

Beitragsserien

Raumgliederung für die Ökologische Umweltbeobachtung des Bundes und der Länder

Winfried Schröder, Gunther Schmidt

Institut für Umweltwissenschaften, Hochschule Vechta, Postfach 53 53, D-49364 Vechta

Korrespondenzautor: Univ.-Prof. Dr. Winfried Schröder; e-mail: winfried.schroeder@ispa.uni-vechta.de

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2000.05.015>

Zusammenfassung. Für den Aufbau einer bundesweiten Ökologischen Umweltbeobachtung ist eine detaillierte Kenntnis der überwiegend von Fachbehörden der Bundesländer betriebenen Messnetze hinsichtlich ihrer Messgrößen, Messmethoden und ihrer naturräumlichen Einordnung wichtig. Raumgliederungen sind u.a. für eine solche Analyse bestehender und die Planung neuer Umweltmessnetze wichtig. Der Beitrag behandelt methodische Grundlagen einer standortökologischen Raumgliederung Deutschlands und ihre Verwendung für die Zusammenführung umweltrelevanter Daten des Bundes und der Länder zu einem Umweltbeobachtungssystem. Die vorgestellte Raumgliederung ist Teil eines GIS- und Statistik-basierten Instrumentariums, mit dem der Bund für verschiedene Fragestellungen wichtige sowie naturräumlich und geostatistisch repräsentative Messstationen von Bund und Ländern als potentielle Datenquellen recherchieren kann. Auf der Grundlage einer solchen Recherche sollen sich vorhandene Messdaten nach ökologischen und räumlicher Gesichtspunkten zusammenführen lassen.

Schlagwörter: Messnetze, Repräsentanz, Datenvergleichbarkeit; Raumgliederung, ökologische; Statistik, Geostatistik; Umweltbeobachtung, ökologische, sektorale

Abstract. Ecoregionalizations are important for the evaluation of monitoring networks. In this article a method is described concerning how to define Germany's ecoregions by using ecological data on soil, vegetation, climate and elevation through the aid of classification and regression trees. The resulting ecoregions can be linked to metadata (parameters, methods, quality control and assurance measures) from thousands of Germany's environmental monitoring sites. Together with GIS procedures, multivariate statistics and geostatistics, ecoregions are useful for integrating data of environmental measurements according to ecological and spatial criteria.

Keywords: Environmental monitoring, integrated, compartmental; networks, representativity, comparability of environmental data; regionalization, ecological; statistics, geostatistics

1 Stand der Umweltbeobachtung

1.1 Gegenwärtige Praxis

In Deutschland gibt es eine Vielzahl umweltrelevanter Datenerhebungen. Für staatliche Umweltschutzaufgaben sind insbesondere Messnetze der Dauerbeobachtung wichtig, wie sie überwiegend von den Bundesländern betrieben werden. Diese sind meist auf die Untersuchung einzelner Umweltmedien wie Wasser, Boden oder Luft ausgerichtet und werden oft unabhängig voneinander nach länderspezifischen Kriterien räumlich angeordnet. Das hat dazu geführt, dass die Messnetzgeometrien nicht kongruent sind. Seit den achtziger Jahren wird intensiv die Idee diskutiert, alle wichtigen Umweltmedien jeweils *zusammen* an ausgewählten Standorten zu beobachten, um die stofflichen und energetischen Beziehungen zwischen ihnen und den Lebensgemeinschaften erfassen zu können. Eine derartige "Ökologische Umweltbeobachtung" ist Gegenstand einer umfassenderen Konzeption des Bundes, die in Kapitel 1.2 kurz erläutert wird.

1.2 Ökologische Umweltbeobachtung (ÖÜB)

1.2.1 Wissenschaftliches Konzept der ÖÜB

Als "Markstein" (HABER, 1996) in der Entwicklung der Umweltbeobachtung gilt das von ELLENBERG et al. (1978) vorgelegte Konzept zum Aufbau eines ökologischen Informationssystems. Seine empirische Grundlage soll die Ökologische Umweltbeobachtung i.w.S. mit folgenden Schwerpunkten sein (BMBF, 1995, S. 7; ELLENBERG et al., 1978; WAGNER et al., 1997, S. 4):

- räumlich konzentrierte bio- und geowissenschaftliche Grundlagenforschung über Struktur, Funktion und Entwicklung repräsentativer Ökosysteme (*Ökosystemforschung*),
- langfristige Sicherung repräsentativer Umweltproben in einer *Umweltprobenbank* zur retrospektiven Analyse von Chemikalieneinflüssen und ökotoxikologischen Wirkungen sowie
- die flächenbezogene, dauerhafte Erfassung des Zustandes repräsentativer Ökosystemtypen anhand ausgewählter biotischer und abiotischer Merkmale (*Umweltmonitoring*, *Ökologische Umweltbeobachtung i.e.S.*).

In den achtziger Jahren wurden diese drei Grundlagen des ökologischen Informationssystems in FuE-Vorhaben erprobt

und methodisch ausgebaut. Beispielhaft sei auf die Entwicklung und Erprobung einer Konzeption für eine regionalisierende Ökologische Umweltbeobachtung in Schleswig-Holstein verwiesen (FRÄNZLE et al., 1992). Denn in diesem Vorhaben wird gezeigt, wie sich Messnetze der sektoralen Umweltbeobachtung zusammenführen und durch medienübergreifende (= integrierende, ökologische) Monitoringansätze ergänzen lassen. Dieses Vorgehen ist aus mindestens zwei Gründen von großer praktischer Bedeutung: Zum einen haben Bund und Länder in den siebziger und achtziger Jahren Umweltmessnetze eingerichtet, in denen Daten über Ökosysteme ("Ökologische Umweltbeobachtung") bzw. einzelne Ökosystemkompartimente (Umweltmedien Boden, Wasser, Luft: "sektorale Umweltbeobachtung") erhoben werden. Zum anderen haben die Umweltminister 1991 die Empfehlung des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU, 1987; SRU, 1991) nach Einrichtung einer Ökologischen Umweltbeobachtung aufgegriffen und das Bundesumweltministerium gebeten, die Umweltbeobachtung im Hinblick auf Umweltvorsorge und Umweltberichterstattung zu entwickeln. Deshalb ist ein Instrumentarium erforderlich, mit dem sich prüfen lässt, inwiefern Daten der bestehenden, meist sektoralen Messnetze zu einem System der medienübergreifenden Umweltbeobachtung zusammengeführt werden können.

1.2.2 Konzept für die ÖUB des Bundes und der Länder

Der in Kapitel 1.2.1 zuletzt genannte Aspekt hat für das vom Bundesamt für Naturschutz und vom Umweltbundesamt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit erarbeitete dreistufige Konzept für die Errichtung einer Ökologischen Umweltbeobachtung i.w.S. besondere Bedeutung (BMU, 1999). Dem Konzept liegt als übergeordnetes Ziel der Umweltbeobachtung die Quantifizierung stofflicher und nicht-stofflicher Veränderungen von Ökosystemen zugrunde. Die Erfassung struktureller, nicht-stofflicher Ökosystemveränderungen dagegen ist ein wesentliches Ziel der "Ökologischen Flächenstichprobe (ÖFS)" (HOFFMANN-KROLL et al., 1997, 1998), für deren Definition die in Kapitel 3 vorgestellte Raumgliederung eine wesentliche Grundlage sein soll.

Das Konzept für eine Ökologische Umweltbeobachtung des Bundes und der Länder sieht eine dreistufige Vorgehensweise vor (BMU, 1999):

- Die Stufe I besteht in der Dokumentation der Dauerbeobachtungsprogramme im Geschäftsbereich des BMU (z.B. Umweltprobenbank, UBA-Luftmessnetz).
- Die Stufe II wird in drei Teilschritten umgesetzt:
 - Im ersten Schritt werden die im Kontext zur Umweltbeobachtung stehenden Programme anderer Bundesressorts systematisch aufbereitet und in einer Metadatenbank dokumentiert (v. KLITZING, 1997).
 - Der zweite Teilschritt umfasst die Dokumentation der auf Länderebene vorhandenen Beobachtungsprogramme.
 - In einem dritten Arbeitsschritt soll eine räumlich und zeitlich systematisierte und hypothesengeleitete Zusammenführung und Verknüpfung dieser Informationen aus den Beobachtungsprogrammen des Bundes und der

Länder erfolgen. Damit soll geprüft werden, ob eine Verknüpfung von Daten aus Messnetzen unterschiedlicher Zielsetzung fachlich zu rechtfertigen ist. Dies ist insofern von praktischer Bedeutung, als die Umweltschutzpraxis und -forschung ständig Fragen aufwirft, für deren Beantwortung empirische Daten benötigt werden. In der Vergangenheit wurden viele Datenerhebungen initiiert, ohne dass zuvor die bereits vorhandenen Informationen unter Berücksichtigung ihres räumlichen Kontextes mit vertretbarem Aufwand recherchiert werden konnten. Dies führt zu Doppelarbeit, die vermeidbar ist und deshalb vom Rat von Sachverständigen für Umweltfragen wiederholt kritisiert wurde (SRU, 1983, 1987, 1991, 1996).

- Die sich anschließende Stufe III (Optimierungsphase) stellt eine Erweiterung der Umweltbeobachtung durch eine ökosystemare Ausrichtung dar. Dies bedeutet nach der Konzeption für eine ökosystemare Umweltbeobachtung i.e.S. (HABER et al., 1994, 1997; → Kapitel 1.2.1), dass an jedem der dafür vorgesehenen Standorte alle Umweltmedien synoptisch erfasst werden und nicht – wie in den meisten bereits bestehenden Messnetzen – einzelne Ökosystemkompartimente an verschiedenen Standorten. Dieser Ansatz wird derzeit modellhaft am länderübergreifenden Biosphärenreservat Rhön in einem Forschungsvorhaben erprobt (Bosch & Partner, 1997 - 1999).

2 Raumgliederung als Teil eines Instruments für die Zusammenführung von Umweltdaten verschiedener Messnetze

Entsprechend der Zielsetzung des zweiten und dritten Arbeitsschrittes der Stufe II im Konzept der ÖUB (BMU, 1999; → Kapitel 1.2.2) wurde in dem FuE-Vorhaben "Entwicklung eines Modells zur Zusammenführung vorhandener Daten von Bund und Ländern zu einem Umweltbeobachtungssystem" ein bereits bei der Vorbereitung des bundesweiten Bodeninformationssystems bewährtes Instrumentarium mit mehreren Komponenten K entwickelt:

- Informationen über Messgrößen und -methoden aller bestehenden Beobachtungsstationen (K 1.1),
- Informationen über die geographische Lage aller Messstellen (K 1.2),
- Standörtliche (naturräumliche) Gliederung des Untersuchungsraumes als Grundlage für die Einschätzung der Effizienz/Suffizienz der bestehenden Messorte (K 2),
- EDV-Tools für die
 - Datenerhebung (→ K 1.1 und K 1.2),
 - Datenverwaltung und -auswertung (→ K 1.1, K 1.2, K 2),
 - Datengenerierung, geostatistische Flächenschätzung punktueller Daten (→ K 2),
 - mehrdimensionale Klassifikation zur Erzeugung geobotanisch, klimatisch, orographisch und pedologisch definierter Raumklassen (→ K 2),
 - mehrdimensionale Raumstrukturanalyse (nachbarschaftsanalytische Repräsentanzanalyse für nominale und ordinale Flächendaten) (→ K 2) sowie für die
 - Datenvisualisierung (→ K 2).

Die Informationen zu K 1.1 und K 1.2 wurden mit Hilfe eines digitalen Fragebogens aus den meist sektoralen Ländermessprogrammen gewonnen. Ihre räumliche Verknüpfung mit den im GIS verwalteten rund 100 Standortkarten (K 2) und der aus einigen von ihnen statistisch abgeleiteten standortökologischen Raumgliederung Deutschlands erfolgt über die Schnittstelle MS ACCESS™. Die Komponente "standortökologische Raumgliederung" (K 2) (SCHRÖDER et al., 1998, 1999) wird in Kapitel 3 näher erläutert.

3 Standortökologische Raumgliederung

3.1 Verwendungszwecke

Raumgliederungen sind Klassifikationen (Zusammenfassungen) einzelner Flächen nach dem Grade ihrer Ähnlichkeit hinsichtlich bestimmter – hier: standortökologischer – Merkmale. Im Zusammenhang mit dem BMU-Konzept für die Ökologische Umweltbeobachtung dient die Raumgliederung folgenden Zwecken:

1. Die Raumgliederung beschreibt die standortökologische Raumstruktur des empirisch nicht überschaubaren Beobachtungsobjektes 'Bundesrepublik Deutschland' in statistisch fundierter Weise.
2. Die Raumgliederung kann nachbarschaftsanalytisch hinsichtlich der Frage ausgewertet werden, ob vorhandene bzw. gesuchte Messflächen in den Standorttypen vertreten sind und deren "typische" räumliche Vergesellschaftung repräsentieren (Repräsentanzanalyse).
3. In Analogie zur empirischen Messnetz- und Versuchsfeldplanung im Gelände hilft die Raumgliederung bei der Bewertung vorhandener Messpunkte (Liegen vorhandene Messflächen auf typischen Standorten?) bzw. bei der Suche nach alternativen Beobachtungsflächen (Wo sind repräsentative Messflächen?) in einem empirisch unüberschaubaren Raum (hier: Bundesrepublik Deutschland, s.o.). Die standortökologische Gliederung ist also eine "Orientierungshilfe im Datenraum" und entspricht insofern der Orientierung des Empirikers im Gelände vor der Installation von Beobachtungseinrichtungen und der Probenentnahme (Versuchsfeldplanung) sowie der kritischen Überprüfung bereits durchgeführter Beobachtungen bzw. Probenentnahmen (Versuchsfeldanalyse) (LORENZ, 1984).

Die methodischen Grundlagen der Raumgliederung werden in Kapitel 3.2 dargestellt.

3.2 Methode

Die Ökologische Umweltbeobachtung soll Informationen für den Schutz der Lebensgrundlagen von Menschen, Pflanzen und Tieren liefern. Wichtig für die Nutzbarkeit vorhandener Informationen ist deren Aussagekraft. Das bedeutet zusätzlich zu den Aspekten der Datenqualität (BAIER, 2000; MOHNEN, 1996; SCHRÖDER et al., 1991), dass die Beobachtungsnetze die Strukturen des Schutzgutes 'Umwelt' suffizient und effizient abbilden sollten.

Wenn man über die Lagekoordinaten *und* die empirischen Daten der Messstellen eines Umweltbeobachtungsnetzes ver-

fügt, dann kann man mit den geostatistischen Verfahren *Variogrammanalyse* und *Kriging* untersuchen, ob die Monitoringstandorte hinsichtlich Zahl und geographischer Anordnung die räumliche Struktur der Messgrößen so zuverlässig erfassen, dass zwischen den Messstellen statistisch sinnvoll interpoliert werden kann. Liegen jedoch die Messdaten nicht vor, so kann man lediglich untersuchen, ob die räumliche Verteilung der Messstandorte die funktional wichtigen räumlichen Strukturen des Schutzgutes, d.h. die standortökologische bzw. naturräumliche Struktur erfasst. Das setzt eine Definition des Konstrukts 'naturräumliche Gliederung' voraus, welche die Methode für ihre empirisch-statistische Erfassung enthält. Eine solche operationale Definition ist die entscheidende Voraussetzung dafür, dass das Ergebnis der Raumgliederung nachvollziehbar, bearbeiterunabhängig (objektiv), wiederholbar (reliabel) und in diesem Sinne gültig (valide) ist. Da nicht überprüfbar ist, ob die vorhandenen Raumgliederungen (MEYNEN et al., 1953-1962; RENNERS, 1992) diese drei Optimierungsriterien erfüllen, wurde im Rahmen des o.g. Projektes eine zwischen BMU, BfN, UBA und StaBA abgestimmte standortökologische bzw. naturräumliche Gliederung erarbeitet (SCHRÖDER et al., 1999).

Zur statistischen Definition der ökologischen Standorttypen wurde das Verfahren CART (Classification and Regression Trees, BREIMAN et al., 1984) mit log-likelihood-index, implementiert in S-Plus, verwendet. Hierbei handelt es sich um ein explorativ-analytisches Verfahren, das keine Voraussetzungen an das Skalenniveau der zu verarbeitenden Daten stellt. So können kategoriale (d.h. nominale und ordinale) Daten zusammen mit kontinuierlich-metrischen (intervall- und rationalskalierten) Daten ohne Skalentransformation und den damit verknüpften Informationsverlust verarbeitet werden. CART eignet sich somit besonders zur Verarbeitung von Daten über ökologische Merkmale, die oft auf unterschiedlichen Skalenniveaus vorliegen und deren Verteilungseigenschaften zumeist nicht bekannt sind. Das CART-Verfahren wurde u.a. auch deswegen gewählt, weil es anders als eine Klassifikation ohne Zielvariable¹ bei raumbezogenen Daten anstelle eines kartographischen "Flickenteppichs" eine optisch homogenere Raumgliederung liefert. Dies wirkt erfahrungsgemäß positiv auf die Akzeptanz einer Regionalisierung, weil vielfach mit Begriffen wie Region oder Landschaft die Vorstellung verknüpft wird, dass solche Raumeinheiten einmalig sind und nicht an zwei von einander getrennten geographischen Orten vorkommen können. Diese Idee der "räumlichen Kontingenz" (SCHRÖDER, 1994, S. 19). beruht auf der empirisch widerlegbaren Annahme, dass voneinander entfernte Raumausschnitte standortökologisch nicht so ähnlich ausgestattet sein könnten, dass man sie trotz räumlicher Trennung als Elemente einer Standortklasse betrachtet.

Ziel des CART-Verfahrens wie auch anderer Klassifikationsmethoden ist es, Objekte anhand der Ähnlichkeit ihrer Merkmalsausprägungen in möglichst wenige homogene und

¹ Eine solche "freie" Klassifikation hat das Statistische Bundesamt als Grundlage für die Ökologische Stichprobe in die Diskussion eingebracht (SCHÄFER et al., 1999). Ein ähnlicher Ansatz führte auch zur Ausweisung der Ökosystemhauptforschungsräume (FRÄNZLE et al., 1987).

klar unterscheidbare Klassen zu gliedern. CART beruht auf einem rekursiven Partitionsalgorithmus, mit dem die Gesamtheit der betrachteten Objekte schrittweise in jeweils zwei Teilmengen zerlegt wird. Die Partitionen erfolgen anhand der Ausprägungen der beschreibenden Variablen derart, dass der Anteil derjenigen Objekte steigt, welche durch die in der Ausgangsmenge am häufigsten vertretene Zielvariablenausprägung gekennzeichnet sind. Damit wächst die Homogenität der Teilmengen ("Reinheit" in der Terminologie des CART-Verfahrens) gegenüber den übergeordneten Gruppen. Homogenitätsmaß ist die "Fehlklassifikationsrate". Sie berechnet sich aus dem Verhältnis der Elemente, die nicht der am häufigsten in dieser Klasse vertretenen Ausprägung der Zielvariablen angehören, zu allen in dieser Klasse enthaltenen Elementen.

Der Partitionsalgorithmus "log-likelihood" der S-Plus-Version von CART (CHAMBERS et al., 1992, S. 413 ff.) berechnet für alle Ausprägungen aller beschreibenden Variablen die "Unreinheiten" der sich ergebenden Untergruppen und wählt diejenige Partition mit dem günstigsten Fehlklassifikationswert aus. Dabei wird ein Strukturbaum (Tree, Dendrogramm) erzeugt, der die Beziehungen der Klassen – das sind die "Blätter" des Baumes – untereinander bezüglich der Ausprägungen der Zielvariablen und der beschreibenden Merkmale abbildet. CART erstellt zunächst den Tree T_{max} mit der nach Datenlage maximal möglichen Klassenanzahl. Anschließend wird durch sukzessives, automatisches Zurückschneiden ("pruning") einzelner Blätter eine Sequenz aus allen möglichen Bäumen T' mit abnehmender Klassenanzahl (Größe des Tree) und damit zunehmender Fehlklassifikationsrate der T' , T'' usw. bis zur Ausgangsklasse (Grundgesamtheit) erstellt. Für jedes dieser Dendrogramme werden die Fehlklassifikationsraten berechnet.

Der auf diese Weise berechnete Maximalbaum kann anschließend vom Bearbeiter nochmals anhand weiterer, im einzelnen fachlich zu begründender Kriterien manuell gestutzt ("snipped") werden. Dadurch wird es möglich, die vom Programm berechnete Klassifikation nach inhaltlichen Überlegungen zu modifizieren. Wenn CART sehr kleine Klassen aufgrund ihrer sehr hohen Homogenität hinsichtlich der Zielvariablen bildet, die sich jedoch untereinander bezüglich der beschreibenden Standortmerkmale sehr ähneln, kann der Bearbeiter eingreifen, indem er diese Gruppen fachlich sinnvoll auf ihren gemeinsamen Ursprung der übergeordneten Gliederungsstufe zurückschneidet. Von noch größerem Vorteil ist jedoch, dass verschiedene Strukturbäume absolut (Klasseninhalte, Klassenzahl) und relativ (Fehlklassifikationsrate und Komplexität der Bäume) vergleichbar sind.

3.3 Eingangsvariablen und Modellbildung

In enger fachlicher Abstimmung mit Experten u.a. des Bundesamtes für Naturschutz, des Umweltbundesamtes und des Statistischen Bundesamtes wurden über ein Jahr lang verschiedene Gliederungsvarianten diskutiert. Der in Abb. 1 (→ S. 241) präsentierte Standortgliederung liegt das folgende zusammengefasste und anschließend beschriebene statistische Modell zugrunde.

Zielvariable: Potentielle natürliche Vegetation (PnV)
Beschreibende Variablen: Monatsmittelwerte der Klimavariablen Niederschlag und Temperatur für die Monate Januar bis Dezember sowie der Klimavariablen Sonnenscheindauer für die Monate März bis November; orographische Höhe; Bodentyp (BÜK 1000)²

Als Zielvariable der CART-Analyse wird die potentielle natürliche Vegetation (PnV) verwendet. Dies ist diejenige Vegetation, die unter den gegenwärtigen klimatischen, orographischen und pedologischen Randbedingungen unter Ausschluss menschlicher Einflüsse zu erwarten wäre (TUXEN, 1978). Die PnV ist also ein Integralindikator für die ökologische Standortqualität bzw. das ökologische Standortpotential eines Raumes. Damit verkörpert sie das, was im Umweltschutz die Vorsorgewerte langfristig gewährleisten sollen bzw. was durch menschliche Eingriffe möglichst wenig zu beeinträchtigen ist: "standörtliche Multifunktionalität". Insofern ist die räumliche Differenzierung der PnV eine ökologisch sehr geeignete Raumgliederung. Doch es sind keine nachvollziehbaren Regeln bekannt, die eine möglichst bearbeiterunabhängige Raumgliederung anhand der PnV gestatten.

Deshalb wird mit dem statistischen Modell geprüft, inwiefern sich die räumliche Differenzierung der potentiellen natürlichen Vegetation Deutschlands anhand flächenhafter Daten zu den Standortmerkmalen Boden, Klima und Orographie beschreiben lässt. Hierbei sind folgende Fälle denkbar:

1. Die Raumstruktur lässt sich mit den verfügbaren Daten nicht beschreiben.
2. Die räumliche Differenzierung der PnV ist mit den Flächendaten nachvollziehbar.
 - a) Einige PnV-Einheiten können hinsichtlich Klima, Boden und Orographie weiter untergliedert werden.
 - b) Andere PnV-Einheiten sind sich hinsichtlich der beschreibenden Merkmale so ähnlich, dass sie aus statistischen Gründen zusammengefasst werden müssen.

In dem statistischen Modell zur Überprüfung der vom Bundesamt für Naturschutz zur Verfügung gestellten PnV-Raumgliederung fungieren das kategoriale Standortmerkmal Bodentyp und die kontinuierlich-metrischen Merkmale orographische Höhe, Niederschlag (Januar bis Dezember), Temperatur (Januar bis Dezember) und Sonnenscheindauer (März bis November) als Deskriptoren für die Zielvariable PnV. Als beschreibende Variablen wurden ausschließlich solche abiotischen Merkmale gewählt, welche zeitlich stabil sind. Für die Monatsmittelwerte der Klimavariablen gilt dies, wenn sie – wie die verwendeten – über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren integriert wurden. Da sich die Klimadaten für Ost- und Westdeutschland nicht auf dieselben Zeiträume beziehen, wird in einer späteren Projektphase eine entsprechend aktualisierte Raumgliederung mit einem harmonisierten Datensatz berechnet. Die räumliche Differenzierung der genannten Klimavariablen wurde durch Regionalisierung mit Hilfe des Kriging-Verfahrens (PIOTROWSKI et

² Weitere Informationen über standortökologisch relevante Merkmale wie beispielsweise die geologische Struktur Deutschlands standen nicht zur Verfügung.

al., 1996; SALSKI & KANDZIA, 1996) nach vorhergehender Variogrammanalyse (HEINRICH, 1994) aus den Stationswerten des Deutschen Wetterdienstes (MEYER & SCHIRMER, 1985; MÜLLER-WESTERMEIER, 1990) sowie des Meteorologischen und Hydrologischen Dienstes der DDR (MHD-DDR, 1978) geostatistisch abgeleitet.

Das digitale Höhenmodell für die Bundesrepublik stammt von UNEP (United Nations Environment Programmes). Die Auflösung der Höhendaten beträgt etwa 30 Bogensekunden (ca. $1 * 1 \text{ km}^2$). Die Flächeninformationen über das Bodinventar wurden der Bodenübersichtskarte 1:1000000 (BÜK 1000, Stand Dezember 1997) entnommen. Da CART für kategoriale Variable maximal 32 Merkmalsausprägungen zulässt, wurden die 72 Ausprägungsstufen (= Legenden-einheiten) des Standortmerkmals Bodentyp in sieben Merkmale "Bodengesellschaften" gegliedert. Jedes dieser sieben Merkmale wird wiederum unterteilt in diejenigen Ausprägungen (Bodentypen), die in den jeweiligen Bodengesellschaften vorkommen sowie in eine weitere Klasse, welche die Ausprägung "gehört nicht zu dieser Hauptbodengruppe" bezeichnet. So umfasst beispielsweise das Merkmal "boden1" (Bodengesellschaft "Böden der Küstenregion und Meere") folgende Bodentypen: Podsol-Regosol [1]; Wattboden [2]; Kalkmarsch [3]; Kleimarsch aus brackigen Ablagerungen [4]; Kleimarsch aus fluviatilen Ablagerungen [5]; Niedermoorboden [6]; Hochmoorboden [7] sowie die Ausprägung "gehört nicht zu dieser Bodengesellschaft" [0].

Aus fachlicher Sicht sind für ökologische Aussagen Angaben zur Bodenart aussagekräftiger als solche zum Bodentyp, da letzterer eine nur begrenzt objektivierbare und umweltchemisch deutbare Bezeichnung für eine empirisch fassbare Kombination pedogenetischer Merkmale ist. Demgegenüber charakterisiert die Bodenart die Pedosphäre bezüglich ihrer bodenphysikalischen Eigenschaften, welche z.B. für den Wasser- und Stoffhaushalt terrestrischer Ökosysteme von entscheidender Bedeutung sind (SCHRÖDER et al., 1998). Dennoch fand in der hier vorgestellten Variante der Bodentyp – trotz kontrovers geführter fachlicher Diskussion – Eingang in die Modellrechnung und soll daher im weiteren näher vorgestellt werden.

Die o.a. flächendeckend für die BRD vorliegenden ökologischen Standortinformationen werden in einem GIS verwaltet und für die statistischen Analysen aufbereitet. Alle 36 Eingangskarten wurden in der flächentreuen Albers-Projektion in einer Auflösung von $2 * 2 \text{ km}^2$ mit Hilfe des Moduls GRID von ARC/INFO™ neu gerastert. Die statistischen Berechnungen erfolgen in dieser flächentreuen Projektion. Damit ist sichergestellt, dass alle Rasterzellen identische Flächenanteile (4 km^2) aufweisen und sich somit keine Verzerrungseffekte bei den Berechnungen einstellen. Für Karten- und Lagebestimmungen werden sowohl die Eingangskarten als auch die Ergebniskarten in die Transverse-Projektion überführt. Sie haben in dieser Projektion Gauß-Krüger-Koordinaten.

Die Standortvariablen potentielle natürliche Vegetation, orographische Höhenlage, Bodentyp sowie die jeweiligen Monatsmittelwerte von Niederschlag, Temperatur und Son-

nenscheindauer werden mit CART zu einem 33-dimensionalen Merkmal "standortökologische Einheit" (Synonyma: Ökocluster, ökologische Standortklasse, Ökoklasse, Standorttyp) zusammengefasst.

3.4 Ergebnisse

Die CART-Analyse der Flächendaten zu o.a. Standortmerkmalen ergibt einen Maximalbaum mit 84 Endknoten bzw. Raumklassen. Diese werden bezüglich der Ausprägungen der ihnen zugrundeliegenden sechs Einzelmerkmale (potentielle natürliche Vegetation, orographische Höhe, Bodentyp, Monatsmittelwerte des Niederschlags, der Temperatur und der Sonnenscheindauer) deskriptiv-statistisch und ökologisch-fachlich untersucht. Dazu werden für alle Elemente einer Standortklasse die Mediane der monatlichen Klimavariablen Niederschlag, Temperatur und Sonnenscheindauer bestimmt und als Jahresgangkurve (\rightarrow Kapitel 3.5, Abb. 2) aufgetragen. Weiterhin werden die Verteilungen der kategorialen Variablen Bodentyp, PnV sowie der orographischen Höhe als Histogramme dargestellt.

Abb. 1 zeigt 20 Klassen der oberen Ebenen des Maximalbaumes; eine weitere Differenzierung ist hier nicht darstellbar. Die 20 Standorttypen lassen sich in der oben erwähnten Weise hinsichtlich ihrer klimatischen, pedologischen, vegetationskundlichen und orographischen Charakteristika deskriptiv statistisch kennzeichnen und auf dieser Grundlage – wie in Kapitel 3.5 beispielhaft gezeigt – verbal beschreiben. Zusätzlich wird durch Kreuztabellierung die räumliche Beziehung der berechneten Standortklassen zu den Haupt-einheiten der Naturräumlichen Gliederung Deutschlands (MEYNEN et al., 1953-1962) quantitativ untersucht – hierauf kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

Die Klimadaten haben einen entscheidenden Einfluss zum einen auf die Größe bzw. Differenzierung und zum anderen auf die Grenzlinienstruktur der Standortklassen. Da die Klimakarten geostatistisch aus Punktdaten durch Kriging-Interpolation (Isolinien) erzeugt wurden, weisen die Klassengrenzen in Norddeutschland, wo überwiegend Klimavariablen als Splitkriterium dienen, einen geschwungenen Verlauf auf. In Süddeutschland, wo andere beschreibende Merkmale wie Bodentypen oder orographische Höhe zur Klassenbildung führen, kommt im Grenzverlauf der Rastercharakter dieser Eingangsdaten zum Ausdruck (\rightarrow Abb. 1).

Ferner fällt auf, dass der Grad der räumlichen Differenzierung Deutschlands sehr unterschiedlich ist: Norddeutschland ist bei der in Abb. 1 dargestellten Gliederung Deutschlands in 20 Standortklassen räumlich weniger strukturiert als der Mittelgebirgs- und Alpenraum. Bei einer Untergliederung der Bundesrepublik in 30 Standortklassen zeigen sich dann auch im norddeutschen Flachland differenzierte Raumstrukturen (SCHRÖDER et al., 1999), die durch die Bodenverteilung sowie die auf den oberen Gliederungsebenen im bundesweiten Vergleich unbedeutenden Höhenunterschiede bedingt sind. In Kapitel 3.5 werden von den in Abb. 1 dargestellten 20 Standorttypen beispielhaft die Klassen 44 und 63 verbal sowie in Abb. 2 klimatisch quantitativ beschrieben.

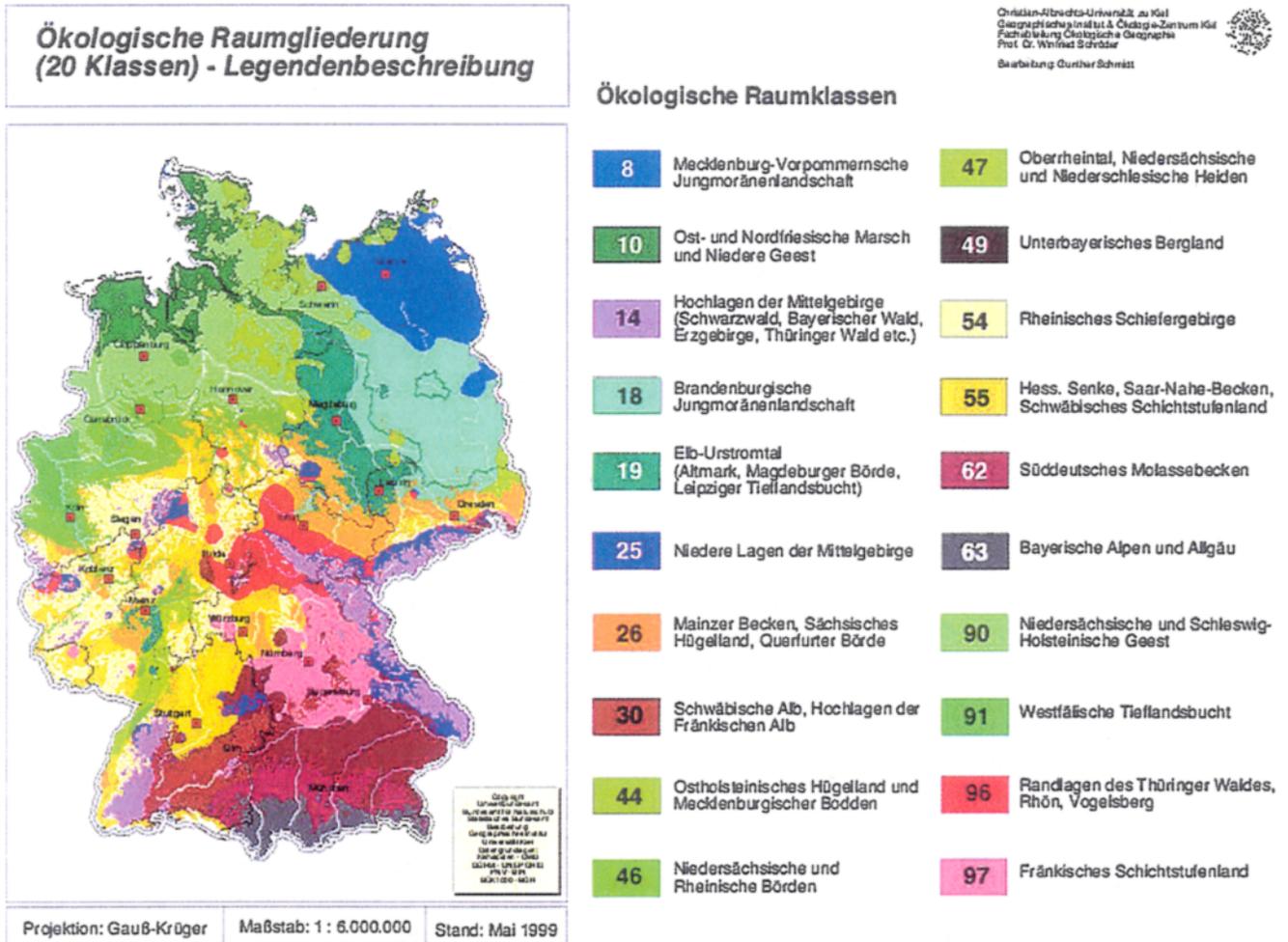


Abb. 1: Bodenkundlich, Klimatisch, orographisch und vegetationskundlich definierte Standorttypen in Deutschland, Differenzierungsniveau 20

3.5 Beschreibung der Raumklassen

Aus Platzgründen können an dieser Stelle nur zwei standort-ökologische Raumklassen beschrieben werden. Über die bodenkundlichen, klimatischen, orographischen und vegetationskundlichen Merkmale der anderen Standortklassen finden sich Informationen bei Schröder et al. (1999).

Raumklasse 44 bildet nahezu das gesamte Ostholsteinische Hügelland ab (Flächenanteil 2%). *Subatlantisch-mitteleuropäische Buchenwälder* sind hier potentiell natürlich. Kennzeichnende Böden in dieser welligen Jungmoränenlandschaft (12 bis 74 m ü. NN) sind *Parabraunerden/Fahlerden* sowie *Pseudogleye* aus Geschiebelehm und -mergeln. Auffällig sind die gegenüber dem Bundesmittel um bis zu 30 h/mon längeren Sonnenscheindauern im Frühjahr. Hingegen entsprechen Niederschlag und Temperaturen dem Bundesdurchschnitt (→ Abb. 2).

Raumklasse 63 bildet die Bayerischen Alpen und das Allgäu ab (Flächenanteil 2%). *Mitteleuropäische Tannen-Buchenwälder* und *nordalpine (Fichten-)Tannen-Buchenwälder* sind potentiell natürlich in 682 bis 2310 m ü. NN. Böden der montanen und subalpinen Höhenstufen der Alpen aus

Kalk- und Dolomitgesteinen, *Braunerden* aus Mergelgesteinen und kalkhaltigen Schottern sowie *Braunerden/Parabraunerden/Pararendzinen* aus Moränenablagerungen sind hier die häufigsten Bodengesellschaften. Extrem hohe Niederschlagssummen, besonders im Frühling und Sommer, die zwischen 40 und 130 mm/mon höher ausfallen als im Bundesdurchschnitt, sind ebenso charakteristisch wie über das Jahr 2°C niedrigere Temperaturen. Im Frühjahr scheint die Sonne bis zu 30 h/mon weniger, während sie im Herbst bis zu 30 h/mon länger zu sehen ist (→ Abb. 2).

4 Ausblick

Der hier vorgestellte Sachstand zur Methodik einer hierarchisch strukturierten ökologischen Raumgliederung ist Zwischenergebnis eines Projekts, das mit vielen anderen Vorhaben verknüpft ist und unter konstruktiver Begleitung zahlreicher Experten fortgeführt wird. Der Bedarf einer standort-ökologischen Raumgliederung Deutschlands ergibt sich beispielsweise zum einen aus dem Konzept für die Ökologische Umweltbeobachtung, ferner aus der Ökologischen Flächenstichprobe und der Neuauflage des Hydrologischen Atlas. Schwerpunkte zukünftiger Weiterentwicklungen sind die

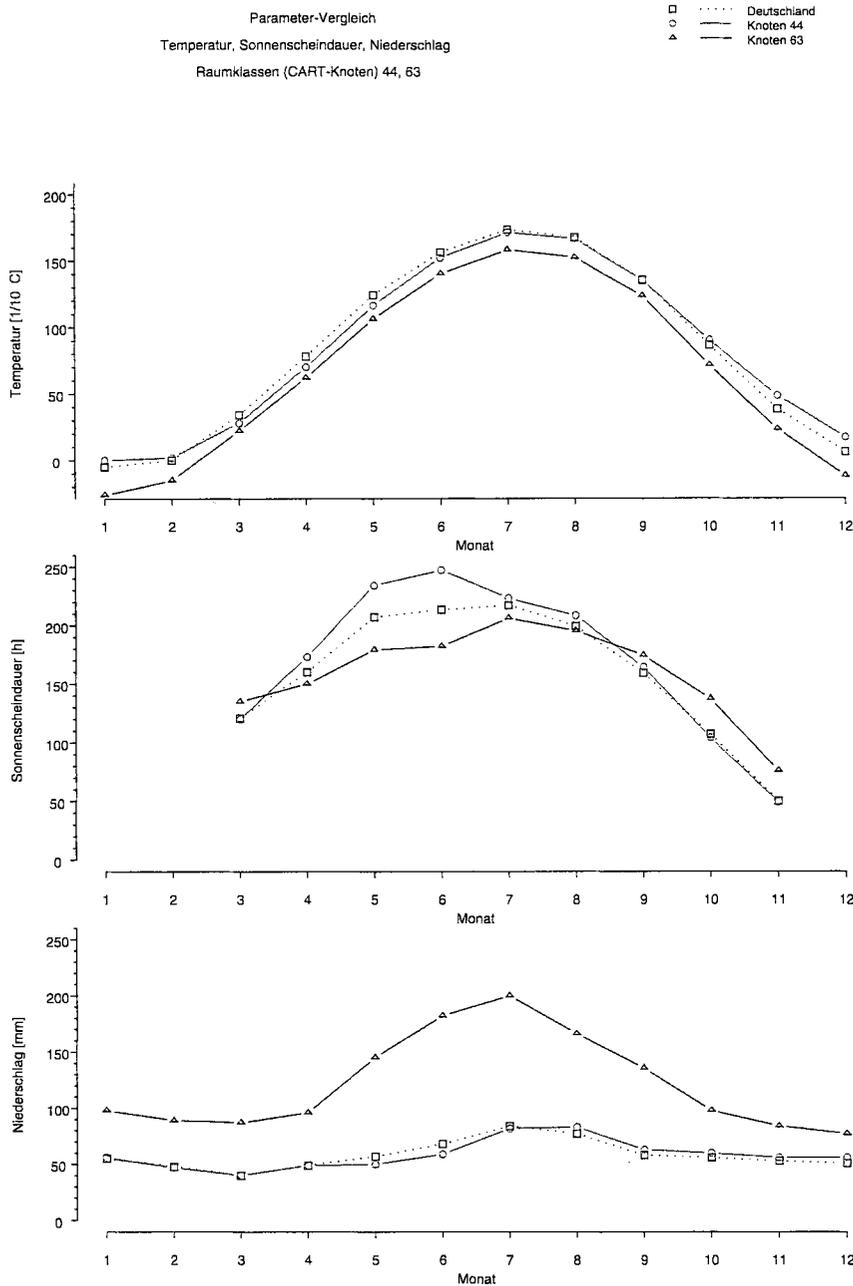


Abb. 2: Jahresgangkurven 30-jähriger Mittel des Niederschlags, der Lufttemperatur und der Sonnenscheindauer in den Standortklassen 44 und 63 sowie im Bundesdurchschnitt

Einbindung der deutschen in eine europäische Raumgliederung sowie die weitere Detaillierung der Raumgliederung insbesondere für die Zwecke der vertiefenden ökosystemaren Umweltbeobachtung am Beispiel des Biosphärenreservates Rhön. Mit Hilfe der im Vergleich zur bundesweiten Raumgliederung detaillierteren standörtlichen Gliederung für die Rhön soll geprüft werden, wie repräsentativ die bereits bestehenden Beobachtungsstationen in den beteiligten Bundesländern für die regionalen Standort- und Nutzungsverhältnisse sind und an welchen Stellen ggf. Lücken im bestehenden Mess- und Beobachtungsnetz geschlossen werden müssten. Einer der nachfolgenden Beiträge wird sich mit diesem Thema ausführlich beschäftigen.

Danksagung. Wir danken allen, die das FuE-Vorhaben "Entwicklung eines Modells zur Zusammenführung vorhandener Daten des Bundes und der Länder zu einem Umweltbeobachtungssystem" durch Datenbereitstellung, Diskussionen, Kritik und Mitarbeit unterstützt haben, insbesondere: Dr. Andreas von Gadow (BMU), Dipl.-Geogr. Gerlinde Knetsch und Dr. Christian Schlüter (UBA), Dr. Ulrich Bohn (BfN), Dipl.-Geogr. Steffen Seibel (StaBA) sowie Dipl.-Inf. Frank Bartels, Eric Ahrens und Björn Schmidt.

Literatur

BAIER, R. (2000): Validität von Umweltdaten. In: Fränzle, O.; Müller, F.; Schröder, W. (Hrsg.): Handbuch der Umweltwissenschaften. Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung. ecomed, Landsberg am Lech

- BMBF (Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie) (1995): Ökosystemforschung – Berichte aus der ökologischen Forschung. Bonn
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit): Konzept Ökologische Umweltbeobachtung des Bundes und der Länder. Bonn Entwurf 1999, N II 2 – 71 020/9
- Bosch & Partner GmbH (1997-1999): Modellhafte Umsetzung und Konkretisierung der Konzeption für eine ökosystemare Umweltbeobachtung am Beispiel des länderübergreifenden Biosphärenreservates Rhön. Königsdorf (1. Zwischenbericht 1997; 2. Zwischenbericht 1998a; 3. Zwischenbericht 1998b; 4. Zwischenbericht 1999 zum F+E-Vorhaben 109 02 076/01, im Auftrag des Umweltbundesamtes, unveröffentlicht)
- BREIMAN, L.; FRIEDMAN, A.; OLSEN, R.; STONE, C.J. (1984): Classification and regression trees (CART). Monterey, Wadsworth, Inc.
- CHAMBERS, J.M., HASTIE, T.J. (1992): Statistical Models in S-Plus. AT & T Bell Laboratories, Pacific Grove, Kalifornien
- ELLENBERG, H.; FRÄNZLE, O.; MÜLLER, P. (1978): Ökosystemforschung im Hinblick auf Umwelt- und Entwicklungsplanung. Bonn (Umweltforschungsplan des Bundesministers des Innern, FuE-Vorhaben 78-10104005, im Auftrag des Umweltbundesamtes)
- FRÄNZLE, O.; KUHN, D.; KUHN, G.; ZÖLITZ, R. (1987): Auswahl der Hauptforschungsräume für das Ökosystemforschungsprogramm der Bundesrepublik Deutschland. Kiel. Forschungsbericht 101 04 043/02, im Auftrag des Umweltbundesamtes
- FRÄNZLE, O.; ZÖLITZ-MÖLLER, R.; BOEDEKER, D.; BRUHM, I.; HEINRICH, U.; JENSEN-HUSS, K.; KLEIN, A.; KOTHE, P.; MICH, N.; REICHE, E.-W.; REIMERS, T. in Zusammenarbeit mit RUDOLPH, H.; DÖRRE, U. (1992): Erarbeitung und Erprobung einer Konzeption für die ökologisch orientierte Planung auf der Grundlage der regionalisierenden Umweltbeobachtung am Beispiel Schleswig-Holsteins. Berlin, UBA-Texte 20/92
- HABER, W.; SCHÖNTHALER, K.; KERNER, H.F.; KÖPPEL, J.; SPANAU, L. (1994): Konzeption für eine ökosystemare Umweltbeobachtung. Pilotprojekt Biosphärenreservate. Berlin (Forschungsbericht 101 04 0404/08, im Auftrag des Umweltbundesamtes, unveröffentlicht)
- HABER, W.; SCHÖNTHALER, K.; KERNER, H.F.; KÖPPEL, J.; SPANAU, L. (1997): Konzeption für eine ökosystemare Umweltbeobachtung. Wissenschaftlich-fachlicher Ansatz. Berlin, UBA-Texte 32/97
- HEINRICH, U. (1994): Flächenhafte Ableitung der Klimaparameter Niederschlag und Temperatur mittels geostatistischer Verfahren. In: Schröder, W.; Vetter, L.; Fränze, O. (Hrsg.): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie. Vieweg Braunschweig, Wiesbaden, S. 283-295
- HOFFMANN-KROLL, R.; SCHÄFER, D.; SEIBEL, S. (1997): Naturvermögen in den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen. Wirtschaft und Statistik 10, 696-706
- HOFFMANN-KROLL, R.; SCHÄFER, D.; SEIBEL, S. (1998): Biodiversität und Statistik – Ergebnisse des Pilotprojekts zur Ökologischen Flächenstichprobe. Wirtschaft und Statistik 1, 60-75
- KLITZING, F. von (1997): Umweltbeobachtungsprogramme des Bundes. Integration der Beobachtungsprogramme anderer Ressorts. Berlin, UBA-Texte 73/98
- LORENZ, R.J. (1984): Grundbegriffe der Biometrie. Gustav Fischer, Stuttgart, New York
- MEYNEN, E.; SCHMITTHÜSEN, J.; GELLERT, J.; NEEF, E.; MÜLLER-MINY, H.; SCHULTZE, J.H. (1953-1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, Bad Godesberg
- MEYER, A.; SCHIRMER, H. (1985): Das Klima der Bundesrepublik Deutschland. Lieferung 3: Mittlere Lufttemperaturen für Monate und Jahr. Zeitraum: 1931-1960. Reihe: Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
- MHD-DDR (Meteorologischer Dienst der Deutschen Demokratischen Republik) (Hrsg.) (1978): Klimatologische Normalwerte für das Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik (1901-1950). Berlin
- MOHNEN, V. (1996): Quality assurance/assurance control as prerequisite for harmonization of data collection and interpretation within the WMO-Global Atmosphere Watch (GAW) Programme. In: Schröder, W.; Fränze, O.; Keune, H.; Mandry, P. (eds.) (1996): Global monitoring of terrestrial ecosystems. Ernst & Sohn, Berlin, pp. 77-84
- MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1990): Klimadaten der Bundesrepublik Deutschland, Zeitraum 1951-1980. Offenbach am Main
- PIOTROWSKI, J.A.; BARTELS, F.; SALSKI, A.; SCHMIDT, G. (1996): Geostatistical regionalization of glacial aquitard thickness in northwestern Germany, based on fuzzy kriging. Mathematical Geology 28 (4) 437-452
- RENNERS, M. (1992): Geoökologische Raumgliederung der Bundesrepublik Deutschland. Trier (Forschungen zur deutschen Landeskunde 235)
- SALSKI, A.; KANDZIA, P. (1996): Fuzzy sets and fuzzy logic in ecological modelling. EcoSys 4, 85-97
- SCHÄFER, W.; SEIBEL, S.; HOFFMANN-KROLL, R. (2000): Raumbezug und Repräsentativität in der Ökologischen Flächenstichprobe. UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox., DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2000.05.016>
- SCHRÖDER, W. (1994): Regionalisierung in den Geowissenschaften. In: Schröder, W.; Vetter, L.; Fränze, O. (Hrsg.): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, S. 17-30
- SCHRÖDER, W.; FRÄNZLE, O.; DASCHKEIT, A.; BARTELS, F.; KASKE, A.; KERRINES, A.; SCHMIDT, G.; STECH, C. (1998): Organisation und Methodik des Bodenmonitoring. Kiel (UBA-Texte, 21/98)
- SCHRÖDER, W.; GARBE-SCHÖNBERG, C.D.; FRÄNZLE, O. (1991): Die Validität von Umweltdaten – Kriterien für ihre Zuverlässigkeit: Repräsentativität, Qualitätssicherung und -kontrolle. UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 4, 237-241
- SCHRÖDER, W.; SCHMIDT, G.; AHRENS, E.; BARTELS, F.; SCHMIDT, B. (1999): Entwicklung eines Modells zur Zusammenführung vorhandener Daten des Bundes und der Länder zu einem Umweltbeobachtungssystem. Bd. 1: Instrumentarium für die Zusammenführung umweltrelevanter Daten verschiedener Messnetze. Bd. 2: Konzept und Realisierung der Standortlichen Gliederung Deutschlands für die Ökologische Umweltbeobachtung. Kiel, Vechta (Forschungsbericht FuE-Vorhaben 29 781 126 / 01, im Auftrag des Umweltbundesamtes)
- SRU (Der Rat der Sachverständigen für Umweltfragen) (1983): Sondergutachten Waldschäden. Metzler-Poeschel, Stuttgart
- SRU (1987): Jahresgutachten 1987. Metzler-Poeschel, Stuttgart
- SRU (1991): Allgemeine ökologische Umweltbeobachtung. Metzler-Poeschel, Stuttgart
- SRU (1996): Jahresgutachten 1996. Metzler-Poeschel, Stuttgart
- TÜXEN, R. (1978): Die heutige potentiell natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung. In: Lauer, W.; Klink, H.-J. (Hrsg.): Pflanzengeographie. Wissenschaftliche Verlagsanstalt, Darmstadt (= Wege der Forschung; 130), S. 323-354
- WAGNER, G.; KLEIN, B.; KLEIN, R.; MÜLLER, P.; PAULUS, M. (1997): Umweltprobenbank. In: Fränze, O.; Müller, F.; Schröder, W. (Hrsg.): Handbuch der Umweltwissenschaften. Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung. ecomed, Landsberg am Lech, Kap. VI-3.2

Erhalten: 18. Januar 2000
 Akzeptiert: 8. Mai 2000
 Online-First: 19. Mai 2000