Dim. Variable

N mm Niederschlagshöhe (46 Stationen im Städtedreieck Köln - Duisburg - Hagen)
 T °C Lufttemperatur (90 Stationen in NRW)
 D mb Dampfdruck (Partialdruck; 40 Stat. in NRW)
 A mm Abflußhöhe (30 Flußgebiete in NRW)
 ANI mm Niedrigwasserabflußhöhe dieser Gebiete.

Tab. 7: Zeitvariante Sekundärdaten:

Kurz Dim. Variable

N mm Niederschlagshöhe
 T °C Lufttemperatur
 E mb Sättigungsdampfdruck
 D mb Partialdruck
 SO mb Sättigungsdefizit
 RF % Relative Luftfeuchte
 VP mm Potentielle Verdunstung
 VA mm Aktuelle Verdunstung
 VF mm Aktuelle Verdunstung (nach FRIEDERICH)
 A mm Abflußhöhe
 ANI mm Niedrigwasserabflußhöhe
 AOB mm Differenz: A - ANI: Oberflächen- und oberflächennaher Abfluß = Direktabfluß
 GW mm Grundwasserneubildung
 SP mm Bodenfeuchtegehalt im Wurzelraum (Füllungsgrad der NFK)
 QAN - Quotient: A/N
 QPN - Quotient: VP/N
 DNA mm Differenz: N - A
 DNP mm Differenz: N - VP

Tab. 8: Zeitinvariante Sekundärdaten:

Kurz Dim. Variable

EXP Grad Exposition (in Altgrad; N=0, E=90)
 HNG Grad Hangneigung (in Altgrad)
 NFK mm Nutzbare Feldkapazität
 FK mm Feldkapazität (NFK plus nicht pflanzenverfügbares Totwasser)
 PV Vol% Porenvolumen (zur kurzfristigen Aufnahme des der Schwerkraft und der Tiefenversickerung unterliegenden Wassers).

6. Aufbereitung der Daten

Im folgenden Abschnitt werden einfach strukturierte bzw. bereits erprobte Verfahren zum Schließen räumlicher Datenlücken und zur Umrechnung hydrometeorologischer Daten auf Rasterbasis vorgestellt. Ein Teil der Verfahren wurde bereits von PETZOLD & STREIT (1980) beschrieben, liegt aber jetzt in einer verbesserten Version vor. Die Signifikanz der Regressionskoeffizienten in den folgenden Tabellen wurde mit dem t-Test geprüft; die Kennzeichnung des Signifikanzniveaus geschieht in den Tabellen durch folgende Symbole:

α	Symbol
0,1%	implizit
1%	*
5%	+
10%	-
insignifikant bei	10%

6.1.1. Niederschlag: Regression

Die Niederschlagshöhe wird durch eine schrittweise multiple lineare Regression geschätzt. Prädiktorvariable sind Rechtswert, Hochwert und Meereshöhe der Station; man könnte hier auch von einer Trendflächenanalyse erster Ordnung mit vertikaler Komponente sprechen. Für jeden Monat werden monatsspezifische Regressionskoeffizienten und -konstanten ermittelt; die Prädiktorvariablen sind für alle Monate gleich:

$$N_j = b0_j + b1_j \cdot RW + b2_j \cdot HW + b3_j \cdot H \quad (3)$$

Tab. 9: Mittelwerte M , Standardabweichungen s des Niederschlags der Meßpunkte; Regressionskonstanten $b0$, -koeffizienten $b1, b2, b3$; multiple Bestimmtheitsmaß B für Gl. (3):

MONAT	M	s	b0	b1	b2	b3	B %
Nov	89,5	18,0	48,3	0,67	-0,30	0,10	78
Dez	89,2	21,4	40,6	0,87	-0,40	0,10	78
Jan	97,4	25,5	22,6	1,06	-0,30	0,13	79
Feb	82,6	20,9	38,6	0,81	-0,42	0,11	80
Mrz	59,9	13,2	21,6	0,63	-0,22	0,06	83
Apr	72,2	13,9	28,5	0,67	-0,20	0,06	86
Mai	71,0	7,9	46,2	0,28	-0,03	0,04	74
Jun	88,4	13,2	53,6	0,70	-0,30	0,04	80
Jul	96,9	13,8	51,5	0,60	-0,10	0,06	71
Aug	102,0	14,4	70,4	0,52	-0,24	0,08	75
Sep	80,5	12,5	45,1	0,47	-0,13	0,07	77
Dkt	82,8	18,6	31,1	0,77	-0,26	0,10	83

Das multiple Bestimmtheitsmaß B - d.h. erklärte Varianz - liegt im Jahresmittel bei 79 %. In zwei Drittel aller Monate wird die Meereshöhe als erster Prädiktor benutzt; sie erklärt im Mittel 70 % der Varianz. Der (in diesem Raum) mit der Höhe stark korrelierende Rechtswert ($r=0,787$) trägt im Durchschnitt weitere 7 % Varianzzuwachs bei. Dies bestätigt eine starke Höhenabhängigkeit der Niederschläge. Der Hochwert korreliert weder mit dem Rechts-

wert ($r=0,065$) noch mit der Höhe ($r=0,075$) und trägt in allen Monaten nur ca. 2 % zur Varianzklärung bei; sein Fortfall würde das Ergebnis nicht wesentlich verschlechtern. HÖRMANN (1977, S. 254) verwendet derartige h, b, l -Modelle (Höhe, geogr. Breite und Länge) zur Berechnung von Lufttemperatur und Niederschlagshöhe.

Da die monatsspezifische Regressionsrechnung relativ aufwendig ist - es müssen 12 Rechenläufe durchgeführt und 48 Koeffizienten bzw. Konstanten verwaltet werden - wurde versucht, des Jahresverlauf des Niederschlags mit nur einer Regressionsgleichung zu beschreiben, wobei zur Steuerung der saisonalen Komponente zwei auf einer Sinusfunktion basierende Variable erzeugt wurden: SJ mit Minimum im März und Maximum im September, und SH mit Minimum im Januar und Maximum im Juli (PETZOLD & STREIT 1980, S.21). Das multiple Bestimmtheitsmaß erreichte jedoch - u.a. wegen der wenig ausgeprägten saisonalen Variabilität des Niederschlags - nur 0,66. Das Verfahren scheidet daher aus.

6.1.2. Niederschlag: Quadrantenverfahren

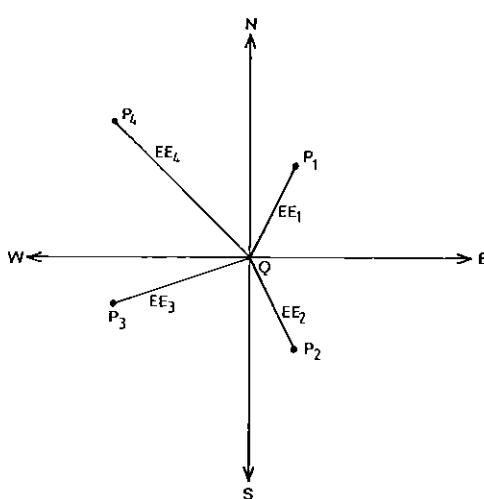
Es ist anzunehmen, daß sich die Niederschlagshöhe zwischen zwei Meßpunkten im Raum nicht sprunghaft, sondern stetig ändert. Demzufolge wird die Niederschlagshöhe NQ am Punkt Q (im Koordinatenursprung) der Niederschlagshöhe der Punkte P_1 bis P_4 mit abnehmender Entfernung EE ähnlich und umgekehrt (Abb. 9). Die jeweiligen Niederschlagshöhen an den Punkten P_j werden daher mit $1/EE_j$ gewichtet, aufsummiert und durch die Summe der Gewichte G dividiert, um die Niederschlagshöhe am Punkt Q zu ermitteln:

$$NQ = \frac{\sum_{j=1}^n G_j \cdot NP_j}{\sum_{j=1}^n G_j} \quad (4)$$

mit: $G_j = 1/EE_j$ und: $n = 4$

Theoretisch können bei der Berechnung des gewichteten räumlichen Mittels beliebig viele Niederschlagsstationen berücksichtigt werden; in der Praxis jedoch zeigte es sich, daß mit einer Station pro Quadrant sich gute Ergebnisse erzielen lassen. Mit vier Sektoren läßt sich dieses Verfahren leicht EDV-mäßig aufbereiten - auch für Kleinrechner: Das Programm definiert vier Suchsektoren durch Errichtung eines Koordinatenkreuzes aus Nord-Süd- und Osts-West-Achse. Da für Hektarrästerflächen auf DGK-

Abb. 9: Quadrantenverfahren:



Basis Niederschlagswerte berechnet werden, läuft der Punkt Q in 100-m-Schritten zeilenweise von oben nach unten. Q liegt in Rastermitte; der Niederschlagswert gilt als repräsentativ für das ganze Rasterquadrat. Als Koordinaten werden Rechts- und Hochwerte nach Gauß-Krüger benutzt.

Die Güte dieses Quadrantenverfahrens bzw. seiner Ergebnisse läßt sich nicht direkt bestimmen, wie etwa durch den Korrelationskoeffizienten bei einer Regressionsrechnung. Daher wurde zu Testzwecken für alle Punkte mit einer Niederschlagsstation unter Fortlassung derselben der Niederschlag berechnet und die berechneten mit den gemessenen Werten monatsweise korreliert. Die hohen Korrelationskoeffizienten (vgl. Tab. 10) lassen vermuten, daß das Verfahren geeignet ist. Hier muß berücksichtigt werden, daß für die randlichen Meßstellen nicht immer eine Station pro Quadrant zur Verfügung stand und somit die Berechnung nicht immer optimal war. Das Quadrantenverfahren hat den Vorteil, daß - im Gegensatz zur Regression in Kap. 6.1.1. - der Prädiktor 'Meereshöhe' nicht bestimmt werden muß.

Tab. 10: Korrelationskoeffizienten zwischen berechneten und gemessenen Niederschlagshöhen:

MONAT	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr
r	0,95	0,95	0,96	0,97	0,96	0,95
MONAT	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
r	0,87	0,92	0,88	0,93	0,94	0,96

Da die Niederschläge in starker Abhängigkeit zur Höhe Höhe stehen, wurde das Quadrantenverfahren durch Einbeziehung der Variablen 'Meereshöhe' zum dreidimensionalen Ansatz erweitert. Trotz unterschiedlicher Gewichtung der Vertikalkomponente konnte eine Verbesserung der Ergebnisse nicht erzielt werden.

Ein weiterer Versuch zur Verbesserung dieses Quadrantenverfahrens sah vor, die Residuen monatsspezifisch durch eine Regression aus der Meereshöhe zu schätzen. Dieser Hybridansatz konnte wegen der niedrigen Korrelationskoeffizienten nicht befriedigen; zwischen Höhe und den monatsspezifischen Residuen wurden nur Korrelationskoeffizienten zwischen -0,22 und -0,36 erreicht:

Tab. 11: Korrelationskoeffizienten zwischen Residuen der Monatsniederschläge und Meereshöhe:

MONAT	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr
r	-0,30	-0,24	-0,30	-0,36	-0,28	-0,33
Sig.	+	o	+	+	-	+
MONAT	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
r	-0,25	-0,23	-0,22	-0,26	-0,29	-0,34
Sig.	o	o	o	-	-	+

Eine für die Residuen des Jahres-, Sommer- und Winterniederschlags durchgeführte Trendflächenanalyse mit Vertikalkomponente (Prädiktoren: H, RW, HW, RW*HW, H*RW, H*HW, H*RW*HW) erreichte multiple Bestimmtheitsmaße von 0,16 / 0,14 / 0,14. Eine Verbesserung der Berechnungsgenauigkeit scheint somit kaum noch möglich. Schlußfolgerungen:

- Die (schlechte) Korrelation zwischen Residuen und Meereshöhe ist in den Wintermonaten höher als im Sommer (vgl. Tab. 11).
- Die Korrelation zwischen berechneten und gemessenen Niederschlagshöhen ist im Winter höher als in den Sommermonaten (vgl. Tab. 9, 1D).

Das bestätigt ohnehin Bekanntes: Die Niederschläge sind im Winter stärker höhenabhängig; das großräumige Niederschlagsrelief ist im Winter homogener bzw. ausgeglichener als im Sommer. Die Ursache liegt in der Niederschlagsgenese begründet: vorwiegend advektive Niederschläge im Winter, vorwiegend konvektive im Sommer.

Ob zur Niederschlagsberechnung das Quadrantenverfahren oder die Regression gewählt wird, ist von der Zielvorstellung des Anwenders abhängig: Das Quadrantenverfahren beruht ausschließlich auf dem raumvarianten Verhalten der Zielgröße selbst, während die Regression die Zielgröße aufgrund exogener Steuerungsmechanismen schätzt.

6.1.3. Niederschlag: Sonstige Verfahren

a) Isolinien

Für 2 x 2 km-Rasterflächen lassen sich die mittleren monatlichen Niederschlagshöhen näherungsweise aus Isohyetenkarten im Maßstab 1: 250 000 (SCHIRMER 1955) entnehmen. Dieses Verfahren ist jedoch arbeitsaufwendig, kaum EDV-mäßig aufzubereiten, für andere nicht immer nachvollziehbar, und scheidet somit aus.

b) Thiessen-Polygone:

Das Verfahren nach THIESSEN (1911) sieht die Konstruktion eines Polygonnetzes vor. Es entsteht aus den Mittelsenkrechten aller Verbindungslien zweier Meßstationen; ein Beispiel gibt HERRMANN (1977, S. 53). Das Polygonnetz ist flächendeckend und eindeutig. Jedem Polygon wird der Meßwert der innenliegenden Meßstation zugeordnet, da diese für jeden Punkt innerhalb des Polygons die nächstgelegene Station ist. Für ein über das Polygonnetz gelegtes Quadratrasternetz lassen sich die Werte durch Interpolation entnehmen. Nachteile des Polygonverfahrens sind:

- Zwischen zwei Niederschlagsstationen wird keine kontinuierliche Änderung der Niederschlagswerte angenommen. Vielmehr ergibt sich ein Sprung beim Übergang von Polygon zu Polygon.
- Eine EDV-technische Aufbereitung des Verfahrens ist aufwendig. Ein am Rechenzentrum der Universität Münster vorhandenes Programm (PUDLATZ 1980, S. 33-38) ist - auch bei benutzerseitiger Vorauswahl der Nachbarschaftskriterien - rechenzeit- und speicherplatzintensiv, somit nur auf Großrechnern einsetzbar, und wird daher hier nicht in Betracht gezogen.

c) Räumliche Autokorrelation bzw. -regression; Kriging:

Räumliche Autoregressivmodelle (NIPPER 1981), räumliche Autokorrelation (STREIT 1978) und Kriging (SCHWENTKER et al. 1981) werden zur Beschreibung räumlicher Prozesse eingesetzt. Die Verfahren nutzen die räumliche Erhaltensneigung z.B. hydrometeorologischer Phänomene zur räumlichen Prognose, wobei unterschiedliche Gewichtungen vergeben werden können. STREIT (1981b) benutzt das Kriging mit Erfolg zur Berechnung von Tagessummen des Niederschlags im Münsterland und von Grundwasserständen im Hessischen Ried. Für Vergleichszwecke wurden die mit dem Quadrantenverfahren (vgl. Kap. 6.1.2.) ermittelten Niederschlagswerte für einige Monate durch Kriging berechnet. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung (SCHWENTKER 1981, md1.Mitt.); die Versuche werden fortgesetzt. Da die drei genannten Verfahren - leider - noch keine weite Verbreitung gefunden haben, und sie außerdem höhere Anforderungen an die DV-Basis stellen, sollen sie hier zunächst ausgeklammert bleiben.

6.2. Lufttemperatur

Zur Berechnung monatlicher Mitteltemperaturen auf Rasterbasis eignet sich eine monatsspezifische Regression. Steuervariable ist die Meereshöhe; sie

allein erklärt im Jahresmittel bereits 82 % der Varianz:

$$T_i = b0_i + b1_i H \quad (5)$$

Tab. 12: Mittelwerte M , Standardabweichungen s der Temperatur der Meßpunkte; Regressionskonstanten $b0$, -koeffizienten $b1$, Bestimmtheitsmaße B (%) für Gl.(5):

MONAT	M	s	b0	b1	B
Nov	5,3	0,99	6,3	-0,0057	86
Dez	2,2	1,03	3,1	-0,0058	83
Jan	0,9	1,06	1,8	-0,0059	80
Feb	1,3	1,08	2,3	-0,0060	79
Mrz	4,6	1,09	5,6	-0,0059	76
Apr	8,4	1,09	9,4	-0,0063	84
Mai	12,6	1,04	13,6	-0,0059	84
Jun	15,7	1,04	16,7	-0,0060	85
Jul	17,3	1,02	18,2	-0,0058	85
Aug	16,8	1,00	17,8	-0,0057	84
Sep	14,0	0,96	14,8	-0,0054	80
Okt	9,4	0,96	10,3	-0,0054	83

Die Erfassung des Jahresgangs der Lufttemperatur mit nur einer Regressionsgleichung unter Zuhilfenahme einer Sinusfunktion erreicht zwar 92 % erklärte Varianz, die jedoch auf die große Stichprobe (12x90 = 1080) zurückzuführen ist. Das Anwachsen des Korrelationskoeffizienten bei zunehmendem Stichprobenumfang beruht auf einer zunehmenden Unterrepräsentation extremer Werte bei Vergrößerung der Stichprobe (vgl. auch 8AHRENBERG/GIESE 1975, S.198).

6.3. Sättigungsdampfdruck

Der Sättigungsdampfdruck E (oder auch maximaler Dampfdruck) ist eine Funktion der Lufttemperatur und läßt sich mit genügender Genauigkeit nach der empirischen Formel von MAGNUS (MÜLLER 1973, f, S. 129) berechnen:

$$E_i = 6,107 * 10^{7,5 T_i / (238 + T_i)} \quad (6)$$

Bei vorgegebener Lufttemperatur T ergeben sich folgende Werte für E (in Bezug auf Wasser):

Tab. 13: Lufttemperatur T , Sättigungsdampfdruck E :

T (°C)	-10	-5	-2	0	2	5	10	15	20
E (mb)	2,9	4,2	5,3	6,1	7,1	8,7	12,2	17,0	23,3

Diese Variable soll u.a. zur Erfassung der Verdunstung dienen und wird zur Berechnung der relativen Feuchte RF und des Sättigungsdefizits SD gebraucht.

6.4. Partialdruck

Der Dampfdruck D (genauer: Partialdruck des Wasserdampfes) wurde von PETZOLD & STREIT (1980) durch eine Regression mit sinusoidaler Komponente in seinem Jahresverlauf geschätzt. Genau wie die Lufttem-

peratur zeigt der Partialdruck einen ausgeprägten Jahresgang, aber auch hier besteht wie bei der Temperatur das Problem der überhöhten Korrelationskoeffizienten aufgrund vergrößerten Stichprobenumfangs. Monatsspezifische Regressionen ergeben folgendes Bild:

a) Berechnung des Partialdrucks mit einer Einfachregression aus der Meereshöhe:

$$D_i = b_0 + b_1 \cdot H \quad (7)$$

b) Berechnung durch eine Mehrfachregression mit Rechtswert, Hochwert, Höhe:

$$D_i = b_0 + b_1 \cdot RW + b_2 \cdot HW + b_3 \cdot H \quad (8)$$

Je nach gewünschter Genauigkeit und Datenlage lässt sich mit einer der beiden Gleichungen für jede Rasterfläche der Partialdruck monatsspezifisch berechnen.

Tab. 14: Mittelwerte M , Standardabweichungen s des Partialdrucks der Meßpunkte; Regressionskonstanten b_0 , -koeffizienten b_1 , Bestimmtheitsmaße B (%) für Gl. (7):

MONAT	M	s	b_0	b_1	B
Nov	7,9	0,47	8,3	-0,0021	80
Dez	7,0	0,44	7,4	-0,0019	74
Jan	5,9	0,40	6,2	-0,0017	70
Feb	5,8	0,37	6,0	-0,0015	65
Mrz	6,8	0,44	7,1	-0,0016	54
Apr	7,9	0,51	8,3	-0,0020	64
Mai	10,4	0,63	10,9	-0,0026	66
Jun	13,0	0,71	13,5	-0,0031	74
Jul	14,9	0,79	15,6	-0,0035	81
Aug	14,8	0,82	15,5	-0,0038	85
Sep	12,6	0,66	13,1	-0,0029	78
Okt	10,2	0,56	10,7	-0,0025	78

Tab. 15: Regressionskonstanten b_0 , -koeffizienten b_1, b_2, b_3 , Bestimmtheitsmaße B (%) für Gl. (8):

MONAT	b_0	b_1	b_2	b_3	B
Nov	8,4	-0,021-	0,004°	-0,0020	85
Dez	7,4	-0,025+	0,007°	-0,0017	81
Jan	6,3	-0,025+	0,006°	-0,0015	79
Feb	6,3	-0,022+	-0,004°	-0,0015	78
Mrz	7,6	-0,012°	-0,017-	-0,0019	65
Apr	8,7	0,006°	-0,020+	-0,0024	67
Mai	11,5	0,024-	-0,035*	-0,0032	71
Jun	14,2	0,024-	-0,041*	-0,0038	79
Jul	16,0	0,026-	-0,028+	-0,0041	83
Aug	15,7	0,009°	-0,015°	-0,0041	85
Sep	13,5	-0,014°	-0,010°	-0,0031	81
Okt	10,8	-0,021-	0,004°	-0,0024	82

6.5. Sättigungsdefizit

Das Sättigungsdefizit SD lässt sich aus Sättigungsdampfdruck und Partialdruck berechnen; es beschreibt die Verdunstungskraft der Atmosphäre und dient verschiedenen Verfahren der Verdunstungsberechnung als Eingangsgröße. Die berechneten Werte sind als Monatsmittelwert - basierend auf mittleren Tageswerten der Ausgangsgrößen - zu sehen:

$$SD_i = E_i - D_i \quad (9)$$

6.6. Relative Luftfeuchte

Die relative Feuchte berechnet sich aus dem Quotient Partialdruck / Sättigungsdampfdruck:

$$RF_i = 100 * D_i / E_i \quad (10)$$

Auch diese Variable kann zur Beschreibung der Verdunstungskraft der Atmosphäre dienen, wird aber im Rahmen dieser Arbeit nicht benötigt. KOEPPEL & ARNOLD (1980, S.41, Tab.2) nennen in ihrem Landschaftsdatenkatalog als Variable 28: 'Schwületage im Jahr' mit dem Vermerk: Keine Daten verfügbar. Diese Variable ließe sich - ungeachtet ihres Aussagegehaltes - aus der Lufttemperatur und der relativen Feuchte konstruieren, ggf. unter Zuhilfenahme klimatologischer Tagesbeobachtungen.

6.7. Potentielle Verdunstung

Die potentielle Verdunstung als maximal mögliche Verdunstung bei ständig ausreichender Wasserzufuhr wird im Untersuchungsraum fast ganzjährig erreicht. Zur Berechnung sind verschiedene Formeln entwickelt worden, die natürlich bei einem Vergleich sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern können. Es wäre voreilig, die eine oder andere Formel als falsch einzustufen, da von den Urhebern unterschiedliche Annahmen gemacht wurden. UHLIG (1954) gibt eine vergleichende Beschreibung verschiedener Verfahren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden 5 Berechnungsformeln gegenübergestellt:

6.7.1. nach THORNTHWAITE

Das THORNTHWAITE'sche Verfahren (MATHER 1978, S.5) berechnet die potentielle Verdunstung für Monatszeiträume; einzige Steuervariable ist die Lufttemperatur:

$$VU_i = 16 * (10 T_i / I)^a \quad (11)$$

$$\text{mit: } I = \sum_{i=1}^{12} (T_i / 5)^{1,514} \quad \text{und:} \quad (12)$$

$$a = 6,75 * 10^{-7} I^3 - 7,71 * 10^{-5} I^2 + 0,0179 I + 0,49 \quad (13)$$

Die berechneten vorläufigen Werte VU müssen für die geographische Breite und monatsabhängige Tageslänge korrigiert werden. THORNTHWAITE gibt für Nordwestdeutschland bis 50° nördlicher Breite die Korrekturfaktoren FT in Tab. 16 an (KELLER 1962, S.57). Damit ergibt sich als korrigierte potentielle Verdunstung VP :

$$VP_i = VU_i * FT_i \quad (14)$$

Tab. 16: Korrekturfaktoren nach THORNTHWAITE:

MONAT	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr
FT	0,76	0,70	0,74	0,78	1,02	1,15
MONAT	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
FT	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	0,92

6.7.2. nach ALBRECHT

Die Berechnung der monatlichen potentiellen Verdunstung nach ALBRECHT (UHLIG 1954, S.6/6) beruht auf dem mittleren Sättigungsdefizit und einer mittleren Windgeschwindigkeit, die in einen Faktor FA eingeht. FA liegt zwischen 4 und 16 für Windgeschwindigkeiten U zwischen 0 und 4 km/h:

$$FA = 3,33 U + 4 \quad (15)$$

$$VP_i = FA * SD_i * f \quad (16)$$

Da das Sättigungsdefizit SD in mb berechnet wird, die Formel aber für mm Hg aufgestellt wurde, wird der Umrechnungsfaktor $f = 0,75$ benutzt. Nach UHLIG (1954) sind die berechneten Verdunstungswerte zu niedrig. Bessere Werte erzielt UHLIG, wenn unabhängig von der Windgeschwindigkeit $FA = 16 = \text{const.}$ angenommen wird.

6.7.3. nach HAUDE

Die HAUDE-Formel (KELLER 1962, S.63) stützt sich auf das Sättigungsdefizit um 14 Uhr (SD14). Der Koeffizient FH variiert von Monat zu Monat und erfaßt die Verdunstungsaktivität der Vegetation. Der Faktor $f (= 0,75)$ dient zur Umrechnung von mb auf mm Hg, und m ist die Zahl der Monatstage, da die Formel für Tageswerte ausgelegt ist. Windverhältnisse werden nicht berücksichtigt. Die potentielle Verdunstung eines Monats berechnet sich aus den täglichen SD14-Werten wie folgt:

$$VP_i = FH_i * SD14 * f * m \quad (17)$$

Tab. 17: Koeffizienten für HAUDE-Formel:

MONAT	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr
FH	0,26	0,26	0,26	0,26	0,33	0,39
MONAT	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
FH	0,39	0,37	0,36	0,33	0,31	0,26

Das Sättigungsdefizit um 14 Uhr (SD14) ist nicht zu verwechseln mit dem in Kap. 6.5. berechneten mittleren Sättigungsdefizit SD, welches aus Tagesmittelwerten berechnet wird. Tagesmittelwerte stehen für mehr Meßpunkte zur Verfügung als Beobachtungsdaten um 14 Uhr; SD14 ist häufig aus den 14-Uhr-Beobachtungen von Lufttemperatur und relativer Feuchte zu ermitteln.

6.7.4. nach PENMAN

PENMAN berücksichtigt mehrere meteorologische Faktoren in seiner Formel zur Berechnung der täglichen potentiellen Verdunstung freier Wasserflächen (KELLER 1962, S.61):

$$VPW = \frac{2 \text{ DD} * \text{ HH} + \text{ Va}}{2 \text{ DD} + 1} \quad (\text{mm/d}) \quad (18)$$

$$\text{mit: } \text{HH} = (0,18 + 0,55 \text{ SW/SM}) * (1 - r) * \text{RA/59} \\ - \text{SB} * \text{TK}^4 * (0,56 - 0,09 \sqrt{\text{DT}}) \\ * (0,1 + 0,9 \text{ SW/SM}) \quad (\text{mm/d}) \quad (19)$$

$$\text{und: } \text{Va} = 0,35 (1 + 0,15 U) * (\text{ET-DT}) \quad (\text{mm/d}) \quad (20)$$

Aufgrund der (EDV-gerechteren) Schreibweise der Formel entsprechen die hier gewählten Kürzel nicht immer der gewohnten Erscheinungsform, wie sie sich bei KELLER (1962, S.61) bzw. bei UHLIG (1954, S.6/8) findet. Die Kürzel haben folgende Bedeutung:

DD = Steigung der Sättigungsdampfdruck-Kurve
(mm Hg/°C)

HH = Wärmeverrat (mm/d)

r = Reflektionskoeffizient der Erdoberfläche. Für Wasser = 0,05

RA = Mögliche Sonneneinstrahlung ohne Atmosphäre
(cal/cm² d)

RA/59 = Durch RA verdunstbare Wassermenge (mm/d)

SW = Wirkliche Sonnenscheindauer (h)

SM = Astronomisch mögliche Sonnenscheindauer (h)

SB = Stefan-Boltzmann-Konstante (cal/cm² min K⁻⁴)

TK = Temperatur (K)

DT = Partialdruck (Tagesmittel) (mm Hg)

Va = Dampftransportkoeffizient (mm/d)

U = Mittlere Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe (km/h)

ET = Sättigungsdampfdruck (Tagesmittel) (mm Hg)

FF = Umrechnungsfaktor: Wasserfläche - Vegetation:

0,6 : November bis Februar

0,7 : März, April, September, Oktober

0,8 : Mai bis August

0,75 : Jahresmittel

Die berechneten Werte sind Tageswerte; m ist die Zahl der Monatstage. Zur Bestimmung einiger Größen werden Tabellen benötigt: DD kann aus einer Psychrometertafel entnommen werden, und RH und SB*TK finden sich u.a. in den Smithsonian Meteorological Tables. Da die potentielle Verdunstung zunächst für freie Wasserflächen berechnet wird, ergibt sich selbige für vegetationsbedeckte Flächen durch:

$$VP_i = VPW * FF * m \quad (21)$$

6.7.5. nach LEEPER

Sättigungsdampfdruck und Lufttemperatur sind die steuernden Größen der potentiellen Verdunstung in der LEEPER-Formel (KELLER 1962, S.60). Windeinfluß wird nicht berücksichtigt, und somit ist letztlich nur die Lufttemperatur - die Sättigungsdampfdruck und Jahresmitteltemperatur TJ beeinflußt - Hauptsteuergröße der potentiellen Verdunstung:

$$VP_i = 3,3 E_i + (T_i - TJ) \quad (22)$$

6.7.6. Vergleich der Verfahren zur Berechnung der potentiellen Verdunstung

Aus den 5 vorgestellten Verfahren war für den weiteren Gebrauch eines auszuwählen, das den eingangs genannten Forderungen möglichst weitgehend entspricht, d.h. a) einfach strukturiert und b) an die verfügbare Datenbasis angepaßt ist, und c) trotzdem gute Ergebnisse liefert. Eine Zusammenstellung der Verfahren und der benötigten Daten gibt Tab. 18:

Tab. 18: Verdunstungsformeln und Eingangsdaten:

	THORN.	ALBR.	HAUDE	PENMAN	LEEPER
Temperatur	x		x	x	
Partialdruck		x	x	x	
Sättigungsdampfdr.	x	x	x	x	
Strahlung			x		
Sonnenscheindauer (x)			x		
Wind		x		x	
Lageparameter	x				

Die Verfahren von HAUDE und PENMAN schieden aus. Sie verlangen nicht allgemein (bzw. überall) verfügbare Daten wie Sättigungsdefizit um 14 Uhr (HAUDE) oder Einstrahlung, Windgeschwindigkeit und wirkliche Sonnenscheindauer (PENMAN). Auch das ALBRECHT'sche Verfahren verlangt die Windgeschwindigkeit als Eingangsgröße; außerdem liefert es zu niedrige Verdunstungswerte (UHLIG 1954, S.6/13) und scheidet daher aus. Die restlichen beiden Verfahren (LEEPER und THORNTHWAITE) haben beide den Vorteil, als Eingangsgröße nur die Lufttemperatur zu benötigen; der Sättigungsdampfdruck für die LLEEPER-Formel kann mit Gleichung (6) aus der Temperatur berechnet werden. Für die Wahl des THORNTHWAITE'schen Verfahrens sprach jedoch folgendes:

a) Es liefert ähnliche Werte wie die Formel von HAUDE (UHLIG 1954, S.6/13), welche z.B. von RENGER et al. (1975) bei der Aufstellung klimatischer Wasserbilanzen benutzt wird. Auch MATHER (1978, S.8 f) benutzt das THORNTHWAITE-Verfahren zum gleichen Zweck.

b) Die LLEEPER-Verdunstungswerte zeigen eine weitaus geringere Jahresamplitude als die Werte anderer Verfahren, verursacht durch relativ hohe potentielle Verdunstungswerte in den Wintermonaten (> 10 mm/mon, vgl. Tab. 19). Im Vergleich dazu erreicht die aktuelle Verdunstung VF, berechnet aus der Gebietswasserbilanz, in den Wintermonaten weniger als 10 mm. In den Sommermonaten strebt VF gegen 80 mm, während VP nach LLEEPER gerade 70 mm überschreitet. Es ist jedoch unwahrscheinlich, daß die potentielle Verdunstung im Winter größer ist als die aktuelle Verdunstung, und im Sommer die potentielle unter der aktuellen Verdunstung bleibt. Aus diesen Gründen wurde zur Berechnung der potentiellen Verdunstung

das THORNTHWAITE'sche Verfahren gewählt, auch wenn die berechneten Werte möglicherweise etwas zu hoch sind; vgl UHLIG (1954, S.6/13 und 1959, S.389) sowie in der vorliegenden Arbeit das Kapitel 7.1. Über die klimatische Wasserbilanz.

Für Vergleichszwecke erfolgte die Berechnung monatlicher Mittelwerte verschiedener klimatologischer Variablen. Das Verfahren nach PENMAN konnte mangels geeigneter Daten nicht mit einbezogen werden; in die HAUDE-Formel wurden versuchsweise Tagesmittelwerte statt der (nicht überall verfügbaren) 14-Uhr-Werte des Sättigungsdefizits eingespeist. Die berechneten Größen finden sich in Tab. 19. Da zum Zeitpunkt der Untersuchungen am Lehrstuhl Landschaftsökologie (Prof.Dr. K.-F. Schreiber) in Münster ein Landschaftsplan für den Kreis Mettmann erstellt wurde (SCHREIBER et al. 1980), lag es nahe, dies zu berücksichtigen und die benutzten Verfahren in diesem Raum zu testen. Die Tab. 19 bezieht sich daher auf folgende Ausgangsdaten: Höhe H = 183 m; Rechtswert RW = 72,7; Hochwert HW = 79,8. Diese Werte gelten für das im Kreis Mettmann liegende Fließgebiet mit dem Pegel Eigen (42,0 km²); vgl. Abb. 10. Die Monatswerte der Variablen wurden sukzessive wie folgt berechnet:

Tab. 19 a: Verknüpfung der Berechnungsverfahren:

Schritt	Berechnete Größe	Benutzte Formel	Prädiktorenvariable
1	T	(5)	H
2	E	(6)	T
3	D	(7)	H
4	SD	(9)	E, D
5	RF	(10)	E, D
6	VP-Thor.	(11-14)	T
7	VP-Albr.	(15,16)	SD
8	VP-Haude	(17)	SD (statt SD14)
9	VP-leep.	(22)	T, E
10	N-Regr.	(3)	RW, HW, H (Regression)
11	N-Quad.	(4)	N (Quadrantenverfahren)
12	A	(-)	gemessen
13	VF	(26,27)	N-Quad., A, VK

Tab. 19 b: Hydrometeorologische Daten für Pegel Eigen (nach Tab. 19 a); Monats-, Jahresmittelwerte für Var.: T, E, D, SD, RF:

MONAT	T	E	D	SD	RF
Nov	5,3	8,9	7,9	1,0	89
Dez	2,0	7,1	7,1	0,0	100
Jan	0,7	6,4	5,9	0,5	92
Feb	1,2	6,7	5,7	1,0	85
Mrz	4,5	8,4	6,8	1,6	81
Apr	8,2	10,9	7,9	3,0	72
Mai	12,5	14,5	10,4	4,1	72
Jun	15,6	17,7	12,9	4,8	73
Jul	17,1	19,4	15,0	4,4	77
Aug	16,8	19,1	14,8	4,3	77
Sep	13,8	15,7	12,6	3,1	80
Dkt	9,3	11,7	10,2	1,5	87
Jahr	8,9	12,2	9,8	2,4	82

Tab. 19 c: Hydrometeorologische Daten für Pegel Eigen (nach Tab. 19 a); Mittlere Monatssummen, Jahressumme für Var: VP, N, A, VF:

MONAT	VP-T	VP-A	VP-H	VP-L	N-R	N-Q	A	VF
Nov	19	12	6	26	91	93	59	9
Dez	7	0	0	16	90	91	83	4
Jan	3	6	3	13	100	99	74	4
Feb	4	12	5	14	84	87	74	9
Mrz	22	19	12	23	61	62	61	21
Apr	46	36	26	35	72	75	48	34
Mai	83	49	37	51	71	76	34	68
Jun	106	58	40	65	88	92	34	73
Jul	118	53	37	72	98	102	42	73
Aug	105	52	33	71	104	104	35	64
Sep	73	37	22	57	82	83	34	47
Okt	42	18	9	39	85	88	47	21
Jahr	628	352	230	482	1026	1052	625	427

6.8. Aktuelle Verdunstung

Die aktuelle Verdunstung erreicht in Mitteleuropa außerhalb der Sommermonate meist die Höhe der potentiellen Verdunstung, da in der Regel ausreichend Bodenfeuchte zur Verfügung steht. Eine direkte Messung der aktuellen Verdunstung ist nur in Verbindung mit wägbaren Lysimetern möglich, und demzufolge technisch und finanziell sehr aufwendig. Zur Berechnung über Hilfsgrößen eignet sich das Verfahren der klimatischen Wasserbilanz. Es verwendet allgemein verfügbare Daten und wird in Kap. 7. beschrieben. Andere Verfahren zur Berechnung der aktuellen Verdunstung, z.B. mit Hilfe des Wärmehaushalts (WERNER 1980) verlangen spezielle Meßwerte und entsprechen damit nicht den eingangs gestellten Forderungen nach allgemein verfügbaren Daten.

TURC entwickelte für die Jahresverdunstung eine Berechnungsformel (KELLER 1962, S.350); sie wird von STRÄSSER (1979) zur Berechnung der aktuellen Verdunstung im Raum Mettmann benutzt:

$$VTU_j = NJ / \sqrt{0,9 + (NJ/L)^2} \quad (23)$$

GUPTA & SOLOMON (1977, S.622) verwenden zur Berechnung der täglichen aktuellen Verdunstung eine für Tageswerte modifizierte Version, in der zusätzlich die verfügbare Bodenfeuchte berücksichtigt wird:

$$VTU_d = \frac{(365 NN + a) / 365}{\sqrt{0,9 + ((365 NN + a) / L)^2}} \quad (24)$$

mit: NN = Tagesniederschlag, NJ = Jahresniederschlag
TJ = Jahresmitteltemperatur
a = zusätzlich verfügbare Bodenfeuchte

$$L = 300 + 25 TJ + 0,05 TJ^3 \quad (25)$$

Die TURC-Formel in dieser Version benötigt Tageswerte. Eine derartige zeitliche Auflösung ist jedoch

bei Landschaftsinformationssystemen nicht vorgesehen und lässt die Anwendung dieses Verfahrens nicht zu.

6.9. Aktuelle Verdunstung von Flussgebieten / Wasserhaushaltbilanz

Für Flussgebiete lässt sich die mittlere monatliche aktuelle Verdunstung durch die Wasserhaushaltbilanz ermitteln. HERRMANN (1977, S.105) gibt ein Beispiel für die Eder. Eingangsgrößen sind mittlere Monatswerte der Niederschlagshöhe und Abflühhöhe. Die aktuelle Jahresverdunstungssumme im langjährigen Mittel wird als Differenz der Jahressummen: Niederschlag - Abfluss angenommen:

$$VJ = \sum_{i=1}^{12} N_i - \sum_{i=1}^{12} A_i \quad (26)$$

Die Jahressumme der aktuellen Verdunstung VJ wird nach einem empirischen prozentualen Verteilungsschlüssel VK (Zeile 1 in Tab. 20) von FRIEDRICH (HERRMANN 1977, S.105) auf die 12 Monate des Jahres aufgespalten, um die aktuelle Monatsverdunstung VF_i (Zeile 5 in Tab. 20) zu errechnen:

$$VF_i = VK_i * VJ / 100 \quad (27)$$

Die derart berechneten Monatswerte der aktuellen Verdunstung stimmen in den Wintermonaten gut mit der potentiellen Verdunstung nach THORNTHWAITE überein; potentielle und aktuelle Verdunstung sind in diesem Zeitraum annähernd gleich. Die zur Auffüllung bzw. zum Aufbrauch der Rücklagen dienenden Wassermengen finden sich in Zeile 6, die jeweils gespeicherte Menge in Zeile 8; ihr Maximalwert entspricht dem Speichervermögen des Flussgebietes. Tabelle 20 zeigt die ermittelten Werte für das Flussgebiet der Düssel, Pegel Eigen. Das Verfahren arbeitet auf der Basis von Flussgebieten. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es jedoch, hydrologische Informationen auf nicht-einzugsgebietsbezogener Basis bereitzustellen, um Aussagen zum Wasserdargebot von Planungsregionen zu machen. Hier bietet es sich an, monatliche Abflusswerte durch eine an Einzugsgebieten geeichte Regression für Teileinzugsgebiete oder sonstige Flächen zu schätzen. Unter Einbeziehung zusätzlicher Niederschlagsdaten lassen sich für diese Flächen - unter gewissen einschränkenden Randbedingungen; vgl. 5.2. - Wasserhaushaltbilanzen erstellen. Die Regressionsgleichungen für den Abfluss werden in Kap. 6.10. f vorgestellt; zur Bilanzierung des Wassermengendargebotes siehe Kap. 7.

Tab. 20: Wasserhaushaltsbilanz für den Pegel Eigen:

Z. Variable	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	SUM
1 VK (%)	2	1	1	2	5	8	16	17	17	15	11	5	100
2 N	93	91	99	87	62	75	76	92	102	104	83	88	1052
3 A	59	83	74	74	61	48	34	34	42	35	34	47	625
4 N - A	34	8	25	13	1	27	42	58	60	69	49	41	427
5 VF	9	4	4	9	21	34	68	73	73	64	47	21	427
6 R - B	25	4	21	4	-20	-7	-26	-15	-13	5	2	20	0
7 SUM (R-B)	25	29	50	54	34	27	1	-14	-27	-22	-20	0	0
8 SUM (R-B) + 27	52	56	77	81	61	54	28	13	0	5	7	27	27

Speichervermögen: 81 mm (Zeile 8, Feb.)

6.10. Grundsätzliches zur Abflußberechnung

Zur Berechnung von Jahres- oder Halbjahreswerten der Abflußhöhe existiert eine Vielzahl meist regressionsanalytischer Verfahren (KELLER 1962, S.334 f., S.377 f.). SCHUMACHER (1976) schätzt durch eine Regression Sommer-, Winter- und Jahresabflußhöhe (ASO, AWI, AJ) für Klimastationen in der Bundesrepublik Deutschland. Er benutzt die dort in der Regel vorliegenden Prädiktorvariablen Winterniederschlag NWI, Jahresmitteltemperatur TJ und Quotient Sommer-/Winterniederschlag NSW, jedoch mit unterschiedlichen Regressionskonstanten bzw. -koeffizienten für die Zielgrößen ASO, AWI oder AJ:

$$A (SO, WI, J) = b_0 + b_1 NWI + b_2 TJ + b_3 NSW \quad (28)$$

Da sich das Abflußverhalten im Donauraum von dem der restlichen Bundesrepublik Deutschland unterscheidet, verwendet SCHUMACHER für das Donaugebiet andere Koeffizienten und Konstanten; offensichtlich spielen hier alpine Einflüsse eine Rolle. Die Eichung der Gleichungen erfolgte an 28 bzw. 53 Fließgebieten nicht genannter Größe.

Als Nachteil dieser Verfahren erweist sich, daß sie a) den Jahresgang des Abflußverhaltens nicht nachbilden können, und b) meist für relativ große Fließgebiete von mehreren hundert Quadratkilometern gelten. STREIT (1981 c) zeigt, daß sich bei abnehmender Gebietsgröße die Korrelationen zwischen Abflußhöhe (Jahressumme) und hydrologisch bedeutsamen Variablen ändern:

Tab. 21: Korrelationskoeffizienten zwischen Abflußhöhe (Jahressumme) und (nichtvariablen) Gebietsparametern (nach STREIT 1981c. a = insignifikant auf 5%):

n	Gebietsgröße (km²)	NWI	NSW	NJ-AJ	RF15
27	10 - 50	0,94	-0,90	-0,69	0,45
33	50 - 150	0,89	-0,83	-0,67	0,30a
28	150 - 300	0,89	-0,69	-0,54	0,31a
27	300 - 550	0,66	-0,58	-0,60	0,07a
115	10 - 550	0,90	-0,78	-0,65	0,28

Da - wie in 5.1. dargelegt - Wasserbilanzen für kleine Quadratrasierflächen erstellt werden sollen, ist es sinnvoll, möglichst kleine Fließgebiete zur Eichung der Regressionen zu wählen. Man kann annehmen, daß kleine Gebiete relativ homogen in der natürlichen Ausstattung sind. Werden Variable ausgewählt, die sowohl für diese kleinen Einzugsgebiete als auch für Rasterflächen (z.B. von 1 ha) sinnvoll bestimmt werden können, so läßt sich vermuten, daß die mit diesen Steuervariablen für Fließgebiete berechneten Abflußhöhen auch für diese Rasterflächen gelten können. Der Jahresgang wird durch mittlere monatliche Werte erfaßt.

Die von STREIT (1981c) benutzten Fließgebiete befinden sich im nördlichen Teil der BR Deutschland zwischen Heidelberg und Hamburg. Diese räumliche Streuung bedingt unterschiedliche klimatische Bedingungen hinsichtlich Kontinentalität oder großräumiger Luv/Lee-Lagen. Erste Schätzungen der Jahresabflußhöhe bestätigten ein anderes Abflußverhalten von Einzugsgebieten der Wetterau, der Eifel-Ostabdachung und des Oberrheingrabens aufgrund hoher Residualwerte. Um mit einer homogenen Stichprobe zu arbeiten, wurden daher von den ursprünglich vorhandenen 46 Einzugsgebieten mit einer maximalen Größe von 100 km² 30 zur Modellerstellung ausgewählt. Diese Gebiete liegen in Nordrhein-Westfalen bzw. in benachbarten grenznahen Regionen und somit im feucht-maritimen Luv-Bereich des rechtsrheinischen Schiefergebirges bzw. Rothaargebirges. Der größte Teil der Fließgebiete entwässert in den Rhein oder seine Nebenflüsse, mehrere Gebiete des Münsterlandes in die Ems oder in die IJssel, und einige wenige in die Eder (siehe Abb. 10; eine Liste der Pegel findet sich im Anhang/Tab. 39).

Die benötigten Abfluß- und Niedrigwasserabflußdaten finden sich in Wasserwirtschaftlichen Jahrbüchern oder Abflußhaupttabellen der Wasserwirtschaftlichen Ämter. Die Gebietsniederschläge der Einzugsgebiete wurden aus Isohyetenkarten des Deutschen Wetterdienstes (Bearbeiter: SCHIRMER) erhoben und sind einer

Arbeit von STREIT (1979) entnommen, ebenso die Flächennutzungsvariablen und die räumlichen Lageparameter H, RW, HW. Aus diesen Größen resultierende Variable (vgl. Tab. 5-8) konnten mit den bereits vorgestellten Berechnungsverfahren ermittelt werden. Die zur Berechnung von Abflußdaten erstellte Datei enthält 143 Variable für 30 Fließgebiete:

- zeitinvariante Variable: FL (Fläche des Gebiets); RW, HW, H; VJ (Jahresverdunstung NJ-AJ); RF15, WALD, SIEG, SEE, SUMP, SUSE.
- raumzeitvariante Daten: je 12 Monatsmittelwerte für: N, A, ANI, AOB, DNA, VP, VF, DNP, T, QAN, QPN.

Eine Prüfung auf Normalität (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$) mit dem GOSSEFELDT-Programm JGNVT zeigt, daß folgende Variable zur Normalverteilung einer Transformation unterworfen werden müssen:

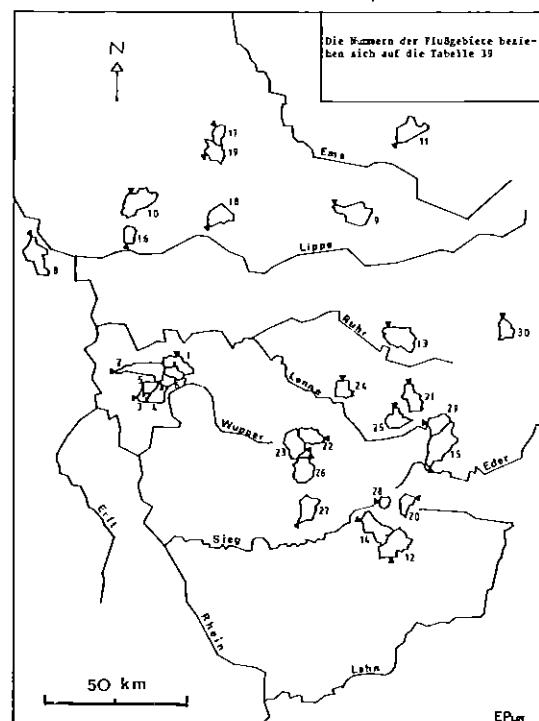
Var.	mögl.Transf.	Var.	mögl.Transf.
RF15	$1/\sqrt{x}$	VP(Jan)	$1/\sqrt{x}$
SEEF	$1/\sqrt{x}$	VP(Feb)	NVT nicht möglich
SUMP	$1/\sqrt{x}$	QP(N) (Jan)	$1/\sqrt{x}$
SUSE	$1/\sqrt{x}$	OPN(FEB)	$1/\sqrt{x}$

Dies führte zu folgenden Überlegungen:

a) Die Variablen RF15, SEEF, SUMP, SUSE können zwar für Flussgebiete und auch für Rasterflächen von 1 ha bestimmt werden, es ist jedoch fraglich, ob sie in beiden Fällen den gleichen Informationsgehalt besitzen. Für Rasterflächen nehmen alle vier Variable sehr häufig den Wert Null (= nicht vorhanden) an, während für Einzugsgebiete meist ein Wert größer als Null erreicht wird. Werte von 100 % sind für Rasterflächen leicht möglich, für Flussgebiete nicht (sieht man von dem Spezialfall: Moor = Einzugsgebiet mit SUSE = 100 % ab). Aufgrund dieses unausgeglichenen Verhaltens, besonders im Vergleich mit den Variablen WALD und SIEG, war eine Nichtnormalverteilung der Variablen RF15, SEEF, SUMP und SUSE zu erwarten. Sie werden daher nicht transformiert und auch nicht in die weitere Modellerstellung einbezogen, sondern allenfalls als zusätzliche Interpretationshilfe benutzt. Sie gehen in die Hauptkomponentenanalyse mit ein.

b) Die Variablen VP(Jan), VP(Feb) und ihre Derivate QPN(Jan) und QPN(Feb) sind mit der THORNTHWAITE'schen Verdunstungsformel (Gl. 11-14) berechnet worden. Diese setzt die potentielle Verdunstung auf Null, falls in Gleichung (11) negative Temperaturen auftreten. Auch diese Variable werden untransformiert der Hauptkomponentenanalyse zugeführt; die Nichtnormalverteilung wird bei einer eventuellen Weiterverwendung dieser Variablen berücksichtigt. Alle anderen Variablen sind - mehr oder weniger gut - normalverteilt.

Abb. 10: Übersichtskarte: Benutzte Flussgebiete
(Maßstab ca. 1 : 2 300 000)



Eine Hauptkomponentenanalyse mit anschließender Varimaxrotation bestätigte die engen Wechselbeziehungen zwischen hydrologisch relevanten Variablen. Nur die ersten 10 Hauptkomponenten enthalten Ladungen $> 0,5$; damit werden 97 % der Varianz erklärt (vgl. Tab. 22). Zeitvariante Größen laden in der Regel nur die ersten 3 Hauptkomponenten hoch.

Die meisten Variablen finden sich in der ersten Hauptkomponente: Alle Monate der Variablen N, A, AOB, VP, DNP, T, QPN, die Wintermonate von QAN, sowie die zeitinvarianten Größen RM, HW, H, RF15, WALD und SIEG; außerdem einzelne Monate von DNA. Die zweite Hauptkomponente wird bestimmt durch alle Monate der Variablen ANI, die Sommermonate von A und QAN, sowie einzelne Monate von DNA. Die dritte Hauptkomponente ist geprägt durch alle Monate der Variablen VF, die Wintermonate von QAN und DNA, und die Jahresverdunstung VJ. In der vierten und fünften Hauptkomponente laden verstreut einzelne Variable, während die sechste von SUMP und SUSE gemeinsam geladen wird. Die Fläche FL bestimmt die siebte, N(Jul) die achte, RF15 die neunte und SEEF die zehnte Hauptkomponente. Ähnliche Ergebnisse liefert auch die nichtrotierte Ladungsmatrix. Die varimax-rotierte Hauptkomponentenmatrix ist auf der folgenden Seite wiedergegeben (Tab. 22).

Tab. 22: Varimaxrotierte Hauptkomponentenmatrix. Es sind nur die ersten 10 Hauptkomponenten und nur Ladungen $>/0.4/$ dargestellt. Erläuterungen zu den Variablen in Kap. 5.4.

Das Ergebnis zeigt erneut die starken Beziehungen zwischen hydrologischen und meteorologischen Variablen. Interessant ist die Tatsache, daß der Niedrigwasserabfluß ANI nur in den Sommermonaten mit A, QAN und schwächer auch mit DNA korreliert; ein winterliches Pendant existiert nicht. AOB hingegen ist ganzjährig hoch mit A korreliert. Da T und VP aus H berechnet sind, sind die Ladungen in allen Monaten konstant. SEEF, SUMP und SUSE laden wegen ihrer andersartigen Verteilung andere Hauptkomponenten. Die erste Hauptkomponente läßt auf einen räumlichen Trend schließen, dem nicht nur die hydrometeorologischen Variablen unterliegen. Von Nordwest nach Südost (in Nordrhein-Westfalen) steigt die Meereshöhe und mit ihr der Waldanteil, Anteil stark geneigter Flächen, Niederschlag und Abfluß, während versiegelte Flächen (Siedlungs-, Verkehrswege, dichte), Lufttemperatur und potentielle Verdunstung zurückgehen. Versuchsweise durchgeführte monatsspezifische Hauptkomponentenanalysen ergeben ein ähnliches Bild.

Eine Anwendung der SCHUMACHER'schen Regressionen auf die eingangs genannten 30 Fließgebiete zur Berechnung von Sommer-, Winter- und Jahresabflußhöhe (ASO, AWI, AJ) zeigte starke Abweichungen von den gemessenen Werten. Tab. 23 zeigt Vergleichswerte für die Pegel Ratingen und Eigen im Raum Mettmann.

Tab. 23: Gemessene und nach SCHUMACHER berechnete Abflußhöhen für Ratingen und Eigen (Pegel):

Pegel:	Ratingen			Eigen		
	ASO	AWI	AJ	ASO	AWI	AJ
Gemessen (mm)	164	317	481	173	440	613
Berechnet (mm)	304	126	430	172	380	552
Differenz (mm)	-140	191	51	1	60	61

Eine Neueichung des Verfahrens mit den Meßwerten der 30 Pegel befriedigte nicht. Vielversprechender schien eine Neukonzeption auf der Basis von Monatswerten und mit anderen Prädiktoren. PETZOLD (1981a) schätzt monatsspezifisch die Abflußhöhe aus Niederschlag, Vormonatsniederschlag, Quotient Sommer-/Winterniederschlag NSW und Meereshöhe H:

$$A_i = b0_i + b1_i N_i + b2_i N_{i-1} + b3_i NSW + b4_i H \quad (29)$$

Die - statistisch gesehen unzulässige - Interkorrelation der Prädiktorenvariablen ist nicht auszuschalten; vgl. auch 5.3.3.; die Korrelationskoeffizienten erreichen jedoch nur Werte um 0,5/. Mit dieser Gleichung wurden für Rasterflächen von 1 ha Größe die 12 Monatsabflüsse berechnet; diese Rasterflächen bedeckten 7 Fließgebiete im Raum Mettmann (Nrn. 1-7 in Tab. 39 und Abb. 10). Eine Aggregation auf Basis der Einzugsgebiete zeigte eine gute Ober-

einstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten. Die Verbesserung des Verfahrens wird angestrebt mit dem Ziel, 1. die Zahl der Prädiktoren zu vermindern, und 2. das in einigen Monaten relativ niedrige multiple Bestimmtheitsmaß (z.B. 64 % im Mai) zu erhöhen.

Grundsätzliche Überlegungen zur Aufstellung neuer Schätzgleichungen für den Abfluß und seine Komponenten Niedrigwasserabfluß und Direktabfluß ergaben folgende Möglichkeiten:

- Auswahl der Prädiktorenvariablen nur unter dem Aspekt der Maximierung des multiplen Bestimmtheitsmaßes bei gleichzeitiger Minimierung der Prädiktorenzahl; hydrologische Kriterien sind nachrangig.
- Neben raumzeitvarianten Größen wird die Meereshöhe und die topografische Komponente (d.h. Variable zur Beschreibung der räumlichen Ausstattung, z.B. Vegetation, Landnutzung, Oberflächenformung und Untergrundeigenschaften) berücksichtigt. Hier in dieser Arbeit werden bei den Regressionsrechnungen nur die anthropogen veränderbaren Variablen WALD und SIEG herangezogen, um sie für Simulationsrechnungen nutzbar zu machen. Die kurzfristig nicht reversible Entwaldung oder gar Umwidmung von Wald in Siedlungsfläche erfordert im voraus eine quantitative Abschätzung der Folgen im Hinblick auf den Wasserhaushalt.
- Wie a) und b), jedoch als autopräzessives Modell.

Zu den autoprojektiven Verfahren zählen z.B. Zeitreihenanalysen, räumliche Autoregressivmodelle oder Kriging (vgl. 6.1.3.). Sie schließen aufgrund zeitlicher oder räumlicher Erhaltsneigung auf den Wert einer Variablen X zum Zeit- oder Raumschritt k aus der Realisation der Variablen X zum Schritt k-1. Realisationen weiter zurückliegender Schritte können berücksichtigt werden, ebenso räumliche Lageparameter. STREIT (1981b, S.219) faßt diese Verfahren unter dem Oberbegriff 'autoprojektiv' zusammen. In der vorliegenden Arbeit werden diejenigen Regressionsmodelle als 'autopräzessiv' bezeichnet, die den Vormonatswert der Zielvariablen - neben zeitinvarianten und raumzeitvarianten Steuergrößen - als Prädiktor mitbenutzen (autoregressive Komponente). Dieses Vorgehen besitzt gewisse Ähnlichkeit mit den 'autoregressiven' Verfahren, unterscheidet sich jedoch durch Verwendung einer räumlichen Stichprobe der 12 Monatsmittelwerte von einem Autoregressivmodell auf Basis einer zeitlichen (sich über mehrere Jahre erstreckenden) Stichprobe.

Auf die Berechnung von Abflußwerten übertragen hieße das: Schätze die Abflußhöhe im Monat i aus der Abflußhöhe im Monat $i-1$, wobei zusätzliche raum- oder raumzeitvariante Prädiktoren einbezogen werden können. Ein 'Gedächtnis' der Schrittweite 1 wird in diesem Falle für ausreichend gehalten; Versuche ergeben, daß die Verwendung von Variablenwerten weiter zurückliegender Monate keine Verbesserung der Ergebnisse brachte (vgl. auch PETZOLD & STREIT 1980, S.24). Lediglich in niederschlagsarmen Sommern werden die letzten Vorräte der winterlichen Grundwasserspeicherung im September aufgebraucht, d.h., man würde in diesem Falle ein 'längeres' Gedächtnis benötigen.

Die folgenden - mehr grundsätzlichen - Aspekte sind stets zu berücksichtigen (vgl. auch STREIT 1979, S. 64):

- Aus Gründen der Arbeitsökonomie und Handhabbarkeit der Modelle sollen die Variablen leicht bestimmbar sein; die Zahl der Prädiktoren sollte fünf nicht überschreiten.
- Die Regressionsrechnungen werden monatsspezifisch durchgeführt. Aus Vereinfachungsgründen erscheint es sinnvoll, in jedem Monat dieselben Prädiktorvariablen, allerdings mit unterschiedlichen Regressionskoeffizienten, zu benutzen. Dabei muß in Kauf genommen werden, daß vereinzelt (auf dem 10%-Niveau) insignifikante Koeffizienten ermittelt werden.
- Die Rechenergebnisse müssen logisch begründbar sein und dürfen nicht in eklatantem Widerspruch zu hydrologischen Erfahrungen stehen. Dies gilt insbesondere für Vorzeichen der Regressionskoeffizienten und einzubeziehende Variable. Die Verwendung interkorrelierter Prädiktoren ist statistisch gesehen unzulässig, obwohl sie - aus hydrologischer Sicht - gemeinsame Steuervariable des Abflusses sein können (vgl. auch MERKL, G., 1974).
- Die Auswahl und Reihenfolge der Prädiktoren beruht nur zum Teil auf den statistischen Kriterien der schrittweisen multiplen Regression. Vorrangig werden hydrologische Aspekte berücksichtigt. Als Gütekriterium für den Vergleich verschiedener Modelle dient das multiple Bestimmtheitsmaß B .

Natürlich sind z.B. Abfluß, Vormonatsniedrigwasserabfluß und topografische Größen mehr oder minder stark miteinander korreliert. Nach statistischen Kriterien - überprüft durch eine Hauptkomponentenanalyse - dürfte nur einer dieser Prädiktoren zur Schätzung z.B. des Niedrigwasserabflusses benutzt werden, obwohl auch die anderen Variablen einen Beitrag leisten können: In der Praxis wird durch den ersten Prädiktor (Vormonatswert der Zielvariablen oder Niederschlag) meist mehr als 70 % der Varianz

erklärt; weitere 10 - 20 % werden durch die zweite und dritte Prädiktorenvariable erreicht. Lediglich beim Niedrigwasserabfluß erklärt der Vormonatswert weniger als 70 % der Varianz; allerdings sind hier die Prädiktoren schwächer interkorreliert. Der Varianzzuwachs durch weitere Prädiktoren kann bei einer schrittweisen multiplen Regression überwacht werden.

6.11. Mittlere Abflußhöhe

Unter Berücksichtigung aller dieser Punkte lassen sich für die Variable 'Abflußhöhe' verschiedene monatsspezifische Modelle erstellen (für $i=1$ setze $i-1 = 12$):

- Einfachmodell (Prädiktoren: Monatsniederschlag, Meereshöhe):

$$A_i = b0_i + b1_i N_i + b2_i H \quad (30)$$

Tab. 24: Mittlere Abflußhöhe M , Standardabweichung s der Meßpunkte; Regressionskonstanten $b0$, -koeffizienten $b1, b2$; Bestimmtheitsmaße B für Gl. (30):

MONAT	M	s	b0	b1	b2	B
Nov	51,6	19,9	-42,2	1,04	0,005	83
Dez	80,8	29,2	-35,4	1,26	0,012	88
Jan	76,0	28,5	-37,2	1,10	0,018	91
Feb	75,2	26,2	-20,2	1,02	0,028	84
Mrz	62,4	23,9	-27,8	1,24	0,044	92
Apr	54,2	18,8	-26,4	1,03	0,015	78
Mai	31,9	9,6	-23,4	0,80	0,001°	59
Jun	27,5	9,6	-35,3	0,80	-0,017	75
Jul	21,1	12,1	-58,4	0,85	0,024	73
Aug	30,3	12,1	-57,9	0,92	-0,011	76
Sep	28,8	12,1	-48,8	1,01	-0,010	80
Okt	38,6	15,9	-42,7	1,03	-0,018	85

- Autopräzessives Einfachmodell (Prädiktoren: Vormonatsabfluß, Monatsniederschlag):

$$A_i = b0_i + b1_i A_{i-1} + b2_i N_i \quad (31)$$

Tab. 25: Regressionskonstanten $b0$, -koeffizienten $b1, b2$; Bestimmtheitsmaße B für Gl. (31):

MONAT	b0	b1	b2	B
Nov	-16,0	0,76	0,43	87
Dez	-14,4	0,83	0,59	90
Jan	-25,0	0,51	0,61	93
Feb	9,5	0,92	-0,05	93
Mrz	-20,3	0,59	0,62	93
Apr	24,3	1,01	-0,45	93
Mai	-7,4	0,30	0,34	74
Jun	-15,1	0,65	0,26	92
Jul	-29,3	0,98	0,36	89
Aug	-13,0	0,74	0,20	86
Sep	-12,9	0,76	0,23	89
Okt	-16,0	0,93	0,33	97

- Autopräzessives Modell mit vertikaler Komponente (Prädiktoren: Vormonatsabfluß, Monatsniederschlag, Meereshöhe):

$$A_i = b0_i + b1_i A_{i-1} + b2_i N_i + b3_i H \quad (32)$$

Tab. 26: Regressionskonstanten $b0$, -koeffizienten $b1, b2, b3$; Bestimmtheitsmaße B für Gl. (32):

MONAT	b0	b1	b2	b3	B
Nov	0,4	0,89	0,12	0,022	89
Dez	-1,0	0,88	0,30	0,032	91
Jan	-24,6	0,51	0,60	0,002*	93
Feb	13,6	0,90	-0,13	0,014	94
Mrz	-4,0	0,50	0,25	0,046	97
Apr	25,1	0,98	-0,45	0,004	93
Mai	-15,9	0,49	0,42	-0,027	81
Jun	-22,7	0,69	0,39	-0,015	95
Jul	-15,8	0,91	0,19	0,016	92
Aug	-22,8	0,78	0,33	-0,015	88
Sep	-30,1	0,69	0,54	-0,019	92
Okt	-11,5	0,98	0,24	0,006	97

d) Autopräzessives Modell mit toposkepischer Komponente (Prädiktoren: Vormonatsabfluß, Monatssniederschlag, Waldanteil, versiegelter Flächenanteil):

$$A_i = b0_i + b1_i A_{i-1} + b2_i N_i + b3_i WALD + b4_i SIEG \quad (33)$$

Tab. 27: Regressionskonstanten $b0$, -koeffizienten $b1, b2, b3, b4$; Bestimmtheitsmaße B f. Gl.(33):

MONAT	b0	b1	b2	b3	b4	B
Nov	1,3	0,93	0,22	0,06	-1,52	90
Dez	-8,6	0,90	0,36	0,23	0,50	93
Jan	-28,6	0,52	0,60	0,01-	0,70	94
Feb	5,0	0,91	-0,04	0,03	0,79	94
Mrz	-16,2	0,56	0,49	0,15	0,18*	95
Apr	23,2	1,04	-0,47	-0,01-	0,29*	93
Mai	-10,5	0,39	0,26	-0,03	1,18	80
Jun	-18,9	0,64	0,32	-0,05	0,28*	95
Jul	-25,2	0,93	0,27	0,12	0,35	94
Aug	-16,6	0,77	0,24	-0,06	0,13-	88
Sep	-25,3	0,67	0,48	-0,13	-0,02*	95
Okt	-9,4	1,03	0,24	0,01*	-0,60	97

Hinzu kommt für die autopräzessiven Modelle b), c) und d) eine Initialgleichung, um einen Startwert der Abflußhöhe zu berechnen. Hierzu eignet sich das Modell a): Die Abflußhöhe des Monats März ist durch Niederschlag und Meereshöhe hinreichend gut bestimmt und kann daher mit Gleichung (30/Mrz) geschätzt werden; das Bestimmtheitsmaß erreicht 92 %:

$$A_{Mrz} = -27,8 + 1,24 N_{Mrz} + 0,044 H \quad (34)$$

Man kann davon ausgehen, daß Ende Februar der Bodenspeicher gefüllt ist. Im März ist der Abfluß daher eine direkte Funktion des Niederschlags und der höhenabhängigen Verdunstung, wobei potentielle und aktuelle Verdunstung in diesem Zeitraum noch weitgehend identisch sind.

Je nach Fragestellung läßt sich eines der Modelle auswählen, wobei in der Regel zunehmende Variablenzahl ein Anwachsen der erklärten Varianz bedeutet. Alle Modelle zeigen im Mai ein starkes Absinken des Bestimmtheitsmaßes. Ursache ist die - modellmäßig schwer erfassbare - stark wachsende Aktivität der

Vegetation, einhergehend mit hohen Verdunstungsraten und einer Entleerung der Bodenwasservorräte. Die in den Sommermonaten tiefer liegenden Bestimmtheitsmaße des Einfachmodells konnten durch Übergang auf das autopräzessive Modellkonzept auf ein höheres Durchschnittsniveau (in der Regel größer als 80 %) angehoben werden.

Aus den Vorzeichen der Regressionskoeffizienten läßt sich hydrologisch ohnehin Bekanntes schließen:

a) Der monatliche Abfluß wächst mit zunehmendem Niederschlag.

b) Bei erhöhtem Vormonatsabfluß ist ein erhöhter Abfluß zu erwarten: Die raumzeitliche Erhaltsneigung ist beim Abfluß aufgrund der Speicherfähigkeit des Untergrundes besonders stark ausgeprägt.

c) Höhe und Waldanteil zeigen ähnliche Vorzeichen der Regressionskoeffizienten; sie sind im Winter und Frühjahr meist positiv, im Sommer und Herbst meist negativ. Der mit zunehmender Höhe des Fließgebietes wachsende Waldanteil wirkt besonders im Sommerhalbjahr durch die freie Speicherkapazität des Substrats und durch die hohe Transpiration dämpfend auf den Abfluß (vgl. HERRMANN 1977, S.89). STREIT (1973, S. 69 f) kommt zu ähnlichen Ergebnissen, verwendet aber einzelne Niederschlagsereignisse statt monatlicher Mittelwerte. In den Wintermonaten bedingt eine Zunahme der Höhe oder des Waldanteils bei gefüllter Speicherkapazität und eingeschränkter Verdunstung eine Zunahme des Abflusses.

d) Die Variable SIEG weist fast ganzjährig positive Regressionskoeffizienten auf: Eine Erhöhung des Anteils versiegelter Flächen verringert die verdunstungsaktiven Flächen und bewirkt eine schnelle Zuführung des Niederschlags (ggf. per Kanalisation) zum Vorfluter, d.h. erhöhten Abfluß bzw. Direktabfluß.

Vereinzelt auftretende negative Vorzeichen inmitten positiver Regressionskoeffizienten (z.B. Februar und April bei der Variablen 'Niederschlag', vgl. Tab. 25-27) sind schwer interpretierbar. Die Interkorrelation der Prädiktoren kann als Ursache in Frage kommen, möglicherweise aber auch Niederschlag und Speicherung in Form von Schnee; vgl. hierzu 7.3.

6.12. Niedrigwasserabfluß

Die Höhe des Niedrigwasserabflusses ANI kann ebenso wie die mittlere Abflußhöhe A aus den Haupttabellen der Wasserwirtschaftsämter bzw. aus dem Hydrologischen Jahrbuch entnommen werden. Nach WUNDT (1958) stellen die Jahressummen dieses rein grundwasserbür-

tigen Abflußanteils ein Maß für die verfügbaren Grundwassermengen dar. KILLE (1970) stellt eine Häufigkeitsverteilung der monatlichen Niedrigwasserabflüsse auf und zeigt, daß diese Werte - zumindest in den hessischen Mittelgebirgen - teilweise noch Oberflächenwasser enthalten (S.90). Für die vorliegende Arbeit wurde diese Verteilung nicht ermittelt, sondern es wurden die Niedrigwasserabflußdaten der Abflußhaupttabellen benutzt, wie WUNDT (1958) es vorschlägt. Eine eventuelle geringfügige Überschätzung des Grundwasserabflusses wird dabei in Kauf genommen, kann jedoch bei einer Neueichung des Modells berücksichtigt werden.

Erste Versuche der regressionsanalytischen Abschätzung der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflußhöhe zeigten schnell, daß eine Berechnung nur durch exogene Steuergrößen keinen Erfolg hatte: Die erklärte Varianz erreichte bei 5 und mehr Prädiktoren selten mehr als 50 %, wobei die Berechnung in den Sommermonaten besser gelang; vgl. auch die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse in 6.10.. Dies führte zu folgenden zwei (autopräzessiven) Modellen:

a) Autopräzessives Modell (Prädiktoren: Vormonatsniedrigwasserabfluß, Abfluß, Vormonatsabfluß):

$$ANI_i = b_0 + b_1 ANI_{i-1} + b_2 A_i + b_3 A_{i-1} \quad (35)$$

Tab. 28: Mittelwerte M, Standardabweichungen s des Niedrigwasserabflusses der Meßpunkte; Regressionskonstanten b₀, -koeffizienten b₁, b₂, b₃; Bestimmtheitsmaße B für Gl. (35):

MONAT	M	s	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	B
Nov	18,9	6,8	2,0	0,96	0,13	-0,09	92
Dez	26,8	8,1	5,0	1,15	0,15	-0,23	89
Jan	26,6	8,5	1,3	1,11	0,22	-0,26	97
Feb	25,9	8,0	-1,0	0,87	0,19	-0,14	96
Mrz	24,4	8,1	1,5	0,93	0,27	-0,24	94
Apr	22,3	8,4	-1,8	0,93	0,27	-0,21	94
Mai	15,0	6,5	0,6	0,67	0,30	-0,19	95
Jun	10,7	5,6	-0,8	0,89	0,19	-0,22	97
Jul	11,9	5,8	-0,5	1,06	0,34	-0,35	96
Aug	12,4	6,6	-0,8	0,89	0,45	-0,34	94
Sep	11,8	5,8	1,0	0,85	0,43	-0,41	95
Okt	14,1	6,4	1,0	1,12	0,09	-0,13	96

b) Autopräzessives Modell mit toposkepischer Komponente (Prädiktoren: Wie in (35), zusätzlich Waldanteil und versiegelte Fläche):

$$ANI_i = b_0 + b_1 ANI_{i-1} + b_2 A_i + b_3 A_{i-1} + b_4 WALD + b_5 SIEG \quad (36)$$

Regressionskonstanten, -koeffizienten, Bestimmtheitsmaße finden sich in Tab. 29. Eine geeignete Initialgleichung analog zu (34) konnte für den Monat März nicht gefunden werden. Für Mai wurden die Prädiktoren Abfluß, Vormonatsabfluß und potentielle Verdunstung benutzt (B=85%):

$$ANI_{Mai} = -106,8 + 0,88 A_{Mai} - 0,09 A_{Apr} + 1,22 VP_{Mai} \quad (37)$$

Tab. 29: Regressionskonstanten b₀, -koeffizienten b₁, b₂, b₃, b₄, b₅; Bestimmtheitsmaße B für Gl. (36):

MONAT	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	B
Nov	3,3	1,05	0,09	-0,08	0,02	-0,40	93
Dez	2,8	1,17	0,11	-0,20	0,04	0,44	90
Jan	0,1	1,09	0,21	-0,25	0,01	0,31	97
Feb	0,5	0,88	0,21	-0,15	-0,03	-0,36	97
Mrz	2,1	0,81	0,43	-0,31	-0,07	0,22	97
Apr	-4,9	1,00	0,23	-0,23	0,08	0,61	96
Mai	0,7	0,59	0,32	-0,13	-0,05	-0,06	97
Jun	-0,9	0,88	0,19	-0,22	-0,01 ^o	0,02-	97
Jul	0,1	1,07	0,34	-0,36	-0,15	-0,15	96
Aug	-2,5	0,91	0,46	-0,39	0,03	0,38	95
Sep	1,3	0,94	0,51	-0,53	0,01	-0,15	96
Okt	2,3	1,10	0,13	-0,16	-0,03	-0,18	97

Aus beiden Modellen läßt sich schließen:

- a) Aufgrund der zeitlichen Erhaltensneigung hydrologischer Prozesse ist der Niedrigwasserabfluß direkt proportional zu seinem Vormonatswert.
- b) Mit wachsender Abflußmenge steigt die Niedrigwasserabflußmenge desselben Monats.
- c) Aufgrund der Regressionskoeffizienten ist nach erhöhtem Vormonatsabfluß verminderter Niedrigwasserabfluß (und umgekehrt) zu erwarten. Eine Interpretation dieser Erscheinung ist problematisch; die Ursache könnte in der - statistisch gesehen unzulässigen - Interkorrelation der Prädiktoren (ANI_{i-1}, A_i, A_{i-1}) liegen.
- d) Aufgrund der von Monat zu Monat wechselnden Vorzeichen der Regressionskoeffizienten ergibt sich kein einheitliches Bild für den Einfluß der Variablen WALD und STEG auf den Niedrigwasserabfluß. Selbst eine vorsichtige Interpretation könnte zu Fehlschlüssen führen. Wahrscheinlich trägt der dem Datensatz innenwohnende räumliche Trend zu derartigen Problemen bei.

6.13. Direktabfluß

Geht man davon aus, daß der grundwasserbürtige Niedrigwasserabfluß Teil des Gesamtabflusses ist, so läßt sich die Differenz: Abfluß - Niedrigwasserabfluß als Direktabfluß (= Oberflächenabfluß + Interflow) interpretieren. Seine Berechnung erfolgt im weiteren Verlauf der Arbeit durch Bildung der Differenz (AOB = A - ANI). Trotzdem soll versucht werden, den Direktabfluß per Regression zu schätzen. Analog zu den beiden vorangegangenen Kapiteln lassen sich folgende Modelle erstellen:

a) Einfachmodell (Prädiktoren: Abfluß, potentielle Verdunstung):

$$AOB_i = b0_i + b1_i A_i + b2_i VP_i \quad (38)$$

Tab. 30: Mittelwerte M , Standardabweichungen s des Direktabflusses der Meßpunkte; Regressionskonstanten $b0$, -koeffizienten $b1, b2$; Bestimmtheitsmaße B für Gl. (38):

MONAT	M	s	b0	b1	b2	B
Nov	32,8	16,9	6,0	0,75	-0,69	90
Dez	54,0	25,9	-4,5	0,78	-0,98	93
Jan	49,5	26,4	-7,0	0,78	-1,91	92
Feb	49,3	23,4	-0,2	0,72	-1,70	92
Mrz	37,9	20,9	49,6	0,56	-2,33	91
Apr	31,9	15,6	116,9	0,40	-2,41	86
Mai	17,0	6,6	134,1	0,21	-1,53	85
Jun	16,8	7,2	98,8	0,42	-0,90	81
Jul	20,2	9,6	107,4	0,50	-0,89	84
Aug	17,8	8,5	98,8	0,45	-0,92	82
Sep	17,0	8,7	68,8	0,57	-0,95	84
Okt	24,5	12,9	82,9	0,63	-2,01	89

b) Autopräzessives Einfachmodell (Prädiktoren: Vormonatsdirektabfluß, Abfluß):

$$AOB_i = b0_i + b1_i AOB_{i-1} + b2_i A_i \quad (39)$$

Tab. 31: Regressionskonstanten $b0$, -koeffizienten $b1, b2$; Bestimmtheitsmaße B für Gl. (39):

MONAT	b0	b1	b2	B
Nov	-5,8	0,45	0,53	91
Dez	-10,3	0,56	0,57	96
Jan	-12,1	0,58	0,40	96
Feb	-3,8	0,54	0,35	97
Mrz	-10,4	0,54	0,35	96
Apr	-0,9	0,54	0,23	95
Mai	-0,4	0,30	0,24	90
Jun	-2,8	0,70	0,28	89
Jul	-2,2	1,10	0,12	92
Aug	-1,1	0,59	0,23	91
Sep	-2,3	0,70	0,24	94
Dkt	-1,8	1,06	0,21	93

c) Ein autopräzessives Modell nach Gl. (39), jedoch mit toposkepischer Komponente, brachte keinen Gewinn an erklärter Varianz; die Vorzeichen der Regressionskoeffizienten waren hydrologisch nicht immer sinnvoll zu interpretieren.

d) Als Initialgleichung für das autopräzessive Modell läßt sich Gl. (38), März, verwenden ($B=91\%$):

$$AOB_{Mrz} = 49,6 + 0,56 A_{Mrz} - 2,33 VP_{Mrz} \quad (40)$$

Während eine Analyse der Residuen beim Mittleren Abfluß und beim Niedrigwasserabfluß weder zeitliche noch räumliche Auffälligkeiten zeigte, verhält sich die Variable AOB anders. Mit beiden Modellen werden in allen Monaten zu hohe Werte des Direktabflusses geschätzt. Dies gilt insbesondere für den Beispielpegel Eigen und benachbarte Einzugsgebiete im Raum Mettmann. Auch bei den restlichen Pegeln finden sich systematische Abweichungen. Der Anteil stark geneigter Flächen in den Einzugsgebieten wird

mit Sicherheit einen Einfluß auf den Direktabfluß haben, ebenso aber auch die Vegetationsverhältnisse, die im Einzugsgebiet vorkommenden Böden und nicht zuletzt das anstehende Gestein. Der derzeit vorhandene Datensatz gestattet es jedoch - wegen des gemeinsamen räumlichen Trends aller Variablen - nicht, den Einfluß der verschiedenen Variablen zu quantifizieren, zumal pedologisch-geologische Daten nur in wenig brauchbarer Form (rang-, nominalskaliert) vorliegen. STREIT (1979, S.54) betont die Schwierigkeiten bei der quantitativen Erfassung derartiger Daten und verwendet - auch aufgrund der kleinmaßstäbigen geologisch-pedologischen Karten - nur rangskalierte Bodenkenngroßen. Eine Verbesserung der Datenbasis ist durch die EDV-gestützte Aufbereitung der Daten aus der Reichsbodenschätzung zu erwarten (HEINEKE 1981). Die Vorzeichen der Regressionskoeffizienten entsprechen bei der Schätzung des Direktabflusses hydrologischen Erfahrungen:

- Der Direktabfluß steigt mit wachsendem Vormonatswert (im langjährigen Mittel).
- Der Direktabfluß steigt mit wachsendem Abfluß.
- Der Direktabfluß ist indirekt proportional zur potentiellen Verdunstung.

6.14. Zusammenwirken der Einzelmodelle

Mit den in Kap. 6. vorgestellten einfach strukturierten Verfahren lassen sich räumliche Datenlücken schließen. Die an Meßstellen geeichten Berechnungsverfahren arbeiten auf der Basis allgemein verfügbarer Daten und benutzen sowohl exogene Steuergroßen als auch die endogene Erhaltensneigung der Zielgröße selbst zur räumlichen Prognose. Dies bedeutet zunächst die Übertragung von Informationen eines Meßpunktes auf beliebige andere Punkte, darüberhinaus aber auch die Zuordnung der punktuellen Information auf eine umgebende Fläche. Konkret heißt das: Wie ordne ich den an einer Station gemessenen Niederschlagswert als Gebietswert der Umgebung zu? Bei Quadratrasterflächen von 1 ha dürfte eine derartige Zuordnung (Extrapolation von einem Punkt auf eine Fläche) zu repräsentativen Flächenmittelwerten führen.

Der weitere Verfahrensgang ist folgender: Das Informationssystem stellt für den Untersuchungsraum flächendeckend auf der Basis quadratischer Rasterzellen von 1 ha die Ausgangsdaten Höhe, Rechtswert und Hochwert (H, RW, HW) bereit. Wird zur Niederschlagsberechnung das Quadrantenverfahren benutzt, so müssen zusätzliche Niederschlagswerte der Stationen zur Verfügung stehen. Die mit den vorge-

stellten Berechnungsverfahren aufbereiteten Variablen Niederschlag, Lufttemperatur, Sättigungsdampfdruck, Partialdruck, Sättigungsdefizit, relative Luftfeuchte und potentielle Verdunstung können nun matrixweise (20 x 20 Rasterflächen je Grundkartenblatt) Variable für Variable in der Datenbank des 'Landschaftsökologischen Informationssystems LÖKIS' abgelegt werden (zur Datenspeicherung vgl. DURWEN & GENKINGER 1979, S.14 f). Die zeitzvarianten Größen wie Niederschlag, Lufttemperatur etc. werden durch ihre mittleren Monatswerte dargestellt und sind daher als 12 Einzelvariable aufzufassen.

Die in 6.10. bis 6.15. behandelten Variablen Abfluß, Niedrigwasserabfluß und Direktabfluß beziehen sich nicht auf Meßpunkte, sondern auf das gesamte Fließeinzugsgebiet. Um diese Größen dennoch auf kleine (relativ homogen ausgestattete) Flächen von 1 ha herunterrechnen zu können, wurden als Datenbasis möglichst kleine - und damit noch relativ homogene - Fließgebiete gewählt. Auch diese Daten werden der Datenbank zugeführt.

Dank der modularen Technik können bei Vorliegen verbesserter Berechnungsverfahren einzelne Komponenten ausgetauscht werden. Dies gilt auch für die monatsspezifischen Regressionsmodelle, d.h., man kann vom Prinzip: 'Dieselben Prädiktorvariablen für alle Monate' durchaus abgehen und stattdessen die (statistisch) besten Prädiktoren benutzen. Die Verfahren zur Bilanzierung und Simulation des Wasserdargebotes in seiner raumzeitlichen Verteilung werden zunächst auf der Basis von Fließgebieten erprobt, um anschließend an einzelnen Rasterflächen angewandt zu werden. Ein Beispiel findet sich im Anhang.

7. Wasserdargebot: Bilanzierung und Simulation

Während die Erfassung des oberirdischen Wasserdargebotes - d.h. in der Regel der Abfluß in Vorflutern - meßtechnisch und rechnerisch relativ einfach in den Griff zu bekommen ist, kann das unterirdische Wasserdargebot meist nur unter Hinzuziehung von Hilfsgrößen und/oder mit erhöhtem technischen Aufwand mengenmäßig bestimmt werden. Dies wiegt umso schwerer, als das Oberflächenwasser aufgrund von Reinheitsansprüchen für die Versorgung von Haushalten und Industrie weniger geeignet ist als das qualitativ hochwertigere Grundwasser. Unter Wasserdargebot ist in dieser Arbeit immer das Wassermengendargebot zu verstehen; Wassergüteparameter sollen hier - auch aufgrund der schlechten Datenbasis - nicht betrachtet werden.

Zur quantitativen Erfassung des Grundwasserdargebotes oder einzelner Komponenten eignen sich verschiedene Verfahren. JOSOPAIT (1980) und ARMBRUSTER (o.J.) geben einen Überblick; beide fordern, daß möglichst zwei oder mehr Verfahren parallel eingesetzt werden, um eine gegenseitige Kontrolle zu ermöglichen. Eine ausführliche Darstellung bereits angewandter Berechnungsmethoden gibt der ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG (1977). LIMPRICH (1970) vergleicht die bei der Erstellung von Wasserwirtschaftlichen Rahmenplänen eingesetzten Verfahren zur Bestimmung des unter- und oberirdischen Wasserdargebotes; er stellt fest, daß viele hydrologisch-deterministische Modelle für einen Einsatz in der Planungspraxis nicht handhabbar genug sind (S.73).

Ein Teil der Verfahren arbeitet mit Einzelereignissen von Niederschlag und Abfluß, um anschließend den Trockenwetterabfluß vom Gesamtabfluß zu trennen. Der Trockenwetterabfluß kann als reiner Grundwasserabfluß angesehen werden (vgl. NATERMANN 1958; LILlich 1970; ALTMANN & BONZ 1971). WUNDT (1958) bzw. KILLE (1970) benutzen monatliche Daten zur Ermittlung des monatlichen Niedrigwasserabflusses. Andere Verfahren versuchen, unter Berücksichtigung von Bodenart und Vegetation aus Lysimeterdaten und Bodenfeuchtemessungen auf die Grundwasserneubildung zu schließen (u.a. ARMBRUSTER & BIRKENBERGER 1972; JOSOPAIT & LILlich 1975; RENGER & STREBEL 1980a), wobei auch kapillarer Aufstieg und Beregnungsbedarf landwirtschaftlicher Kulturen von Interesse sind (RENGER & STREBEL 1980b). Die Erstellung klimatischer Wasserbilanzen mit Hilfe o.g. Daten wird in der vorliegenden Arbeit in Kap. 7.1. behandelt. Dieses Verfahren wird in der Literatur häufig vorgestellt, jedoch selten einem Vergleich mit anderen Verfahren unterzogen.

Die auf spezielle Daten oder Techniken angewiesenen Verfahren zur Abschätzung von Grundwasserneubildung und verfügbarem Grundwasserdargebot, wie Tracermethoden, Pumpversuche, Wasserwerksbeobachtungen oder mit Aquiferdaten arbeitende Grundwassermodelle, sollen hier ausgeklammert bleiben. Auch komplexe Modelle zur Untersuchung des Wasserhaushaltes wie etwa das USDAHL-Modell (PREUSS 1978 a, b) oder das Abfluß- und Sedimenttransportmodell von GUPTA & SOLOMON (1977) kommen wegen der Vielzahl nicht allgemein verfügbarer Eingangsparameter nicht in Betracht. Interessanter seien auf die einschlägigen Lehrbücher und die Zusammenstellung des ARBEITSKREISES GRUNDWASSERNEUBILDUNG (1977) verwiesen.

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung der Grundwasserneubildung basiert auf der Wasserhaushaltbilanz von Fließgebieten. Die einzelnen Wasserhaushaltkomponenten Niederschlag, Abfluß, Niedrigwasserabfluß und Direktabfluß lassen sich gut erfassen; Schwierigkeiten ergeben sich bei der Bestimmung des unterirdischen Grundwasserabstromes aus Einzugsgebieten (DORBAUM & LILlich 1969). SCHEKORR (1972) erstellt Gebietswasserbilanzen für norddeutsche Fließgebiete, berücksichtigt allerdings nicht die saisonale Variabilität des Wasserdargebotes, sondern nur Halbjahres- und Jahreswerte.

In den folgenden Kapiteln werden verschiedene - z.T. bereits erprobte - Möglichkeiten zur Bilanzierung des Wasserdargebotes vorgestellt und verglichen. Diese Verfahren sollen die saisonale Variabilität des ober- und unterirdischen Wasserdargebotes einschließlich ihrer Minima und Maxima erfassen und Möglichkeiten zum Durchspielen alternativer Planungsvorhaben bieten (alternativ ist hier nicht politisch zu verstehen). Darüberhinaus erscheint es wichtig, hydrologische Aussagen nicht nur für Fließgebiete, sondern auch für anderweitig abzugrenzende Gebiete treffen zu können.

7.1. Klimatische Wasserbilanz

Durch die klimatische Wasserbilanz lassen sich aktuelle Verdunstung VA, Grundwasserneubildung GW und Bodenfeuchtevorrat SP berechnen. Stellvertretend seien hier die Varianten nach RENGER, STREBEL & GIESEL (1974), THORNTHWAITE (1959) bzw. MATHER (1978) und PFAU (1966) genannt. PETZOLD (1981b) vergleicht diese Verfahren und stellt fest, daß sie nur unter extremen Witterungsbedingungen wie langandauernden sommerlichen Trockenperioden stark von einander abweichende Ergebnisse zeigen. Mit diesen

Verfahren werden für Punkte (meist Klimastationen oder Versuchsflächen) die klimatischen Wasserbilanzen für Tage (STREIT 1975a, S.29), Dekaden (JOSOPAIT 1980, S.8) oder Monate (UHLIG 1959) ermittelt. Eine Überprüfung der Verfahren an kleinen Fließgebieten ist - nach Kenntnis des Verfassers - bisher nicht erfolgt. Für die 30 o.g. Fließgebiete war eine Kontrolle der Input-Output-Bilanz anhand der vorliegenden Abflußdaten möglich. Da die nutzbare Feldkapazität dieser Einzugsgebiete nicht bekannt ist, wird für alle Gebiete in vier Rechenläufen eine NFK von 50, 100, 150 und 200 mm simuliert. Das THORNTWAITE/MATHER'sche Verfahren gelangt zur Anwendung, da es nur die Temperaturdaten benötigt, und wird im folgenden kurz beschrieben:

Die aktuelle ist gleich der potentiellen Monatsverdunstung, wenn der Niederschlag größer oder gleich der potentiellen Verdunstung ist:

$$VA_i = VP_i, \text{ wenn: } DIF = N_i - VP_i \leq 0 \quad (41)$$

Ist der Restverdunstungsanspruch DIF kleiner als Null (also $N < VP$), so wird der Bodenfeuchtevorrat angegriffen. MATHER (1978, S.12) nimmt eine nicht-lineare Entleerung des Bodenspeichers an. SP_{i-1} sei der aktuelle Wassergehalt des Bodenspeichers zu Beginn des Betrachtungszeitraumes; am Ende des Zeitraumes wird nach (42) der Wassergehalt SP_i erreicht; die aktuelle Verdunstung VA_i dieses Zeitraumes bestimmt sich aus (43):

$$SP_i = SP_{i-1} + DIF * SP_{i-1} / NFK \quad (42)$$

$$VA_i = N_i - DIF * SP_{i-1} / NFK \quad (43)$$

Grundwasserneubildung findet erst dann statt, wenn a) der Niederschlag größer als die potentielle Verdunstung ist, und b) der Bodenspeicher auf NFK aufgefüllt ist:

$$GW_i = N_i - VP_i, \text{ wenn: } N_i > VP_i \text{ und: } SP_i = NFK \quad (44)$$

Dies bedeutet, daß Grundwasserneubildung in den Sommermonaten kaum möglich ist, da der Niederschlag meist niedriger als die potentielle Verdunstung ist und - nach Gl. (41) - vorrangig der potentiellen Verdunstung zur Verfügung steht. Daraus resultiert eine hohe aktuelle Verdunstung; ihre Jahressumme erreicht in fast allen Einzugsgebieten die Höhe der potentiellen Verdunstung und überschreitet damit die Differenz: Jahresniederschlag - Jahresabfluß, obwohl diese - nach der Wasserhaushaltsbilanz für Fließgebiete (vgl. 6.9.) - ein Maß für die aktuelle Verdunstung ist, da mit langjährigen Mittelwerten gearbeitet wird.

Ein Vergleich der berechneten Jahressumme der Grundwasserneubildung mit der Jahressumme des Niedrigwasserabflusses sollte ähnliche Werte ergeben, da dieser nach WUNDT (1958) bzw. KILLE (1970) ein Maß für die verfügbaren Grundwassermengen ist. Bei den Mittelgebirgspegeln - besonders im stärker reliefierten Bereich - treten erhebliche Abweichungen auf; die Grundwasserneubildung nach der klimatischen Wasserbilanz erreicht wesentlich höhere Werte als der Niedrigwasserabfluß. Zwar findet sich in der Literatur verschiedentlich der Hinweis, das Verfahren der klimatischen Wasserbilanz könne im Flachland angewandt werden, inwieweit jedoch Variationen in der Hangneigung zulässig sind, wird nicht mitgeteilt. Im Gegensatz zu den Einzugsgebieten der Mittelgebirge nehmen Grundwasserneubildung (nach der klimatischen Wasserbilanz) und Niedrigwasserabfluß bei Pegeln im Flachland teilweise Werte gleicher Größenordnung an. In diesen Einzugsgebieten wirkt sich auch die Annahme unterschiedlicher nutzbarer Feldkapazitäten auf die berechnete Grundwasserneubildung aus: Mit abnehmender NFK steigt die Grundwasserneubildung, während die berechnete aktuelle Verdunstung abnimmt. Bei welcher NFK eine optimale Übereinstimmung herrscht, läßt sich zur Zeit noch nicht abschließend klären, da für statistisch gesicherte Aussagen die Stichprobe der verfügbaren Flachlandpegel zu klein ist.

Aus diesen Beobachtungen folgt:

a) Hohe Reliefenergie in Mittelgebirgen bedeutet mehr versickerungshemmendes Festgestein und mehr direktabflußfördernde geneigte Flächen. Das Verfahren der klimatischen Wasserbilanz vermag jedoch nicht zu trennen zwischen grundwasserbürtigem Abfluß und Direktabfluß; vielmehr wird das von der Verdunstung nicht benötigte Wasser als Versickerung bzw. Grundwasserneubildung angesehen. Die klimatische Wasserbilanz scheint sich daher nur für Fließgebiete des Flachlands mit Lockermaterialien im Untergrund zu eignen, wobei auf eine Trennung von Grundwasserneubildung und Direktabfluß verzichtet werden muß.

Die klimatische Wasserbilanz geht von einer Gleichverteilung des Niederschlags und der potentiellen Verdunstung während des Untersuchungszeitraumes aus (vgl. PETZOLD 1981b). Dadurch entsteht in den Sommermonaten ein Wasserdefizit; die aktuelle Verdunstung ist geringer als die potentielle. Folgendes (realitätsnahe) Beispiel mag den Gedankengang erläutern:

Im August fallen 100 mm Niederschlag an 5 aufeinanderfolgenden Tagen, d.h. 20 mm/Tag. Die potentielle Verdunstung (nach THORNTWAITE) erreicht 120

mm/Monat oder 4 mm/Tag. Nach der klimatischen Wasserbilanz entsteht ein Defizit von 20 mm/Monat, und die aktuelle Verdunstung wird 108 mm/Monat (bei 40 % Füllung der NFK) erreichen. Tatsächlich werden von den 100 mm Niederschlag nur etwa 10 mm verdunsten, da an den 5 Niederschlagstagen die potentielle Verdunstung gemindert wird durch Wolkendecke und Absinken von Strahlung, Lufttemperatur und Sättigungsdefizit. Der Rest füllt den Bodenspeicher und reichert ggf. das Grundwasser an. Bei einer nutzbaren Feldkapazität von 100 mm und einem Füllungsgrad von 40 % dienen zunächst 60 mm der Wiederauffüllung; die restlichen 30 mm gehen ins Grundwasser. Der Direktabfluß ist bei diesem Verfahren nicht berücksichtigt; ein großer Teil der als Grundwasserneubildung angesehenen Menge wird daher gar nicht versickern, sondern als Interflow abfließen. Die aktuelle Verdunstung wird bei diesem Verfahren überschätzt.

Die Grundwasserneubildung wird bei der klimatischen Wasserbilanz in den Sommermonaten als Null ermittelt, da die potentielle Verdunstung größer als der Niederschlag ist, und dieser somit vollständig verdunstet. Lysimeteruntersuchungen zeigen jedoch auch in den Sommermonaten noch geringe Sickerwassermengen in der Größenordnung von 0,1 % des Niederschlags (SCHIFF 1979, S.203). Auch WEYER (1972, S.44) hält es für möglich, daß während des Sommers nach längeren Niederschlagsperioden Niederschlag ins Grundwasser gelangt. Die Menge der Grundwasserneubildung und des Trockenwetterabflusses ist nach seiner Ansicht eine Funktion des Substrats und nicht der Vegetation; diese bestimmt lediglich den jahreszeitlichen Verlauf.

Aus diesen Überlegungen folgt:

b) Die klimatische Wasserbilanz berücksichtigt nicht die unterschiedliche Verteilung von Niederschlag und potentieller Verdunstung (und anderen klimatologischen Einflußgrößen: T, E, D, SD, RF) im Untersuchungszeitraum. Daraus ergeben sich zu hohe aktuelle Verdunstungswerte und zu niedrige Versickerungsrationen, von der fehlenden Berücksichtigung des Direktabflusses ganz abgesehen. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, daß die potentielle Verdunstung nach THORNTHWAITE möglicherweise schon zu hoch berechnet wird.

Aus den genannten Gründen erscheint das Verfahren der klimatischen Wasserbilanz fehlerbehaftet. Lediglich unter besonderen Randbedingungen läßt es sich einsetzen:

- Es werden Tageswerte der klimatologischen Größen benutzt;
- Der Untersuchungsraum besteht aus Lockermaterial.

ten und ist eben, so daß das nicht verdunstende Wasser vollständig versickern kann;

- Oberflächenabfluß wird nicht angenommen;
- Eine Trennung von Interflow und Tiefenversickerung (Grundwasserneubildung) ist nicht erforderlich.

Diese Randbedingungen entsprechen jedoch nicht den eingangs gestellten Forderungen (Monatswerte; universal einsetzbar). Ein Einsatz der klimatischen Wasserbilanz zur Abschätzung der Grundwasserneubildung erscheint - ohne Modifizierung des Verfahrens - nicht sinnvoll.

7.2. Wasserhaushaltsbilanzen

Wasserhaushaltsbilanzen für Fließgebiete wurden bereits in Kap. 6.9. vorgestellt. In diesem Kapitel (7.2.) soll untersucht werden, ob eine Übertragbarkeit des Verfahrens (oder von Komponenten) auf anderweitig abzugrenzende Gebiete möglich ist. Der bei der Wasserhaushaltsbilanz von Fließgebieten benutzte Verdunstungsschlüssel (vgl. 6.9.) läßt sich nach STRÄSSER (1979, S.16) zur Ermittlung des Bodenwasserhaushaltes beliebiger Punkte anwenden; Gl. (1a) bleibt unberührt. STRÄSSER benutzt dieses Verfahren im Raum Mettmann. Da Abflußwerte nicht vorliegen, wird die aktuelle Jahresverdunstung VTU nach TURC (siehe Gl. 23) berechnet und mit einem Faktor korrigiert:

$$VJ = VTU * VJF / VTF \quad (45)$$

Der Korrekturfaktor ist der Quotient VJF/VTF und berechnet sich aus der Jahresverdunstung eines benachbarten Fließgebietes (Niederschlag - Abfluß) VJF und der nach TURC berechneten Verdunstung VTF für diese Gebiet.

Die korrigierte Jahresverdunstung VJ wird mit dem Verdunstungsschlüssel nach FRIEDRICH (vgl. 6.9.; andere Schlüssel sind möglich) auf die 12 Monate aufgespalten (Zeile 2 in Tab. 32). Positive Differenzen zwischen monatlichem Niederschlag und Verdunstung können versickern oder oberflächlich abfließen (Zeile 4), negative Werte in Zeile 4 entleeren den Bodenspeicher im Wurzelraum (Zeile 5), hier mit 200 mm angenommen. Zeile 6 gibt den für den Direktabfluß und für die Grundwasseranreicherung zur Verfügung stehenden Rest an.

Dieses Verfahren ist insofern ausgeglichen, als die Summe von Zeile 2 und 6 ('Rest') nicht den Jahresniederschlag übersteigt (wie bei der klimatischen Wasserbilanz). Jedoch befriedigt die fehlende Trennung von Versickerung und Direktabfluß nicht.

Tab. 32: Bodenwasserbilanz (nach STRÄSSER 1979, S.16) für den Raum Eigen / Kreis Mettmann; zum Vergleich: Abfluß des Pegels Eigen:

MONAT:	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	SUMME
1 VK (%)	2	1	1	2	5	8	16	17	17	15	11	5	100
2 VF	9	4	4	9	21	34	68	73	73	64	47	21	427
3 N	93	91	99	87	62	75	76	92	102	104	83	88	1052
4 N - VF	84	87	95	78	41	41	8	19	29	40	36	67	625
5 SP	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	625
6 Rest	84	87	95	78	41	41	8	19	29	40	36	67	625
7 A (gemessen)	59	83	74	74	61	48	34	34	42	35	34	47	625

Tab. 33: Wasserdargebot: Bilanzmodell für den Pegel Eigen. A und ANI wurden per Regression geschätzt (Gl. 30 und 34):

MONAT:	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	SUMME	MIN	MAX
1 VK (%)	2	1	1	2	5	8	16	17	17	15	11	5	100	1	17
2 N	93	91	99	87	62	75	76	92	102	104	83	88	1052	62	104
3 AOB	30	52	44	44	28	22	9	11	16	14	14	22	306	9	52
4 NAOB	63	39	55	43	34	53	67	81	86	90	69	66	746	34	90
5 VF	9	4	4	9	22	35	69	74	74	65	48	22	433	4	74
6 RNAV	54	35	51	34	12	18	-2	7	12	25	21	44	311	-2	54
7 SP	200	200	200	200	200	200	198	200	200	200	200	200	198	200	
8 PSP (%)	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	99	100	
9 DSP	0	0	0	0	0	0	-2	2	0	0	0	0	2a	-2	2
10 GW	54	35	51	34	12	18	0	5	12	25	21	44	311	0	54
11 ANI	27	35	36	34	29	26	24	19	21	21	19	22	313	19	36
12 GS	27	0	15	0	-17	-8	-24	-14	-9	4	2	22	70a	-24	27
13 TS	27	27	42	42	25	17	-7	-21	-30	-26	-24	-2	-30	42	
14 TSA	57	57	72	72	55	47	23	9	0	4	6	28	0	72	
15 TSR (%)	79	79	100	100	76	65	31	12	0	5	8	38	0	100	
16 A	57	87	80	78	57	48	33	30	37	35	33	44	619	30	87

Rundungsfehler sind möglich; a = Summe der positiven Werte.

7.3. Bilanzmodell zur Ermittlung des Wasserdargebots

Das in 7.2. dargestellte Verfahren der Bodenwasserbilanz liefert bereits brauchbare Ergebnisse, ist jedoch verbesserungsfähig hinsichtlich Direktabfluß, Grundwasserneubildung und -verfügbarkeit. Aktuelle Verdunstung, Wasservorrat im Boden (Füllung der NFK) und Restbetrag für Versickerung und Oberflächenabfluß lassen sich ermitteln, es fehlt jedoch eine genaue Trennung der einzelnen Abflußkomponenten und Angaben zu den nutzbaren Grundwassermengen. Ein verbessertes Bilanzmodell soll zunächst an Flüßgebieten geeicht und dann auf andere Flächen übertragen werden; hier gelten die Einschränkungen, wie sie in Kap. 5.1. erläutert wurden. Ausgangsbasis ist wiederum die Wasserhaushaltsbilanz eines Einzugsgebietes, d.h., Niederschlag, Abfluß und Jahresverdunstung stehen zur Verfügung (vgl. Kap. 6.9.). Zusätzlich wird der Niedrigwasserabfluß ANI und der Direktabfluß AOB (AOB = A - ANI) berücksichtigt. Folgende vereinfachende Annahmen werden gemacht:

- Der Niedrigwasserabfluß ist ein rein grundwasserbürtiger Abfluß (vgl. WUNDT 1958). Die nach KILLE (1972) noch vorhandenen Reste von Oberflächenwasser können hier nicht berücksichtigt werden, da KILLE leider kein handhabbares Verfahren vorschlägt, um die hier benutzten langjährigen Monatsmittelwerte entsprechend zu reduzieren.

- Der Direktabfluß enthält den Oberflächen- und den oberflächennahen Abfluß und entstammt den Niederschlägen des jeweiligen Monats.

Der weitere Gedankengang sieht wie folgt aus:

Der für den Direktabfluß (AOB, Zeile 3 in Tab. 33) nicht benötigte Niederschlagsrest (NAOB, Zeile 4) steht für die Verdunstung (VF, Zeile 5) bereit (genommen finden Direktabfluß und Verdunstung gleichzeitig statt; ein Computerprogramm kann jedoch die Berechnungen nur nacheinander ausführen). Sollte der Niederschlagsrest niedriger als die Verdunstung sein, so wird der Verdunstungsrestanspruch (negative Werte RNAV, Zeile 6) aus der Bodenfeuchte (SP, Zeile 7) gedeckt. Die maximal speicherbare, pflanzenverfügbare Wassermenge ist gleich der nutzbaren Feldkapazität NFK im Wurzelraum (ca. 1 m). Entleerung (negative Werte DSP, Zeile 9) und Wiederauffüllung (positive Werte) des Bodenspeichers werden als linear angenommen. Auch RENGER et al. (1974) nehmen bei einem Füllungsgrad von mehr als 70 % der NFK eine lineare Abnahme des Bodenwassergehaltes an. Zeile 8 gibt den Füllungsgrad des Bodenspeichers (PSP) in % der NFK an.

Sollte nach Abzug von Direktabfluß, Verdunstung und ggf. Wiederauffüllung des Wurzelraumspeichers auf NFK noch ein Rest des Niederschlags verbleiben,

kann dieser als Grundwasserneubildung (positive Werte GW, Zeile 10) angesehen werden. Allerdings ist diese neugebildete Grundwassermenge aufzurechnen gegen den grundwasserbürtigen Niedrigwasserabfluß (ANI, Zeile 11), wobei hier nicht geklärt werden kann und soll, wie lang die durchschnittliche Verweilzeit dieser Wassermengen im Grundwasserspeicher ist. Der monatliche Grundwasserrestbetrag GS findet sich in Zeile 12; die Zeilen 13 und 14 geben den jeweiligen Wassergehalt des Tiefenspeichers an, wobei in Zeile 14 eine Translation der Werte ins Positive (TSA) vorgenommen wurde. Die Amplitude dieser Variablen entspricht der jahreszeitlichen Schwankung des Grundwasserspiegels, wobei eine Eichung (etwa in dm unter Geländeoberfläche) z.Zt. noch nicht möglich ist. Zeile 15 (TSR) gibt den Füllungsgrad des Tiefenspeichers in % an. Die monatlichen Abflußhöhen A sind zu Vergleichszwecken in Zeile 16 aufgelistet.

Mit diesem Verfahren lässt sich für Fließgebiete ein mittlerer Jahrestag des Wasserdargebotes darstellen. Als Eingangsdaten dienen lediglich Niederschlag, Abfluß, Niedrigwasserabfluß und nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum (alle Größen in mm; Zeittakt: Monatswerte). In den Testrechnungen wurde eine fiktive (aber nicht realitätsferne) NFK von 200 mm angenommen, da tatsächliche Werte nicht vorlagen.

Eine Speicherung des Niederschlags in Form von Eis und Schnee - und somit eine zeitliche Verzögerung in der Input-Output-Relation - ist möglich, wird in dieser Arbeit jedoch als minimal bzw. schwer fassbar angesehen. Eine Analyse von Niederschlags- und Schneedaten (1960 - 1979) ergab für die Beobachtungsstation Arnsberg (218 m Meereshöhe) im nördlichen Bereich des rechtsrheinischen Schiefergebirges:

Langandauernde höhere Schneedecken (länger als 21 Tage und mehr als 10 cm Schneehöhe) werden nur äußerst selten erreicht; nur in diesen Fällen ist eine Speicherung des Schnees bzw. Niederschlags bis in den Folgemonat hinein wahrscheinlich. Dies war in Arnsberg in diesen 20 Jahren nur zweimal der Fall. Schneedecken von max. 10 cm tauen in der Regel im Verlauf desselben Monats wieder. In Arnsberg wurde für die fünf Monate: November bis März eine mittlere Schneedeckendauer (> 0 cm Schneehöhe) von 2/8/11/11/6 Tagen ermittelt. Dies erscheint für eine Übertragung in den nächsten Monat nicht ausreichend. Lediglich in höheren Lagen scheint eine langerdauernde Schneekumulation möglich, allerdings liegen hier nicht ausreichend Daten vor.

Die zur Erstellung obiger Wasserbilanz durchzuführenden Rechenoperationen werden nachfolgend in EDV-technisch günstiger Schreibweise dargestellt (für $i = 1$ setze $i-1 = 12$):

$$AOB_i = A_i - ANI_i \quad \text{Direktabfluß} \quad (46)$$

$$VJ = \sum_{i=1}^{12} N_i - \sum_{i=1}^{12} A_i \quad \text{Jahresverdunstung} \quad (47)$$

$$VF_i = VK_i * VJ \quad \text{Monatsverdunstung} \quad (48)$$

$$NAOB_i = N_i - AOB_i \quad \text{Restniederschlag} \quad (49)$$

$$RNAV_i = NAOB_i - VF_i \quad \text{Nied.überschuß/-defizit} \quad (50)$$

$$SP_i = SP_{i-1} + RNAV_i \quad (0 \leq SP_i \leq NFK) \quad \text{Bodenfeuchte} \quad (51)$$

$$PSP_i = 100 SP_i / NFK \quad \text{Füllungsgrad der NFK} \quad (52)$$

$$DSP_i = SP_i - SP_{i-1} \quad \text{Bodenfeuchteänderung} \quad (53)$$

$$GW_i = RNAV_i - DSP_i \quad \text{Grundwasserneubildung} \quad (54)$$

$$GS_i = GW_i - ANI_i \quad \text{Grundwasserrestbetrag} \quad (55)$$

$$TS_i = \sum_{i=1}^{12} GS_i \quad \text{Tiefenspeicherung} \quad (56)$$

$$TSA_i = TS_i - TS_{\min} \quad \text{Tiefensp. (pos. Translat.)} \quad (57)$$

$$TSR_i = 100 TSA_i / TSA_{\max} \quad \text{Tiefensp. (\% Füllung)} \quad (58)$$

Aus der Bilanz lassen sich folgende Überlegungen ableiten:

- Der niedrigste Monatswert des Direktabflusses kann als obere Grenze für eine ständig gleichbleibende Entnahme von Oberflächenwasser aus einem Vorfluter gelten. Bei Erreichen dieses Minimumswertes wird der Fluss nur noch grundwasserbürtigen Abfluß führen. Dies ist bei der Planung von Einrichtungen, die Oberflächenwasser als Kühlwasser, Energieträger, Transportmittel oder zur Uferfiltratgewinnung benutzen, zu beachten.
- Entsprechend gilt für den grundwasserbürtigen Niedrigwasserabfluß: Wird ständig eine dem niedrigsten Wert entsprechende Wassermenge aus dem Grundwasservorrat des Einzugsgebietes abgepumpt, so besteht der Abfluß im Minimum-Monat nur aus dem Oberflächen- und oberflächennahen Abfluß.
- Werden die Grenzmengen für Grundwasser- und Direktabfluß gleichzeitig entnommen, so muß - falls beide Minima im selben Monat liegen - mit dem Trockenfallen des Vorfluters gerechnet werden.
- Das letzte Glied der Bilanz (Zeilen 14, 15) gibt die im Tiefenspeicher (Grundwasserspeicher) zurückgelegte Wassermenge in mm bzw. % Füllungsgrad an.

Sie entspricht dem saisonal schwankenden Grundwasserstand. Übersteigt die monatliche Grundwasserförderung den Niedrigwasserabfluß über mehrere Jahre, so müssen die zusätzlichen Wassermengen dem Tiefenspeicher entnommen werden. Da eine Wiederauffüllung im Winter nicht in gleichem Maße angenommen werden kann, muß mit einem Absinken des Grundwasserspiegels gerechnet werden. Eine Überprüfung dieses Bilanzierungsverfahrens mit Daten aus dem - von einer Grundwasserabsenkung betroffenen - Hessischen Ried wäre interessant, jedoch bereitet die Beschaffung einer hinreichend langen und vor allem unbeeinflußten Beobachtungsreihe zur Eichung des Modells Probleme, da die hydrologischen Meßnetze erst in den letzten drei Jahrzehnten verstärkt ausgebaut wurden.

e) Aus dem saisonalen Gang der Wasserspeicherung im Wurzelraum (SP) und ihrem Minimalwert läßt sich rückschließen auf die nutzbare Feldkapazität des Einzugsgebiets, hier mangels verfügbarer Daten für Testzwecke mit 200 mm angenommen. Ein tiefes sommerliches Absinken (das hier dank ganzjährig hoher Niederschläge praktisch nicht eintritt; zum Vergleich: Pegel Langenberg, ca. 20 km nordöstlich von Eigen, sinkt von 200 auf 177 mm bzw. 89 % ab) läßt auf eine starke Entleerung und somit auf eine geringe NFK schließen: Der Jahresgang der Bodenfeuchte SP wurde unter Berücksichtigung von Direktabfluß und Niedrigwasserabfluß ermittelt. Diese wiederum sind in ihrem Jahresgang durch die pedologisch-geologischen Verhältnisse eines Einzugsgebiets geprägt. Wäre für die 30 o.g. Flüßgebiete die nutzbare Feldkapazität bekannt, so könnte mit diesen Werten ein Modell zu ihrer Berechnung geeicht werden. Damit ließe sich die aufwendige und trotzdem ungenaue Erfassung von Bodenkennwerten aus Bodenkarten umgehen, zumal für weite Teile der BR Deutschland keine großmaßstäbigen Bodenkarten vorliegen. Um repräsentative Gebietswerte der NFK zu erhalten, ist es wichtig, zur Eichung möglichst kleine und damit homogene Einzugsgebiete auszuwählen.

f) Addiert man die positiven Werte des monatlichen Grundwasserrestbetrags, erhält man ein Maß für die Speicherkapazität des Tiefenspeichers: Hohe Werte deuten bedeuten - nach den für 30 Einzugsgebiete durchgeföhrten Berechnungen und Vergleichen mit Bodenkarten - eine hohe Speicherfähigkeit des Untergrundes. Die Eichung eines Berechnungsverfahrens ist (wie unter e)) mangels geeigneter geohydrologischer Daten z.Zt. noch nicht möglich, wird aber weiterverfolgt.

g) Die sommerliche Entleerung des Wurzelraumspeichers wird in diesem Modell als linear angenommen, kann jedoch auch als nichtlinear vorgegeben werden.

Hierzu eignet sich das bei der klimatischen Wasserbilanz benutzte Verfahren von THORNTHWAITE (vg1. Kap. 7.1.) oder der exponentielle Ansatz von PFAU (1966, S.35), falls der Niederschlagsrest RNAV kleiner als Null ist, d.h., ein Restverdunstungsanspruch besteht:

$$SP_i = SP_{i-1} / e^k \quad (59)$$

$$\text{mit: } k = - RNAV_i / NFK \quad (60)$$

Die Wiederauffüllung des Bodenspeichers wird als linear angenommen. Eine nichtlineare Entleerung dürfte zu einer höheren Grundwasserneubildung führen, da der Wassergehalt des Bodens weniger stark absinken kann. Damit verringert sich die Verdunstung und somit auch der Wasserbedarf bei Wiederauffüllung bis zur Sättigung.

7.3.1. Simulation natürlicher Einwirkungen auf das Wasserdargebot

a) Trocken- und Feuchtjahre:

Unter natürlichen Einwirkungen auf den Wasserkreislauf sollen hier nicht langfristige Klimaänderungen verstanden werden, sondern nur kurzzeitige Schwankungen, etwa in Form mehrerer aufeinanderfolgender Trocken- oder Feuchtjahre. Um z.B. eine Abnahme der monatlichen Niederschläge um 10 oder 20 % zu simulieren, müssen einige zusätzliche Annahmen gemacht werden:

aa) Abfluß und Niedrigwasserabfluß werden mit einem der in Kap. 6.11. bzw. 6.12. vorgestellten Modelle berechnet, oder:

bb) Die (absolute) Verminderung des monatlichen Niederschlags wirkt sich nur in einer entsprechenden Abnahme des Direktabflusses aus, oder:

cc) Die Verminderung des Niederschlags teilt sich nach einem - noch zu findenden - Schlüssel auf beide Abflußanteile auf.

Wird nach der (stark vereinfachten) Annahme bb) verfahren, so ändern sich nur Niederschlag und Direktabfluß. Bei cc) wäre ein sinnvoller Verteilungsschlüssel zu erstellen, wofür noch geeignete Kriterien definiert werden müßten. Ein Vorgehen nach aa) ergibt:

Eine Abnahme der monatlichen Niederschläge wirkt sich besonders in einer Minderung des Abflusses aus; die Verdunstung ist weniger betroffen. Der Rückgang des Gesamtabflusses wird zum größten Teil durch eine Abnahme des Direktabflusses bewirkt und weniger durch den grundwasserürtigen Anteil. Die absolute

Minderung ist bei den Minimumwerten geringer als bei den Maxima: Ein Niederschlagsrückgang bewirkt eine Kappung der Spitzen. Jahressummen, Minima und Maxima der Monatswerte von Niederschlag, Verdunstung und Abflußkomponenten zeigt Tab. 34 a; Tab. 34 b enthält die absolute Abnahme der Werte.

Tab. 34 a: Niederschlag, Verdunstung und Abflußkomponenten für den Pegel Eigen: Jahressummen, Minima, Maxima (in mm) bei einer Abnahme der monatlichen Niederschläge um 0, 10 und 20 %:

N-Abnahme:	0% (norm.)			10%			20%		
	SUM	MIN	MAX	SUM	MIN	MAX	SUM	MIN	MAX
N	1052	62	104	948	56	94	842	50	83
A	619	30	87	533	25	72	447	18	57
AOB	306	9	52	236	7	39	166	3	27
ANI	313	19	36	297	17	33	281	15	31
VF	433	4	74	415	4	71	395	4	67

Tab. 34 b: Absoluter Rückgang der Werte aus Tab. 34a bei 10- und 20%iger Niederschlagsabnahme:

N-Abnahme:	--- 10% ---			--- 20% ---		
	SUM	MIN	MAX	SUM	MIN	MAX
N - Abnahme in mm	104	6	10	210	12	21
A - Abnahme in mm	86	5	15	172	12	30
AOB - Abnahme in mm	70	2	13	140	6	25
ANI - Abnahme in mm	16	2	3	32	4	5
VF - Abnahme in mm	18	0	3	38	0	7

b) Sukzession

Bei fortschreitender Industrialisierung und gleichzeitig abnehmender Investitionsbereitschaft in der Landwirtschaft ist besonders bei Grenzertragsböden mit zunehmender Verbrauchung zu rechnen (SCHREIBER 1980). Die Vegetation durchläuft sukzessive die Stadien der Verkrautung und Verbuschung und erreicht schließlich das Klimaxstadium Wald. Aufgrund dieser Vorgänge wird eine Veränderung des Wasserdargebotes eintreten. Zu ihrer Erfassung scheint das Bilanzmodell auf der Basis von Flußgebieten nicht geeignet zu sein, da es das Einzugsgebiet in toto betrachtet und nicht zwischen Teilgebieten mit unterschiedlicher Landnutzung differenzieren kann. Dieses Problem wird in Kap. 7.4. wieder aufgegriffen.

Der Versuch, den Einfluß des Waldes auf den Abfluß mit einer Mehrfachregression abzuschätzen, brachte nicht immer zufriedenstellende Ergebnisse. (vgl. Kap. 6.11., 6.12.). Grundsätzlich war in den Wintermonaten bei einer Zunahme des Waldanteils eine Zunahme des Abflusses zu verzeichnen, während im Sommer meist eine Dämpfung des Abflusses durch wachsenden Waldanteil erzielt wird. Gibt man in die Regressionsgleichung einen 100 %igen Waldanteil ein, so ergibt sich - Juli ausgenommen - eine Minderung des monatlichen Abflusses um 1 mm im April, ansteigend auf 13 mm im September. Diese Werte dürften sicher-

lich zu niedrig sein, wobei sich ohnehin die Frage erhebt, ob eine derartige Extrapolation noch sinnvoll ist. Eine weitergehende Differenzierung des Variablenkomplexes 'Flächenbedeckung/Vegetation' bei gleichzeitiger Ausschaltung des gemeinsamen räumlichen Trends der Variablen: Höhe, Wald, Siedlungsfläche und Hangneigung könnte eine Verbesserung der Ergebnisse bewirken.

7.3.2. Simulation anthropogener Einwirkungen auf das Wasserdargebot im Flußgebiet

Ähnlich wie eine Verringerung der nutzbaren Feldkapazität im Wurzelraum wird sich eine Versiegelung versicherungsaktiver Flächen auswirken, einen exponentiellen Ansatz nach PFAU (1966; vgl. auch Kap. 7.3.1.) vorausgesetzt: Die Entleerung des Bodenspeichers durch Verdunstung ist langsamer und damit geringer; zur Wiederauffüllung wird ergo eine geringere Wassermenge benötigt. Angenommen wird in mehreren Schritten eine jeweils 50 %ige Totalversiegelung der noch unversiegelten Restfläche, d.h., es stehen nur noch 50 % der NFK zur Verfügung (genaugenommen: nur noch 50 % der Fläche mit einer bestimmten NFK). Für einen Verdunstungsrestanspruch von 40 mm und einen Anfangsfeuchtegehalt des Bodens von 200 mm, der der NFK entspricht, ergibt sich für 5 Wiederholungen dieses Schrittes unter Anwendung von Gl. (59, 60) - wobei $t-1$ = vorher, t = nachher bedeutet:

Tab. 35: Bodenfeuchte, Verdunstung und Restbestand:

SP _{t-1}	SIEG	k	e ^k	SP _t	Verdunst.	RR	Spareffekt
mm	%			mm	mm	mm	%
200	0	0,2	1,22	164	36	4	10
100	50	0,4	1,49	67	33	7	18
50	75	0,8	2,23	22	28	12	30
25	88	1,6	4,95	5	20	20	50
13	94	3,2	24,50	1	12	28	70
6	97	6,4	607,80	0	6	34	85
1	99	40,0	>99999	0	1	39	98

Da eine schrittweise zu versiegelnde Fläche kaum zur landwirtschaftlichen Nutzung oder zur Grundwassergewinnung herangezogen wird, ist der Bodenfeuchtegehalt weniger von Interesse. Wichtiger ist die nicht verdunstende und somit später nicht zur Wiederauffüllung anstehende Wassermenge RR. Wird sie vor Verdunstung geschützt und einem Schluckbrunnen zugeführt, so kann sie als gewonnene (Niederschlags-) Wassermenge zur Grundwasseranreicherung genutzt werden; die Verdunstung sinkt um den gleichen Betrag. Ob allerdings eine Flächenversiegelung mit dem Ziel, das gesammelte Wasser zu versickern, aus ökologischen oder ästhetischen Gründen sinnvoll ist, soll hier nicht diskutiert werden.

Ein zweiter Weg zur Abschätzung des Wasserdargebotes bei zunehmender Überbauung bzw. Versiegelung geht von der Verschiebung des Verhältnisses: Niedrigwasserabfluß/Direktabfluß aus. Die zur Modellerstellung benutzten 30 Fließgebiete weisen eine mittlere prozentuale Versiegelung von 3,9 % mit Standardabweichung 1,8 auf, d.h. sie sind diesbezüglich noch weitgehend unbeeinflußt. Mit zunehmender Versiegelung wird ein zunehmender Teil des nichtverdunstenden Niederschlags oberflächlich abgeführt. Bei einer Versiegelung von 100 % wird die Versickerung und damit auch die Grundwasserneubildung und der Grundwasserabfluß gegen Null streben; der Abfluß besteht zu 100 % aus dem Oberflächenanteil. Nimmt man keinen linearen, sondern einen exponentiellen Einfluß der Versiegelungszunahme auf den Wasserhaushalt eines Einzugsgebietes an, so eignet sich der exponentielle Ansatz, wie ihn PFAU (1966) für den Bodenwasserhaushalt benutzt; vgl. auch Kap. 7.3.. Die Änderung des Niedrigwasserabflusses ist eine Funktion der Zunahme der versiegelten Fläche (in %), wobei der Zeitpunkt t nach und $t-1$ vor der Versiegelungsmaßnahme liegt:

$$ANI_t = ANI_{t-1} / e^k \quad (61)$$

$$\text{mit: } k = (SIEG_t - SIEG_{t-1}) / 100 \quad (62)$$

Bei einer 100 %igen Oberbauung erreicht dieses Verfahren nicht eine Grundwasserneubildung bzw. einen Niedrigwasserabfluß von Null. Es ist ohnehin hydrologisch wenig sinnvoll, eine Versiegelung von 100 % anzunehmen; die Existenz des Fließgebietes wäre damit in Frage gestellt. Die nicht zur Versickerung gelangende Differenz $ANI_t - ANI_{t-1}$ wird dem Direktabfluß zugeschlagen und geht somit der Grundwasserneubildung verloren.

7.4. Übertragung der Modelle auf Rasterflächen

Mit den in Kap. 6. vorgestellten Berechnungsverfahren konnten hydrometeorologische Variable (H, T, E, D, SO, RF, VP, A, ANI, AOB) für Quadrat rasterflächen von 1 ha berechnet und im Informationssystem gespeichert werden. Für jede Rasterfläche läßt sich die klimatische Wasserbilanz nach 7.1. und die Wasserhaushaltsbilanz nach 7.2. berechnen; auf die Problematik sei nochmals hingewiesen. Auch das in 7.3. vorgestellte Bilanzmodell kann für jede Rasterfläche gerechnet werden, sofern die in 5.1. gesetzten Randbedingungen beachtet werden. Ohnehin darf das Problem der Extrapolation hydrologischer Daten von Einzugsgebieten (10 - 100 km²) auf Hektarflächen nicht übersehen werden. Die Ermittlung

Grenzwerte für die Entnahme von Oberflächenwasser aus dem Vorfluter und von Grundwasser geschieht entsprechend 7.3., ebenso die Vorgabe unterschiedlicher Niederschläge. Unter Abfluß, Direktabfluß und Niedrigwasserabfluß ist nun allerdings der Zugewinn zu verstehen, den die einzelnen Abflußkomponenten durch die jeweilige Rasterfläche haben; vgl. hierzu wiederum Kap. 5.1., Gl. (1e) und Nachfolgendes. Da nun auf der Basis von Hektarflächen bilanziert wird, bieten sich einige Vorteile gegenüber Fließgebieten:

a) Nutzbare Feldkapazität

Die auf Einzugsgebietsbasis u.a. auch wegen der gebietsinternen Variation nur ungenau zu erfassende nutzbare Feldkapazität läßt sich für Hektarflächen besser bestimmen. Hierzu können - falls vorliegend - Bodenkarten im Maßstab 1:50 000 benutzt werden. Eine andere Möglichkeit basiert auf der flächendeckenden Aufbereitung von Daten der Reichsbodenschätzung. Unter Verwendung dieser Daten laufen Arbeiten zur Ausweisung natürlicher Standorteigenschaften; die Bereitstellung der pedologisch-geologischen und auch der hydrometeorologischen Informationen erfolgt durch EDV-gestützte räumliche Informationssysteme (HEINEKE & PETZOLD 1982).

b) Oberflächenversiegelung

Die Landnutzung jeder Rasterfläche ist im Informationssystem gespeichert (als Raster- oder als umzurechnende Polygoninformation). Da es sich um relativ kleine Flächen (1 ha) im Vergleich zu Fließgebieten (10 bis 100 km²) handelt, kann man bei linearer Zunahme des versiegelten Flächenanteils und einem linearen Rückgang des versickerungsfähigen Anteils auch einen linearen Rückgang der Versickerung annehmen. Im Extremfall erreicht ein total versiegeltes Rasterquadrat eine Versickerung von Null; der Niederschlag wird oberflächlich (ggf. per Kanalisation) in den Vorfluter abgeführt: Diese Fläche fällt für die Grundwasserneubildung aus und erzeugt stattdessen nur mehr Direktabfluß. Damit läßt sich eine quantitative Beziehung für jede Rasterfläche aufstellen; die monatliche Grundwasserneubildung nach Flächenteilversiegelung (GWS) sinkt um den gleichen Prozentsatz, um den die Flächenversiegelung wächst, und ergibt sich nach (63) aus dem ursprünglichen Wert GW vor der Versiegelung:

$$GWS_i = GW_1 * (1 - SIEG/100) \quad (63)$$

Der Direktabfluß nach Versiegelung AOBs wird nach (64) entsprechend steigen:

$$AOB_i = AOB_1 + GW_i - GWS_i \quad (64)$$

während der grundwasserbürtige Abfluß ANIS abnimmt:

$$ANIS_i = ANI_i - (GW_i - GWS_i) \quad (65)$$

Die nach der Versiegelung gültigen Werte für Direkt- und Niedrigwasserabfluß A0BS bzw. ANIS gehen in das Bilanzmodell ein. Eine im Einzugsgebiet des Pegels Eigen liegende repräsentative Rasterfläche hätte bei einer Zunahme der Versiegelung von 0 auf 30, 60 und 90 % folgende Änderungen aufzuweisen:

Tab. 36 a: Änderung der Wasserbilanz bei zunehmender Flächenversiegelung im Bereich des Pegels Eigen (Jahressummen, Minima, Maxima: mm):

SIEG: -----0%----- 30%----- 60%----- 90%-----												
	SUM	MIN	MAX	SUM	MIN	MAX	SUM	MIN	MAX	SUM	MIN	MAX
A0B	306	9	52	400	16	62	493	23	73	587	28	83
ANI	313	19	36	219	13	25	126	7	14	32	2	4
A	619	30	87	--wie vor--								
N	1052	62	104	--wie vor--								

Tab. 36 b: Wie Tab. 36 a, jedoch bei 10 %igem Rückgang der monatlichen Niederschläge:

SIEG: -----0%----- 30%----- 60%----- 90%-----												
	SUM	MIN	MAX	SUM	MIN	MAX	SUM	MIN	MAX	SUM	MIN	MAX
A0B	236	7	39	324	13	49	415	18	59	587	28	83
ANI	297	17	33	209	12	23	118	7	13	32	2	4
A	533	25	72	--wie vor--								
N	948	56	94	--wie vor--								

Ob die bei diesem Simulationsverfahren etwa beibehaltene Verdunstung sich nicht doch ändern wird, bleibt zu diskutieren. Die Fragestellung lautete jedoch: Wie verhalten sich Grundwasserneubildung und Direktabfluß bei zunehmender Versiegelung? Da es sich - wie ein- gangs gefordert - um einfach strukturierte Modelle auf allgemein verfügbarer Datenbasis handeln soll, erscheint dieses Modell als brauchbar.

c) Veränderung der Vegetation

Der Einfluß der Vegetation auf den Wasserhaushalt ist unbestritten, jedoch wegen der vielschichtigen Vorgänge nur schwer quantitativ abzuschätzen (vgl. auch SCHREIBER 1976, S.262), wenn nicht spezielle Daten zur Verfügung stehen. BRECHTEL & v.HOYNINGEN-HUENE (1978, S.211 nach BAUMGARTNER 1967) veröffentlichten Verdunstungs- und Sickerwassermengen bei unterschiedlicher Vegetation für tiefgründige, grundwasserferne Standorte in der Rhein-Main-Ebene (Tab. 37). Diese Werte sind nur bedingt für das Bilanzmodell nach 7.3. geeignet, da sie 1. nur für das klimatisch andersartige Rhein-Main-Gebiet gelten, 2. auf (weitgehend ebenen) tiefgründigen Lockersedimenten ermittelt wurden, und 3. die saisonale Komponente nicht beinhaltet. Trotzdem soll versucht werden, anhand grundsätzlicher Überlegungen den Einfluß der Vegetation auf das Wassermengendargebot quantitativ abzuschätzen. Die in Tab. 37 verwandten Flächennutzungstypen zeigen in etwa eine Rangskala, die der natür-

Tab. 37: Verdunstung und Sickerwasser bei unterschiedlicher Vegetation im Raum Frankfurt. Quotienten: Verdunstung/Niederschlag (VN), Sickerwasser/Niederschlag (SN). Jahresniederschlagssumme: 663 mm (nach BAUMGARTNER 1967):

Stufe	Vegetation	Verdunstung		Sickerwasser	
		mm	VN(%)	mm	SN(%)
1	Nackter Boden	265	40	398	60
2	Spärliche Veg.	345	52	318	48
3	Ackerland	431	65	232	35
4	Grasland	497	75	166	25
5	Strauchveg.	564	85	99	15
6	Wald	600	91	68	10

Tab. 38: VV-Koeffizienten:

Stufe	Sukzession					
	1	2	3	4	5	6
1	-	1,30	1,63	1,88	2,13	2,26
2	0,80	-	1,25	1,44	1,63	1,74
3	0,58	0,73	-	1,15	1,31	1,39
4	0,42	0,52	0,72	-	1,13	1,21
5	0,25	0,31	0,43	0,60	-	1,06
6	0,17	0,21	0,29	0,41	0,69	-

Abnahme des Sickerwassers

lichen Sukzession oder der auf der Fläche vorhandenen Biomasse entspricht. Erhält z.B. nackter Boden den Rang 1 und Wald den Rang 6 (vgl. Tab. 37), so nimmt die Verdunstung bei aufsteigenden Rängen zu und die Sickerwassermenge ab. Die Zunahme der Verdunstung bzw. Abnahme der Versickerung läßt sich als Quotient ausdrücken, im folgenden als VV-Koeffizient bezeichnet. Tab. 38 zeigt die VV-Koeffizienten für Übergänge von einer niedrigen auf eine höhere Sukzessionsstufe; in Gegenrichtung ist der reziproke Wert des VV-Koeffizienten zu benutzen. Die obere Dreiecksmatrix enthält die Koeffizienten für die Zunahme der Verdunstung; die untere Dreiecksmatrix zeigt die Koeffizienten für die Abnahme der Sickerwassermengen.

Beispiel 1: Das Brachliegenlassen einer Wiese (Stufe 4) führt sukzessive zur Bewaldung (Stufe 6) einer Fläche. Die Verdunstung wird danach den 1,2-fachen Wert erreichen; die Sickerwassermenge verringert sich auf 41 % des vorherigen Wertes.

Beispiel 2: Nach Entwaldung einer Fläche bleibt nur spärliche Vegetation zurück. Dieser Rückgang von Stufe 6 auf Stufe 2 entspricht einem VV-Koeffizienten von $1/1,74 = 0,57$ für die Verdunstung, während die Versickerung bzw. Grundwasserneubildung das $1/0,21 = 4,76$ -fache des vorherigen Wertes erreicht.

Die Einpassung des Verfahrens in den nordrhein-westfälischen Raum ist problematisch, eine Verschiebung der VV-Koeffizienten aufgrund der anderen klimatischen Verhältnisse wahrscheinlich: Frankfurt erhält ca. 650 mm/a, Mettmann ca. 1000 mm/a Niederschlag. Lägen die Sickerwasserraten entsprechend für verschiedene Stellen in Nordrhein-Westfalen vor, so könnten die VV-Koeffizienten und die VN- und SN-Quotienten

(Sickerwasser/Niederschlag bzw. Verdunstung/Niederschlag) neu geeicht werden; Sickerwasser entspricht der Grundwasserneubildung. Allerdings sind z.B. die Daten der Lysimeteranlage St. Arnold bei Rheine möglicherweise kaum ausreichend, da sie nur für den Flachlandbereich Nordrhein-Westfalens repräsentativ sein können. Die VV-Koeffizienten ließen sich als einfacher analytischer Ausdruck - etwa als Ausgleichsgerade - darstellen, wenn die Vegetation in einer metrischen Skala statt rangskaliert erfaßt werden könnte (z.B. als Biomasse/Fläche).

Das Verfahren wird an einer Rasterfläche von 1 ha wie folgt eingesetzt: Das Informationssystem stellt für die Rasterfläche die Variablen: Niederschlag, Grundwasserneubildung und Oberflächenbedeckung zur Verfügung. Aus der Oberflächenbedeckung (falls zu den Stufen 1-6 gehörig) leitet sich der SN-Quotient ab. Dieser - mit dem Jahresniederschlag multipliziert - ergibt die Jahresgrundwasserneubildung. Mit diesen Werten lassen sich unter Zuhilfenahme der VV-Koeffizienten aus Tab. 38 bei Vorgabe unterschiedlichen Vegetationsbesatzes Veränderungen im Wasserdargebot simulieren. Die Ausweitung des Verfahrens auf monatliche Werte dürfte - nach Neueichung mit geeigneten Daten - keine Schwierigkeiten bereiten. Das Bilanzmodell läßt sich dann mit den korrigierten Eingangsdaten neu rechnen.

c) Lysimeterdaten

Erste Überlegungen, die von DYCK & CHARDABELLAS (1963, S.252f) anhand mitteleuropäischer Lysimeterbeobachtungen aufgestellten Lysimetergeraden zur Abschätzung des Vegetationseinflusses auf Verdunstung und Sickerwasser zu verwenden, mußten aufgegeben werden. Die Autoren benutzen Daten von Lysimetern in Sand, lehmigem Sand, sandigem Lehm und Lehm bei unterschiedlichem Bewuchs (spärlicher Bewuchs, Gras, Feldfrüchte, Gemüse, junge Bäume, vegetationslos), trennen aber bei der Aufstellung der Geradengleichungen nur mehr nach den Bodenarten, nicht aber nach dem Bewuchs. Eine Klärung der Abhängigkeiten zwischen Bewuchs und Sickerwasser war somit nicht möglich.

7.5. Gesamtbetrachtung der eingesetzten Bilanz- und Simulationsverfahren

Die anfangs gesetzten Ziele konnten erreicht werden: aa) Quantitative Erfassung des unter- und oberirdischen Wassermengendargebotes in seiner raumzeitlichen Verteilung - wobei die räumliche Auflösung weitaus feiner als die zeitliche ist -, und bb) Bi-

lanzierung und Simulation (in Teilespekten) bei natürlichen und/oder anthropogenen Einwirkungen auf den Naturhaushalt; die Aussagen gelten für Fließgebiete oder anderweitig (beliebig) abzugrenzende Regionen. Das in 7.3. vorgestellte Bilanzmodell ermöglicht in Verbindung mit einem EDV-gestützten räumlichen Informationssystem die Bereitstellung folgender Daten: Niederschlag, Verdunstung, Abfluß, Direktabfluß, Niedrigwasserabfluß, Grundwasserneubildung, Grundwasservorrat und Bodenfeuchtegehalt (einschließlich mittlerer Monatswerte, Minima, Maxima) für einen mittleren Standardjahresgang, wobei gewisse einschränkende Randbedingungen in Kauf genommen werden mußten.

Die Daten sind flächendeckend vorhanden und quantifizieren das Wasserdargebotspotential, wie es z.B. von HAASE (1978) definiert wird; vgl. auch 5.1.. MANNSFELD (1978) erfaßt das Wasserpotential mit einer vierstufigen Rangskala; das in Kap. 7.3. vorgestellte Bilanzmodell ermöglicht jedoch eine rationalskalierte Abschätzung des verfügbaren Wasserdargebotes unter Berücksichtigung der saisonalen Komponente. Ein zusätzlicher Vorteil des Modells liegt in der Möglichkeit, Veränderungen des Naturhaushaltes zu simulieren, um die Auswirkungen auf das Wasserdargebot vorweg absehen zu können. So ist es z.B. möglich, Entwaldung und/oder zunehmende Oberbauung des Untersuchungsraumes zu simulieren, Feucht- oder Trockenjahre vorzugeben, oder das im Verlauf der natürlichen Sukzession sich ändernde Wasserdargebot abzuschätzen.

Bei der Modellerstellung wurde großer Wert auf die Verwendung einfacher strukturierter Berechnungsverfahren und allgemein verfügbarer Daten gelegt, um einen Einsatz in der Planungspraxis nicht zu erschweren. Die Modellgüte ist hinreichend; bei regressionsanalytischen Berechnungen werden in der Regel Bestimmtheitsmaße von 80 % und mehr erreicht. Eine Nacheichung einzelner Komponenten bzw. Adaptierung auf den Untersuchungsraum (Nordrhein-Westfalen) ist erforderlich, um z.B. den Einfluß unterschiedlicher Vegetation auf die Grundwasserneubildung besser abschätzen zu können. Auch eine Verbesserung der pedologisch-geologischen Datenbasis wäre wünschenswert. Das Zusammenwirken einzelner Berechnungsverfahren ist nach dem Baukastenprinzip konzipiert; einzelne Module lassen sich ggf. bei Vorliegen verbesserter Berechnungsverfahren austauschen.

Alle Wasserhaushaltsgrößen sind langjährige Monatsmittelwerte in 'mm'. Eine Umrechnung in '1/sec*km²' (Abflußpende) bzw. 'm³/sec' (Abflußmenge) ist jederzeit möglich, da die Größe des Einzugsgebietes oder der Rasterfläche bekannt ist.

8. Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel soll auf einige - mehr technische - Probleme eingegangen werden, die sich im Umfeld EDV-gestützter räumlicher Informationssysteme ergeben. Gleichzeitig werden Einsatzmöglichkeiten und Weiterentwicklungen diskutiert.

8.1. Digitales Geländemodell

Unter einem 'Digitalen Geländemodell' ist ein EDV-Programmpaket zu sehen, welches aus - meist auf Rasterbasis vorliegenden - Höhendaten weitere Reliefdaten berechnet. Häufig wird unter einem digitalen Geländemodell nur die Ausgabe eines dreidimensionalen Bildes der Höhenwerte verstanden, evtl. noch die Berechnung von Exposition und Hangneigung (z.B. KOEPPEL & ARNOLD 1980; MÜLLER & EHMKE 1978; WEIHS 1978). Ein digitales Geländemodell sollte jedoch nicht nur zur EDV-gestützten Bilderstellung, sondern auch zur Berechnung einer Vielzahl von Reliefparametern dienen. Erste derartige Arbeiten - meist aus dem anglo-amerikanischen Raum - liegen bereits 20 Jahre zurück. Für den deutschsprachigen Bereich ist NORMANN (1969) zu nennen; er versucht, die Reliefenergie quantitative zu erfassen, und trianguliert mittels EDV-Programm zwischen nicht rasterförmig verteilten Punkten (u.a. Höhenpunkten der Wasserscheiden). MARK (1975) vergleicht verschiedene Möglichkeiten, Datenpunkte auf unterschiedlichen Rastern zu erfassen und Reliefkennwerte zu berechnen. WERNER (1974) benutzt Höhendaten auf der Basis eines 50x50 m-Rasters, wobei die Höhen auf den Gitterschnittstellen (einschließlich der Kartenränder) erhoben wurden, d.h. 1681 Datenpunkte pro Deutscher Grundkarte. Die Daten dienen zur plottergestützten Erstellung von Isohypsen- und Isoklinenkarten, die als transparente Deckblätter auf die zugehörigen topographischen Karten aufgelegt werden können.

Das Informationsraster der Schweiz benutzt die auf 100x100 und 250x250 m-Rastern vorliegenden Höhenwerte zur Berechnung von Hangneigung und Exposition (TCHANG 1972; ZOST 1976), um z.B. unter Einbeziehung weiterer Daten die Eignung von Rasterflächen als Baugrund zu ermitteln. MERKL, U. (1981) erarbeitet im Flussgebiet der Nidda mit einem 'Digitalen Gebietsmodell' und berechnet auf Rasterbasis Luv/Lee-Effekte zur Abschätzung des Niederschlags, um letztlich Abflußwerte zu ermitteln. DURWEN et al. (1978) benutzen auf Basis der Deutschen Grundkarte ein Raster mit 100 m Maschenweite. Da die Höhenwerte für die Mitten der Rasterflächen erhoben werden, sind zur Berechnung von Neigung und Exposition die Daten der benachbarten Flächen erforderlich; dies erfordert zusätzlichen

Aufwand, da bei Rasterflächen am Kartenrand benachbarte Grundkartenblätter herangezogen werden müssen. Ein derartiges Vorgehen hat allerdings den Vorteil, daß die 20x20-Matrix der Höhenwerte sofort in der Datenbank des Informationssystems LÜKIS gespeichert werden kann.

Eigene Arbeiten an einem digitalen Geländemodell ergeben jedoch, daß es sinnvoller ist, wie WERNER (1974) zu verfahren und je Grundkarte für eine 20x20-Matrix von Rasterflächen die Höhen auf den Gitterschnittpunkten zu erheben, d.h. 21x21 Datenpunkte je Grundkarte bei 100x100 m Maschenweite. Dadurch kann das Hinzuziehen benachbarter Kartenblätter vermieden werden. Aus dieser 21x21-Rohdatenmatrix lassen sich aus den vier Eckwerten jeder Rasterfläche eine Vielzahl von Variablenwerten für jede Fläche gewinnen und vom Informationssystem als 20x20-Matrix speichern, wie z.B. minimale, mittlere und maximale Höhe. Neigung und Exposition sind nicht immer sinnvoll zu bestimmen, weil es sich häufig um gekrümmte Flächen handelt. Da jedoch die Diskretisierung des Reliefs in 100 m-Schritten ohnehin einen Informationsverlust nach sich zieht, wurde folgendes (stark vereinfachte) Verfahren zur Hangneigungsbestimmung der Hektarflächen gewählt: Die 4 Eckpunkte werden aufsteigend sortiert (H1, H2, H3, H4). Die Hangneigung HNG (als Tangens des Winkels) ergibt sich aus:

$$HNG = \frac{(H3 + H4) - (H1 + H2)}{2 \cdot AK} \quad (66)$$

AK entspricht der Seitenlänge einer Rasterfläche, wenn H1 und H4 benachbart sind. Liegen sie diagonal gegenüber, hat AK die Länge der Diagonalen.

Die Exposition (in 8 Richtungen bzw. 45°-Stufen) läßt sich näherungsweise gewinnen aus der Lage des niedrigsten und höchsten Eckpunktes (H1 bzw. H4): Die Richtung H4-H1 gibt die Exposition an; Nord = 0°, Drehrichtung im Uhrzeigersinn. Bei der EDV-gestützten Weiterverarbeitung von Expositionswerten ist es ratsam, zwei Richtungsvariable zu definieren mit: a) Nord = 0° und b) Ost = 0°. Dies ermöglicht eine korrekte Konvertierung Grad-Sinus-Grad mit zwischen geschalteter Summen- und Mittelbildung; SYMADER (1976) verfährt ähnlich bei der Definition von Windrichtungsvariablen. Eine Variable 'Talrichtung' läßt sich aus der Variablen 'Exposition' bilden, indem jeweils um 180° gegenüberliegende Expositionen zusammengefaßt werden.

NORMANN (1969, S.81) gibt eine mathematische Definition der Reliefenergie RE, bezogen auf den Pegelnulnpunkt eines Flussgebietes:

$$RE = \int h(v) dv \quad (68)$$

Hier bedeutet h die Höhe der Volumenelemente dV über Pegelnnull. Dieser - mathematisch-physikalischen - Definition von Reliefenergie soll hier nicht gefolgt werden. Als einfaches Maß für die 'Reliefenergie' RS einer Rasterfläche kann die maximale Höhendifferenz der 4 Eckpunkte gelten:

$$RS = H_4 - H_1 \quad (68)$$

Wahrscheinlich wird diese Variable hoch korrelieren mit den Variablen RF15, WALD, SIEG und H .

Ein weiteres Maß für die Rauhigkeit einer Rasterfläche kann das Verhältnis: Wahre Oberfläche/Auf die Horizontale projizierte Oberfläche (=Rasterfläche) sein. Zur Berechnung der wahren Oberfläche einer quadratischen Grundfläche gibt TCHANG (1972) relativ aufwendige Verfahren an. Eine einfache Möglichkeit zur Flächenberechnung ergibt sich durch Hinzunahme einer fünften Stützstelle in Rasterflächenmitte HM (HM = mittlere Höhe der Fläche). Die Fläche der entstehenden vier gleichschenkligen Dreiecke (Mittelpunkt und je zwei Eckpunkte der Rasterzelle) läßt sich im dreidimensionalen Raum einfach berechnen. Die Flächensumme kann als angenäherter Wert für die wahre Oberfläche gelten; sie wächst mit zunehmender Steilheit der Hänge.

Berechnet man den Korrelationskoeffizienten zwischen zwei Spalten (oder Zeilen) einer 20×20 -Matrix der mittleren Höhen, so wird dieser einen hohen Wert annehmen, wenn man an den benachbarten Matrixpositionen ähnliche Höhen vorfindet, d.h., das Relief ändert sich nur langsam (räumlich gesehen). Die für Zeilen (Ost-West) und für Spalten (Nord-Süd) berechneten Korrelationskoeffizienten werden sich - je nach vorherrschenden Talrichtungen - unterscheiden. Ebenso wird eine Änderung des Korrelationskoeffizienten zu erwarten sein, wenn (mit einer Raumschrittweite > 1) nur mittelbar benachbarte Zeilen oder Spalten korreliert werden. Diese Korrelationskoeffizienten können als ein Maß für die Rauhigkeit eines Gebietes angesehen werden und dazu beitragen, qualitative Begriffe wie 'Haupttalrichtung', 'stark zertalt' oder 'leicht gewellt' zu quantifizieren. Aufgrund der erst begonnenen Untersuchungen können detaillierte Aussagen z.Zt. noch nicht gemacht werden.

8.2. Isothermenkarten

Die phänologische Kartierung eignet sich als relativ kostengünstige Datenquelle zur Herstellung von Wärmegliederungskarten. SCHREIBER (1969; 1975/1977) erstellt auf diese Weise entsprechende Karten für die Schweiz, Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen.

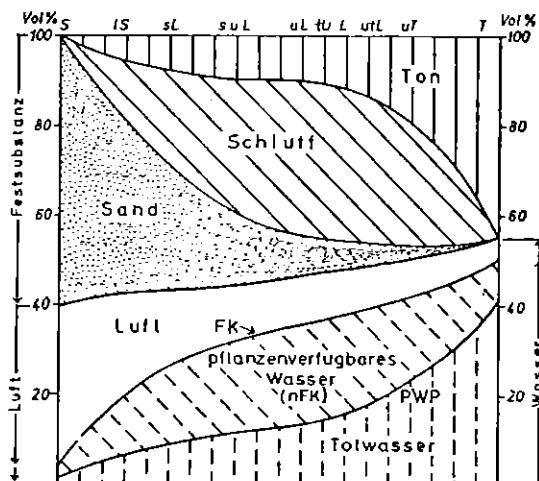
Ein Vergleich der Isothermen mit Isohypsen zeigt, daß generell eine Übereinstimmung besteht; an Südhangen ist die Isotherme durch Besonnungseinfluß nach oben, an Nordhangen nach unten verschoben. Auch Vegetationseinfluß oder lokal absinkende Kaltluft können Isothermen verschieben. Um den finanziellen Aufwand der phänologischen Kartierung zu minimieren, ließe sich ein Grundgerüst einer Isothermenkarte aus den auf Rasterbasis vorliegenden Temperaturdaten als Isolinienplot erstellen (vgl. WERNER 1974, S. 321; Programm ISOKON). Nach einer zunächst erforderlichen Eichung hätte die phänologische Kartierung - neben Stichproben - nur noch dort anzusetzen, wo lokale Besonderheiten zu erwarten sind. Erste Versuche zur EDV-gestützten Erzeugung dieser Isothermenkarten laufen bereits.

8.3. Pedologisch-geologische Daten

An mehreren Stellen der Arbeit zeigte sich ein Engpaß bei der Bereitstellung pedologischer und geologischer Detailinformation. Eine Verbesserung der Datenbasis ist durch die bereits laufenden Arbeiten zur EDV-gestützten Aufbereitung der Daten aus der Reichsbodenschätzung im Rahmen des Projekts: 'Neue Kommunikationswege in den Geowissenschaften mit Hilfe der ADV' zu erwarten (HEINEKE 1981).

Die für die klimatische Wasserbilanz oder andere Bilanzierungsmodelle benötigte nutzbare Feldkapazität (NFK) läßt sich aus Bodenkarten im Maßstab 1:50 000 (falls vorhanden) in grober Klassifizierung entnehmen. Denkbar ist auch der Fall, daß Informationen über die Bodenarten vorliegen, d.h. Ton-, Schluff- und Sandanteil (in Gew.% der Festsubstanz).

Abb. 11: Bodenphysikalische Kennwerte (nach MÖLLER/BENECKE/RENGER, 1970):



W. MÜLLER et al. (1970, S.55) zeigen in einem Diagramm die Abhängigkeit des Totwasser-, pflanzenverfügbaren Wasser- und Luftanteils (alle in Vol.%) von den Festsubstanzanteilen (in Vol.%), unterschieden in Ton, Schluff und Sand (Abb. 11), geben aber leider keine Berechnungsformeln an. Ein Abgreifen der für verschiedene Bodenarten gültigen Volumenprozentwerte der einzelnen Bodenkomponenten ergab 21 Stützstellen. Für die festen Bestandteile erfolgte eine Umrechnung von Prozent des Gesamtvolumens in Prozent der Festsubstanz. Mit diesen Daten läßt sich eine Regression für die Zielgröße: nutzbare Feldkapazität (NFK) aufstellen, zusätzlich aber auch für den Luftanteil (Porenvolumen PV), den Totwasseranteil (TW) und die Feldkapazität (FK = NFK + TW):

$$NFK = 6,7 + 0,25 \text{ SCHLUFF} \quad (B = 85 \%) \quad (69)$$

$$FK = 44,9 - 0,40 \text{ SANO} \quad (B = 95 \%) \quad (70)$$

$$TW = 4,2 + 0,41 \text{ TON} \quad (B = 91 \%) \quad (71)$$

$$PV = 5,8 + 0,27 \text{ SAND} \quad (B = 94 \%) \quad (72)$$

Mit diesen einfachen und leicht handhabbaren Gleichungen lassen sich in guter Näherung hydrologisch wichtige Bodenkennwerte aus der Bodenartenzusammensetzung abschätzen. Vergleiche mit anderen Methoden (HEINEKE 1981) bestätigen die Brauchbarkeit dieses Schnellverfahrens.

Bereits in Kap. 7.3. war die Möglichkeit angedeutet worden, aus dem Abflußverhalten auf die pedologisch-geologische Ausstattung des Einzugsgebietes zu schließen. Hierzu gehört z.B. die Ermittlung der Speicherfähigkeit und Transmissivität des Untergrundes, oder die Bestimmung der Grundwasserspiegelschwankung unter dem Aspekt der Ausweisung von Pseudogleyen. Dies setzt zunächst eine umfangreiche Beschaffung pedologischer und geologischer Daten voraus, um die Modelle eichen zu können.

8.4. Überlagerungsprogramme

Zur Auswertung der durch ein EDV-gestütztes räumliches Informationssystem bereitgestellten Daten werden im einfachsten Falle Routinen benötigt, die für vorzugebende Rasterflächen und Variable die Lage und Häufigkeit des Auftretens bestimmter Kombinationen ermitteln. Für diese Zwecke eignet sich u.a. das Programmsystem IMGRID (KOEPPEL & ARNOLD 1980) bzw. als Vorlaufversion GRID (KOEPPEL 1978). Zur Überlagerung von Polygonen und zur Bildung ihrer Schnittmengen steht das Programm ARIADNE (WINTER 1982) bereit.

Wird eine Angabe darüber benötigt, welche Rasterflächen in einer Planungsregion liegen, gelangt das Programm EGZ zum Einsatz (Ermittlung der Gebietszugehörigkeit): Die Grenzen der Planungsregion werden als Gauß-Krüger-Koordinaten digitalisiert. Das Programm EGZ prüft, ob der Mittelpunkt einer Rasterfläche innerhalb oder außerhalb des Polygons (d.h. Planungsregion) liegt. Eine Grobauswahl der möglicherweise das Planungsgebiet bedeckenden Rasterflächen wird vom Benutzer durch Angabe der Grundkartennummern vorgegeben, d.h., es werden immer alle Rasterzellen einer Grundkarte (400, 16, 4 oder 1 je nach Maschenweite 100, 500, 1000 oder 2000 m) auf Zugehörigkeit zum Polygon geprüft. Zugehörigkeitskriterium ist die Lage der Flächenmitte: Der Mittelpunkt einer Rasterzelle liegt im Polygon, wenn drei der vier von ihm vertikal und horizontal ausgehenden Strahlen eine ungerade Anzahl von Schnittpunkten mit dem Polygonzug haben. Dieses Verfahren ist zwar dreifach überbestimmt (ein Strahl reicht in der Regel), hat aber den EDV-rechentechnischen Vorteil, daß Sonderfälle (Berührung oder deckungsgleicher Verlauf eines Strahles und eines Polygonsegmentes) nicht extra abgefragt werden müssen. Das von BEIERLE & FENKER (vgl. DURWEN & GENGINGER 1979, S.39 f) für das LÜKIS gewählte Zugehörigkeitskriterium: 'Flächenanteil des Polygons an der Rasterzelle' ist zwar genauer, aber rechentechnisch aufwendiger.

8.5. Synthetische Zeitreihen

Bei der Planung von Versorgungsspeichern (Talsperren) wird z.B. ein einzuhaltender Ausgleichsgrad bei einer minimalen Betriebsdauer (z.B. 100 Jahre) vorgegeben. Zur Bestimmung der optimalen Speichergröße bei Angabe der Versagenswahrscheinlichkeit - d.h. Leer- oder Überlaufen - wäre die 100-jährige Beobachtungsreihe des Abflusses der nächsten 100 Jahre nötig, die jedoch realiter nicht vorhanden ist. STREIT (1975b) benutzt zur Synthetisierung einer derartigen Zeitreihe ein Markov-Modell mit saisonaler Komponente (nach FIERING & JACKSON 1971):

$$X_{j,i} = A_i + r_i (X_{j,i-1} - A_{i-1}) * s_i / s_{i-1} + z_{j,i} * s_i (1 - r_i)^{1/2} \quad (73)$$

$j = 1, 2, \dots$ Jahresindex

$i = 1, 2, \dots, 12$ Monatsindex

$X_{j,i}$ = Zeitreihenwert des Abflusses

A_i = Abfluß (mm), monatlicher Mittelwert

s_i = Monatliche Standardabweichungen des Abflusses

r_i = Korr. Koeff. zwischen den Abflüssen der Monate

$z_{j,i}$ = standardnormalverteilte Zufallszahlen

Indizes und Variablenkürzel entsprechen der in der vorliegenden Arbeit gebräuchlichen Schreibweise. Die für dieses Markov-Modell benötigten mittleren Monatswerte des Abflusses können aus dem Informationssystem abgerufen werden; zugehörige Korrelationskoeffizienten und Standardabweichungen wurden aus den Rohdaten der Flussgebiete berechnet und sind als rauminvariant angenommen, und die Zufallszahlen erzeugt ein Rechnerprogramm. Durch Bereitstellung einer derartigen Zeitreihe ließe sich – unter Hinzuziehung der toposkeptisch-morphometrischen Daten des Informationssystems – Hilfestellung bei der Planung von Versorgungsspeichern leisten; eine Anfrage an das Informationssystem ermöglicht es, Gebiete auszuscheiden mit:

- unversiegelter Oberfläche (siedlungsfrei);
- wenig durchlässigem Untergrund, um die Versickerungsverluste gering zu halten (dazu sind pedologische und geologische Daten in hoher Auflösung wichtig);
- hoher Reliefenergie (Kerb- und Kerbsohlentäler mit starkem Gefälle ermöglichen kurze Staumauern mit geringem Bauvolumen bei hoher Speicherkapazität; starkes Gefälle in Verbindung mit großen Stauhöhen erhöht die Ausbeute an Hydroenergie);
- möglichst hohen und im Jahresverlauf ausgeglichenen Abflüssen.

Weitere Kriterien (z.B. Bodengüte, wertvolle Biotope, Waldbesatz) sind bei Vorliegen entsprechender Daten möglich. Bei der Speicherplanung wäre es weiterhin von Nutzen, wenn die Isohypsen (digitalisiert als Polygonzug oder von einem Interpolationsprogramm berechnet aus Rasterdaten) vorliegen; dadurch wären bereits relativ genaue Berechnungen der beanspruchten Fläche und der Aufstauhöhe bei vorgegebenem Speicher- volumen möglich.

Die soeben aufgeführten Möglichkeiten des Einsatzes EDV-gestützter räumlicher Informationssysteme stellen nur eine Grobauswahl dar; inwieweit sich der Einsatz in der Planungspraxis als brauchbar erweist, bleibt abzuwarten. Weitere, z.T. erst geplante, Anwendungen finden sich in der einschlägigen Literatur; vgl. hierzu auch Kap. 3. dieser Arbeit mit einem Vergleich verschiedener EDV-gestützter räumlicher Informationssysteme.

9. Zusammenfassung

Eine steigende Inanspruchnahme der natürlichen Ressourcen erfordert zukünftig eine vorausschauende Planung, um das Vorhandene optimal und möglichst schonend zu nutzen. Der wasserwirtschaftlichen Planung fällt die Aufgabe zu, den wachsenden Bedarf der verschiedenen Nutzergruppen zu decken. Dazu sind verlässliche und vor allem flächendeckende hydrologisch relevante Daten nötig, die jedoch in der gewünschten räumlichen und/oder zeitlichen Auflösung nicht immer zur Verfügung stehen. Um dieses häufig auftretende Problem zu lösen, wurde von Seiten der Planungspraxis der Aufbau EDV-gestützter raumbezogener Informationssysteme forciert, um bei Bedarf schnell geeignete Daten zur Verfügung stellen zu können. Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, zu prüfen:

- Können EDV-gestützte räumliche Informationssysteme aus dem Bereich 'Landschaftsplanung' (im weitesten Sinne) bei der wasserwirtschaftlichen Planung Hilfestellung leisten?
- Wie lassen sich hydrologisch relevante Daten flächendeckend aufbereiten bzw. räumliche Datenlücken schließen?
- Eignen sich diese Daten und Verfahren zur quantitativen Erfassung des Wassermengendargebotes?
- Lassen sich natürliche oder anthropogene Einwirkungen auf den Wasserhaushalt simulieren, um dessen Reaktion abzuschätzen?

Teil 1 der Arbeit (Kap. 2. bis 4.) befaßt sich mit der Problematik EDV-gestützter Informationssysteme, während im Teil II (Kap. 5. ff.) die Abschätzung und Bilanzierung des Wasserdargebotes im Vordergrund steht.

Zunächst werden in Kap. 2. grundlegende Begriffe des Komplexes 'Informationssysteme / Datenbanken' erläutert: Bei der Datenerfassung und -speicherung wird nach Flächen-, Linien- und Punktdaten unterschieden. Flächendaten können auf Rasterbasis oder auf der Basis von Polygonen vorliegen. Die Erfassung auf Rasterbasis bietet sich für quantitative (interpolierbare) Daten wie etwa Meereshöhe oder Niederschlag an, während für qualitative Flächendaten (z.B. Flächennutzung: Laub-/Misch-/Nadelwald) die Erfassung auf Polygonbasis besser geeignet scheint. Eine räumliche Blockung der zu speichern den Daten ist auf der Basis der Deutschen Grundkarte (1:5000) empfehlenswert.

Im Kap. 3. werden 27 EDV-gestützte räumliche Informationssysteme verglichen. Sie gehören den Bereichen Landschaftsplanung, Regionalplanung, Geowissen-

schaften und Wasserwirtschaft an und werden untersucht auf Einsatzgebiete, benutzte Daten, Art der Datenerfassung und Einsatzmöglichkeiten in der wasserwirtschaftlichen Planung. Die aufgrund dieses Vergleichs gewonnenen 'Wunschvorstellungen' an ein EDV-gestütztes räumliches Informationssystem werden in Kap. 4. vorgestellt.

Kap. 5. im zweiten Teil der Arbeit beinhaltet grundsätzliche Überlegungen zur quantitativen Erfassung des Wasserdargebotspotentials einschließlich der Ziele und Rahmenbedingungen. Besonderer Wert wird - unter planungspraktischem Aspekt - auf einfach strukturierte Berechnungsverfahren gelegt, die auch bei schlechter Datenbasis noch brauchbare Ergebnisse liefern. Die im Rahmen der Arbeit benutzten statistischen Verfahren (Hauptkomponentenanalyse, Test auf Normalverteilung, schrittweise multiple lineare Regression) werden nur kurz erläutert; Interessenten seien auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Das Konzept zur flächendeckenden Erfassung des Wassermengendargebotes sieht vor, monatliche Mittelwerte hydrometeorologischer Daten durch geeignete räumliche Prognoseverfahren für Rasterflächen von 1 ha zu berechnen; eine Eichung der Modelle erfolgt mit Daten von Meßstationen. Rasterflächen von 1 ha eignen sich zur Verarbeitung durch ein EDV-gestütztes räumliches Informationssystem und lassen sich noch ohne großen Informationsverlust an einen Polygonzug (z.B. Grenzen einer Planungsregion) anpassen. Eine Aggregation der Rasterdaten für diese Region ist problemlos (per EDV-Programm) möglich. Dadurch lassen sich Aussagen zum Wasserdargebot eines 'beliebig' abgegrenzten Gebietes machen.

Die Aufbereitung der Daten wird in Kap. 6. erläutert: Der mittlere monatliche Niederschlag lässt sich per Regression oder mit Hilfe eines Quadrantenverfahrens durch Bildung des gewichteten räumlichen Mittels umliegender Stationen abschätzen. Andere Verfahren wie die Thiessen-Polygon-Methode, räumliche Autoregressivmodelle oder Kriging werden vergleichend geprüft. Die Berechnung klimatologischer Größen (Lufttemperatur, Sättigungsdampfdruck, Partialdruck, Relative Luftfeuchte, Verdunstung) geschieht durch erprobte Verfahren. Die Abflußhöhe lässt sich durch eine (schrittweise) multiple lineare Regression schätzen; es werden verschiedene Verfahren mit unterschiedlichen Prädiktorenkombinationen zur Verfügung gestellt. Ein Teil dieser Verfahren arbeitet autoprojektiv bzw. autopräzessiv, d.h., sie nutzen die der Zielvariablen zum Zeitpunkt t innewohnende Information unter Hinzuziehung

exogener Steuergrößen zur Prognose für den Zeitschritt $t+1$. Gleiche Verfahren, jedoch mit anderen Prädiktorenkombinationen, eignen sich zur Berechnung des Niedrigwasserabflusses. Dieser grundwasserbürtige Abfluß kann als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen dienen. Der Oberflächen- und oberflächennahe Abfluß (Direktabfluß) ergibt sich aus der Differenz: Abfluß - Niedrigwasserabfluß; eine Abschätzung per Regression war aufgrund hoher Residualwerte wenig erfolgreich.

Die Berechnung der Grundwasserneubildung und der aktuellen Verdunstung mit der klimatischen Wasserbilanz (Kap. 7.1.) zeigt, daß dieses Verfahren nicht überall einsetzbar ist: Die aktuelle Verdunstung wird überschätzt, und ebenso - zumindest in stärker reliefierten Gebieten - auch die Grundwasserneubildung. Ursache ist das Unvermögen dieses Verfahrens, zwischen Direktabfluß und Tiefenversickerung zu trennen. Die Wasserhaushaltsbilanz für Fließgebiete bringt ausgeglichene Ergebnisse, vermag aber ebenso wenig die einzelnen Abflußkomponenten voneinander zu trennen (Kap. 7.2.).

Der Versuch, Direktabfluß und Niedrigwasserabfluß in die Wasserhaushaltsbilanz einzubeziehen, war erfolgreich. Der niedrigste Monatswert des grundwasserbürtigen Abflusses kann als Maß für die maximal zu entnehmende Grundwassermenge dienen. Wird mehr Grundwasser ganzjährig gefördert, enthält der Vorfluter im Minimum-Monat nur mehr Direktabfluß, und es ist langfristig mit einem Absinken des Grundwasserspiegels zu rechnen. Analog dazu gilt der niedrigste Wert des Direktabflusses als Grenzwert für die Entnahme von Oberflächenwasser. Werden die Grenzmengen für Grundwasser und Oberflächenwasser gleichzeitig über längere Zeiträume hinweg entnommen, ist in den Sommermonaten mit einem (fast) Trockenfallen des Vorfluters zu rechnen; das ist z.B. unter dem Aspekt der Abwasserverdünnung interessant.

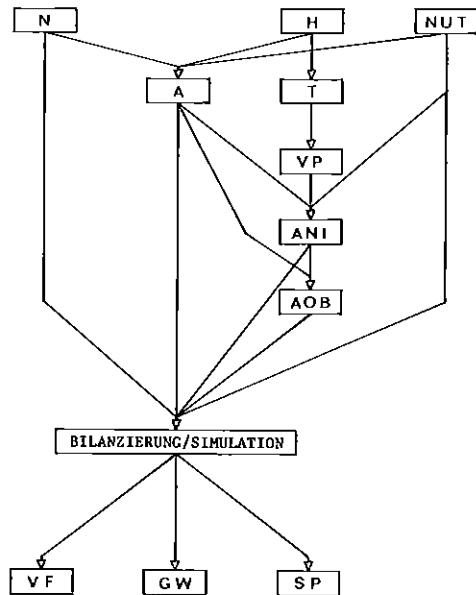
Das vorgestellte Bilanzverfahren (7.3.) läßt sich - bei Beachtung gewisser einschränkender Randbedingungen - auf Rasterflächen übertragen (Kap. 7.4.). Für jede Fläche kann die Wasserhaushaltsbilanz erstellt werden; Abfluß, Niedrigwasserabfluß und Direktabfluß werden mit den vorgestellten Verfahren berechnet. Die Simulation von Feucht- oder Trockenjahren ist durch Eingabe entsprechender Monatswerte des Niederschlags möglich; die Wasserhaushaltsgrößen werden vom Modell selbsttätig berechnet. Es zeigt sich, daß bei einer Abnahme der monatlichen Niederschläge der Direktabfluß weitaus stärker zurückgeht als der Niedrigwasserabfluß, was für die Grundwasserneubildung durchaus positiv ist.

Geht man von der Annahme aus, daß eine lineare Vergrößerung des versiegelten Flächenanteils einen linearen Rückgang der versickerungsfähigen Fläche und somit auch der Versickerung bedeutet, kann die Grundwasserneubildung bei zunehmender Versiegelung mengenmäßig abgeschätzt werden. Im Extremfall bedeutet eine 100 %ige Versiegelung der Rasterfläche eine Grundwasserneubildung von Null.

Eine Änderung der Grundwasserneubildung durch Veränderung der Vegetation (z.B. durch natürliche Sukzession oder anthropogene Entwaldung) kann z.Zt. noch nicht quantitativ erfaßt werden, da geeignete Daten für den Untersuchungsraum fehlen. Diese Daten liegen jedoch für ein anderes Gebiet vor, so daß der Verfahrensgang festgelegt werden konnte und lediglich einer Nachrechnung bedarf.

Das Flußdiagramm in Abb. 12 zeigt den Verfahrensgang von der Datenbereitstellung über die Berechnung hydrometeorologischer Variablen bis hin zur Bilanzierung des Wasserdargebotes (NUT = Flächennutzung einschl. pedologisch-geologische Ausstattung; andere Kürzel: siehe Tab. 5 bis 8).

Abb. 12: Ablaufschema: Bilanzierung und Simulation des Wasserdargebotes



Zukünftige Fragestellungen und im Umfeld EDV-gestützter räumlicher Informationssysteme auftretende technische Probleme werden im Kap. 8. aufgegriffen. Ein 'Digitales Geländemodell' eignet sich zur Berechnung einer Vielzahl morphometrischer Größen, die als Steuervariable in mathematisch-statistische

Modelle eingehen können, zur Erzeugung computerkarto-graphischer Darstellungen (z.B. Blockbilder, Iso-klinenkarten etc.) dienen oder auch zur quantitati-ven Beschreibung des Reliefs herangezogen werden.

Die computerunterstützte Herstellung von Isothermen-karten unter Verwendung der Temperatur- und Relief-daten des Informationssystems bietet die Mögliche-keit, die (personal- und kostenintensive) phänologi-sche Geländearbeit zu unterstützen. Die Kartierung vor Ort ließe sich damit auf kritische Punkte und Stichproben beschränken.

Eine Verbesserung der pedologisch-geologischen Da-tenbasis wurde bereits an mehreren Stellen der Ar-biet gefordert; in Kap. 8.3. werden mögliche Prob-lemlösungen aufgezeigt und zur Abschätzung bodenphy-sikalischer Kennwerte mehrere Schnellverfahren vor-gestellt.

Zur Auswertung flächenbezogener Daten benötigte Überlagerungsprogramme werden in einem kurzen Abriß vorgestellt, und in einem letzten Abschnitt wird die Möglichkeit aufgezeigt, mit den Daten des Infor-mationssystems Zeitreihen von Abflußdaten zu synthe-sisieren, um Unterstützung bei der Planung von Tal-sperren zu leisten.

Ein Beispiel für das Zusammenwirken der vorgestell-ten Berechnungsverfahren und Simulationsmodelle findet sich im Anhang.

Summary

The increasing human impact on natural environment demands prospective planning for optimal and careful use of the natural resources. Since different groups of users are involved in hydrological planning, we need reliable data concerning hydrology, climatology, geology, pedology, and morphometry. Usually these data are not available in the desired spatial and/or temporal resolution. To solve this problem, planners have been pushing forward the development and the implementation of computer-assisted data banks and information systems, providing quick accessibility to data.

This study tries to answer the following questions:

- Are computerized spatial information systems (geographic information systems) helpful in water resources planning?
- Which methods can be used for spatial inter- resp. extrapolation of hydrologic data to close spatial data gaps?
- Is it possible to use these data for quantification of the water potential?
- Is there any possibility to simulate natural or human impacts on the water cycle and to estimate its reaction?

Part I of this study (chap. 2.-4.) deals with problems concerning information systems. The main contents of part II (chap. 5. f) is the evaluation of the water potential.

Chap. 2. begins with an explanation of basic notions concerning information systems and data banks. Data registration requires a distinction of areal, line and point data. Areal data can be recorded on a square grid base, or as polygons (e.g. border line of a forest area). It seems to be useful to record quantitative data (rational or interval scaled, such as elevation above sea level, or amount of precipitation) on a square grid system; qualitative spatial data on a nominal scale (land use: forest/agriculture/meadows) or binary scale (forest: yes/no) should be recorded and stored as polygonal data. Storing these data, a (sheet-wise) 'spatial blocking' is recommended on the base of 'Deutsche Grundkarte' (1:5000, 2x2 km).

A comparison of 27 computerized spatial information systems is presented in chap. 3.. These systems represent the fields: Landscape(ecological) Planning, regional planning, geology and soil sciences, and hydrology. All systems are investigated for operation area, stored data/variables, and their possibilities of use in hydrological planning. After com-

parison, ideas to improve spatial information systems are discussed in chap. 4..

Part II of this study starts with basic considerations concerning the quantitative evaluation of the water potential (chap. 5.). It is pointed out, that planning practice will accept only simply structured models, which will produce useful results, even on a poor data base. The statistical methods are described in short (multiple regression, factor analysis, normal distribution); statistical handbooks can be referred to for further information.

The concept to evaluate the water potential intends to calculate mean monthly values of hydrometeorological data for grid squares of 1 ha; calibration of these models requires data from registration stations. Grid data will be handled by a geographic information system. The grid size of 100x100 m allows to overlay a polygon (e.g. border-line of a planning area) without losing much information. It is possible to aggregate grid data in any spatial combination. Thus statements - concerning the water potential - can be made for any given region.

Chap. 6. deals with the upgrading of the data: Mean monthly precipitation can be calculated by regression or by a 'quadrant method' (calculation of the weighted spatial average from values of surrounding registration stations). Other methods - as Thiessen-polygons, spatial autoregressive models or Kriging - are examined, too. Climatological data, such as air temperature, humidity, evapotranspiration etc., are evaluated with well proved methods. Runoff can be estimated by (stepwise) multiple linear regression; several combinations of predictor variables are submitted. Some regression models are autoregressive resp. autoregressive, using information of previous time steps for the estimation of the dependent variable. The same methods - but with different combinations of predictor variables - can be used for estimation of dry-weather discharge. This part of discharge derives only from groundwater; it can be seen as a value for the amount of disposable groundwater. Surface- and subsurface runoff (= direct runoff) equals total runoff minus groundwater-originating runoff.

Calculation of groundwater recharge and actual evapotranspiration by the 'climatic water balance' (chap. 7.1.) shows, that this method is not unique: actual evapotranspiration and (in areas with steeper slopes) also groundwater recharge is overestimated. This originates from the inability, because the 'climatic water balance' does not distinguish into direct runoff (surface runoff plus interflow) and infiltration

into the deep layers of the soil (groundwater recharge). A water balance for catchment areas (7.2.) gives balanced results, but this method also does not differentiate direct runoff and runoff originating from groundwater. A modified water balance (7.3.) including direct runoff data and dry-weather runoff data allows to quantify the disposable amount of groundwater:

The lowest monthly value of groundwater-originating discharge can be taken as a value which should not be exceeded while pumping off groundwater from a catchment area. If more than the lowest monthly value is taken away every month, there is only direct (surface- and subsurface) runoff left in the river, and the groundwater will sink in level. The same is true for direct runoff: The lowest value of direct runoff is the maximum amount to be pumped off every month.

Taking away the maximum amount of direct runoff and groundwater-originating runoff over longer periods, there might be a total draining of the river during the minimum-runoff (resp. low-precipitation) period. This is interesting - for example - for the dissolution of waste waters.

The modified water balance method can be transferred from catchment areas to grid squares (7.4.), regarding some marginal conditions. For each grid square a balance will be set up; runoff, direct runoff and groundwater-originating runoff are calculated with the above mentioned methods. With this model the situation of wet and dry years can be simulated. It becomes evident, that less mean monthly precipitation is followed by a pronounced reduction of direct runoff and a moderate decrease of groundwater-originating runoff.

In case that a linear increase of sealed area causes a linear reduction of infiltration-capable area and thus of infiltration, it would be possible to estimate groundwater recharge after sealed area has been increased. The extreme case is a 100 %-sealing of a grid square with no groundwater recharge.

A change in groundwater recharge caused by a change in vegetation (natural succession, human impacts) cannot be quantified at present time, because of the lack of data for the investigation area (Nordrhein-Westfalen). These data were available for the Rhein-Main-area, and thus it was possible to show a mathematical way of evaluation. The model only needs to be recalibrated, if the missing data is available.

The flow chart in fig. 12 shows the way from upgrading and calculation of hydrometeorological data up to the evaluation and balance of the water potential. Future investigations and aspects concerning geographic information systems and their technical problems are discussed in chap. 8..

A digital surface model can be used to evaluate a lot of (new) morphometric variables. These variables are input data for hydrological models or for computer-assisted cartographical representations (e.g. block diagrams). Using temperature and relief data, it seems to be possible to draw plotter-maps of isothermes, which can be used in phenological surveying. The next chapter shows how to use mathematical models for the evaluation of soil data. Data processing including overlay programs for spatial data is discussed in the last chapter, and it is also shown, how geographic information systems can be useful in water reservoir planning.

Literaturverzeichnis, Quellen:

Abkürzungen:

- ALL Arbeitsberichte des Lehrstuhls Landschaftsökologie, Münster
 DGM Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen
 DISP Dokumente und Informationen zur Schweizerischen Orts-, Regional- und Landesplanung, Zürich
 GGS Gießener Geographische Schriften
 GJ Geologisches Jahrbuch, Hannover
 NL Natur und Landschaft
 PGM Petermanns Geographische Mitteilungen
 WRR Water Resources Research
 WB Wasser und Boden
 WW Wasserwirtschaft
 ZKF Zeitschrift für Kulturtchnik und Flurbereinigung

- ALTMANN, K., BONZ, M. (1971): Untersuchungen zur Grundwasserneubildung in der Lüneburger Heide. DGM, 15.Jg., H.4, S.85-90.
- ANDERSON, T.W. (1958): An Introduction to Multivariate Statistical Analysis. Wiley, New York, 374 S.
- ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG der Fachsektion Hydrogeologie der Dt. Geol. Ges. (1977): Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate. GJ, C 19, S.3-98.
- ARMBRUSTER, J. (o.J.): Ermittlung des Grundwasserabflusses. Vervielf. Manuskr., 27 S., 5 Abb., Landesanstalt f. Umweltschutz, Karlsruhe.
- ARMBRUSTER, J., BIRKENBERGER, R. (1972): Grundwasserkundungen in der badischen Oberrheinebene. WB, 9, S.270-274.
- BAHRENBERG, G., GIESE, E. (1975): Statistische Methoden und ihre Anwendung in der Geographie. Stuttgart, 308 S.
- BARCKHAUSEN, J. (1973): Automatisch gewonnene Informationen aus geologischen Schichtenverzeichnissen und ihre Weiterverarbeitung. GJ, A7, S.35-50.
- BAUMGARTNER, A. (1967): Energetic Bases for Differential Vaporization from Forest and Agricultural Lands. Forest Hydrology, Braunschweig, S.381-389.
- BELING, G., WERSIG, G. (1973): Zur Typologie von Daten und Informationssystemen. Terminologie, Begriffe und Systematik. Gutachten i.A. des Bundesministers des Innern. Beiträge zur Informations- und Dokumentationswissenschaft, F.6, Pfullach.
- BIERHALS, E. (1978): Ökologischer Datenbedarf für die Landschaftsplanung. Anmerkungen zur Konzeption einer Landschaftsdatenbank. Landschaft u. Stadt, 1D.Jg., H.1, S.30-36.
- BISCHOFF, H., NUHN, H., OSSENRODGE, J., PUK, K., STUTZBACH, M. (1980): Regionale Informationssysteme für geographische Forschung und Lehre. Aufbau und Einsatz der Datenbank und des Programmsystems HAMREGIS. Hamburg, 126 S.
- BOWEN, R.W., BDTBOL, J.M. (1975): The Geological Retrieval and Synopsis Program (GRASP). Geol. Surv. Prof. Pap., 966, 87 S., Washington/USA.
- BRECHTEL, H.M., v.HOYNINGEN-HUENE, J. (1978): Einfluß der Verdunstung verschiedener Vegetationsdecken auf den Gebietswasserhaushalt. Schriftenreihe des DVWK, H.40, S.172-231.
- CRAWFORD, N.H., LINSLEY, R.K. (1966): Digital Simulation in Hydrology. Stanford Watershed Model IV. Techn. Rep. 39, Dept. of Civil Eng., Stanford/USA.
- DEMAYO, A., HUNT, E. (1976): NAQUADAT Users Manual. Ottawa/Canada, 117 S.

- DORBAUM, H.-J., LILLICH, W. (1969): Zur Bestimmung der Grundwasserneubildung als einer der Grundlagen für wasserwirtschaftliche Planungen. DGM, Sonderheft, S.41-45.
- DURWEN, K.J. unter Mitwirkung von R. GENKINGER (1979): Das Landschaftsökologische Informationssystem LÜKIS. ALL, H.1, 53 S.
- DURWEN, K.J., GENKINGER, R., THOLE, R. (1978): Praxisorientierte Variablenauswahl und -verarbeitung für eine EDV-gestützte ökologische Planung. NL, 53, Nr.5, S.164-168.
- DYCK, S., CHARDABELLAS, P. (1963): Wege zur Ermittlung der nutzbaren Grundwasserreserven. Ber. der Geol. Ges. in der DDR, Bd.8 u. Sonderheft 1, Berlin, S.245-262.
- EHMKE, W., MÖLLER, M. (1979): Studien zur Ermittlung von Wasserdargebotspotential und Lärmbelästigung mit Hilfe der EDV. Verh. der Ges. f. Ökologie (Münster 1978), Bd. VII, S.191-199.
- ERGENZINGER, P., DENEUF, STOUE (1982): The Role of Digital Topographic Models as a Tool for Investigations in Hydrological Research Basins. Third Internat. Symp. on 'Theory and Quant. Methods in Geogr.', Augsburg 1982, (in Druckvorb.)
- FIERING, M.B., JACKSON, B.B. (1971): Synthetic Streamflows. Water Resources Monographs Series, No.1, Am. Geophys. Union, Washington/USA, 99 S.
- FRIEDRICH, W. (o.J.): zitiert in R. KELLER (1962): (siehe dort).
- GIESE, E. (1978): Kritische Anmerkungen zur Anwendung faktorenanalytischer Verfahren in der Geographie. Geogr. Zeitschr., Jg.66, H.3, S.161-182.
- GRESCH, P. (1977): Raster als Darstellungsmittel für die Raumplanung. DISP, Nr.44, S.40-43.
- GUNTHER, W., RADEMACHER, O., SCHREIBER, P. (1979): Computergestützte Speicherung und Auswertung von Abwasserdaten - ein Abwasserkataster. DGM, 23.Jg., H.4, S.91-96.
- GÜSSEFELDT, J. (o.J.): JGNVT - FORTRAN-Programm zum Test auf Normalverteilung.
- GUPTA, S.K., SOLOMON, S.I. (1977): Distributed Numerical Model for Estimating Runoff and Sediment Discharge of Ungaged Rivers:
 1. The Information System (S.613-618)
 2. Model Development (S.619-629)
 3. Comparison with other Simple Techniques (S.631-636). HRR, Vol.13, No.3.
- HAASE, G. (1978): Zur Ableitung und Kennzeichnung von Naturpotentialen. PGM, 122, S.113-125.
- HARTENSTEIN, W., SCHAAF, U. (1974): Was kann und soll ROLAND leisten? Informationen zur Raumentwicklung, H.6, S.217, 221-234.
- HASE, K. (1972): Aufbau des Informationsrasters. DISP Nr.24, S.7-14.
- HECKMANN, W. (1978): Regionale Datenbank im Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. NL, 53, H.5, S.143-145.
- HEINEKE, H.J. (1981): Zum Aufbau eines EDV-gestützten räumlichen Informationssystems zur ökologischen Auswertung von Bodendaten. Klagenfurter Geogr. Schr., H.2, S.343-351.
- HEINEKE, H.J., OELKERS, K.H. (1983): Instrumentarien zur automatischen Erstellung von Bodenkarten. (Arbeitstitel, in Druckvorb. f. Geolog. Jahrb., Reihe F, 1983).
- HEINEKE, H.J., PETZOLD, E. (1982): Evaluation of Natural Site Conditions Using Geographic Information Systems. Third Internat. Symp. on 'Theory and Quant. Methods in Geogr.', Augsburg 1982 (in Druckvorb.).

- HERRMANN, R. (1965): Vergleichende Hydrogeographie des Taunus und seiner südlichen und südöstlichen Randgebiete. GGS, H.5, 151 S.
- HERRMANN, R. (1971): Zur regionalhydrologischen Analyse und Gliederung der nordwestlichen Sierra Nevada de Santa Marta (Kolumbien). GGS, H.23, 88 S.
- HERRMANN, R. (1977): Einführung in die Hydrologie. Stuttgart, 151 S.
- HIDBER, C. (1972): Die Landesplanerische Datenbank - ein leicht anwendbares Informationssystem zu handen der Planer des Bundes, der Kantone und der Gemeinden. DISP, Nr.24, S.4-6.
- HITZ, P. (1979): Datenbanken, Brücken zu neuen EDV-Verfahren. DISP, Nr.55, S.32-38.
- HORMANN, K. (1969): Geomorphologische Kartenanalyse mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen. Zeitschr. f. Geomorphologie, N.F., 13, S.75-98.
- HDRMANN, K. (1977): Geographische Gradienten der Lufttemperatur. Erdkunde, Bd.31, Lfg.4, S.241-255.
- HORMANN, K. (1979): Klimatologische Modellrechnungen und ihre Anwendungen. Kieler Geogr. Schr., Bd. 50, S.247-263.
- HYDROLOGISCHER ATLAS der BR Deutschland (1979). Ges. Ltg.: R. KELLER, Hrsg.: U. de HAAR. Bonn, Textbd. 365 S., Kartenbd. 71 S.
- HYNEK, A. (1981): Geoelectrical Information System for Landscape Management. The Case of Rosice-Oslavany Area, CSSR. IGU-Symp. 'Landscape Synthesis - Geoelectrical Foundations of the Complex Landscape Management', Smolenice/CSSR (im Druck).
- JÄGER, K.-D., HRABOWSKI, K. (1976): Zur Strukturanalyse von Anforderungen der Gesellschaft an den Naturraum, dargestellt am Beispiel des Bebauungspotentials. PGM, 120, S.29-37.
- JOSOPAIT, V. (1980): Ermittlung der Grundwasserneubildungsrate über den Bodenwasserhaushalt (Lysimeter), aus dem Abfluß in Vorflutern, mit Hilfe von Grundwasserständen. Vervielf. Manusk., 25 S., 2. Fortbildungslehrgang des DVWK 'Grundwasser/Quantitative Methoden bei der Grundwassererschließung'. Konstanz (Sammelbd.).
- JOSOPAIT, V., LILLICH, W. (1975): Die Ermittlung der Grundwasserneubildung sowie ihre Kartendarstellung im Maßstab 1:200 000 unter Verwendung von geologischen und bodenkundlichen Karten. DGM, 19.Jg., H.5, S.132-136.
- JUCKEL, P. (1980): Datenbank Wasserwirtschaft - Stand und Entwicklung. Informationsber. des Bayr. Landesamtes f. Wasserwirtsch., H.3, S. 53-59, München.
- KELLER, R. (1962): Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes. Leipzig, 520 S.
- KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoMNQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. Zeitschr. dt. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol., Hydrogeochem., S. 89-95, Hannover.
- KOEPPEL, H.-W. (1975): Konzeption für ein Landschaftsinformationssystem. NL, 5D, H.12, S. 329-336.
- KOEPPEL, H.-W. (1978): IMGRID: Ein ideales EDV-Auswertungsprogramm für die Landschaftsdatenbank. NL, 53, H.1, S.24-27.
- KOEPPEL, H.-W., ARNOLD, F. (1980): Landschaftsinformationssystem. Gesamtbereicht. Bonn-Bad Godesberg, 219 S. und Anhang.
- KUEHNE, K. (1981): Das Geowissenschaftliche Datenbanksystem DASP. Unveröff. Kurzbeschreibung, Nieders. Landesamt f. Bodenforschung, Hannover, 14 S. und Anhang.
- LILLICH, W. (1970): Vergleich moderner Methoden zur Bestimmung des Grundwasseranteils am Gesamtabfluß der Erdoberfläche. Zeitschr. dt. Geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol., Hydrogeochem., S. 17-25, Hannover.
- LIMPRICH, H. (1970): Berechnung der Grundwasserneubildung und des nutzbaren und verbrauchbaren Grund- und Oberflächenwasserangebotes für die wasserwirtschaftliche Rahmenplanung. Zeitschr. dt. Geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol., Hydrogeochem., S.69-88, Hannover.
- LOCH, R., LOCK, W., ISCHER, K. (1978): Aufbau und Anwendung von maschinenlesbaren Flächenkatalogen in der räumlichen Planung. NL, 53, H.5, S.154-157.
- LOTTIG, G., PFEIFFER, D. (1974): Die Karte des Naturraumpotentials. Ein neues Ausdrucksmittel geowissenschaftlicher Forschung für Landesplanung und Raumordnung. Neues Archiv für Niedersachsen, Bd.23, H.1, S.3-13.
- MANNSFELD, K. (1978): Zur Kennzeichnung von Gebieteinheiten nach ihren Potentialeigenschaften. PGM, 122, H.1, S.17-27.
- MARK, D. (1975): Computer Analysis of Topography: A Comparison of Terrain Storage Methods. Geografiska Annaler, 57 A, 3-4, S.179-188.
- MATHER, J.R. (1978): The Climatic Water Budget in Environmental Analysis. Lexington, Mass., USA, 239 S.
- MERKL, G. (1974): Zur Prognose der mittleren monatlichen Wasserführung von Flüssen. Österreich. Wasserwirtsch., Jg.26, H.7/8, S.180-187.
- MERKL, U. (1981): Anwendung eines digitalen Gebietsmodells bei der Beurteilung der Wasserbilanz auf der Basis monatlicher Daten am Beispiel des Einzugsgebietes der Nidda. Vortrag: Symp. d. AK 'Hydrologie', Münster 1981.
- MÜLLER, F. (1973): Einführung in die Meteorologie. Bd. 1: Physik der Atmosphäre, 222 S.; Bd. 2: Physik der Atmosphäre, 223 S., Mannheim.
- MÜLLER, M., EHMKE, W. (1978): Anwendungsbeispiele aus der konzipierten Landschaftsdatenbank Baden-Württemberg. NL, 53, H.5, S.150-153.
- MÜLLER, W., BENECKE, P., RENGER, M. (1970): 2. Bodenphysikalische Kennwerte wichtiger Böden, Erfassungsmethodik, Klasseneinteilung und kartographische Darstellung. Beihefte GJ, Bodenkdl. Beiträge, 99/2, S.13-70, Hannover.
- MUNDY, E. (1973): Ein Dokumentations- und Abfrageprogramm für Schichtenverzeichnisse (DASCH). GJ, A7, S.25-33, Hannover.
- NATERMANN, E. (1958): Der Wasserhaushalt des oberen Emsgebietes nach dem Au-Linienv erfahren. Minister f. Ernährung, Landw. und Forsten NRW, Düsseldorf, 44 S.
- NEEF, E. (1966): Zur Frage des gebietswirtschaftlichen Potentials. Forschungen und Fortschritte, 40, S.65-96.
- NEULAND, H. (1975): Zur Vorhersage von Hang- und Böschungsrschungen mit Hilfe der Diskriminanzanalyse. Diss., Köln, 53 S. und Anhang.
- NIPPER, J. (1981): Autoregressiv- und Kriging-Modelle. Zwei Ansätze zur Erfassung raumvarianter Strukturen. Zürcher Geogr. Schr., H.1, S.31-45.
- OEST, K. (1979): EDV-gestützte Umweltanalysen und -dateien in der Bundesrepublik Deutschland (Zwischenbericht). Arb.material Nr.22, Akad. f. Raumforsch. Landesplan., 334 S., Hannover.

- OEST, K. (1980): EDV-gestützte Umweltanalysen und -dateien in der Bundesrepublik Deutschland (2. Zwischenbericht). Arb. Material Nr.33, Akad. f. Raumforsch. und Landesplan., 342 S., Hannover.
- PENTLAND, R.L., CUTHBERT, D.R. (1971): Operational Hydrology for Ungaged Streams by the Grid Square Technique. WRR, Vol.7, No.2, S.283-291.
- PETZOLO, E. (1981a): Berechnung monatlicher mittlerer Abfluss Höhen auf kleinerräumiger Basis. Zürcher Geogr. Schr., H.1, S.183-186.
- PETZOLO, E. (1981b): Grundwasserneubildungsrate und Bodenfeuchtevorrat. Ein Vergleich unterschiedlicher Berechnungsverfahren. Mitt. Otsch. Bodenkd. Ges., Bd.32, (im Druck).
- PETZOLO, E. (1981c): Ecological Potential as Limiting Factor in Regional Planning. IGU-Symp. 'Landscape Synthesis - Geocological Foundations of the Complex Landscape Management', Smolenice, CSSR (im Druck).
- PETZOLO, E., STREIT, U. (1980): Zur Bestimmung des Wasserdargebotspotentials. ALL, H.2, S.19-25.
- PFAU, R. (1966): Ein Beitrag zur Frage des Wassergehaltes und der Beregnungsbedürftigkeit landwirtschaftlich genutzter Böden im Raume der EWG. Meteorol. Rdsch., 19, 2, S.33-46.
- PREUSS, E.F. (1978a): Wasserhaushaltsuntersuchungen mit dem USDAHL-Modell. ZKF, 19, S.103-114.
- PREUSS, E.F. (1978b): Untersuchungen über die Einflüsse der Verstädterung auf den Wasserhaushalt des Bille-Gebietes mit Hilfe des USDAHL-Modells. ZKF, 19, S.216-225.
- PUDLATZ, H. (1980): Computer-Kartographie. Programmbeschreibungen. Vervielf. Manuskr., Rechenzentr. der Uni Münster, 38 S.
- RASE, W.D. (1981): Das EDV-gestützte Informationssystem für die Raumordnung in der Bundesrepublik Deutschland. Klagenfurter Geogr. Schr., H.2.
- REGIONALE PLANUNGSGEMEINSCHAFT UNTERMAIN / RPU (1977): Informations- und Planungssystem. Erstellt im Rahmen des erdwissenschaftlichen Flugzeugmessprogramms. Frankfurt, 88 S.
- RENGER, M., STREBEL, O. (1980a): Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften. WB, 8, S.362-366.
- RENGER, M., STREBEL, O. (1980b): Beregnungsbedarf landwirtschaftlicher Kulturen in Abhängigkeit vom Boden. WB, 12, S.572-575.
- RENGER, M., STREBEL, O., GIESEL, W. (1974): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten. 4. Bericht: Grundwasserneubildung. ZKF, 15, S.353-366.
- RENGER, M., STREBEL, O., GIESEL, W. (1975): Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten. 5. Bericht: Staunässebildung. ZKF, 16, S.160-171.
- RODDA, D.W.C., MOORE, R.V., LIDDAMENT, J.L. (1978): The Water Archive - Phase 2. Reading/U.K., 27 S.
- RUMP, H.H. (1976): Mathematische Vorhersagemodelle für Pestizide und Schadstoffe in Gewässern der niederrheinischen Bucht und der Nordeifel. Kölner Geogr. Arb., H.34, II, 122 S.
- SACHS, L. (1974): Angewandte Statistik. 4.Aufl., Berlin, 549 S.
- SCHÄFER, H. (1974): Grobkonzept für das 'Informationssystem Raumentwicklung'. Informationen zur Raumentwicklung, H.6, S.243-250.
- SCHEKORR, E. (1972): Zur Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Gebietswasserbilanzen. WW, 62, 12, S.367-370.
- SCHIFF, H. (1979): Ergebnisse von Lysimeteruntersuchungen in Hannover-Herrenhausen. ZKF, 19, S.197-210.
- SCHIRMER, J. (1955): Isohyetenkarten des Deutschen Wetterdienstes, Maßstab 1:250 000. Offenbach.
- SCHIMMING, D. (1977): Das topographische Datenbank- und Verarbeitungssystem (TDMS 1100) der Deutschen Bundespost. Darmstadt, 142 S.
- SCHOSS, H.D. (1977): Die Bestimmung des Versiegelungsfaktors nach Meßtischblattsignaturen. WB, 5, S.138-140.
- SCHREIBER, K.-F. (1969): Landschaftsökologische und standortskundliche Untersuchungen im nördlichen Waadtland als Grundlage für die Orts- und Regionalplanung. Arb. der Univ. Hohenheim, Bd.45, 166 S. und Kartenanhang.
- SCHREIBER, K.-F. (1975/1977): Über einige methodische Probleme und Ergebnisse der phänologischen Kartierung der Schweiz. Int. Symp. Int. Ver. Vegetationskunde, Rinteln 1975, Vaduz 1977, S.271-287.
- SCHREIBER, K.-F. (1976): Berücksichtigung des ökologischen Potentials bei Entwicklungen im ländlichen Raum. ZKF, 17, S.257-265.
- SCHREIBER, K.-F. (1980): Brachflächen in der Kulturlandschaft. Daten und Dokumente zum Umweltschutz, Sonderreihe Umwelttagung, Nr.30: Ökologische Probleme in Agrarlandschaften. Univ. Hohenheim, S.61-93.
- SCHREIBER, K.-F. / LEHRSTUHL LANDSCHAFTSÖKOLOGIE (1980): Landschaftsplan Mettmann. Als Manuskr. vervielf., Münster, 668 S., 2 Atl., 5 Anl.Ktn.
- SCHRIMPFF, E. (1975): Ein mathematisches Modell zur Vorhersage von Abflußereignissen im Bereich der Anden Kolumbiens/Südamerika. Diss., Köln, 120 S.
- SCHRIMPFF, E., HERRMANN, R. (1978): Spurenmetallgehalte im Schnee Nordostbayerns. Gesundheits-Ingénieur, 99, H.3, S.70-74.
- SCHUMACHER, M. (1976): Karten der langjährigen mittleren Abfluß- und Verdunstungshöhe für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. DGM, 20.Jg., H.3, S.61-70.
- SCHUMACHER, M. (1979): Aufbau einer Informationsbank für umweltrelevante gewässerkundliche Daten. Bericht der Bundesanst. für Gewässerkunde, Koblenz, 91 S.
- SCHWENTKER, F., STREIT, U., WIENEKE, G. (1981): Geostatistik. Fortran-Programme zur statistischen Bearbeitung raumbezogener Daten. Teil 1: Räumliche Autokorrelationskoeffizienten, Variogramm, Punkt-Kriging. ALL, H.4, 81 S.
- SFB 26 (SONDERFORSCHUNGSBEREICH 26) (1978): Teilprojekt M6: Das ökologische Potential als Engpaßfaktor in der Regionalplanung. Finanzierungsantrag. Münster, S.188-219.
- SFB 26 (1979): Arbeits- und Ergebnisbericht 1978-1979. Teilprojekt M6: Das ökologische Potential als Engpaßfaktor in der Regionalplanung. Münster, S. 101-112.
- SOLOMON, S.I., DENOUVILLIEZ, J.P., CHART, E.J., WOOLLEY, J.A., CADOU, C. (1968): The Use of a Square Grid System for Computer Estimation of Precipitation, Temperature, and Runoff. WRR, Vol.4, No.5, S.919-929.
- STRÄSSER, M. (1979): Angerland. Studien zum Wasserhaushalt des Angertales. Mettmann, 21 S.
- STREIT, U. (1973): Ein mathematisches Modell zur Simulation von Abflußganglinien. GGS, H.27, 97 S.

- STREIT, U. (1975a): Eine Modellstudie zur Abschätzung von Wasserhaushaltskomponenten für semi-aride Gebiete - am Beispiel der Insel Porto Santo/Madeira-Archipel. Werkstattfäpapere, 2, S. 1-50, Geogr. Inst. Univ. Gießen.
- STREIT, U. (1975b): Über eine Anwendungsmöglichkeit von Simulationsmodellen bei der wasserwirtschaftlichen Planung. Tagungsbericht und wissenschaftl. Abh., 40. Dt. Geogr. tag in Innsbruck. Wiesbaden, S. 503-514.
- STREIT, U. (1978): Räumliche und zeitliche Erhaltensneigung als Ansatzpunkt stochastischer Modellbildung in der physischen Geographie. Karlsruher Manusk. zur math. und theor. Wirtsch.- und Soz.geogr., H.30, 22 S.
- STREIT, U. (1979): Raumvariante Erweiterung von Zeitreihenmodellen. GGS, H.46, 105 S.
- STREIT, U. (1981a): Zur Methodik der Interpolation und Mittelbildung punktbezogener Daten bei räumlichen Informationssystemen. Klagenfurter Geogr. Schr., H.2, S.309-333.
- STREIT, U. (1981b): Kriging - eine geostatistische Methode zur räumlichen Interpolation hydrologischer Informationen. WW, 71, 7+8, S.219-223.
- STREIT, U. (1981c): Ein Konzept zur Disaggregation flächenbezogener hydrologischer Daten. Vortrag: Symp. des AK 'Hydrologie', Münster 1981.
- SYMADER, W. (1976): Multivariate Nährstoffuntersuchungen zu Vorhersagezwecken in Fließgewässern am Nordrand der Eifel. Kölner Geogr. Abh., H.34, I, S.1-154.
- TCHANG, M. (1972): Programme de complément à la grille d'information. DISP, Nr.24, S.18-24.
- THIESSEN, A.H. (1911): Precipitation Averages for Large Areas. Monthly Weather Review, 39, S. 1082-1084.
- THOMAS, W. (1981): Entwicklung eines Immissionsmeßsystems für PCA, Chlorkohlenwasserstoffe und Spurenmetalle mittels epiphytischer Moose - angewandt auf den Raum Bayern. Bayreuther Geowissenschaftl. Arb., Bd.3, 143 S.
- THORNTWHAITE, C.W. (1959): zitiert in UHLIG, S. (1959): siehe dort.
- TOMLINSON, R.F., CALKINS, H.W., MARBLE, D.F. (1976): Computer Handling of Geographical Data. Paris, 214 S.
- ÜBERLA, K. (1968): Faktorenanalyse. Berlin, 399 S.
- UHLIG, S. (1954): Berechnung der Verdunstung aus klimatologischen Daten. Mitt. des Dt. Wetterdienstes, 6, S.6/1-6/24.
- UHLIG, S. (1959): Wasserhaushaltsbetrachtungen nach THORNTWHAITE. Zeitschr. für Acker- und Pflanzenbau, 109, S.384-407.
- VELOMANN, D. (1967): Fortran Programming for the Behavioral Sciences. New York, 396 S.
- VONDERHORST, P. (1972): Die Möglichkeiten der Luftbildinterpretation zur Nachführung des Informationsrasters. DISP, Nr.24, S.25-30.
- WEIDHAAS, C. (1982): Räumliche Informationssysteme in der Hydrologie - ein Überblick. Dipl.Ar., Inst.f.Geogr., Münster (in Vorb.).
- WEIHS, E. (1978): Zum Stand der Entwicklungsarbeiten des bayerischen Umweltinformationssystems. NL, 53, H.5, S.146-149.
- WEIHS, E. (1981): Zum methodischen Ansatz der ökologischen Kartierung der Europäischen Gemeinschaft. NL, 56, H.1, S.18-22.
- WERNER, J. (1974): Zur Bedeutung einer EDV-Relief-Daten für die Geomorphologie. Zeitschr. f. Geomorphologie, N.F., 18, H.3, S.316-328.
- WERNER, J. (1980): Ein vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration (AET) von Waldbeständen. WW, 70, 7+8, S.270-274.
- WEYER, K.U. (1972): Ermittlung der Grundwassermengen in den Festgestein der Mittelgebirge aus Messungen des Trockenwetterabflusses. GJ, C3, S. 19-114, Hannover.
- WINTER, F. (1982): ARIADNE - Fortran-Programm zur Überlagerung von Polygonen. Progr.beschr.
- WUNDT, W. (1958): Die Kleinstwasserführung der Flüsse als Maß für die verfügbaren Grundwassermengen. Forsch. zur dt. Landeskunde, Bd.105, II, S.47-54, Remagen.
- ZOST, W. (1976): Das Geländemodell des Informationsrasters. DISP, Nr.43, S.23-25.

Benutzte Karten- und Tabellenwerke:

- Deutsche Grundkarte (1:5000)
- Topographische Karten (TK 25, 50, 100, 200)
- Topographische Karten - OH-Ausgaben
- Bodenkarten (1:50 000)
- Geologische Karten (1:25 000)
- Isohyetenkarten des Dt. Wetterdienstes (1:250 000); vgl. SCHIRMER (1955)
- Hydrologischer Atlas der BR Deutschland
- Abfluhhaupttabellen der Wasserwirtschaftsämter
- Hydrologisches Jahrbuch (verschiedene Stromgebiete)
- Deutsches Meteorologisches Jahrbuch, Offenbach

EDV-Programme; Daten:

Alle Berechnungen wurden im Rechenzentrum der Universität Münster auf einer IBM-3032 bzw. im Institut für Geographie der Universität Münster auf einer CROMEMCO-CS3 - Rechenanlage durchgeführt. Ein Großteil der Programme ist auf beiden Rechnern adaptiert. Wegen des großen Umfangs bzw. aus urheberrechtlichen Gründen ist eine Veröffentlichung der benutzten Daten und Programme an dieser Stelle nicht möglich; für weitere Auskünfte steht der Verfasser jedoch gern zur Verfügung. Dies gilt auch für die im Rahmen dieser Arbeit erstellten und nicht explizit genannten Programme zur Abschätzung/Simulation des Wasserdargebotes. Die Plots wurden auf der CS3-Anlage mit einem TEKTRONIX-4662-Plotter erzeugt.

Benutzte oder in der Arbeit genannte Programme:

- ARIADNE: Überlagerung von Polygonen. Autor: F.Winter/ Bavendorf; auf IBM und CS3 adaptiert: H.J.Heineke/Münster.
- BILSIM: Bilanzierung und Simulation des Wasserdargebotes. Autor, auf IBM und CS3 adaptiert: Petzold.
- BLOCKPLOT: Zeichnen dreidimensionaler Histogramme. Autor und auf IBM adaptiert: H.Pudlatz/Münster. Auf CS3 adaptiert: Petzold.

BMD02R: Schrittweise multiple lineare Regression.
Autor: Health Sciences Computing Facility, UCLA.
Auf IBM adaptiert u. modifiziert: U.Streit/Petzold.

CHOROPLOT: Kartendarstellungen auf dem Plotter/IBM.
Vgl. PUDLATZ (1980).

RELIEF: Berechnung morphometrischer Parameter auf Rasterbasis. Autor, auf IBM und CS3 adaptiert: Petzold.

EGZ: Prüfen von Punkten/Rasterflächen auf Zugehörigkeit zu Polygonen u. vice versa. Autor, auf IBM und CS3 adaptiert: Petzold.

FAKTO: Hauptkomponentenanalyse. Vgl. VELDMANN (1967).
Auf IBM adaptiert: Petzold.

FLUSS: Zeichnen von Flußdiagrammen. Autor, auf CS3 adaptiert: Petzold.

GEOMAP: Kartenerstellung auf dem Schnelldrucker. Vgl. PUDLATZ (1980).

GRM: Berechnung gewichteter räumlicher Mittelwerte/Quadrantenverfahren. Autor, auf IBM und CS3 adaptiert: Petzold.

IMGRID, GRID: Überlagerung, Bewertung und kartographische Darstellung (Schnelldrucker) von Rasterdaten. Vgl. KOEPPEL (1978).

ISDKON: Isoliniendarstellungen auf dem Plotter. Autor: Meteorol.Inst. TH Darmstadt. Auf CS3 adaptiert: G.Schwanhäußer/J.Schweter.

JGNVT: Test auf Normalverteilung. Autor: J.Güsselfeldt, Freiburg. Auf IBM adaptiert: H.J.Heineke/Petzold.

KWB: Berechnung der klimatischen Wasserbilanz nach verschiedenen Algorithmen. Autor, auf IBM und CS3 adaptiert: Petzold.

LUKIS: Landschaftsökologisches Informationssystem, Am Lehrstuhl Landschaftsökologie Münster (Prof.Dr. K.-F.Schreiber) unter Mitarbeit des Verf. erstellt. Eine Beschreibung geben DURWEN & GENKINGER (1979). Auf IBM adaptiert.

NAG: Unterprogrammbibliothek zur Lösung numerischer Probleme. Auf IBM implementiert.

PLOT3D: Zeichnen dreidimensionaler Blockbilder auf dem Plotter. Autor: Inst.f.angewandte Geodäsie, Hannover. Auf IBM und CS3 adaptiert: H.J.Heineke.

SPSS: Programmsystem mit Verfahren der uni- und multivariaten Statistik. Auf IBM implementiert.

Anhang

Tab. 39: Verzeichnis der Flußgebiete (vgl. Tab. 5-8 und Abb. 10):

Nr.	Pegel	Gewässer	RW	HW	H	FL	Beob. Jahre
1	Langenberg	Deilbach	78,3	87,5	214	57,0	21
2	Ratingen	Angerbach	67,1	86,4	152	62,9	25
3	Erkrath	Düssel	70,6	79,8	169	71,3	22
4	Eigen	Düssel	72,7	79,8	183	42,0	24
5	Neandertal	Mettmannbach	68,5	79,8	156	22,4	16
6	Düssel	Düssel	74,8	82,0	204	14,1	24
7	Neviges	Hardenberger Bach	77,6	85,3	225	20,2	18
8	Marienbaum	Hohe Ley	28,0	123,0	29	55,6	25
9	Sendenhorst	Angel	140,5	140,8	95	65,0	15
10	Borken	Borkener Aa	62,9	143,0	64	71,4	16
11	Oesterweg	Hessel	158,7	170,8	109	51,7	16
12	Haiger	Dill	154,5	30,9	430	63,0	16
13	Kolonie Neuhaus	Heve	155,9	99,7	372	64,5	30
14	Kaan-Marienborn	Weiß	148,9	35,4	397	59,6	22
15	Raumland	Odeborn	171,3	65,3	592	84,6	29
16	Schermbbeck	Mühlenbach	60,1	131,9	51	20,5	16
17	Darfeld	Vechte	90,9	167,4	107	21,2	16
18	Sythen II	Sandbach	91,6	138,6	63	42,7	16
19	Lutum	Berkel	89,5	160,8	99	38,3	16
20	Feudingen	Lahn	159,4	44,2	532	25,0	26
21	Nichtinghausen	Henne	160,8	79,8	491	36,8	20
22	Kraghammer	Ihne	126,5	66,4	421	37,2	25
23	Börlinghausen	Lister	120,9	64,2	456	48,0	30
24	Amecke	Sorpe	136,3	82,0	427	28,3	30
25	Menkhausen	Wenne	155,2	72,0	440	42,3	24
26	Rosenthal	Brachtpe	124,4	55,3	404	48,9	15
27	Morsbach	Wisser	125,1	42,0	323	43,1	23
28	8rauersdorf	Obernau	151,7	44,2	486	11,0	17
29	Oberkirchen	Lenne	169,9	70,9	633	37,0	29
30	Forsthaus Waldbach	Aa	192,2	104,2	409	28,0	30

Erläuterungen zu den nachfolgenden Tabellen (A-F) im Text auf S. 80.

Tab. A: Zeitinvariante Daten:

Pegel	km ²	H	RW	HW	WALD	SIEG	E/km ²
6 Düssel	14,1	204	74,8	82,0	13,5	4,3	17
4 Eigen	42,0	183	72,7	79,8	9,3	3,1	50
3 Erkrath	71,3	169	70,6	79,8	6,2	5,5	84

Tab. 8: Düssel

mm	1/s*km ²	m ³ /s	m ³ /mon
NJahr	1072 /a	34,0	0,48
AJahr	769 /a	24,4	0,34
A0Bjahr	472 /a	15,0	0,21
ANIJahr	297 /a	9,4	0,13
A min	40 /mon	15,4	0,22
A0B min	23 /mon	8,6	0,12
ANI min	13 /mon	4,9	0,07
		564000	35 /mon 13,5 0,57 1470000
		324000	14 /mon 5,2 0,22 588000
		183000	19 /mon 7,3 0,31 798000

Tab. C: Eigen

mm	1/s*km ²	m ³ /s	m ³ /mon
1052 /a	33,4	1,40	3682000
614 /a	19,5	0,82	2149000
285 /a	9,0	0,38	998000
329 /a	10,4	0,44	1152000

Tab. D: Erkrath

mm	1/s*km ²	m ³ /s	m ³ /mon
1019 /a	32,3	2,30	6044000
555 /a	17,6	1,25	3285000
207 /a	6,6	0,47	1235000
348 /a	11,0	0,79	2076000
34 /mon	12,7	0,91	2437000
11 /mon	4,1	0,29	777000
22 /mon	8,5	0,61	1581000

Tab. E: Einwohner, Wasserbedarf, Grundwassergrenzmenge, Überschuß, mögl. Einwohnerzuwachs:

Pegel	EINW	BED	ANI min	R	ZEW
6 Düssel	17000	77000	183000	106000	24000
4 Eigen	50000	225000	798000	573000	127000
3 Erkrath	84000	378000	1581000	1203000	267000
Düsseldorf	595000	2678000	-	-	-
Wuppertal	394000	1773000	-	-	-

Tab. F: Versiegelbare Flächen:

Pegel	ANImin	Bedarf	Versiegelbar	Flußgebiet
	(mm)	(mm) (%)	(%)	(km ²)
6 Düssel	13	6	42	58 8,2 14,1
4 Eigen	19	5	28	72 30,2 42,0
3 Erkrath	22	7	31	69 49,2 71,3

Beispiele für eine mögliche Anwendung der vorgestellten Modelle:

Abschließend soll die Anwendung der in der Arbeit vorgestellten Verfahren an zwei Beispielen unter Benutzung der Daten der Pegel 6, 4 und 3 (Düssel, Ei- gen, Erkrath) vorgestellt werden. Alle Pegel liegen an der Düssel; Pegel 6 ist ein Teilgebiet von 4, Pegel 4 wiederum ein Teilgebiet von Pegel 3. Die geologische Ausstattung aller drei Einzugsgebiete ist weitgehend gleich: Oberdevonische und unterkarbonische Tonsteine und Schiefer im Untergrund werden stellenweise von Kalksteinen bzw. Massenkalken des Ober- und Mitteldevons abgelöst. Besonders im westlichen Bereich ist eine Lößauflage zu finden. Hinsichtlich der Böden unterscheidet sich der Oberlauf der Düssel (Pegel 6) vom Gesamtgebiet: Hier treten lehmig-schluffige Braunerden und Braunerde-Pseudogleye auf umgelagertem Löß auf, bis zu 1 m mächtig bei einer nutzbaren Feldkapazität von 70 - 120 mm/m. In den restlichen Bereichen aller Einzugsgebiete finden sich bis zu 2 m mächtige, teilweise pseudovergleyte, Parabraunerden auf umgelagerten Lößlehm mit NFK-Werten von 120 - 160 mm/m. Die Täler bedecken kolluviale Böden aus umgelagertem Lößlehm, teilweise vergleyt oder pseudovergleyt, und die Talauen selbst bestehen aus Gleyen bzw. Naßgleyen. In allen Einzugsgebieten zeugen aufgelassene oder aktive Kalksteinbrüche von den im Untergrund anstehenden devonischen Massenkalken.

Alle Gebiete werden teilweise von mitunter dicht versiegelten Siedlungsflächen bedeckt: Pegel Düssel mit Ortsteilen von Wülfrath und Wuppertal, Pegel Ei- gen mit Teilen von Wülfrath, Dornap, Vohwinkel, Haan und Gruiten, und Pegel Erkrath mit Ortsteilen von Wülfrath, Hochdahl, Erkrath, Metzkausen und Mettmann. Für die Flussgebiete bzw. Teilgebiete gelten die Daten in Tab. A. Die Einwohnerdichte (gerundet, in 1000) errechnet sich aus der mittleren Einwohnerdichte des Kreises Mettmann (1177 E/km² 1980; Quelle: Statist.Jb.NRW) und der Flussgebietsgröße. Da der Raum relativ dicht besiedelt ist (z.B. Mettmann 37, Erkrath 42, Wülfrath 20 Tausend Einwohner), sind diese Zahlen realistisch. Für die Einzugsgebiete 6, 4 und 3 gelten die hydrologischen Daten in Tab. B,C, D. Die maximal föderbare Grundwassermenge findet sich in Zeile 7; vgl. Kap. 7.3. zur Ermittlung dieser Daten. Unter Berücksichtigung der Gebietseinwohnerzahlen (Tab.A) ergibt sich als Gesamtbedarf pro Einwohner und Monat (BED) bei einem pro-Kopf-Verbrauch von 150 l/Tag ein verbleibender Rest (R), der noch zusätzliche Einwohner (ZEW) im jeweiligen Flussgebiet versorgen könnte: Siehe Tab.E. Zum Vergleich ist der nach obigen Kriterien abgeschätzte Wasserbedarf für

Düsseldorf und Wuppertal aufgelistet. Es zeigt sich, daß der Rest des Gesamteinzugsgebietes Erkrath nicht zur Deckung des Wuppertaler Bedarfs ausreicht, zumindest nicht während der verdunstungsstarken Jahreszeit. Nach Kap. 7.4. ließe sich aber auch das Einzugsgebiet soweit versiegeln, daß es gerade zur Dek- kung des eigenen Grundwasserbedarfes ausreicht. Da mit könnten die in Tab. F aufgelisteten Teilgebiete versiegelt werden. Allerdings steigt mit zunehmender Bebauung auch die Einwohnerzahl und damit der Bedarf an Wasser, so daß diese Abschätzungen nur bedingt richtig sind und mehr ein Denkmodell darstellen.

Zweites Beispiel: Eine Kläranlage in Höhe des Pegels Erkrath benötige eine ständige Mindestabflußmenge von 0,1 m³/s zur ausreichenden Verdünnung der einge- leiteten Abwassermengen. Wieviel Grundwasser kann trotzdem dem Einzugsgebiet z.B. zur Trinkwasserversor- gung der Gemeinde Erkrath entnommen werden?

Der Minimumswert des Niedrigwasserabflusses erreicht 0,61 m³/s (Tab. D) im langjährigen Monatsmittel (Jun). Somit stehen ca. 0,5 m³/s (=18 mm) zur ständigen Grundwasserentnahme bereit. Derselbe Einleiter müßte - bei Einleitung in Höhe des Pegels Düssel - damit rechnen, entweder die zulässigen Konzentrationen zu überschreiten, oder seine Ableitung einzuschränken, falls im Minimum-Monat gleichzeitig noch die Grenz- menge für das Oberflächenwasser entnommen wird, bzw. eine länger dauernde regenarme Periode eintritt. 0,1 m³/s entsprechen hier 18 mm Abflußhöhe; dieser Wert wird vom mittleren Niedrigwasserabfluß in den Monaten Juni bis September nicht erreicht. Ggf. wäre die Einleitungsstelle weiter flussabwärts zu verlegen; zur Abschätzung der an dieser Stelle nicht gemesse- nen Abflußdaten siehe Kap. 6.10. ff.

Natürlich handelt es sich bei den vorgestellten Bei- spielen nur um Denkmodelle zur Abschätzung der mög- lichen Größenordnung von hydrologischen Komponenten. Wenig detaillierte Daten - wie z.B. Siedlungs- bzw. Versiegelungsdichte oder Bevölkerungszahlen im Fluss- gebiet - sind genauso Unsicherheitsfaktoren wie un- genaue/fehlende Information über Geologie und Pedolo- gie, oder Vegetationseinfluß auf den Wasserhaushalt; diese Probleme wurden bereits angesprochen. Nicht an- gesprochen wurde der Aspekt der Wassergüte; ein Teil der rechnerisch verfügbaren Wassermengen dürfte aus Qualitätsgründen (z.B. Nitrit-, Nitratgehalt) für die Einspeisung ins Trinkwassernetz nicht in Frage kommen. Diese Probleme wurden in der Arbeit bereits angerissen und sind zukünftige Untersuchungsschwerpunkte, wobei auch dort wieder darauf geachtet werden soll, ein- fach strukturierte und handhabbare Verfahren unter Be- rücksichtigung allgemein verfübarer Daten einzusetzen.

MÜNSTERSCHE GEOGRAPHISCHE ARBEITEN

Herausgegeben von den Hochschullehrern des Instituts für Geographie
der Westfälischen Wilhelms-Universität

Wilfrid Bach - Hermann Hambloch - Heinz Heineberg - Ludwig Hempel -
Friedrich-Karl Holtmeier - Cay Lienau - Alois Mayr - Karl-Friedrich
Schreiber - Ulrich Streit - Dietbert Thannheiser - Peter Weber -
Julius Werner

Schriftleitung : Alois Mayr

- H.1 Alois Mayr: Universität und Stadt. Ein stadt-, wirtschafts- und sozialgeographischer Vergleich alter und neuer Hochschulstandorte in der Bundesrepublik Deutschland.
1979. 375 Seiten mit 43 Tab., 28 Abb., 24 Bildern, 8 Farbkarten im Anhang, DM 60,-. ISBN 3-506-73201-3.
- H.2 Hermann Mattes: Der Tannenhäher im Engadin. Studien zu seiner Ökologie und Funktion im Arvenwald.
1978. 87 Seiten mit 52 Abb., DM 20,-. ISBN 3-506-73202-1.
- H.3 Friedrich-Karl Holtmeier: Die bodennahen Winde in den Hochlagen der Indian Peaks Section (Colorado Front Range).
Ludwig Hempel: Physiogeographische Studien auf der Insel Fuerteventura (Kanarische Inseln).
1978. 103 Seiten mit 21 Abb., 52 Fotos und 1 Kartenbeilage, DM 20,-. ISBN 3-506-73203-x.
- H.4 Peter Weber (Hrsg.): Peripherie Räume - Strukturen und Entwicklungen in europäischen Problemgebieten. Mit Beiträgen von Bernhard Butzin, Hans Elsasser, Wilfried Heller, Cay Lienau/Hartmut Hermanns, Rolf Lindemann, Hartmut Lücke, Frank Nagel, Wolfgang Taubmann und Peter Weber (Berichtband einer Arbeitssitzung des Geographentags in Göttingen 1979).
1979. 183 Seiten mit insg. 23 Abb. und 32 Karten, DM 30,-.
ISBN 3-506-73204-8.
- H.5 Heinz Heineberg (Hrsg.): Einkaufszentren in Deutschland. Entwicklung, Forschungsstand und -probleme mit einer annotierten Auswahlbibliographie. Mit Beiträgen von Bernhard Butzin, Bernd R. Falk, Marianne Grewe, Heinz Heineberg, Alois Mayr und Winfried Meschede.
1980. 165 Seiten mit insg. 22 Tab., 20 Abb. im Text und 12 Abb. im Anhang, DM 30,-. ISBN 3-506-73205-6.
- H.6 Wilfrid Bach/Ulrich Hampicke: Klima und Umwelt.
Wilfrid Bach: Untersuchung der Beeinflussung des Klimas durch anthropogene Faktoren.
Ulrich Hampicke/Wilfrid Bach: Die Rolle terrestrischer Ökosysteme im globalen Kohlenstoff-Kreislauf.
1980. 104 Seiten mit insg. 12 Tab., 17 Übersichten und 24 Abb., DM 31,50. ISBN 3-506-73206-4.
- H.7 Peter Schnell/Peter Weber (Hrsg.): Agglomeration und Freizeitraum. Vorträge eines Symposiums der Arbeitsgruppe "Geography of Tourism and Recreation" der Internationalen Geographischen Union (IGU/UGI) in Münster 1979.
27 Beiträge von Autoren aus Bulgarien, Frankreich, Italien, der Tschechoslowakei, den USA und der Bundesrepublik Deutschland.
1980. 238 Seiten mit insg. 94 Abb., DM 40,-. ISBN 3-506-73207-2.
- H.8 Norbert de Lange: Städtetypisierung in Nordrhein-Westfalen im raum-zeitlichen Vergleich 1961 und 1970 mit Hilfe multivariater Methoden - eine empirische Städtesystemanalyse.
1980. 178 Seiten mit 56 Tab. und 37 Abb. (davon 4 im Anhang), DM 34,-. ISBN 3-506-73208-0.
- H.9 Ludwig Hempel/Hartmut Brettschneider: Beiträge zur "Energetischen Geomorphologie" in Trockengebieten.
Ludwig Hempel: Studien über rezenten und fossilen Verwitterungsvorgänge im Vulkangestein der Insel Fuerteventura (Islas Canarias, Spanien) sowie Folgerungen für die quartäre Klimageschichte.
Hartmut Brettschneider: Mikroklima und Verwitterung an Beispielen aus der Sierra Nevada Spaniens und aus Nordafrika mit Grundlagenstudien zur Glatthanggenese.
1980. 142 Seiten mit insg. 27 Fotos (davon 4 farbig), 43 Abb., 4 röntgenographischen Diagrammen und 3 Karten, DM 37,-. ISBN 3-506-73209-0.

- H.10 Dietbert Thannheiser: *Die Küstenvegetation Ostkanadas.* 1981. 204 Seiten mit 41 Tab. und 166 Abb. (davon 16 Fotos), DM 41,50. ISBN 3-506-73210-2.
- H.11 Gerhard Bahrenberg / Ulrich Streit (Hrsg.): *German Quantitative Geography. Papers presented at the 2nd European Conference on 'Theoretical and Quantitative Geography'* in Cambridge 1980. Mit Beiträgen von Gerhard Bahrenberg, Hubert Bischoff, Wolf Gaebe, Ernst Giese, Georg Heygster, Franz-Josef Kemper, Hans Kern, Kurt Klein, Günter Löffler, Josef Nipper, Aribert Peters, Reiner Schwarz, Ulrich Streit, Wolfhard Symader, Wolfgang Taubmann, Wilfried Wittenberg. 1981. 182 Seiten mit 22 Tab., 47 Abb. und 1 Farbkarte im Anhang, DM 30,-. ISBN 3-506-73211-0.
- H.12 Bernhard Butzin (Hrsg.): *Entwicklungs- und Planungsprobleme in Nordeuropa.* Mit Beiträgen von Annette Bergmann, Ruth Büning, Bernhard Butzin, Staffan Helmfrid, Rolf Lindemann, Friedhelm Pelzer, Peter Sedlacek, Dietbert Thannheiser, Erhard Treude und Uuno Varjo. 1981. 178 Seiten mit 68 Tab., 53 Abb., DM 31,50. ISBN 3-506-73212-9.
- H.13 Volker Rönick: *Das nordöstliche Rio Grande do Sul/Brasilien - Naturräumliche Gliederung und wirtschaftliche Bewertung.* 1981. 152 Seiten mit 21 Tab., 35 Abb. und 14 Fotos, DM 28,50. ISBN 3-506-73213-7.
- H.14 Ekkehard Petzold: *Einsatzmöglichkeiten EDV-gestützter räumlicher Informationssysteme für hydrologische Planungszwecke. Bilanzierung des Wasserdargebotes auf kleinräumiger Basis.* 1982. 82 Seiten mit 39 Tab., 12 Abb. und Anhang. ISBN 3-596-73214-5.

In Vorbereitung:

- H.15 Heinz Heineberg/Alois Mayr/Karl-Friedrich Schreiber/ Peter Weber (Hrsg.): *Westfalen und angrenzende Regionen. Festschrift zum 44. Deutschen Geographentag in Münster 1983, Teil I.*
- H.16 Heinz Heineberg/Alois Mayr/Karl-Friedrich Schreiber/ Peter Weber (Hrsg.): *Exkursionen in Westfalen und angrenzenden Regionen. Festschrift zum 44. Deutschen Geographentag in Münster 1983, Teil II.*

VERLAG FERDINAND SCHÖNINGH, POSTFACH 2540, D-4790 PADERBORN
 Anfragen bezüglich Schriftentausch werden erbeten an die Schriftleitung,
 Institut für Geographie der Westfälischen Wilhelms-Universität,
 Robert-Koch-Straße 26, D-4400 Münster.