

Die Beiträge von Gerhard Bartels, Michael Richter und Rolf Schröder, Helmut Siebertz und Werner Siegburg sowie Harald Zepp sind dem Mitherausgeber der Erdkunde, PETER HÖLLERMANN, zum 60. Geburtstag gewidmet.

## EINE QUANTITATIVE, LANDSCHAFTSÖKOLOGISCH BEGRÜNDETE KLASSIFIKATION VON BODENFEUCHTEREGIME-TYPEN FÜR MITTELEUROPA\*)

Mit 8 Abbildungen und 5 Tabellen

HARALD ZEPP

*Summary:* A quantitative and geocologically-based classification of soil moisture regimes for Central Europe

The characterization of soil moisture regimes is an important task within the scope of geocology. The paper discusses existing spatially-orientated approaches and classifications of soil moisture regimes with reference to their geocological significance. The proposed quantitative classification is adapted to Central and Western European conditions. It is based on many detailed field-measurements of soil water tension. The classification of the distribution function of soil water tension during the vegetative period is done with respect to plant ecology and hydrodynamics. By combining the moisture distribution classes of the top soil and of deeper horizons, uniform soil moisture regimes and those with a vertical gradation can be described adequately. Finally, the complementary concepts of soil moisture regimes and plant ecological moisture levels are discussed and the problems of regionalisation are exemplified.

### 1 Einleitung

Das Studium des Wassers im Boden wird seit Jahrzehnten von zahlreichen Disziplinen in wechselnden Untersuchungszusammenhängen und mit den verschiedenartigsten Methoden betrieben. Entsprechend vielgestaltig sind die Ansätze zur Systematisierung der Erscheinungsformen des Bodenwassers. Die Diversität der Ansätze beruht auf den unterschiedlichen Zielsetzungen der Bodenwasseruntersuchungen und ist abhängig von den gewählten Untersuchungsmethoden. Im Rahmen wasserwirtschaftlicher Fragestellungen steht die Quantifizierung der Wasserumsätze, insbesondere der Durchsickerung und der Abflußretention in der ungesättigten Zone, im Mittelpunkt des Interesses; daneben erlangt im Rahmen des vorsorgenden Grundwasser- und Ge-

wässerschutzes die Verweildauer des Wassers und der in ihm gelösten Stoffe im Boden primäre Bedeutung. Die zeitlich wechselnde Verfügbarkeit des Bodenwassers für natürliche Pflanzengesellschaften und für Kulturpflanzen interessiert die Geobotanik, den Pflanzenbau und die Forstwissenschaft. Schließlich begründet die Multifunktionalität des Bodenwassers als Agens für den Stofftransport, als Grundlage der Biomassenproduktion und als Einflußgröße für biologische und chemische Stofftransformationen seine zentrale Rolle bei der landschaftsökologischen Struktur- und Prozeßforschung sowie bei der geökologischen Raumgliederung (vgl. HAMBLOCH 1957, NEEF et al. 1961).

Für eine umfassende Charakterisierung des Bodenwasserhaushaltes sind zwei Aspekte wesentlich: Informationen über die charakteristischen Feuchteverhältnisse und ihre zeitliche Variation während eines längeren Zeitraums (Vegetationsperiode, Jahr, Dekade; Feuchteregimes mit ihrer „ökologischen Varianz“ nach NEEF et al. 1961, S. 108/109) sowie die Quantifizierung der wesentlichen hydrologischen Prozesse des Wasserumsatzes. Die Kennzeichnung des Bodenwasserhaushaltes umschließt somit sowohl die zeitliche Variation der aktuellen Wasserverfügbarkeit (-dargebot) als auch die hydrologische Bilanzierung. Im Blick auf eine vergleichende Betrachtung bisheriger Ansätze zur Klassifikation von Bodenfeuchteregime-Typen seien

\*) Die Ausführungen sind Teilergebnisse eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes „Klassifikation von regionalen Feuchteregime-Typen im Bereich des grundwasserfreien Solums und Untergrundes (ungesättigte Zone)“. Für die Forschungsförderung sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

einige allgemeine Anmerkungen über Elemente und Faktoren des Bodenwasserhaushalts vorausgeschickt. Als ‚Elemente des Bodenwasserhaushaltes‘ sollten möglichst zahlreiche, physikalisch faßbare (meß- oder beschreibbare) Zustands- und Prozeßgrößen des Wassers im Boden wie Wassergehalt, Bindungsintensität (Wasserspannung, Matrixpotential), Bodenwassergeschwindigkeit, Durchsickerung im Mikro- oder Makroporensystem, Durchsickerungshöhe (Grundwasserneubildung), kapillarer Aufstieg, Bodenevaporation, Infiltration zur Beschreibung herangezogen werden. Die Größen können als Mittel-, Summenwerte oder Extrema sowie durch Indices quantifiziert werden (z. B. mittlere Bindungsintensität des Bodenwassers während der Vegetationsperiode, jährliche Durchsickerungshöhe).

Von den Elementen des Bodenwasserhaushaltes sind die ‚Faktoren des Bodenwasserhaushaltes‘ zu unterscheiden, als die am Standort zusammenwirkenden Eigenschaften, Größen und Prozesse, die die Erscheinungsformen und Umsätze des Bodenwassers steuern. Analog zum Begriffspaar ‚Klimaelement – Klimafaktor‘ können bei besonderen Betrachtungszusammenhängen ‚Elemente des Bodenwasserhaushaltes‘ durchaus die Rolle von ‚Faktoren‘ übernehmen. Hierzu gehören die Elemente des hydrologischen Systems (z. B. Klimaelemente, Porengrößenverteilung, Vegetation, Durchwurzelung, Grundwasserflurabstand), die in ihrem funktionalen Wechselwirken die zeit- und tiefenspezifische Differenzierung des Wassers regulieren. Die Regulation erfolgt über hydrologische Teilprozesse im System Atmosphäre – Pflanze – Boden. In diesem Sinne sind bodenhydrologische Kennwerte wie Feldkapazität und Wasserleitfähigkeit keine Elemente, sondern Faktoren des Bodenwasserhaushaltes.

Ein wesentlicher Bestandteil der Charakterisierung des Bodenwasserhaushaltes ist das Feuchteregime, das hier als zeit- und tiefenspezifisch wechselnde Bindungsintensität des Bodenwassers während der Vegetationsperiode oder im Ganzjahreszeitraum verstanden wird. Da das Feuchteregime auf die anderen pedohydrologischen Elemente Rückschlüsse zuläßt, stellt die Operationalisierung, Klassifikation und Regionalisierung von Feuchteregimes eine vorrangige Forschungsaufgabe dar. Auch MOSIMANN (1990, S. 25) stellt fest, daß ein „allgemein anwendbares und quantitativ ausreichend definiertes Klassifizierungssystem für Bodenfeuchteregimetypen“ nicht bestehe. Im vorliegenden Beitrag wird eine in weiten Teilen West- und Mitteleuropas anwendbare, quantitative Klassifikation von Feuchteregime-Typen aus Geländemessreihen abgeleitet und diskutiert.

## 2 Ansätze und Grundlagen zur raumbezogenen Systematisierung der Bodenfeuchte auf quantitativer Grundlage

### 2.1 Klassifikationsansätze mit besonderer Berücksichtigung der Bodenwassergehalte

Der Begriff des Bodenfeuchteregimetyps wurde von NEEF und seinen Schülern als ökologisches Hauptmerkmal (NEEF et al. 1961) in die wissenschaftliche Literatur eingeführt und in zahlreichen Arbeiten (z. B. LAUCKNER 1964, THOMAS u. HAASE 1967/68, HUBRICH u. THOMAS 1978) für die physisch-geographische Raumtypisierung in Sachsen weiterentwickelt. Nach prozessualen bzw. genetischen Aspekten werden als Klassen grund-, hang- und stauwasserbeeinflusste sowie sickerwasserabhängige Bodenfeuchteregimes qualitativ unterschieden (vgl. Tab. 1); diese werden auf der Grundlage gravimetrischer Bodenwassergehaltsmessungen in mehreren Bodentiefen in etwa wöchentlichem Meßturnus weiter in die Bodenfeuchteregime-Typen differenziert. Da für die Zuordnung beliebiger anderer Wassergehaltsmessreihen zu den Typen keine quantitativ formulierten, operationalisierten Regeln angegeben sind, handelt es sich bei dem Vorschlag von THOMAS u. HAASE (1967/68) nicht um eine Klassifikation im engeren Sinn. Dennoch war mit der Typisierung von Bodenfeuchteregimes ein entscheidender Anstoß zur systematischen, jahreszeitlich und tiefenbezogenen Erfassung topologisch und chorologisch relevanter Bodenwasserhaushaltsmerkmale gegeben. So waren die frühen Arbeiten der NEEF-Schule Vorbild für zahlreiche Anwendungen und Modifikationen (vgl. Tab. 2),

Tabelle 1: Bodenfeuchteregime-Typen (BFR-Typen) nach THOMAS-LAUCKNER u. HAASE (1968)

Types of soil moisture regimes as proposed by THOMAS-LAUCKNER u. HAASE (1968)

A	I:	Permanent-Grundwasser-BFR
A	II:	Perioden-Grundwasser-BFR
B	I:	Permanent-Hangwasser-BFR
B	II:	Perioden-Hangwasser-BFR
B	III:	Permanent-Tiefhangwasser-BFR
B	IV:	Perioden-Tiefhangwasser-BFR
C	I:	Permanent-Stauwasser-BFR
C	II:	Perioden-Stauwasser-BFR
C	III:	Tief-Stauwasser-BFR
D	I:	Wechselfrisch-Sickerwasser-BFR
D	II:	Frisch-Sickerwasser-BFR
D	III:	Schichten-Sickerwasser-BFR

Tabelle 2: Ordnungsvorschläge (Auswahl) für Feuchteregimes und Feuchtestufen im Überblick  
Systematic approaches to soil moisture regimes

Autoren	Charakterisierung	räumliche Übertragbarkeit		Quantifizierung/ Ordnungsmerkmal	regionaler Bezug
		Grundtypen	Subtypen		
ELLENBERG et al. 1956	Typisierung Feuchtestufe		+	Zeigerwerte	Mitteleuropa
DAHMEN, F. W. u. DAHMEN, G. 1973	Typisierung Feuchtestufe		(fraglich)	(vegetationsbezogen)	Niederrhein
MARKS 1979	Typisierung ökol. Feuchtegrad		(bedingt)		Niederrhein
ESKUCHE 1978	Klassifikation Feuchtestufe	+	+	potentieller Aufbrauch der Vegetation	Münsterland
CHIRITA et al. 1964	Typisierung Bodenfeuchteregime	+	(bedingt)	komplex, Feuchteindex	
THOMAS u. HAASE 1967/68	Typisierung Bodenfeuchteregime	+	(bedingt)	komplex, Wassergehalt	Sachsen
TRETER 1970	Typisierung Bodenfeuchteregime	+	–	komplex, Wassergehalt	Schleswig-Holstein
JORDAN 1974	Typisierung Bodenfeuchteregime	+	–	komplex, Wassergehalt	Raum Hannover
ROSENKRANZ 1981	Typisierung Bodenfeuchteregime	+	–	komplex, Wassergehalt	Ostseeküste
LANG 1982	Typisierung Bodenfeuchteregime	+	–	komplex, Wassergehalt	Frankenalb
HUBRICH u. THOMAS 1978	Typisierung/Pedohydrotope	+	(bedingt)	sehr komplexe Merkmals- Kombinationen	Sachsen
RODE 1968	Typisierung Wasserbewegung	+	–	komplex, Wassergehalt	Sowjetunion
HERRMANN 1971 a, b	Typisierung Wasserbindung u. Wasserbewegung	+	–	Wasserbindung	Kolumbien
USDA, Soil Taxonomy 1975	Klassifikation (Feuchteregime)	+	+	Wasserspannung, Bodentemperaturen	weltweit
MOSIMANN 1990	Klassifikation (Feuchteregime)	+	+	Wassergehalt	(Mitteleuropa)

teilweise unter Einschluß fortentwickelter bodenkundlicher Untersuchungsmethoden (Neutronensonden) (TRETER 1970, JORDAN 1974, HUBRICH u. THOMAS 1978, MOSIMANN 1980 u. 1985, ROSENKRANZ 1981, LANG 1982).

HUBRICH u. THOMAS (1978) legten für zwei Testgebiete eine differenzierte Pedohydrotop-Gliederung, eine Typisierung und Klassifizierung von Bodenformen nach hydrologischen Merkmalen vor. Ihre hierarchische Gliederung in Regimes, Typen, Subtypen und Varietäten basiert auf den Haupttypen nach THOMAS u. HAASE (1967/68). Auf den niedrigeren Hierarchiestufen werden solche Merkmale ausgesucht, die als bodenkonstante Daten „pedohydrologisch aussagefähig sind und zugleich in ihrer Kombination geeignete Kriterien für die Bildung von Pedohydrotopen darstellen“ (HUBRICH u. THOMAS 1978, S. 290), z. B. Textur, Lagerungsdichte, Hangnäse, Grundwasserstufe. Durch das vielfältige Bodenformen-Inventar besitzen die definierten Typen überregionalen Modellcharakter. Dennoch bleibt offen, ob sich die 65 Pedohydrotypen hinsichtlich ihres Bodenwasserhaushaltes tatsächlich unterscheiden, denn die Klassifikation enthält sowohl Elemente des Wasserhaushaltes als auch deren Faktoren. Insofern könnte man eher von potentiellen Pedohydrotypen sprechen. Die Autoren verweisen auf zukünftige „mathematisch-statistische Auswertung(en)

mehnjähriger Bodenfeuchtemessungen“ (HUBRICH u. THOMAS 1978, S. 290).

MOSIMANN (1990) verknüpft eine Ökotopklassifikation mit einer Klassifikation von Bodenfeuchteregime-Typen, die in den Grundzügen der Darstellung an frühere Arbeiten anknüpft (MOSIMANN 1985). Das System basiert auf den „geschätzten oder gemessenen zeitlichen Häufigkeitsanteilen des Vorkommens verschiedener Bodenfeuchtestufen“ (volumetrische Wassergehalte) „in drei Tiefenbereichen bis 1 m“ (MOSIMANN 1990, S. 25). Eine Auswahl von 117 verschiedenen 3 × 3-Matrizen (Häufigkeit × Tiefenstufe), in die als dritte Variable klassifizierte Bodenwassergehalte eingetragen sind, leitet den Benutzer zu 28 verschiedenen, verbalisierten Feuchteregime-Klassen (Beispiele: tief-mäßig feucht, sehr feucht/tief naß, wechsel feucht/schicht-naß). Die Wassergehalte sind klassifiziert in 0–10, 10–20, 20–35 und > 35 Vol.-%. Es handelt sich um eine Klassifikation im engeren Sinne, die konsequent auf ein Element des Bodenwasserhaushaltes zurückgreift und universell anwendbar ist.

Eine Wasserstufen-Klassifizierung für Pflanzengesellschaften der Westfälischen Bucht und im Weserbergland besorgte ESKUCHE (1978) auf der Grundlage mehrjähriger Bodenwassergehaltsmessungen. Gliederungskriterium ist der potentielle Wasseraufbrauch während der Vegetationsperiode in mm. Im Kern

basiert die auch auf beliebige andere Meßreihen übertragbare Gliederung auf einer Bodenwasserbilanzgröße; sie stellt daher keine Klassifikation von Feuchteregimes im engeren Sinne dar. Durch die Verknüpfung von Pflanzenaufnahmen mit bodenphysikalischen Messungen bietet dieser Ansatz wertvolle landschaftsökologische Vergleichsmöglichkeiten.

Ein interessanter, wenig beachteter Ansatz zur prozessualen Kennzeichnung und Veranschaulichung von Bodenfeuchteregimes („soil moisture regimes“) geht auf RODE (1968) zurück. Grundlage für die Regime-Kennzeichnung sind auf die maximale Wasserkapazität normierte Häufigkeitsverteilungen der Wassergehalte unterschiedlicher Bodentiefen während eines Jahres. Dieses Gliederungskonzept eignet sich für die Feuchteregime-Charakteristik zonaler Böden.

## 2.2 Zur Bedeutung der Wasserspannung (Matrixpotential) als Basis einer landschaftsökologisch begründeten Klassifikation von Bodenfeuchteregime-Typen

Alle Versuche, das Bodenfeuchteregime auf der Grundlage von Wassergehaltmessungen zu typisieren oder zu klassifizieren, besitzen eine konzeptionelle Schwierigkeit. Ohne weitere Zusatzinforma-

tionen ist der Wassergehalt weder (pflanzen-)ökologisch noch hydrodynamisch, d. h. für die Analyse von Bodenwasserbewegungen, hinreichend aussagekräftig (vgl. HERRMANN 1971, S. 93 und LESER 1978, S. 127). Dieses Problem war bereits NEEF et al. (1961) bewußt, als sie in ihren Interpretationen die Wassergehalte in Beziehung zu Kennwerten der Wasserbindung (Wasserkapazität, Feldkapazität, Permanenter Welkepunkt; vgl. den elementaren Feuchteindex  $I_e$  nach CHIRITA et al. 1964) setzten. Zur Illustration und Definition von in unserem Zusammenhang bedeutsamen bodenhydrologischen Grundbegriffen dient ein Diagramm (Abb. 1), das Aspekte der Porenraumgliederung, der Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers und des im Gelände anzutreffenden Feuchtezustandes gegenüberstellt. Daß der Wassergehalt als bodenhydrologische Kenngröße für die Klassifikation von Feuchteregimes ungeeignet ist, zeigen die beispielhaft aufgeführten Wasserspannungskurven (pF-Kurven). Die alleinige Angabe eines Wassergehalts ermöglicht keinen Rückschluß auf den Bodenfeuchtezustand, sie besitzt einen nur geringen Wert, da mit dem Wassergehalt je nach Bodenart und -struktur völlig unterschiedliche Bindungsintensitäten des Bodenwassers und damit eine differierende Pflanzenverfügbarkeit verbunden sind.

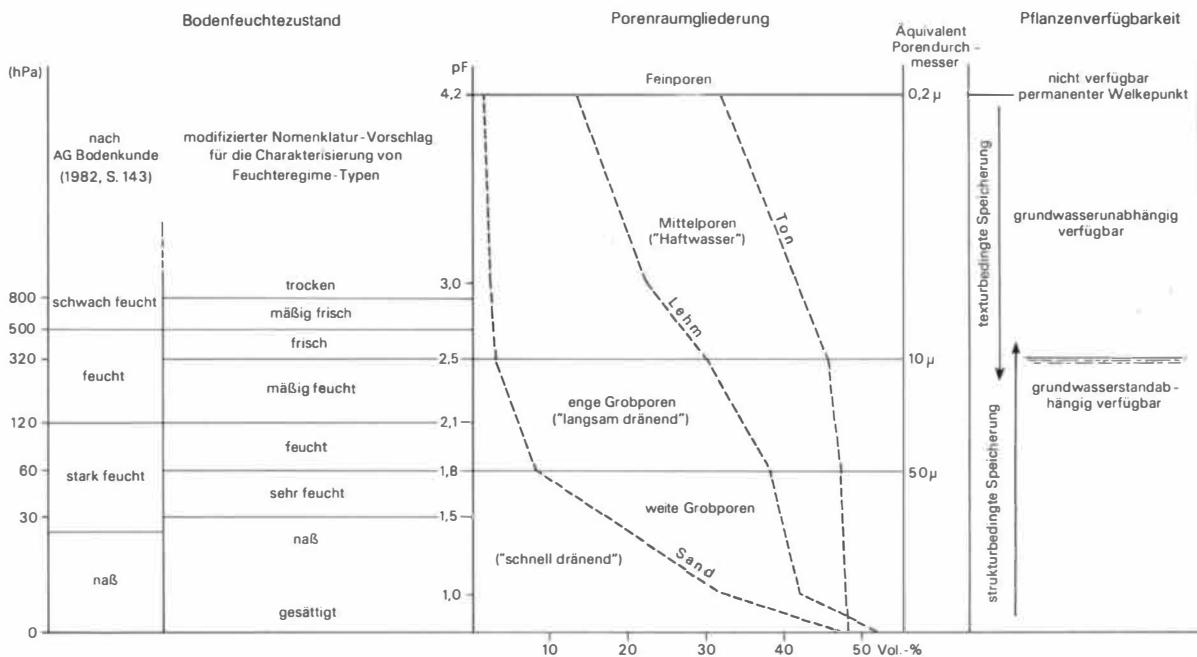


Abb. 1: Beziehungen zwischen Porenraumgliederung, Feuchtezustand, Wassergehalt und Wasserbindungsintensität verschiedener Bodenarten (unter Verwendung von HARTGE 1971 und RICHTER 1986)

Relation between pore size distribution, actual soil moisture status, volumetric water content, and soil water tension for selected soil textures (using HARTGE 1971 and RICHTER 1986)

Dagegen ist die Bindungsintensität des Bodenwassers pflanzenökologisch und hydrodynamisch unmittelbar aussagekräftig.

Abb. 1 enthält einen gegenüber der Kartieranleitung Bodenkunde (*AG Bodenkunde* 1982, S. 143) modifizierten Nomenklatur-Vorschlag für die Kennzeichnung des aktuellen Bodenfeuchtezustandes; die Klassifikation nach *AG Bodenkunde* ist für die im Rahmen einer Feuchteregime-Klassifikation wünschenswerte Differenzierung des Feuchtezustandes zu grob. Unter Einbeziehung der Bezeichnung ‚frisch‘ ergibt sich eine Abstufung, die m. E. auch vom Geländeeindruck der Bodenfeuchte gerechtfertigt ist. Die gewählten Bezeichnungen ähneln den in der Geobotanik und Standortkunde verwendeten. Wegen dieser in der Geländepraxis nachvollziehbaren Kennzeichnungen wurde darauf verzichtet, künstliche Begriffe einzuführen. Die Begriffsbildung soll die verbale Charakterisierung, das Verständnis und die Bewertung von gemessenen Wasserspannungen erleichtern.

Die in das Schema aufgenommene gebräuchliche Charakterisierung der engen und weiten Grobporen als langsam und schnell dränende Poren ist zwar unter dem Aspekt gerechtfertigt, daß im allgemeinen die Wasserleitfähigkeit – als Funktion der textur- und strukturbedingten Porengeometrie – mit abnehmendem Durchmesser der wasserleitenden Poren sinkt, doch sind die Beziehungen in der Realität weniger statisch als es die Gliederung in Haftwasser und Dränwasser suggerieren mag. Die Wasserbewegung im Boden beruht auch im ungesättigten Boden auf der Kombination von Darcy-Gesetz und Kontinuitätsgleichung:  $\delta\theta/\delta t = \delta(k(\Psi_m) \cdot (\delta\Psi_m/\delta z - 1))/\delta z$ , mit  $\theta$  = Wassergehalt ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $k$  = Wasserleitfähigkeit ( $\text{cm}/\text{d}$ ),  $\Psi_m$  = Matrixpotential (hPa),  $t$  und  $z$  = Zeit- und vertikale Ortskoordinaten.

Der Wasserfluß wird durch die Wasserleitfähigkeit und durch das antreibende Potentialgefälle bestimmt, das über gemessene Wasserspannungen im Gelände quantitativ erfaßt wird. Auch unter diesem Aspekt ist eine Feuchteregime-Charakterisierung auf der Grundlage der Wasserspannung sinnvoll. Entsprechende hydrodynamische Interpretationshinweise enthalten bodenphysikalisch orientierte Arbeiten und Methodenbücher (CHILDS 1969, RINGER et al. 1974, BOUMA 1977, HARTGE 1971, ZEPP 1987, HARTGE u. HORN 1989). Wengleich der Begriff der Feldkapazität eindeutig definiert ist als die Wassermenge, die ein Boden maximal gegen die Schwerkraft zurückhalten kann, bleiben in der Praxis Schwierigkeiten, ihn festzulegen. Das Schwerkraftpotential ist abhängig von der Lage über dem Grundwasserspiegel, so daß selbst bei konstanter Grundwasserspiegellhöhe das maximal

gegen die Schwerkraft gehaltene Wasser keine für die ungesättigte Zone konstante Größe ist. Die Festlegung der Feldkapazitätsgrenze auf pF 1,8 erfolgte daher eher als praxisnahe Konvention als aus bodenphysikalischer Notwendigkeit. Sinnvoll ist die Angabe eines variablen Bereiches der Wasserspannungscharakteristik mit grundwasserstandsabhängiger Speicherung pflanzenverfügbaren Wassers (RICHTER 1986, S. 86), der zum Trockenen hin abgelöst wird von der texturbestimmten Wasserspeicherung. Dies bedeutet, daß im Freiland eine Wasserspeicherung mit geringen Bindungsintensitäten von deutlich unter pF 2,5 über längere Zeiträume nur unter besonderen Umständen möglich ist. Ursachen für lange Naß- bis Feuchtphasen können Grundwassernähe oder außergewöhnlich feuchte Witterungsabschnitte sein; den gleichen Effekt wie die Grundwasseroberfläche besitzt periodisch auftretendes, freies, über einer relativ undurchlässigeren Schicht (Stauwassersohle) gestautetes Bodenwasser. Somit ist die maximal gegen die Schwerkraft gehaltene Wassermenge zugleich grund- oder stauwasserabhängig und texturbedingt. Hiervon ist allein der texturbedingte Anteil zeitunabhängig, die anderen Anteile unterliegen unter natürlichen Verhältnissen jahreszeitlichen Schwankungen. Die zeitliche Variabilität der maximalen Speicherfähigkeit in unterschiedlichen Bodentiefen ist ein Nachteil für eine physikalisch begründete Klassifikation von Feuchteregimes, die ausschließlich auf der Porengrößenverteilung bzw. den Angaben von Totwasser, nutzbarer Feldkapazität und Feldkapazität beruht.

Aus den erörterten bodenphysikalischen Zusammenhängen folgt, daß als Grundlage für eine Feuchteregime-Typisierung und -Klassifikation auf die tatsächliche Dauer von Phasen unterschiedlicher Wasserbindung in ausgewählten Bodenabschnitten zurückgegriffen werden sollte. Bislang sind zwei systematische Ansätze mit regionalem Bezug bekannt, in denen auf der Grundlage von Wasserspannungen eine Feuchteregime-Typisierung vorgenommen wurde. In der Arbeit von HERRMANN (1971 a, vgl. HERRMANN 1971 b) werden regionale Feuchteregime-Typen eines Landschaftsprofils in der Sierra Nevada de Santa Marta (Kolumbien) quantitativ beschrieben, nach der Methode von RODE (1968) dargestellt, typisiert und großflächig regionalisiert (HERRMANN 1971 a). Der eingeschränkte Meßzeitraum (1 Jahr), die regionalspezifischen Besonderheiten und die Tatsache, daß hier keine Klassifikation im engeren Sinne vorliegt, schließen die Übernahme der Typisierung für Mitteleuropa aus.

Dagegen enthält die Soil Taxonomy (USDA 1975) eine weltweit anwendbare Klassifikation von Feuchte-

regimes („soil moisture regimes“), die sie als „presence or absence of ground water or water held at a tension  $< 15$  bars in the soil or in specific soil horizons by periods of the year“ definiert (USDA 1975, S. 52). In dieser Definition ist der Aspekt der Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers einbezogen. Die Böden werden als ‚moist‘ (feucht) bezeichnet, wenn sie pflanzenverfügbares Wasser enthalten; daneben werden die Kategorien ‚dry‘ (trocken) und ‚saturated with water‘ (wassergesättigt) verwendet. Um ‚soil moisture regimes‘ aus klimatischen Daten abschätzen zu können, wird der Begriff des „Bodenfeuchte-Kontrollabschnittes“ (soil moisture control section) (USDA 1975, S. 53) eingeführt. Entsprechend der Dauer der Feuchtphase im Kontrollabschnitt in Kombination mit der saisonalen Variation der Bodentemperatur werden die folgenden Bodenfeuchteregeime-Klassen gebildet: aquic, aridic (= torric), udic, ustic, xeric. Für eine Behandlung der Bodenfeuchteregeime in West- und Mitteleuropa ist die Klassifikation zu grob; im mittel- und westeuropäischen Raum kommen nur ‚aquic‘ und ‚udic‘ Regimes vor.

### 3 Klassifikation von Häufigkeitsverteilungen jahreszeitlich wechselnder Bindungsintensitäten des Bodenwassers

#### 3.1 Datengrundlage

Aus dem Untersuchungsraum Nordrhein-Westfalen wurde umfangreiches Originaldatenmaterial zusammengetragen, das bislang zum größten Teil weder publiziert noch zusammenfassend ausgewertet worden ist. Die Übersichtskarte (Abb. 2) vermittelt einen Eindruck von der räumlichen Verteilung und Streuung der Feuchtemeßreihen. Die Meßstandorte entfallen im Verhältnis 2:1:1 auf die Nutzungen Acker (30 Standorte), Grünland (15) und Wald bzw. Forst (15). Mit über 20 verschiedenen Boden-Subtypen ist eine breite Palette der pedogenetischen Differenzierung vertreten. Das Bodenartenspektrum umfaßt alle Bodenarten zwischen Sand, Schluff und lehmigem Ton; es sind sowohl homogene als auch deutlich geschichtete Böden vertreten. Als wesentliche Substratgruppen sind beteiligt: Löß, Löß über Terrassenmaterial, Löß über Geschiebelehm, Löß über Graulehm-Fließerde, verwitterte Sand- und Schluffsteine mit Lößbeimengung, Hochflutlehm über Terrasse, Flugsand, Flugsand über Terrasse, Flugsand über Geschiebelehm, Flugsand über Tonen und Mergeltonen, Mergeltonen und Tone, Kalkmergel, Geschiebelehm und Geschiebesand.

Im Rahmen dieses Beitrages wird mit einer Ausnahme<sup>1)</sup> ausschließlich auf Wasserspannungsmessreihen zurückgegriffen, die vom Geologischen Landesamt Nordrhein-Westfalen<sup>2)</sup> übernommen wurden. Nach Umwandlung der Rohdaten und Datenkontrollen (Plausibilitäts- und Fehlerkontrollen) standen Meßreihen aus 1100 Bodentiefen zur Verfügung, aus denen 875 von 53 Standorten aus den Jahren 1970–1987 ausgewählt wurden; Auswahlkriterium war eine Mindestdauer der Meßreihen von 5 aufeinanderfolgenden Monaten im Bezugszeitraum zwischen Anfang April bis Ende Oktober. Dieser Zeitraum umfaßt für eine Klassifikation hinreichend die wesentlichen Veränderungen der Bodenfeuchte während der Vegetationsperiode. In Abhängigkeit von Bodenartenschichtung und -horizontierung betragen die vertikalen Abstände der Meßtiefen 20–30 cm, während die Meßintervalle durchschnittlich 3–4 Tage betragen.

#### 3.2 Klassifikation der Saugspannungs-Häufigkeitsverteilungen

Die Häufigkeitsverteilung der in der Vegetationsperiode gemessenen Bindungsintensitäten des Bodenwassers (vgl. Abb. 3a) wird als die grundlegende Information über den Feuchtecharakter in der betrachteten Bodentiefe angesehen. Graphisch können diese Informationen durch Kurven der kumulierten prozentualen Häufigkeitsverteilung (Abb. 3b) veranschaulicht werden. Bewußt wurden nicht die Zeitreihen der Wasserspannung benutzt, da dies das zur Verfügung stehende Material stark eingeengt hätte. Der Witterungsablauf unterliegt von Jahr zu Jahr großen Schwankungen, die auch den Beginn der sommerlichen Austrocknung betreffen. Selbst bei gleicher Austrocknungsintensität können die Trockenperioden während unterschiedlicher Zeiträume auftreten. Diese Schwierigkeiten werden umgangen, wenn die kumulativen Häufigkeitsverteilungen der Wasserspannungsintensität verwendet werden. Darüber hinaus werden so Meßreihen mit unterschiedlichen Meßintervallen und -zeitpunkten normiert.

Nasse Horizonte erscheinen beispielsweise als flache Kurven, die anzeigen, daß 75 oder 100% aller

<sup>1)</sup> Unveröffentlichte Messungen von Frau D. Heyder, Institut für Bodenkunde, Bonn.

<sup>2)</sup> Es handelt sich um Meßdaten, die dankenswerterweise von Herrn Dr. U. Kraemer zur Verfügung gestellt wurden. Einige dieser Meßdaten sind veröffentlicht in WARSTAT (1980).

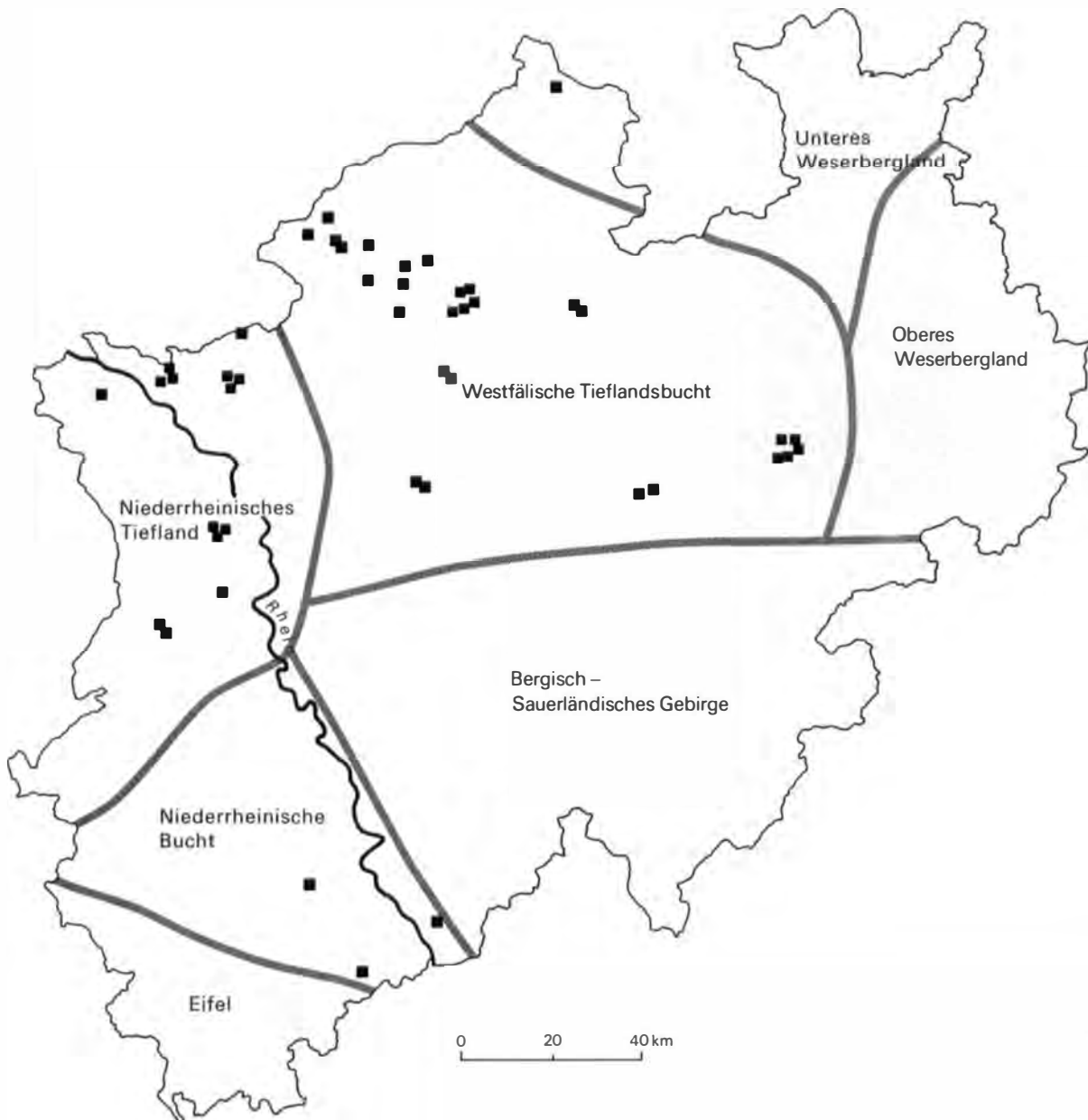


Abb. 2: Standorte der Bodenfeuchtemeßreihen  
Locations of soil moisture measurements

Saugspannungsmessungen unterhalb 60 hPa (Feldkapazität) bleiben; dagegen weisen die Häufigkeitsverteilungen trockener Horizonte starke Anstiege im Bereich geringer und flache Kurvenabschnitte im Bereich hoher Saugspannungen auf. Die Überlagerung der Häufigkeitsverteilungen aus allen Meßtiefen eines Standortes zeigt die großteils erhebliche Differenzierung der Bodenfeuchte innerhalb eines

Bodens. Jeder Boden besitzt in Abhängigkeit von den Standorteigenschaften, vom Bewuchs und von der Witterung eine spezifische Kombination der Verteilungskurven.

Das effektive Feuchtereime ist die charakteristische Kombination von Feuchteverteilungskurven ausgewählter Bodentiefen. Die große Vielfalt der Verteilungskurven mußte durch ein geeignetes Typi-

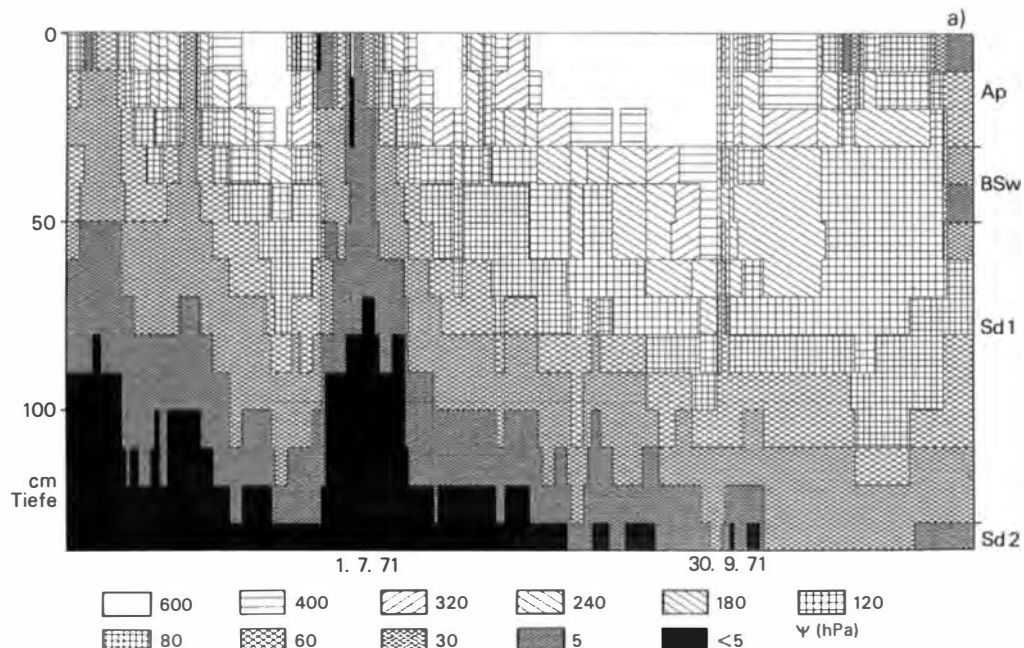


Abb. 3a: Saugspannungs-Isoplethen eines Pseudogleys aus Geschiebesand über Grundmoräne unter Grünland (Datengrundlage: U. KRAHMER, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen)

Soil water tension as a function of time and depth in a surface water gley (pseudo-gley), parent material: sandy and loamy glacial till (data base: U. KRAHMER, Geological Service of North Rhine-Westphalia)

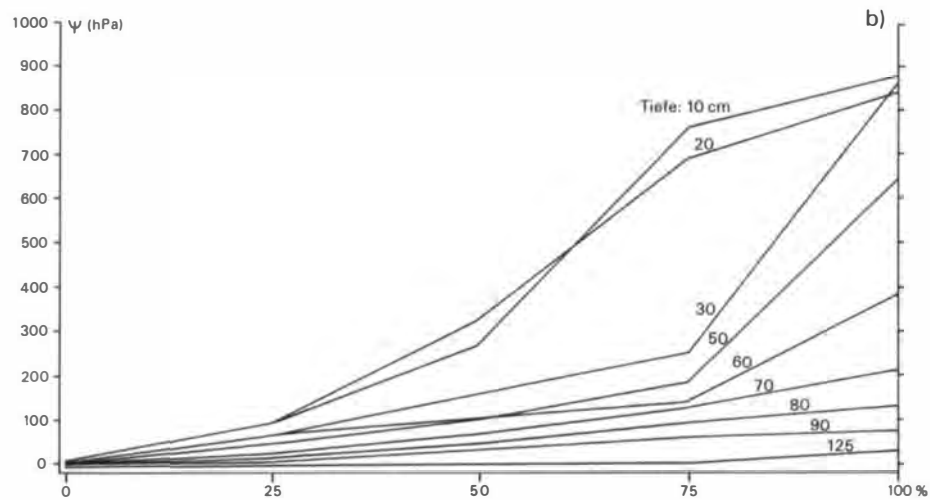


Abb. 3b: Häufigkeitsverteilungen (kumuliert) der tiefenspezifischen Wasserspannungen während der Vegetationsperiode 1971

Cumulative frequency distribution of soil water tensions of varying depth during the growing season in 1971

sierungs- oder Klassifikationsverfahren zu einer überschaubaren Anzahl von Gruppen zusammengefaßt werden.

Zur Klassifikation multivariater Datensätze, insbesondere auch zur Zusammenfassung von Kurven-

zügen sind Cluster-Analyse-Verfahren weitverbreitet im Einsatz. Es bot sich daher an, statistisch ähnliche Häufigkeitsverteilungen der Wasserspannungen automatisch gruppieren zu lassen. Die Methode nach WARD ist bekannt dafür, daß sie statistisch homogene



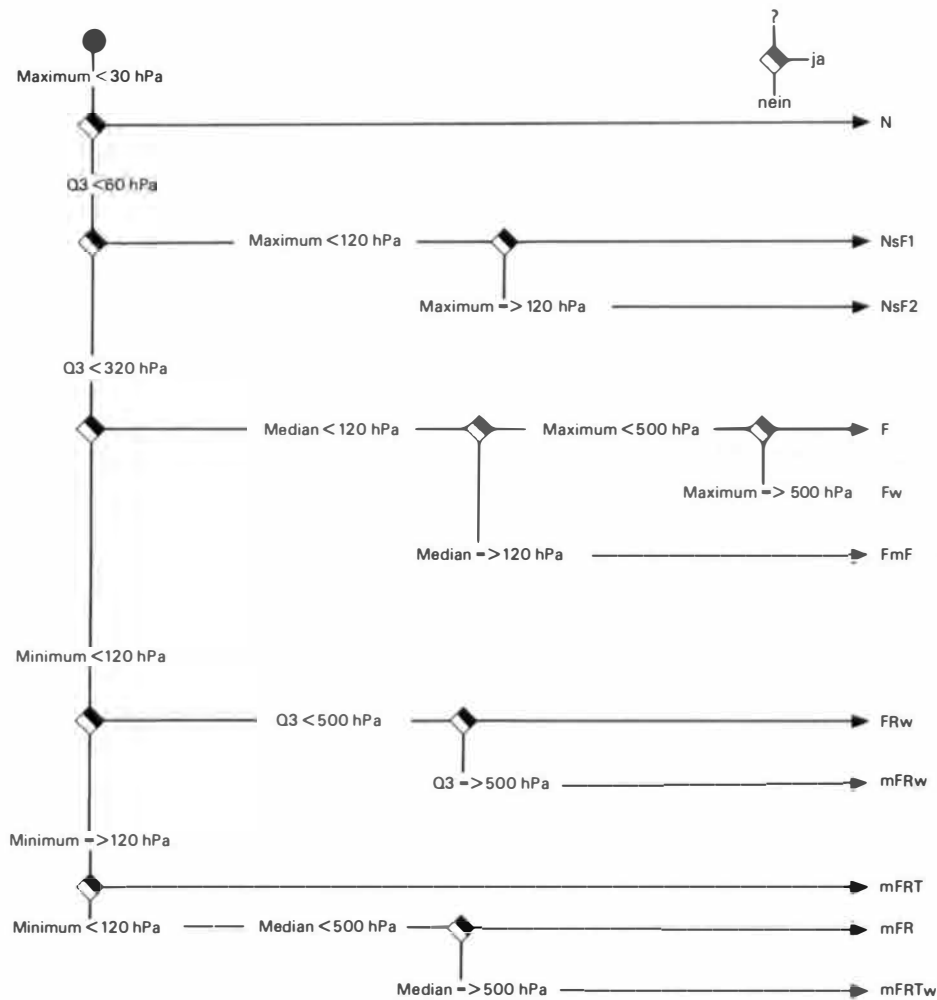


Abb. 4: Entscheidungsleiter zur Ermittlung der Feuchteverteilungsklassen auf der Grundlage von Wasserspannungsmessungen während der Vegetationsperiode

Determination of the moisture distribution class with the help of soil water tensions during the vegetative period

Gruppierungen erzeugt (vgl. z. B. STEINHAUSEN u. LANGER 1977). Um nicht nur den Verlauf der kumulativen Häufigkeitsverteilung, sondern auch zusätzliche Verteilungseigenschaften zu berücksichtigen, wurden maximal 10 deskriptiv-statistische Parameter in Clusteranalyseverfahren einbezogen: arithmetisches Mittel, Standardabweichung, Variationskoeffizient, Minimum, Maximum, 1. und 3. Quartilswert, Median, Schiefe, Kurtosis. Diese Liste enthält sowohl relative als auch absolute Maße, die unterschiedliche Größenordnungen besitzen. Die Maxima können Werte zwischen 0 und 1000 annehmen, während die Minima zwischen 0 und 230 schwanken. Schiefe und Kurtosis variieren meist um den Nullpunkt, nur in wenigen Extremfällen erreichen sie Werte bis nahezu 1000. Um diese Ungleichgewichte auszuglei-

chen, wurde auch mit standardisierten Variablen gearbeitet. Die Auswahl und Anzahl der Variablen wurden ebenso wie die Anzahl der angestrebten Cluster variiert, um optimale Resultate zu erzielen.

Wenngleich im statistisch-operationellen Sinne alle angewandten 19 Varianten der Clusteranalyse funktionieren, hielten die Ergebnisse einer kritischen inhaltlichen Prüfung nicht stand. Zwar zeigten die auf den mittleren Quartilswerten basierenden typischen Häufigkeitsverteilungen der erhaltenen Cluster durchaus plausible und interpretierbare Verläufe, doch in allen Fällen erschien die Schwankungsbreite innerhalb der Cluster vorwiegend im feuchten Bereich niedriger Wasserbindungen zu groß. Um eine bessere Differenzierung zu erzielen, wurden Logarithmierungen der Variablen vorgenommen; dies

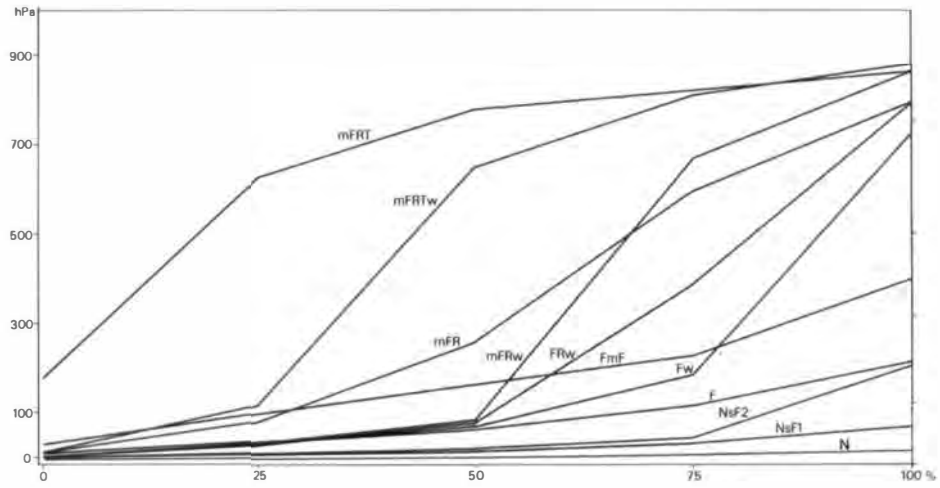


Abb. 5: Mittlere Summenkurven der Feuchteverteilungsklassen  
Average curves for the soil moisture distribution classes

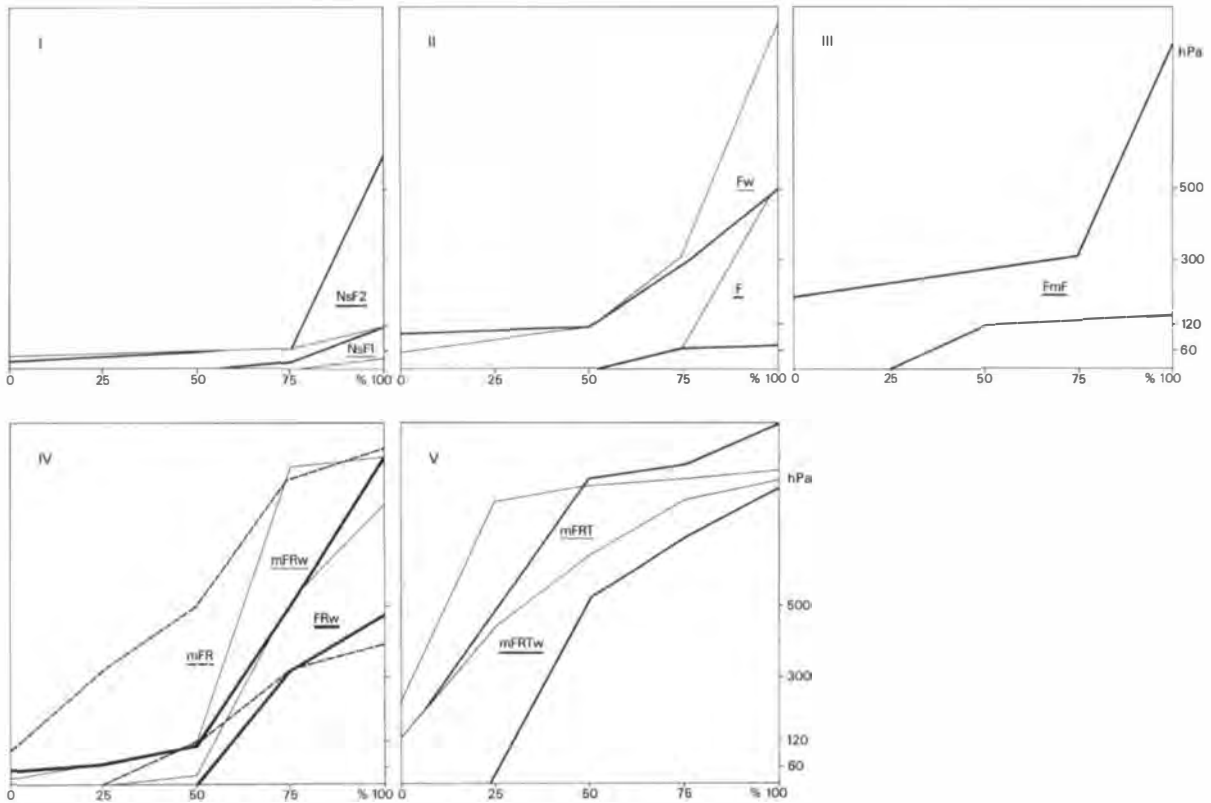


Abb. 6: Empirische Schwankungsbereiche innerhalb der Feuchteverteilungsklassen  
Empirical range within the soil moisture distribution classes

Tabelle 3: Verbale Kennzeichnung der Feuchteverteilungsklassen

Characterization of soil moisture distribution classes

Kategorie	Klassen-Kennzeichnung	Kurzzeichen	Wasserspannung	
			Mittelwert	Standard- abweichung
I NASS	<i>permanent naß oder wassergesättigt, extremer Luftmangel</i>	N	< 5	< 5
	<i>überwiegend naß oder sehr feucht, meist eingeschränkte Sauerstoffversorgung</i>	NsF1	20	20
	<i>überwiegend naß oder sehr feucht, kurzfristig feucht</i>	NsF2	35	40
II FEUCHT	<i>überwiegend feucht, zeitweise naß oder sehr feucht</i>	F	80	55
	<i>überwiegend feucht, zeitweise naß oder sehr feucht, kurzfristig frisch und mäßig frisch; zeitlich wechselnde Wasserbindung</i>	Fw	160	195
III MÄSSIG FEUCHT	<i>überwiegend feucht bis mäßig feucht, selten sehr feucht, selten frisch; stark wechselnde Wasserbindung</i>	FmF	170	97
IV FRISCH	<i>überwiegend frisch, mäßig frisch und mäßig feucht, zeitweise sehr feucht oder naß, wechselnde Wasserbindung</i>	FRw	220	260
	<i>überwiegend mäßig frisch, zeitweise feucht bis sehr feucht, kurzfristig trocken; sehr unausgeglichene Feuchteverteilung</i>	mFRw	290	335
	<i>überwiegend mäßig frisch, zeitweise sehr feucht bis frisch; ausgeglichene Feuchteverhältnisse</i>	mFR	330	290
V MÄSSIG FRISCH/ TROCKEN	<i>überwiegend mäßig frisch und trocken, zeitweise frisch bis feucht; zeitlich wechselnde Wasserspannung trockengefährdet</i>	mFRTw	505	335
	<i>überwiegend mäßig frisch und trocken, kurzfristig mäßig feucht; trockengefährdet</i>	mFRT	688	192

entspricht dem Übergang von der physikalischen Maßeinheit hPa auf den aus der Wasserspannungskurve bekannten pF-Wert (vgl. Abb. 1). Auf diese Weise erhält die Wasserspannungsdifferenz von 120 bis 320 hPa dieselbe Größenordnung wie der Unterschied zwischen 320 und 800 hPa.

Da keine der durchgeführten Clusteranalysen hydrologisch befriedigen konnte, wurde eine automatische Klassifikation mit statistischen Methoden nicht weiter als Arbeitsziel verfolgt. Vielmehr wurden schrittweise hydrologisch begründete, restriktive Vorgaben eingeführt; diese bestanden in der Definition kritischer Schranken, unter denen die zusammenfassenden Verteilungskurven bleiben sollen. Für

die durch diese Schranken gesetzten Gruppen wurden getrennte Clusteranalysen durchgeführt (Methode: WARD; Variablen: Min, Max, Median, 1. u. 3. Quartilswert). Deren Ergebnisse wurden wiederum hydrologisch bewertet und bei nicht zufriedenstellenden Resultaten weitere restriktive Annahmen getroffen. Auf diese Weise wurde das Verfahren der Clusteranalyse schrittweise durch eine eigene hydrologisch und ökologisch begründete Klassifikation ersetzt. Insofern trat an die Stelle des „objektiven“, statistischen Verfahrens ein „willkürliches“, subjektives, allerdings hydrologisch sinnvoller Schema. Die im Zuge der Erarbeitung der eigenen Klassifikation eingeführten Schranken entsprechen ausnahmslos kriti-

schen Punkten der pF-Kurven (vgl. Abb. 1), die für die Wasserbewegung, die Pflanzen-Wasser-Verfügbarkeit und den für bodenbiologische Prozesse relevanten Lufthaushalt bedeutsam sind. Dennoch war bei der Entwicklung der eigenen Klassifikation die Möglichkeit, Clusteranalysen durchzuführen, sehr hilfreich, da aus ihren Ergebnissen wertvolle Hinweise über typische, dem Datenmaterial inhärente, quasi natürliche Verteilungsmuster entnommen werden konnten.

Das Klassifikationsschema geht aus der Entscheidungsleiter (Abb. 4) hervor; die Zuordnung beliebiger Meßreihen kann leicht von jedem Bearbeiter durchgeführt werden. Das Ergebnis der Klassifikation aller analysierten 875 Wasserspannungsmessreihen ist in Form der mittleren Verteilungskurven im Vergleich (Abb. 5) und durch Hüllkurven dargestellt, die den Schwankungsbereich der empirischen Datenbasis anzeigen (Abb. 6). Unter Verwendung der Nomenklatur der Abb. 1 ergibt sich hieraus die verbale Kennzeichnung der Klassen (Tab. 3), die ihrerseits wieder in 5 Kategorien zusammengefaßt

werden können. Sie reichen von permanente Nässe ausdrückenden Verteilungen, die für das Grundwasser und den Kapillarraum typisch sind, bis hin zu Verteilungskurven, die für austrocknungsgefährdete Standorte gelten.

### 3.3 Feuchteverteilungsklassen und ökologischer Feuchtegrad

Um eine dem Feuchtedreieck nach *AG Bodenkunde* (1982, S. 276) (Abb. 7) entsprechende, grobe konzeptionelle Vorstellung graphisch zu veranschaulichen, sind die Feuchteklassen nach einem Konstruktionsprinzip, das an dieser Stelle nicht im Detail erläutert werden kann, in ein Dreiecksdiagramm (Abb. 8) eingetragen. Im zentralen und unteren Teil des Dreiecks liegen die Feuchteklassen mit stark wechselnden Feuchtebedingungen. Nach außen schließen sich Bereiche an, die zeitlich ausgeglichene Feuchtigkeitsbedingungen ausdrücken. Die Feuchteklassen greifen, Kreis-sektoren vergleichbar, von außen in das Innere der Dreiecksfläche ein.

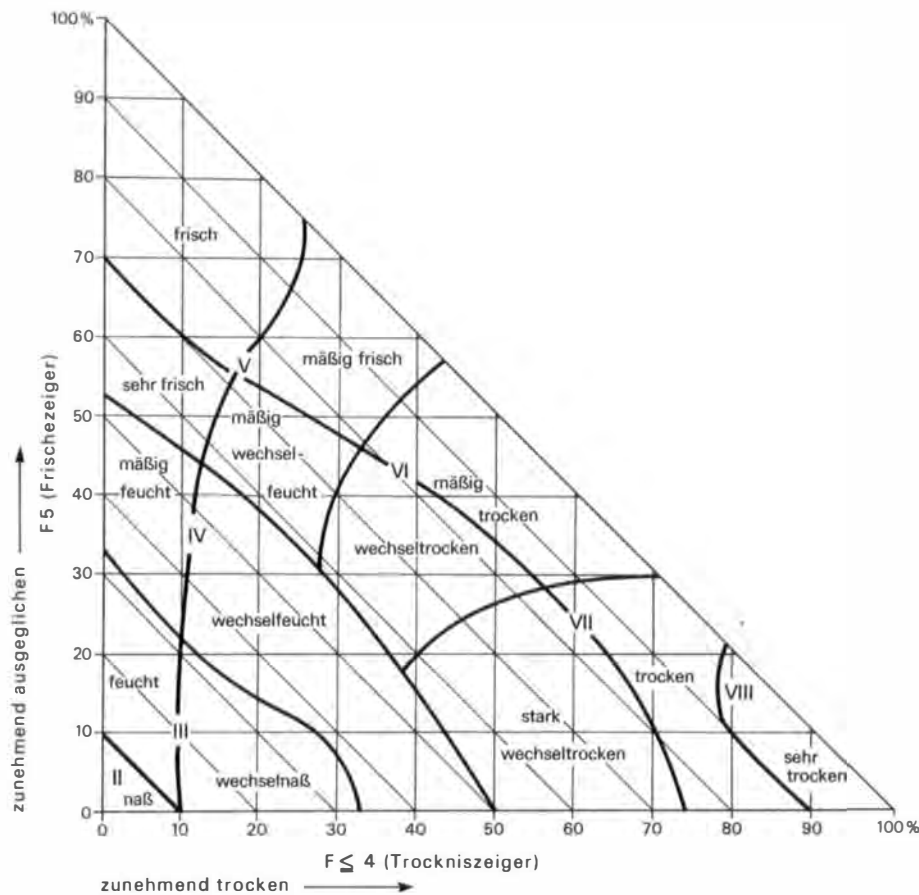


Abb. 7: Feuchtedreieck nach *AG Bodenkunde* (1982, S. 276)

Moisture diagram according to *AG Bodenkunde* (1982, p. 276)

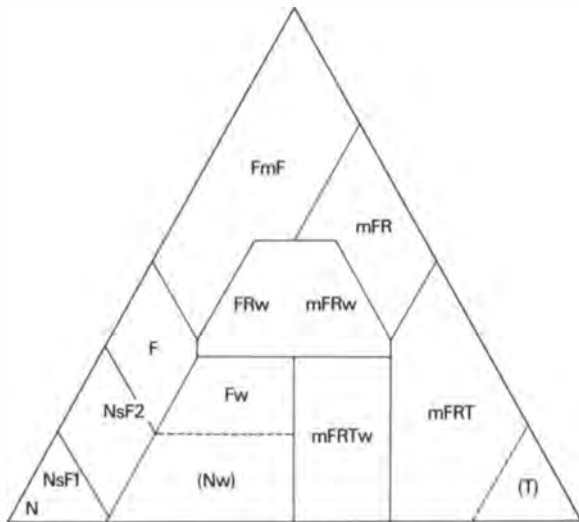


Abb. 8: Dreiecksdiagramm quantitativer Feuchteverteilungsklassen

Triangular diagram of quantitative soil moisture distribution classes

Es liegt nahe, beide Diagramme zu überlagern, verbal abzugleichen und somit ökologische Feuchtestufe und quantitative Feuchtestufe auf einfache Weise zu parallelisieren. Ein solches Vorgehen ist nicht gerechtfertigt, da trotz ihrer formalen Ähnlichkeit beide Diagramme auf prinzipiell unterschiedlichen methodischen Grundlagen beruhen. Während bei ökologischen Feuchtestufen und standortkundlichen Feuchtestufen pauschale Aussagen für den Pflanzenstandort getroffen werden, beziehen sich

die eigenen Feuchteverteilungsklassen nur auf diskrete Bodentiefen. Im ökologischen Feuchtedreieck (Abb. 7) ist die Anzahl der Frische- und Trockenzeiger gegeneinander aufgetragen, die Bezeichnung der Feuchtestufen beruht auf der Geländeerfahrung des Geobotanikers, wohingegen beim eigenen Diagramm der Feuchteverteilungsklassen (Abb. 8) eine physikalische Meßgröße, die Wasserbindungsintensität, unmittelbar die Basis des Schemas bildet. Die Kennzeichnungen der Wasserspannungen während der Vegetationsperiode sind physikalisch eindeutig und hydrologisch so differenziert, daß die Zuordnung eines Standorts bzw. einer Feuchtemeßreihe zu einer Feuchtestufe allein aufgrund des Dreiecks nicht möglich ist; das mehrstufige Klassifikationsverfahren der Entscheidungsleiter muß in jedem Fall durchlaufen werden.

Ohne Zweifel ist das ökologische Feuchtediagramm für eine sehr viel weitere Feuchteamplitude konzipiert, für die in der eigenen Untersuchung keine quantitativen Grundlagen (z. B. extreme Trockenstandorte, grundwasserferne Dünenstandorte, sonnenexponierte Hangstandorte mit geringmächtiger, schuttreicher Verwitterungs- und Bodendecke, Moor- und Sumpfgelände) zur Verfügung stehen. Wegen der großen hydrologischen Verschiedenartigkeit der in der eigenen Analyse berücksichtigten Böden können die Feuchteverteilungsklassen dennoch als für weite Flächen Mitteleuropas typisch gelten. Die Klassifikation und Regionalisierung quantitativer Bodenfeuchteregime-Typen ist angesichts der Tatsache, daß bei Ackerflächen „die schon früher nicht unproblematische Auswertung der Ackerunkrautgesell-

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Typisierung ökologischer Feuchtestufen verschiedener Autoren

Comparison of ecological moisture levels as defined by various authors

Stufen mittlerer langjähriger Feuchtigkeit	Feuchtezahlen für Pflanzenarten	Feuchtestufen	Feuchtestufen
ELLENBERG et al. 1956, verändert nach WELLER 1987	ELLENBERG 1978	DAHMEN, F. W. u. DAHMEN, G. 1973	MARKS 1979
0 äußerst trocken	1 Starktrockniszeiger	0 sehr trocken	
1 sehr trocken			
2 trocken bis sehr trocken			
3 trocken	3 Trockniszeiger	1 trocken	1 trocken
4 mäßig trocken		2 mäßig trocken	2 mäßig trocken
5 mäßig frisch		3 mäßig trocken bis mäßig frisch	(2a: wechselfrisch)
6 frisch	5 Frischezeiger	4 frisch bis mäßig frisch	3 frisch
7 mäßig feucht			4 feucht
8 feucht	7 Feuchtezeiger	5 feucht	(4a: wechselfeucht)
9 sehr feucht bis naß		6 mäßig naß	
	9 Nässezeiger	7 naß bis sehr naß	5 naß
	10 Wechselwasserzeiger		(wechselfeucht)

Tabelle 5: Zuordnung der Feuchteregimes zu Bodentypen und Bodenartenschichtungen

Relation of soil moisture regimes to soil types and soil textures

		Feuchteverteilungsklassen des Oberbodens (30 cm Tiefe)											
		N	NsF1	NsF2	F	Fw	FmF	FRw	mFRw	mFR	mFRTw	mFRT	
Feuchteverteilungsklassen des Unterbodens (90 cm Tiefe)	N				GS:uS/tS					G:utL/IT			
	NsF1	G:tL/uS			gPS:IS/tS G:stL/S SG:IU/IU sGL:IU/IU BG:IU/IU S:sL/sL	S:IS/stL SG:IU/IU				G:stL/S GP:IS/IS			
	NsF2								S:sL/IT	G:stL/S SB:tL/IT	S:sL/IT		
	F		SG:tL/S		S:IU/IU sgL:IU/IU sgL:IS/sL GB:IS/IS	PG:S/S G:stL/S BP:IS/stL S:IU/IU GB:IS/IS	GP:uS/IS SL:IU/IU S:AlvM S:IU/tL sgL:IU/IU L:IU/IU S:IS/tS SL:U/U	S:IU/tL SB:utL/tL	BS:sL/tL	LS:IU/uL L:uL/stL bA:sL/tL BP:IS/tS SL:U/U BS:sL/stL S:sL/sL SD:tT/T	G:utL/IT GB:IS/IS		
	Fw					S:sL/IT		SB:tL/T SB:tL/IT	BS:sL/tL				
	FmF					PR:tS/IS P:IS/IS L:IU/uL	L:IU/IU S:tU/tU S:tU/tU bS:sL/stL L:uL/IU		P:tS/IS	E:u'S sL:IU/IU PB:tS/IS			
	FRw											SB:tL/T	
	mFRw											BS:sL/IT	
	mFR								SB:tL/IT	BS:tL/IT	bA:uL/IS S:IU/tL SB:tL/IT L:IU/uL	L:uL/stL BS:tL/IT S:stL/tL	
	mFRTw										S:stL/tL BS:tL/IT		bA:uL/IS
	mFRT												

Erläuterung: 1. Buchstabenkombination: Bodentyp (G = Gley, S = Pseudogley, P = Podsol, L = Parabraunerde, B = Braunerde, D = Pelosol, A = Auenboden, E = Esch)

2. Buchstabenkombination: Bodenartenschichtung, z. B.: IU/uL = lehmiger Schluff über schluffigem Lehm

schaften seit der allgemeinen Anwendung von Herbiziden nahezu ganz illusorisch geworden ist“ (WELLER 1987, S. 42), erforderlich. Darüber hinaus zeigt der Vergleich verschiedener Feuchtestufengliederungen, daß gleichlautende Begriffe, etwa mäßig frisch oder feucht, nicht identische Begriffsinhalte wiedergeben (vgl. Tab. 4). Ökologische und standortkundliche Feuchtestufen besitzen den Nachteil, daß sie eine nichtquantifizierte Relativskala darstellen; andererseits besitzen sie den Vorteil, daß sie die mittlere, langjährige Feuchte ausdrücken, die experimentell

durch Messungen nur mit größtem Aufwand zu ermitteln wäre. Vor dem Hintergrund der Unterscheidung zwischen Elementen und Faktoren des Bodenwasserhaushaltes dienen die Zeigerwerte als Indikatoren für das Feuchteregime, die Pflanzen selbst sind als aktive Elemente des hydrologischen Systems allerdings gleichzeitig Faktoren des Feuchteregimes. Ihr Indikatorwert wird beeinflusst durch ihr „ökologisches Verhalten“ (ELLENBERG 1979, S. 12) als Bestandteil der Pflanzengemeinschaft sowie durch anthropogene Eingriffe in den Stoffhaushalt der Öko-

systeme (z. B. Mahd, Düngung, luftgebundene Stoffeinträge).

In diesem Zusammenhang ist die Frage zu erörtern, wie notwendig und sinnvoll die Verknüpfung der quantitativen Auswertung von Feuchtezahlen (Mittelwert, Modalwert oder Anteile von Frische- und Trockeniszeigern) mit physikalischen Meßergebnissen ist. Entsprechende allgemeingültige Parallelisierungen stehen zwar weiterhin aus (AG *Bodenkunde* 1982), doch erscheint die Erarbeitung hydrologischer Bilanzgrößen für Ökotope (vgl. ЕСКУЧЕ 1978) sinnvoller. Je nach physiologischer Gründigkeit und genetisch fixierten Pflanzeigenschaften decken die Pflanzen ihren Wasserbedarf aus unterschiedlichen und auch zeitlich wechselnden Tiefen. Daher bleibt eine aus den Feuchtezahlen interpretierte Feuchtestufe eine quantitativ-analytisch nicht faßbare, integrierte Größe. Die Berechtigung beider Ansätze zur Feuchtecharakterisierung, des auf bodenphysikalischen Messungen und des auf Feuchtezahlen beruhenden, ist Beleg für den notwendigen Dualismus zwischen analytischer und integrativer Erkenntnisgewinnung in der Landschaftsökologie. Beide Ansätze können nicht gegeneinander ausgespielt werden, eine Parallelisierung der Ergebnisse von pflanzenökologischer und bodenphysikalischer Feuchtecharakterisierung ist nur begrenzt möglich und sinnvoll.

#### 4 Typisierung von Feuchteregimes

Als quantitative Elemente des Feuchteregimes werden die Feuchteverteilungsklassen unterschiedlicher Bodentiefen angegeben. Während die Feuchteverteilungsklasse unmittelbar die zeitliche Verteilung der Wasserbindung ausdrückt, wird die Tiefendifferenzierung aus der vertikalen Kombination der Klassenzugehörigkeit sichtbar. Hierzu sind in Tabelle 5 alle 79 Meßstandorte bzw. Vegetationsperioden nach der Zugehörigkeit der Meßtiefen 30 und 90 cm zu den Feuchteverteilungsklassen eingetragen. Die Meßtiefen wurden so ausgewählt, daß ein großer Feuchtegradient zwischen Oberboden und unterem Bereich des Hauptwurzelraumes deutlich wird. Eine Angabe der Zugehörigkeit weiterer Tiefen zu Feuchteverteilungsklassen, wie es MOSIMANN (1990) für Wassergehalte vorschlägt, erübrigt sich, denn im Gegensatz zu texturabhängigen Wassergehalten besteht bei Wasserspannungen in der Regel ein im Mittel gleichsinniger Tiefengradient.

In der Matrix erscheinen Feuchteregimes ohne Tiefendifferenzierung entlang einer Diagonalen, bei

spielsweise tiefgründig naß bis sehr feuchte (NsF1), tiefgründig feucht bis mäßig feuchte (FmF) oder tiefgründig mäßig frische Feuchteregimes (mFR). Mit zunehmender Entfernung von der Diagonalen nehmen die Gegensätze der Wasserbindung zwischen Ober- und Unterboden zu; in diesen Fällen liegen kombinierte Feuchteregimes vor, z. B. mäßig frisch über naß (mFR/N) oder mäßig frisch und trocken mit wechselnden Bindungsintensitäten über feucht (mFR Tw/F).

Trotz der relativ großen Anzahl an Meßreihen aus unterschiedlichen Jahren konnten nur 32 Tiefenkombinationen nachgewiesen werden. Deutliches Übergewicht besitzen Feuchteregimes mit tiefenwärts zunehmender Feuchte, d. h. mit tiefenwärts geringerer Wasserbindungsintensität. Erwartungsgemäß sind für 90 cm Tiefe ausgeglichene Feuchteregimes typisch (vor allem: NsF1, F, FmF, mFR).

Daß die interannuellen Schwankungen des Feuchteregimes beträchtlich sein können, zeigen einige Beispiele. In fünf aufeinanderfolgenden Meßjahren variierten die Feuchteverteilungen eines Gleyes (Krefeld-Hülser Bruch, Oberkante des Reduktionshorizontes bei 70 cm) von naß bis sehr feucht (NsF1 und NsF2) bis feucht (F) in 90 cm Meßtiefe, während in 30 cm Tiefe im niederschlagsreichsten Jahr feuchte Bedingungen vorherrschten und in drei relativ trockenen Jahren nur mäßig frische Bedingungen (mFR). Ein Pseudogley aus 75 cm mächtiger Deckschicht aus sandig-lehmigem Geschiebelehm über Oberkreide-Tonen im Münsterland variiert im Unterboden von naß bis sehr feucht (NsF2) hin zu wechselfeucht (Fw); in 30 cm Tiefe wurden wechselfeuchte (Fw), mäßig wechselfrische (mFRw) sowie mäßig wechselfrische und wechselfrische (mFR Tw) Bedingungen registriert. In einem feuchten Jahr zeigt eine Parabraunerde in der südlichen Niederrheinischen Bucht ein kombiniertes Feuchteregime Fw/FmF, während in einem trockeneren Jahr im gesamten oberen Bodenneter mäßig frische Bodenfeuchten vorherrschen.

Insgesamt zeigen die Ausführungen, wie problematisch der Rückschluß von bodentypologischen Eigenschaften und bodengenetischen Merkmalen auf einen quantitativ formulierten Feuchteregimtyp ist; es bedarf einer differenzierten, komplexen Bewertung der hydromorphen Profilmerkmale, der Bodenartenschichtung, der Porengrößenverhältnisse und des Grundwasserstandes. In ein derartiges „Schätzungsmodell“ (MOSIMANN 1990, S. 25), das bereits existierende, grob vereinfachende Schemata (z. B. MARKS 1979, vgl. MARKS u. ZEPP 1988, S. 111; AG *Bodenkunde* 1982, Tab. 57) fortführen soll, müssen leicht verfügbare Faktoren des Bodenwasserhaushal-

tes und Feuchteindikatoren unter Einschluß von Vegetation und Klima einbezogen werden. Hieran wird zur Zeit auf der Grundlage des vorliegenden Datenmaterials und unter Einschluß von Modellrechnungen gearbeitet. Die Erreichung dieses Ziels ist ein entscheidender Schritt für die Regionalisierung quantitativer, landschaftsökologisch relevanter Feuchtereimes.

### Literatur

- AG *Bodenkunde*: Bodenkundliche Kartieranleitung, 3. Auflage. Hannover 1982.
- BOUMA, J.: Soil survey and the study of water in unsaturated soil. Soil survey papers 13. Wageningen 1977.
- CHILDS, E. C.: An introduction to the physical basis of soil water phenomena. London, New York 1969.
- CHIRITA, C., BUTUCELEA-ZANELLI, S., MAINAU, A. u. MOTOC, E.: Klassifizierung der Feuchtigkeitsregimes der Böden zu ökologischen Zwecken. *Stiinta Solului* 11, Nr. 3/4, 1964.
- DAHMEN, F. W. u. DAHMEN, G.: Eine ökologische Auswertekarte zur Bodenkarte 1:50 000 für Zwecke der Landschaftspflege und Nutzungsplanung. In: *Nieder-rheinisches Jahrbuch* 12, 1973, S. 63-69.
- ELLENBERG, H.: Zeigerwerte der Gefäßpflanzen Mitteleuropas. *Scripta Geobotanica* IX. Göttingen 1979.
- ELLENBERG, H., SCHREIBER, K.-F., SILBEREISEN, R., WELLER, F. u. WINTER, F.: Grundlagen und Methoden der Obstbau-Standortskartierung. In: *Obstbau* 75, 1956, S. 75-77, 90-92, 107-110.
- ESKUCHE, U.: Bodenwasserhaushalt von Wäldern in der Westfälischen Bucht und im Wesergebiet nördlich von Minden. *Schriftenreihe der Landesanstalt für Wasser und Abfall des Landes Nordrhein-Westfalen* 37, o. O. 1978.
- HAMBLOCH, H.: Über die Bedeutung der Bodenfeuchtigkeit bei der Abgrenzung von Physiotopen. In: *Berichte zur deutschen Landeskunde* 18, 1958, S. 246-252.
- HARTGE, K. H.: Einführung in die Bodenphysik. Stuttgart 1971.
- HARTGE, K. H. u. HORN, R.: Die physikalische Untersuchung von Böden. Stuttgart 1989.
- HERRMANN, R.: Zur regionalhydrologischen Analyse und Gliederung der nordwestlichen Sierra Nevada de Santa Marta (Kolumbien). *Giessener Geographische Schriften* 23 (Sonderheft 1), 1971a.
- : Die zeitliche Änderung der Wasserbindung in Böden unter verschiedenen Vegetationsformationen der Höhenstufen eines tropischen Hochgebirges (Sierra Nevada de Santa Marta/Kolumbien). In: *Erdkunde* 25, 1971b, S. 90-102.
- HUBRICH, H. u. THOMAS, M.: Die Pedohydrotope der Einzugsgebiete von Döllnitz und Parthe. In: *Beiträge zur Geographie* 29, Akademie der Wissenschaften der DDR, Institut für Geographie und Geoökologie, Berlin 1978, S. 285-322.
- JORDAN, E.: Landschaftshaushaltsuntersuchungen im Bereich der nördlichen Lößgrenze im Raume Gleidingen/Oesselse bei Hannover. Diss. Hannover 1974.
- LANG, R.: Quantitative Untersuchungen zum Landschaftshaushalt in der Südöstlichen Frankenalb (= beiderseits der unteren Schwarzen Laaber). *Regensburger Geographische Schriften* 18, 1982.
- LAUCKNER, M.: Landschaftsökologische Untersuchungen im nordwestsächsischen Raum. In: *Wissenschaftliche Veröffentlichungen des Deutschen Instituts für Länderkunde*, NF 21/22, 1964, S. 133-175.
- LESER, H.: *Landschaftsökologie*. Stuttgart 1978.
- MARKS, R.: Ökologische Landschaftsanalyse und Landschaftsbewertung als Aufgaben der angewandten Physischen Geographie. *Materialien zur Raumordnung XXI*, Bochum 1979.
- MARKS, R. u. ZEPP, H.: Bodenwasser. In: LESER, H. u. KLINK, H. J. (Hrsg.): *Handbuch und Kartieranleitung Geökologische Karte 1:25 000. Forschungen zur deutschen Landeskunde* 228, 1988, S. 93-117.
- MOSIMANN, TH.: Boden, Wasser und Mikroklima in den Geosystemen der Löß-Sand-Mergel-Hochfläche des Bruderholzgebietes (Raum Basel). *Physiogeographica* 3, Basler Beiträge zur Physiogeographie. Basel 1980.
- : Untersuchungen zur Funktion subarktischer und alpiner Geoökosysteme (Finmark (Norwegen) und Schweizer Alpen). *Physiogeographica* 7, Basler Beiträge zur Physiogeographie. Basel 1985.
- : Ökotope als elementare Prozeßeinheiten der Landschaft. Konzept zur prozeßorientierten Klassifikation von Geoökosystemen. *Geosynthesis* 1. Hannover 1990.
- NEEF, E., SCHMIDT, G. u. LAUCKNER, M.: Landschaftsökologische Untersuchungen an verschiedenen Physiotopen in Nordwestsachsen. *Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Math.-Nat. Klasse* 47. Leipzig 1961.
- RENGER, M., STREBEL, O. u. GIESEL, W.: Beurteilung bodenkundlicher, kulturtechnischer und hydrologischer Fragen mit Hilfe von klimatischer Wasserbilanz und bodenphysikalischen Kennwerten. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 15, 1974, S. 148-160, 206-221, 263-271, 353-366.
- RICHTER, J.: Der Boden als Reaktor. Modelle für Prozesse im Boden. Stuttgart 1986.
- RODE, A.: Hydrophysical Properties and Moisture Regime in the unsaturated zone. In: RIJTEMA, P. E. u. WASSING, H. (Hrsg.): *Water in the unsaturated zone. Proceedings of the Wageningen Symposium. Publication* 82, I. Wageningen 1968, S. 33-46.
- ROSENKRANZ, G.: Untersuchungen über den Jahresgang der Bodenfeuchte und ihre geoökologische Bedeutung im Küstenraum der östlichen Kieler Außenförde. *Regensburger Geographische Schriften* 17, 1981.
- STEINHAUSEN, D. u. LANGER, K.: Clusteranalyse. Einführung in Methoden und Verfahren der automatischen Klassifikation. Berlin, New York 1977.



- THOMAS-LAUCKNER, M.: Der Bodenfeuchte-Mittelwert und die Schwankungsbreite der Feuchte einiger Bodentypen Nordwestsachsens. In: Leipziger Geographische Beiträge (Lehmann-Festschrift). Leipzig 1965, S. 185-190.
- THOMAS-LAUCKNER, M. u. Haase, G.: Versuch einer Klassifikation von Bodenfeuchteregeime-Großtypen. In: Albrecht-Thaer-Archiv 11, 1967, S. 1003-1020 u. 12, 1968, S. 3-32.
- TRETER, U.: Untersuchungen zum Jahresgang der Bodenfeuchte in Abhängigkeit von Niederschlägen, topographischer Situation und Bodenbedeckung an ausgewählten Punkten in den Hüttener Bergen/Schleswig-Holstein. Schriften des Geographischen Institutes der Universität Kiel 33, 1970.
- USDA (U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service): Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Soil Survey Staff. Agriculture Handbook 436, Washington 1975.
- WARSTAT, M.: Mitwirkung der Bodenkunde bei der Flurbereinigung mit einem Beispiel zur landwirtschaftlichen Standorterkundung „Geseke“. Diss. Bonn 1980.
- WELLER, F.: Die Beurteilung des Wasserhaushaltes bei der landbaulichen Standortskartierung in Baden-Württemberg. In: Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung 33, 1987, S. 41-48.
- ZEPP, H.: Wasserhaushalt und Verlagerung wasserlöslicher Stoffe in Lößdecken des Main-Taunus-Vorlandes. Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde 56, 1987.

## SEDIMENTOLOGISCHE UND PEDOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR LANDSCHAFTSGENESE IN DER BUCHT VON WISSANT (PAS DE CALAIS)

Mit 5 Abbildungen und 3 Tabellen

HELMUTH SIEBERTZ UND WERNER SIEBURG

*Summary:* Stratigraphical research of the Quaternary in the Bay of Wissant (Pas-de-Calais)

In the bay of Wissant various Holocene (and Pleistocene?) sediments are exposed on a cliff wall (height: up to 15 m) in the northern part of Wissant. They reveal a differentiated landscape development in this area. The subjacent stratum, which consists of Pre-Subboreal colluvial and solifluction deposits, indicates intensive processes of redeposition. Above this stratum a fossil loamy humic horizon (W 1, Fig. 3) was found, the age of which could be determined by means of radiocarbon dating ( $2760 \pm 30$  a BP = Subboreal-Subatlanticum). It forms a significant stratigraphic break between the subjacent and the overlying strata and thus reveals a remarkable change of the paleogeographic conditions (formation of soils), which partly coincided with the formation of peat deposits in the 'petite plaine maritime' of Wissant (Calais IV - Dunkirk 0 by HAGEMAN 1969). A similar horizon can be found in numerous profiles of the French, Belgian and Dutch coast. It provides a chronostratigraphic mark within the Holocene sediments of this region. The upper strata consists of partly redeposited eolian sands which indicate another phase of landscape development. The  $^{14}\text{C}$  dating of a fossil soil horizon, which was formed within the eolian deposits, makes it possible to identify an older and a younger dune

generation. The stratigraphic interchanging of eolian sands (dune sand, drift sand) and fossil soils give evidence of successive phases of dune or cover sand formation and stabilization.

*Résumé:* Recherches stratigraphiques du Quaternaire dans la baie de Wissant (Pas de Calais)

Dans la baie de Wissant se révèlent dans un paroi de 0,5 km de longueur et de 15 m de hauteur de divers sédiments et de sols holocènes (jusqu'au pleistocène?) traduisant une formation du paysage assez différente dans cette région. Les couches basales sont construites par les sédiments solifluidales et colluviales, qui sont classés dans la rubrique pré-subboreal, indiquant d'importants processus de redeposition. Sur ces couches se trouve un horizon fossile, formé d'une série d'humus, limons et argiles (W 1 dans la Fig. 3), datés radiométriquement de  $2760 \pm 30$  a BP (la limite Subboreal-Subatlantikum). Il forme un hiatus bien marqué entre les couches basales et supérieures et il indique ainsi un changement incisif des conditions paléogéographiques (formation de sols) qui se sont déroulées, correspondant à la datation, dans la même période que la formation des tourbes dans la petite plaine maritime de Wissant (Calais IV - Dunkerque 0 à la HAGEMAN 1969). Un horizon