

Landschaftsökologische

Moorkunde

Zweite, völlig neu bearbeitete Auflage

Herausgegeben von

Michael Succow und Hans Joosten



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart

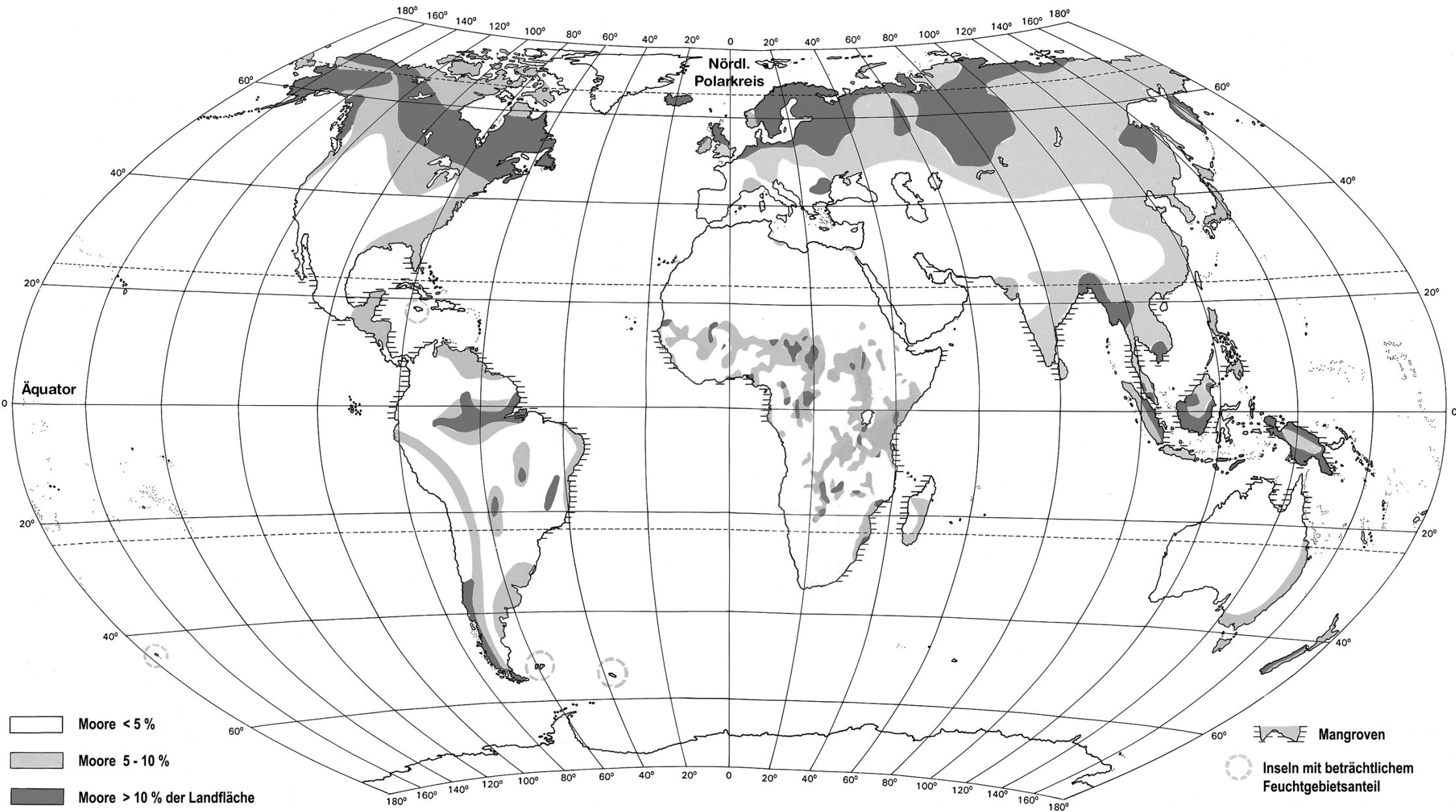


Abb. 1-1: Verteilung der Moore auf der Erde (aus Lappalainen 1996).

Landschaftsökologische

Moorkunde

Herausgegeben von

Michael Succow und Hans Joosten

Bearbeitet von 33 Fachwissenschaftlern

Zweite, völlig neu bearbeitete Auflage

Mit 10 Farbbildern, 223 Abbildungen, 136 Tabellen
im Text sowie auf 2 Beilagen



Schweizerbart Science Publishers
Stuttgart 2001

Landschaftsökologische Moorkunde

Herausgeber: Michael Succow
Hans Joosten

Titelbild: Aapamoorkomplexe in der Nördlichen Taiga des Belomorski Plateaus nordöstlich Archangelsk
(s. auch Bild 7, S. 268)
Rückseite: Oben: Exzentrisches Regenmoor (s. auch Bild 61, S. 295)
Mitte: Offenes eutrophes Hang-Quellmoor (s. auch Bild 87, S. 308)
Unten: Küsten-Überflutungsmoor (s. auch Bild 83, S. 306)

Unveränderter Nachdruck der 2. Auflage 2012
2. völlig neu bearb. Aufl. 2001 (Hrsg.: Succow/Joosten)
1. Auflage 1988 (Succow), erschienen bei VEB Gustav Fischer Verlag, Jena

ISBN ebook (pdf) 978-3-510-65454-3
ISBN 978-3-510-65198-6
Information on this title: www.schweizerbart.de/9783510651986

© 2001 by E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, Germany

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Verlag: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller)
Johannesstr. 3 A, 70176 Stuttgart, Germany
mail@schweizerbart.de
www.schweizerbart.de

∞ Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

Satz + Druck: Tutte Druckerei GmbH, Waldstr. 53, 94121 Salzweg bei Passau, Germany
Printed in Germany

Gedruckt mit Unterstützung der



Vorwort

Die Eigenart des Naturraumes Moor, seine Lebensfülle und seine ökologischen Besonderheiten, die sich ständig aufdrängenden Fragen nach der Genese, aber auch der menschlichen Nutzung und damit anthropogenen Umwandlung – all das fordert auf zu intensiver wissenschaftlicher Untersuchung, zu immer tieferem Eindringen in die Naturzusammenhänge. Heute sind zudem Forschungen und Moorerkundungen notwendig, um schonende Formen der Moornutzung zu finden und um die verbliebenen Reste naturnaher Moore möglichst lange in unserer Landschaft zu erhalten, – für uns, aber auch für unsere Nachkommen.

Ich hatte das Glück und die Möglichkeit, mich seit nunmehr fast 40 Jahren mit dem Naturraum Moor zu beschäftigen, seine Naturgesetzlichkeiten zu erforschen. Waren es anfangs die Vogel- und Insektenwelt und bald schon die Vegetation, so traten später Fragen der Entstehung und Entwicklung, der stofflichen Eigenschaften und der Nutzung und damit einhergehend der anthropogenen Veränderungen in den Mittelpunkt des Interesses, immer aufs engste verbunden mit Bemühungen um den Erhalt ungestörter Moorökosysteme, zunächst im Osten Deutschlands, später weltweit.

Mit 20 Jahren (1961) erlebte ich zur Blütezeit von Mehlprimel und Trollblume, von Honigorchis und Strauchbirke zum ersten Mal ein naturnahes Niedermoor: Es war das Naturschutzgebiet Peenewiesen bei Gützkow, wohin eine Exkursion am Ende des ersten Jahres meines Biologie-Studiums an der Universität Greifswald führte. Neben den Blumen, den Seggen und den vielfältigen Moosen faszinierten mich aber auch die erste Begegnung mit Wiesenweihe und Schreiadler, der Gesang von Blaukehlchen und Sprosser. Seitdem ließen mich die Moore nicht mehr los. Meine Diplomarbeit, die ich 1965 abschloß, widmete sich der Ziesee-Niederung, ebenfalls ein Flußtalmoor ganz in der Nähe Greifswalds, damals noch in Nützlichkeit und Schönheit der Feuchtwiesen. Aber schon war die „Komplexmelioration“ der großen Moorniederungen Nordostdeutschlands angesagt. Der große „interglaziale Irrtum“ nahm seinen Lauf. Buchstäblich in letzter Minute, getrieben von Großbaggern und Meliorateuren, erarbeitete ich meine Dissertation über die Vegetation der mecklenburgisch/vorpommerschen Flußtalmoore und ihre anthropogene Umwandlung, war noch letzter Zeuge ihrer Vielfalt und Schönheit, ihrer Nährstoffarmut und Funktionstüchtigkeit. Mit 29 Jahren (1970) verteidigte ich die Dissertation, aber jetzt waren nahezu alle Flußtalmoore von tiefen Kanälen durchzogen, sie sollten „ausbluten“, wie es damals in der Meliorationssprache hieß, um schwere Maschinensysteme tragen zu können, die Feuchtwiesen in Saatgrasland umzuwandeln hatten. „Höchstertragskonzeptionen“ wurden erstellt, die industriegemäße Agrarnutzung begann nun auch auf den tiefgründigen Moorstandorten! In der Endphase der Dissertation – von der Universität in die Praxis versetzt – hatte ich ab 1969 die sogenannten „Komplexmeliorationen“ der Niederungsstandorte als Standorterkunder in einem „Volkseigenen Meliorationskombinat“ in meiner Heimatregion Bad Freienwalde/Ostbrandenburg „mitzugestalten“. So erlebte ich den menschlichen Größenwahn im Umgang mit Landschaften unmittelbar. In ehrenamtlicher Arbeit konnten nur wenige Moorschutzgebiete gesichert werden. Vier Jahre als Standorterkunder erbrachten aber auch umfangreiche Kenntnisse über den stratigraphischen Aufbau der Moore, den Wasserhaushalt, die Folgen anthropogener Umwandlung. Ab 1974 wieder in einer Forschungseinrichtung, der damaligen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften in Eberswalde tätig, hatte ich mich als Bodenkundler im Rahmen der „Hydromeliorationsforschung“ auch mit den Moorstandorten zu beschäftigen. Es war u. a. meine Aufgabe, federführend die TGL (entspricht DIN-Vorschriften) für die Ansprache der Moorstandorte sowie der Bodenwasserverhältnisse zu erarbeiten. Des weiteren war ich im Rahmen der Erarbeitung der mittelmaßstäbigen landwirtschaftlichen Standortkartierung der DDR (MMK) für die Moorstandorte zuständig. Ab 1975 reifte die Idee, in einer Habilitationsschrift mich den Fragen des Aufbaus und der Genese der Moorstandorte der damaligen DDR zu widmen. Mehr nebenher erstellt, konnte die Schrift 1980 erfolgreich an der Landwirtschaftsakademie verteidigt werden. Inzwischen, nach 10 bis 15 Jahren Intensivnutzung der Niedermoore,

traten zunehmend Probleme auf. Nun galt es, Fragen der beginnenden Moordegradierung in ihren Auswirkungen auf Bewirtschaftbarkeit und Vegetation zu untersuchen. Die Resultate dieser Forschungen konnten dann dank der Mithilfe einiger Freunde, darunter das Ehepaar Heinz und Johanna Schlüter (Leipzig/Jena), zusammen mit den Ergebnissen der Habilitationsschrift noch kurz vor der „Wende“ 1988 im volkseigenen Gustav Fischer Verlag Jena als „Landschaftsökologische Moorkunde“ in Buchform erscheinen. Eine Teilaufgabe erschien gleichzeitig im Gebrüder Borntraeger Verlag Stuttgart.

Die ersten Jahre im vereinten Deutschland ließen kaum Zeit für die geliebte Wissenschaft, zur Zwiesprache mit den Mooren. Es gab vieles zu sichern bzw. voranzutreiben. Zum Herbst 1992, mit Beginn meiner Tätigkeit als Hochschullehrer an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, gewissermaßen zurückgekehrt an die Wurzeln meiner wissenschaftlichen Ausbildung, konnte ich nun auch wieder über Moore nachdenken. Am Botanischen Institut entfaltete sich ein vielseitiges, in hohem Maße moorkundlich orientiertes Forschungsprogramm. Das Tätigwerden von Hans Joosten am Botanischen Institut Greifswald 1996 brachte eine ungewöhnliche Aktivierung der Moorforschung auf nationaler wie internationaler Ebene. Mehr als 20 Wissenschaftler forschen derweil im Rahmen von Projekten, Dissertationen und Habilitationen über dieses Ökosystem. Viele Diplomarbeiten zu Moorthemen wurden fertiggestellt. Einen Schwerpunkt bildeten dabei die Moore des nordostdeutschen Tieflandes. Zunehmend dehnen sich die Forschungen auf die „Weiten des Ostens“ aus: Weißrußland, das europäische Rußland, Sibirien, Kirgistan, Kasachstan, die Mongolei, Kaukasien. Die Palette der Untersuchungen reicht nun von Fragen der Moorgenese, Moorhydrologie, Paläoökologie, Populations- und Vegetationsökologie bis hin zu ökophysiologischen Aspekten der Torfbildung. Weiterhin werden angewandte Fragestellungen zur Moor-Revitalisierung, zu alternativen Nutzungsformen und zum weltweiten Schutz von Moorökosystemen, auch unter ökonomischen und ethischen Aspekten, behandelt.

Damit schien es an der Zeit, das hinzugekommene Wissen erneut zu sichten und einer zusammenfassenden Darstellung zu unterziehen. Gut 10 Jahre nach dem Erscheinen der „ersten“ Landschaftsökologischen Moorkunde liegt nun eine zweite, völlig neu bearbeitete Auflage vor, nicht mehr allein geschrieben, sondern durch eine große Zahl begeisterter Moorforscher mitverfaßt. Fast 35 Autoren konnten gewonnen werden, ihre Forschungsergebnisse einzubringen. Es war keine leichte Aufgabe, die einzelnen Beiträge zu koordinieren, zu korrigieren, zu verdichten. So zog sich das Vorhaben mehr als drei Jahre hin. Insbesondere unserer hochverehrten Frau Dr. h.c. Johanna Schlüter, einst Gustav Fischer Verlag Jena, gebührt größter Dank für die unermüdliche Geduld, für das immer wieder aufgebrachte Verständnis ob der vielen Verzögerungen und Unvollkommenheiten. Eingeschlossen in diesen Dank ist auch Herr Dr. habil. Heinz Schlüter, der wesentliche Teile des Manuskriptes kritisch durchsah. Ganz besonders möchte ich aber Dr. Hans Joosten (Greifswald) danken, der viele neue Ideen hatte und umsetzte, zahlreiche Veränderungen und Umstellungen im Manuskript erwirkte und in der Endphase der Fertigstellung alle Texte nochmals kritisch las, kürzte oder auch ergänzte. Ohne sein tatkräftiges, unermüdliches und immer wieder aufmunterndes Mitwirken hätte das Buch nicht diesen Stand erreicht.

Ein besonderer Dank gilt der Dr. Michael Otto Stiftung für Umweltschutz, Hamburg, die mit einem erheblichen Druckkostenzuschuß wesentlich zur erfreulichen Ausstattung des Buches, vor allem mit Farbbildern, beitrug.

Bedanken möchte ich mich ebenso bei den Kolleginnen und Kollegen meines Institutes, die viele technische Arbeiten für die 2. Auflage des Buches durchführten. Insbesondere gilt das für Frau Gertrud Schittek, die über 100 Abbildungen neu gestaltete. Ebenso ist Herrn John Couwenberg zu danken, der es auf Grund seines exzellenten Umgangs mit dem Computer ermöglichte, zahlreiche Tabellen und Abbildungen höchsten Anforderungen gerecht werden zu lassen. Für fast alle MitarbeiterInnen des Institutes brachte das „Moorbuch“ zahlreiche Belastungen. Letztendlich überwog aber die Freude am in gemeinsamer Arbeit Erreichten.

Auch beeindruckte mich die Bereitschaft so vieler Autoren, an diesem nicht leichten Vorhaben mitzuwirken. Ihnen allen gilt mein Dank.

Es ist mir ein besonderes Bedürfnis, all jenen zu danken, mit denen ich gemeinsam den Naturraum Moor erforschen und erleben durfte, ob bei körperlich schwerer Erkundungsarbeit, im fördernden Gedankenaustausch oder in Begeisterung um die Erscheinungsformen der lebenden Moor-Natur.

Sehr befruchtend für die Arbeit waren die zahlreichen gemeinsamen Moorexkursionen sowie der Gedankenaustausch mit meinen Kollegen und Freunden, allen voran Dr. Lebrecht Jeschke (Greifswald), aber auch Dr. Wilhelm Schmidt (Heinrichwalde/Berlin). Zu Dank verpflichtet fühle ich mich meinem „Lehrmeister“ in der naturräumlichen Denkweise, Herrn Dr. habil. Dietrich Kopp (Eberswalde/Tews Woos). Danken möchte ich auch den Moorforschern und Freunden außerhalb unseres engeren Wirkungsbereiches, die mir bzw. uns in beeindruckenden Exkursionen „ihre“ Moore zeigten: Nikolai Bambalov (Minsk), Klaus Dierßen

(Kiel), Dominik Fijalkowski (Lublin), Ab Grootjans und Rudy van Diggelen sowie Geert van Wirdum (Groningen/Wageningen), Andreas Grünig (Birmensdorf/Zürich), Janina Jasnowska und Mieczyslaw Jasnowski (†) (Szczecin), Asbjörn Moen (Trondheim), Jörg Pfadenhauer (Weihenstephan), Eliška Rybničková und Kamil Rybniček (Brno), Gerd Michael Steiner (Wien) sowie Bryan Wheeler (Sheffield).

Schließlich ist es mir ein großes Bedürfnis, meiner lieben Frau Ulla tief empfundenen Dank auszusprechen für die in wesentlichen Teilen durch sie bewältigte redaktionelle und Schreibaarbeit dieses Buches einschließlich der Erstellung des nicht enden wollenden Literaturverzeichnisses. Aber auch für die jahrzehntelange unermüdliche Hilfe, das immerwährende Verständnis und die große Geduld, die sie stets neu für meine Moorforschungen und die Naturschutzarbeit aufbrachte, danke ich ihr. Ohne ihre maßgebliche Mithilfe wäre dieses Buch nicht fertiggestellt worden.

Danken möchte ich letztendlich auch der E. Schweizerbart'schen Verlagsbuchhandlung, insbesondere Herrn Dr. E. Nägele, der gern bereit war, das umfangreiche und aufwendig gestaltete Buchmanuskript zu einem fertigen Buch zu führen.

Greifswald, im Dezember 2000

Michael Succow

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Einführung	1
1.1	Zum Inhalt des Buches (M. Succow)	1
1.2	Zum Begriff „Moor“ und vom Wesen der Moore (H. Joosten, M. Succow)	2
1.3	Naturraumkunde und Landschaftsökologie von Mooren (H. Joosten, D. Kopp, M. Succow)	3
2	Prozesse auf Moorstandorten (topische Betrachtung)	8
2.1	Torfbildung (D. Koppisch)	8
2.1.1	Was ist Torf?	8
2.1.2	Stoffabbau	8
2.1.3	Redoxverhältnisse	10
2.1.4	Stoffabbauraten	11
2.1.5	Resümee: Wie entsteht Torf?	12
2.1.6	Torfakkumulationsraten	13
2.2	Hydrologische Eigenheiten (F. Edom)	17
2.3	Stoffumsetzungsprozesse	18
2.3.1.	Umsetzungen von C, N, S, P und Kationen	18
2.3.1.1	Kohlenstoff-Umsetzungsprozesse (D. Koppisch)	19
2.3.1.2	Stickstoff-Umsetzungsprozesse (D. Koppisch)	20
2.3.1.3	Schwefel-Umsetzungsprozesse (D. Koppisch)	22
2.3.1.4	Phosphor-Umsetzungsprozesse (J. Gelbrecht, D. Koppisch)	24
2.3.1.5	Kationenaustauschkapazität, Umsetzungsprozesse von Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen und Einfluß des pH-Wertes (D. Koppisch)	26
2.3.1.6	Mikronährstoffe – Schwermetalle (D. Koppisch, J. Gelbrecht)	28
2.3.2	Emission, Aufnahme und Klimarelevanz von Spurengasen (J. Augustin)	28
2.3.3	Stoffein- und -austräge am Beispiel nordostdeutscher Niedermoore	37
2.3.3.1	Nordostdeutsche Niedermoore als Quelle klimarelevanter Spurengase (J. Augustin)	37
2.3.3.2	Nordostdeutsche Niedermoore als Akkumulationsräume (J. Gelbrecht, D. Koppisch, H. Lengsfeld)	38
2.3.3.3	Moore als Stofffilter (D. Koppisch)	40
2.4	Bodenbildende Prozesse in Mooren	41
2.4.1	Bodenkundliche Betrachtung von Mooren (H. Stegmann, F. Edom, I. Koska)	41
2.4.2	Bodenbildende Prozesse wachsender Moore (H. Stegmann, F. Edom, I. Koska)	42
2.4.3	Bodenbildende Prozesse entwässerter Moore (H. Stegmann, J. Zeitz)	47
2.4.3.1	Moorsackung	47
2.4.3.2	Gefügebildung durch Schrumpfung und Quellung	52
2.4.3.3	Gefügebildung durch aerobe Zersetzung und Tätigkeit der Bodentiere	55
2.4.3.4	Torfschwund durch Mineralisation	55
2.4.3.5	Moorschwund	56
2.4.3.6	Verlagerung und Auswaschung	57

3	Abiotische Kennzeichnung von Moorstandorten (topische Betrachtung)	58
3.1	Geogenetisch-stoffliche Kennzeichnung	58
3.1.1	Moorsubstrate (M. Succow, H. Stegmann)	58
3.1.2	Torfarten (M. Succow, H. Stegmann)	58
3.1.3	Muddearten (H. Stegmann, M. Succow, J. Zeitz)	62
3.1.4	Ablagerungen in Quellmooren (H. Stegmann, M. Succow)	65
3.1.5	Stoffliche Moorsubstratgliederung (M. Succow, H. Stegmann)	65
3.2	Pedogenetische Kennzeichnung	69
3.2.1	Moorbodenhorizonte und -typen (J. Zeitz, H. Stegmann)	69
3.2.2	Substrattypen (M. Succow, J. Zeitz)	74
3.3	Nährstoffökologisch-chemische Kennzeichnung (M. Succow, H. Stegmann)	75
3.3.1	pH-Verhältnisse und Basensättigung	75
3.3.2	Trophische Verhältnisse	77
3.3.3	Chemische Eigenschaften von Torf- und Muddearten	80
3.3.4	Zur Veränderung chemisch-stofflicher Eigenschaften von Niedermoorböden Ostdeutschlands durch Entwässerung	80
3.4	Physikalisch-hydrologische Kennzeichnung (J. Zeitz)	85
3.4.1	Torfe und Mudden	85
3.4.2	Entwässerte Moorböden	86
3.5	Ökohydrologische Kennzeichnung (I. Koska)	92
3.5.1	Wasserstufen	93
3.5.2	Wasserregime	100
3.5.3	Hydrotopkennzeichnung	111
3.6	Übersicht der Kennzeichnungsmöglichkeiten (H. Stegmann)	111
4	Vegetationskundliche Kennzeichnung von Mooren (topische Betrachtung)	112
4.1	Vegetation als Komponente landschaftsökologischer Naturraumkennzeichnung (I. Koska, M. Succow, U. Clausnitzer)	112
4.1.1	Das Konzept der Vegetationsform	112
4.1.2	Vegetationsökologische Standortfaktoren und Standortstypen	116
4.1.3	Übergeordnete Vegetationseinheiten	123
4.1.4	Methode der aktuellen Vegetations- und Standortklassifikation	126
4.2	Standortkundliche Kennzeichnung und Bioindikation (I. Koska)	128
4.2.1	Wasserstufen und Wasserregimetypen	128
4.2.1.1	Wasserstufen und Vegetation	128
4.2.1.2	Wasserregime und Vegetation	130
4.2.1.3	Wasserstufen-Ausbildung (Wechselfeuchte) und Vegetation	132
4.2.1.4	Wasserstandsmeßwerte zu den Vegetationsformen und ihren Ausbildungen	132
4.2.2	Trophie- und Säure-Basen-Stufen	135
4.2.2.1	Trophiestufen und Vegetation	136
4.2.2.2	Säure-Basen-Stufen und Vegetation	136
4.2.2.3	Meßwerte zur Kennzeichnung der Trophie- und Säure-Basen-Stufen	137
4.2.3	Wasserqualität als Standortfaktor	140
4.2.4	Vegetationskundliche Bioindikation	143
4.3	Vegetationsformen der Feuchtgebietsstandorte	143
4.3.1	Vegetationsformen der offenen, naturnahen Moore und des aufgelassenen Feuchtgrünlandes (I. Koska, M. Succow, T. Timmermann)	144
4.3.1.1	Vegetationsformen oligotroph-saurer naturnaher Moorstandorte (T. Timmermann, M. Succow)	144
4.3.1.2	Vegetationsformen mesotroph-saurer naturnaher Moorstandorte (T. Timmermann, M. Succow)	149
4.3.1.3	Vegetationsformen mesotroph-subneutraler naturnaher Moorstandorte (I. Koska, M. Succow)	150
4.3.1.4	Vegetationsformen mesotroph-kalkhaltiger naturnaher Moorstandorte (I. Koska, M. Succow)	151
4.3.1.5	Vegetationsformen eutropher naturnaher Moorstandorte (I. Koska, M. Succow)	152

4.3.1.6	Vegetationsformen polytropher nasser Moorstandorte (I. Koska)	153
4.3.1.7	Vegetationsformen salzwasserbeeinflußter nasser Moorstandorte (M. Succow, I. Koska) ...	153
4.3.1.8	Vegetationsformen des aufgelassenen Feuchtgrünlandes (I. Koska, M. Succow)	154
4.3.1.9	Liste der Vegetationsformen mit Angaben zur Synonymik und zur Gefährdung (I. Koska, T. Timmermann).	156
4.3.2	Vegetationsformen der Gebüsch- und Wälder (U. Clausnitzer, M. Succow)	161
4.3.3	Vegetationsformen des Grünlandes	170
4.3.3.1	Vegetationsformen der Wiesen und Weiden in traditioneller Nutzung (M. Succow)	170
4.3.3.2	Vegetationsformen des Saatgraslandes, des Intensivgraslandes und daraus wieder hervorgehender Wiesen und Weiden (S. Roth, M. Succow)	171
4.4	Vegetationsentwicklungsreihen (M. Succow, I. Koska, U. Clausnitzer)	181
5	Moorlandschaften aus hydrologischer Sicht (chorische Betrachtung) (F. Edom)	185
5.1	Klassifikation von Moorlandschaften in der quantitativen Hydrologie	185
5.2	Hydrologische Eigenheiten der Moorlandschaften	186
5.3	Hydromorphologische Zusammenhänge	187
5.3.1	Hydraulische Eigenschaften von Akrotelm und Katotelm	187
5.3.2	Hydromorphologische Grundgleichung	190
5.3.3	Zusammenhänge zwischen Hydromorphologie und Stoffhaushalt	192
5.3.4	Hydromorphologische Strukturelemente	194
5.4	Hydrographische Einbettung in die Landschaft	197
5.4.1	Struktur von Mooreinzugsgebieten	197
5.4.2	Hydrologie von Überflutungsstandorten	199
5.4.3	Hydroklimatische Einbettung in die Landschaft	200
5.4.3.1	Luftmassenaustausch zwischen Landschaft und Moor	200
5.4.3.2	Einbettung in den Landschaftsstrahlungshaushalt	202
5.5	Wasserbilanz von Mooren	204
5.5.1	Niederschlag	205
5.5.2	Zufluß	205
5.5.3	Abfluß	205
5.5.3.1	Oberirdischer und Moorboden-Abfluß als Folge der hydromorphologischen Struktur	205
5.5.3.2	Unterirdischer Abfluß	206
5.5.4	Verdunstung	208
5.5.4.1	Der Verdunstungsprozeß im Moorökotop	208
5.5.4.2	Mesoklimatische Verdunstungsvariabilität	213
5.5.4.3	Atmosphärische Wasserbilanzen	215
5.5.5	Speicherverhalten	215
5.5.5.1	Statischer Speichervorrat	215
5.5.5.2	Dynamische Speicheränderung	216
5.5.6	Hydrologische Modellierung	217
5.6	Dynamische und ökosystemare Moorhydrologie	218
5.6.1	Hydrologische Selbstregulation	218
5.6.1.1	Hydrologische Selbstregulation in wachsenden Mooren	218
5.6.1.2	Hydrologische Selbstregulation in gestörten Mooren – Regeneration	221
5.6.2	Hydrologische Vegetations- und Ökotoptvorhersage	224
5.6.2.1	Kopplung mit einer Wasserstandsvorhersage und der Wasserqualität	224
5.6.2.2	Kopplung mit einer Vorhersage integrativer Akrotelm- bzw. Moorbodenparameter	225
6	Kennzeichnung und Typisierung von Moorlandschaften (chorische Betrachtung)	229
6.1	Ökologisch(-phytozoenologische) Moortypen (M. Succow)	229
6.2	Hydrogenetische Moortypen (H. Joosten, M. Succow,)	234
6.3	Übersicht chorischer Moor-Naturraumtypen (M. Succow)	240
6.3.1	Chorische Naturraumtypen naturnaher Moore	241
6.3.2	Chorische Naturraumtypen entwässerter Moore	248
6.4	Pflanzengeographie mitteleuropäischer Moore (H. D. Knapp)	252
6.4.1	Einführung	252

6.4.2	Arealtypen der mitteleuropäischen Moorflora	252
6.4.3	Pflanzengeographische Charakterisierung der ökologischen Moortypen	255
6.5	Moorregionen Europas (L. Jeschke, H. D. Knapp, M. Succow)	256
6.5.1	Einführung	256
6.5.2	Die Moorregionen	258
6.5.2.1	Region der hocharktischen Polygonmoore (I)	258
6.5.2.2	Region der arktisch-subarktischen Palsamoore (II)	259
6.5.2.3	Region der borealen Aapamoore (III)	259
6.5.2.4	Region der nordtemperat-borealen Regenmoore (IV)	259
6.5.2.5	Region der minerotrophen Moore der temperaten Laubwaldzone (V)	261
6.5.2.6	Region der minerotrophen Moore der submeridionalen Waldsteppenzone (VI)	262
6.5.2.7	Region der minerotrophen Moore der submeridional-meridionalen Steppen- und Halbwüstenzone (VII)	263
6.5.2.8	Region der Moore der Kolchis (VIII)	263
6.5.2.9	Region der Moore des Mittelmeergebietes (IX)	263
6.5.2.10	Region der Gebirgsmoore (X)	264
7	Genese und Aufbau der Moore an Beispielen Ostdeutschlands	317
7.1	Verlandungsmoore (M. Succow)	317
7.1.1	Zur Entstehung und Entwicklungsgeschichte von Gewässern	319
7.1.2	Hydrologische und ökologische Seentypen	321
7.1.3	Gewässerverlandung und Torfbildung	323
7.1.4	Beispiele für Verlandungsmoore	329
7.2	Versumpfungsmoore (M. Succow)	338
7.2.1	Grundwasser-Versumpfungsmoore	338
7.2.2	Stauwasser-Versumpfungsmoore	341
7.2.3	Waldsumpf-Kleinstmoore	341
7.3	Überflutungsmoore (M. Succow)	343
7.3.1	Auen-Überflutungsmoore	344
7.3.2	Küsten-Überflutungsmoore	346
7.4	Hangmoore (M. Succow)	350
7.4.1	Allgemeine Charakteristik des Moortyps	350
7.4.2	Beispiele für Hangmoore	352
7.5	Quellmoore (M. Succow, H. Stegmann, I. Koska)	353
7.5.1	Allgemeine Charakteristik des Moortyps	353
7.5.2	Beispiele für Quellmoore	356
7.6	Durchströmungsmoore (M. Succow)	365
7.6.1	Allgemeine Charakteristik des Moortyps	365
7.6.2	Beispiele für Durchströmungsmoore	369
7.7	Kesselmoore (T. Timmermann, M. Succow)	379
7.7.1	Allgemeine Charakteristik des Moortyps	379
7.7.2	Beispiele für Kesselmoore	384
7.8	Regenmoore (M. Succow, F. EDOM)	391
7.8.1	Tieflands-Regenmoore	391
7.8.2	Mittelgebirgs-Regenmoore	395
7.9	Hydrogenetische Moortypen in der Zeit – eine Zusammenschau (J. Couwenberg, P. de Klerk, E. Endtmann, H. Joosten, D. Michaelis)	399
8	Zur anthropogenen Veränderung der Moore	404
8.1	Kurzer Abriß der Nutzungsgeschichte mitteleuropäischer Moore (M. Succow)	404
8.2	Bilanzen zum Moorverlust	406
8.2.1	Das Beispiel Europa (H. Joosten, J. Couwenberg)	406
8.2.2	Das Beispiel Deutschland (J. Couwenberg, H. Joosten)	409
8.2.3	Das Beispiel Mecklenburg-Vorpommern (U. Lenschow)	411
8.3	Ausgewählte Beispiele der „Anthropogenese“ von Mooren Nordostdeutschlands	415
8.3.1	Beispiele zur Standorts- und Vegetationsveränderung von Versumpfungsmooren	416

8.3.1.1	Lewitz (M. Succow)	416
8.3.1.2	Finowtal (M. Succow)	418
8.3.1.3	Oberes Rhinluch (J. Zeitz)	420
8.3.2	Beispiele zur Standorts- und Vegetationsveränderung von Durchströmungsmooren	431
8.3.2.1	Tollense-Flußtalmoor (M. Succow)	431
8.3.2.2	Randow-Welse-Flußtalmoor (J. Zeitz)	434
8.3.2.3	Gartzer Bruch (O. Nalenz, M. Succow)	436
8.3.2.4	Peene-Flußtalmoor (NSG Gützkow) (U. Fischer)	438
8.3.2.5	Ziese-Niederung (F. Jansen, M. Succow)	443
8.3.3	Beispiele zur Standorts- und Vegetationsveränderung von Verlandungsmooren	453
8.3.3.1	Siebendorfer Moor (M. Succow)	453
8.3.3.2	Oberes Rhinluch (M. Succow)	457
8.3.4	Zur Standorts- und Vegetationsveränderung von Regenmooren (D. Gremer)	457
8.4	Zusammenfassende Beurteilung der tiefgreifenden agrarischen Nutzungsintensivierung auf die Niedermoorstandorte Nordostdeutschlands (M. Succow)	463
8.4.1	Auswirkungen auf Bewirtschaftbarkeit und Grünlandvegetation	465
8.4.2	Auswirkungen auf Wasserhaushalt, Gewässerschutz und Gewässerunterhaltung	469
9	Nutzung der Moore – Schutz der Moore	471
9.1	Aktuelle Erfordernisse (M. Succow, I. Koska)	471
9.2	Zukunftsfähige Formen der Moornutzung	472
9.2.1	„Moorschonende Grünlandnutzung“ – Erste Erfahrungen auf nordostdeutschen Niedermooren (S. Roth, D. Koppisch, W. Wichtmann, J. Zeitz)	472
9.2.2	Ökologisches Entwicklungskonzept Oberes Rhinluch (H. Kretschmer, J. Zeitz, H. Pfeffer) ..	480
9.2.3	Das Naturschutzgroßprojekt „Peenetal-Landschaft“ (F. Hennecke)	487
9.2.4	Umweltverträgliche Erzeugung nachwachsender Rohstoffe – Die Schilf-Experimentalanlage Biesenbrow (Randow-Welse-Flußtalmoor) (W. Wichtmann, T. Timmermann)	492
9.3	Revitalisierung von Moorökosystemen – Beispiele aus Nordostdeutschland	496
9.3.1	Grundsätze (M. Succow)	496
9.3.2	Vom Saatgrasland zum wieder torfspeichernden Niedermoor – die Experimentalanlage Am Fleethoz/Friedländer Große Wiese (D. Koppisch, S. Roth, M. Hartmann)	497
9.3.3	Revitalisierung von Flußtalmooren (M. Succow, K. Runze)	504
9.3.4	Revitalisierung eines Quellmoorkomplexes am Sernitz-Oberlauf (I. Koska, H. Stegmann) ..	509
9.3.5	Revitalisierung eines Küsten-Überflutungsmoores am Greifswalder Bodden (G. Müller-Motzfeld)	517
9.3.6	Revitalisierung von Kesselmooren im Serrahner Wald (Müritz-Nationalpark) (L. Jeschke, C. Paulson)	523
9.3.7	Revitalisierung des Kieshofer Moores bei Greifswald (L. Jeschke)	528
9.3.8	Revitalisierung von Regenmooren an ihrer klimatischen Arealgrenze (F. Edom)	534
9.4	Schlußbetrachtung (M. Succow)	543
Anhang	Aufnahme landwirtschaftlich genutzter Standorte (TGL 24300/04 Moorstandorte)	547
1	Gliederung der Moorstandorte	547
1.1	Hydrologische Moortypen	547
1.2	Ökologische Moortypen	547
1.3	Moor-Naturraumtypen	547
1.4	Moormächtigkeitsstufen	550
2	Torf- und Muddearten, Zersetzungsgrad der Torfe	550
2.1	Torfarten	550
2.2	Muddearten und Quellablagerungen	552
2.3	Zersetzungsgrad der Torfe	554
2.4	Konsistenz der Mudden	554
3	Moorsubstrate und Moorsubstrattypen	555
3.1	Substratgliederung der Moore	555
3.2	Substratschichtung – Substrattypen	555

4	Horizonte, Bodentypen und Bodenformen	556
4.1	Horizonte	556
4.2	Bodentypen	556
4.3	Bodenformen	557
5	Prüfprotokoll	557
Literaturverzeichnis		558
Register		601

Autorenverzeichnis

Dr. agr. Jürgen Augustin, Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V., Institut für Rhizosphärenforschung und Pflanzenernährung, Eberswalder Straße 84, D-15374 Müncheberg

Dipl.-Biol. Ute Clausnitzer, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Botanisches Institut, Grimmer Straße 88, D-17487 Greifswald

Drs. John Couwenberg, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dipl.-Hydr. Frank Edom, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dipl.-Biol. Elisabeth Endtmann, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Institut für Geologische Wissenschaften, Jahnstraße 17A, D-17487 Greifswald

Dipl.-Biol. Ulrich Fischer, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dipl.-Biol. Dieter Gremer, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dr. rer. nat. Jörg Gelbrecht, Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Müggelseedamm 260, D-12562 Berlin

Dr. rer. nat. Maja Hartmann, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dr. rer. nat. Frank Henicke, Zweckverband Peenetalandschaft, Pasewalker Straße 27A, D-17389 Anklam

Dipl.-Biol. Florian Jansen, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dr. rer. nat. Lebrecht Jeschke, Goethestr. 11, D-17489 Greifswald

Dr. rer. nat. Hans Joosten, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Drs. Pim de Klerk, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dr. rer. nat. Hans-Dieter Knapp, Bundesamt für Naturschutz, Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm, D-18581 Lauterbach

Dr. habil. Diedrich Kopp, Dömitzer Str. 3, D-19303 Tews-Woos

Dr. rer. nat. Dorothea Koppisch, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dipl.-Biol. Ingo Koska, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dr. agr. Hartmut Kretschmer, Landesanstalt für Großschutzgebiete in Brandenburg, Haus am Stadtsee 1–3, D-16225 Eberswalde

Dipl.-Geogr. Holger Lengsfeld, Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Müggelseedamm 260, D-12562 Berlin

Dr. rer. nat. Uwe Lenschow, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Goldberger Straße 12, D-18273 Güstrow

Dr. rer. nat. Dierk Michaelis, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Prof. Dr. rer. nat. habil. Gerd Müller-Motzfeld, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Zoologisches Institut, J.-S.-Bach-Straße 11/12, D-17487 Greifswald

Dipl.-Geol. Olaf Nalenz, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dipl.-Biol. Christina Paulson, Kantstraße 26, D-52078 Aachen

Dipl.-agr.-Ing. Holger Pfeffer, Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V., Institut für Landnutzungssysteme und Landschaftsökologie, Eberswalder Straße 84, D-15374 Müncheberg

Dr. Siegfried Roth, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dipl.-Biol. Katrin Runze, Landesamt für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern, Abteilung Naturschutz, Wampener Straße, D-17498 Neuenkirchen

Dipl.-Geogr. Heike Stegmann, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Prof. Dr. rer. nat. habil. Michael Succow, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dr. rer. nat. Tiemo Timmermann, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Dr. sc. agr. Wendelin Wichtmann, Botanisches Institut Greifswald, Adr. s. o.

Doz. Dr. sc. agr. Jutta Zeitz, Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, FG Bodenkunde und Standortlehre, Invalidenstraße 42, D-10115 Berlin

1 Einführung

1.1 Zum Inhalt des Buches

(M. Succow)

In den letzten Jahrzehnten gewinnen Moore international zunehmendes Interesse für land- und forstwirtschaftliche Flächennutzung, Rohstoff- und Wasserwirtschaft, Ressourcenschutz, Umweltschutz, aber auch für den Naturschutz sowie für ur- und frühgeschichtliche Fragestellungen. Die weltweit fortschreitende Entwässerung von Moorlandschaften und der Verbrauch von Torf haben das Bewußtsein geschärft, daß Moore eine für den Menschen vielfältig nutzbare und für den Stoffhaushalt bedeutsame Ressource darstellen, mit der äußerst haushälterisch umzugehen ist. Auch muß mehr für ihren Schutz getan werden als bisher. Das verlangt von jedem Land eine genaue Kenntnis seiner Moore und der in ihnen ablaufenden Veränderungen. Auf weltweiter Ebene werden diese Anforderungen explizit gestellt von den Mitunterzeichnern der Ramsar Konvention auf ihren jüngsten Konferenzen in Brisbane (1996) und Costa Rica (1999) (Rubec 1996, Ramsar 1999).

In der 1. Auflage dieses Buches (Succow 1988) wurden am Beispiel der Moore der DDR die vielfältigen Moorbildungen in ihrer Entstehung und Entwicklungsgeschichte, dem stratigraphischen Aufbau, den stofflichen Eigenschaften, den hydrologischen Bedingungen, den mannigfaltigen Vegetationsausbildungen sowie den Aspekten der Nutzung dargestellt.

Die 2. Auflage versucht, wesentliche Teile des seinerzeit verarbeiteten Wissens zu aktualisieren. Dabei galt es, die Grunddiktion zu erhalten: Die naturräumliche Kennzeichnung und Typisierung der Moore in der topischen und in der chorischen Betrachtungsebene. Dazu ist es nötig, die wesentlichen Geokomponenten, also Substrat, Wasser, Relief und Vegetation, zu erfassen und in ihrer Verknüpfung zu charakterisieren. Diese Kennzeichnung und Typisierung bildet eine Basis für jedwede Naturraumkartierung im groß- und mittelmaßstäbigen Bereich (vgl. Haase et al. 1982, 1991, Kopp et al. 1982, 1991, Bastian & Schreiber 1994, Kopp & Succow 1996). In Abschnitt 1.3 sollen die Methoden der Naturraum-

kunde und ihre Beziehungen zur Landschaftsökologie etwas näher erläutert werden. Die Kapitel 2 bis 4 beinhalten die topische Ebene, die Kapitel 5 und 6 die chorische Ebene. Diese Charakterisierung und Klassifizierung muß sowohl für die naturnahen, also noch wachsenden Moore als auch für ihre anthropogenen Abwandlungsreihen (Kultivierungsstufen) erfolgen.

In Erweiterung zur ersten Auflage dieses Buches wird versucht, verstärkt auf Prozesse in Mooren einzugehen, um so den Ansprüchen an eine landschaftsökologische Moorkunde besser gerecht werden zu können. Dem tragen insbesondere die Kapitel 2 und 5 Rechnung. Die Kapitel 7 und 8 charakterisieren relativ detailliert naturnahe sowie anthropogen veränderte Moore. Hierbei wurde wiederum auf eine Darstellung für den relativ gut bearbeiteten und naturräumlich (edaphisch-klimatisch) gut abgegrenzten Raum (Nord-) Ostdeutschland orientiert. Diese Teile entsprechen damit eher einer regionalen Moorkunde. Dementsprechend wurde hier auf Darstellungen aus anderen Moorregionen weitgehend verzichtet; das gilt auch für die Literaturlauswertung.

Innerhalb Mitteleuropas lassen sich drei moorkundlich deutlich unterschiedene Räume ausgliedern, die jeweils einer eigenen Bearbeitung bedürfen. Zum einen handelt es sich dabei um den nordwestdeutsch/niederländischen Raum als altpleistozäne Landschaft mit einer deutlich ozeanisch bis subozeanischen Klimaprägung. Dieses Gebiet wurde seinerzeit durch Overbeck (1975) zusammenfassend dargestellt. Der zweite edaphisch-klimatisch relativ eigenständige Raum umfaßt Süddeutschland, das westliche Österreich und die Schweiz. Er weist als Jungmoränenlandschaft bei Kalkreichtum die größte Fülle an Moortypen auf. Für diesen von den Alpen und damit durch hohe Niederschläge geprägten Raum gilt es zukünftig eine zusammenfassende regionale Moorkunde zu erarbeiten. Erst in Teilen ist das geschehen, so durch Krisai & Schmidt (1983) bzw. Steiner (1992) für Österreich und durch Früh & Schröter (1904), Grünig et al. (1986) und Grünig (1994) für die Schweiz. Innerhalb Mitteleuropas findet sich der höchste Anteil noch naturnaher Moore in dieser Region. Der dritte Naturraum, das nordostmitteleuropäische Tiefland mit Ostdeutschland sowie Nord- und Mittelpolen, weist insgesamt schon subkontinentales Klima auf und besitzt ebenfalls saure wie basenreiche Moore. Der Erkenntnisstand

des vorliegenden Buches ist im wesentlichen aus Forschungen aus diesem Raum hervorgegangen.

Kapitel 9 widmet sich Fragen einer zukünftigen Nutzung und des Schutzes von Mooren im Sinne des Erhalts bzw. der Wiederherstellung ihrer Funktionstüchtigkeit als speichernde und entsorgende Landschaften. Fragen der Revitalisierung degradierter Moore und die Entwicklung moorerhaltender Nutzungsformen spielen dabei eine zentrale Rolle. Auch hierbei handelt es sich wiederum vornehmlich um Forschungen bzw. um Umsetzungsprojekte aus dem nordostdeutschen Tiefland. Die Bearbeitung erfolgte insgesamt aus einer überwiegend hydrologisch-vegetationsökologischen Schwerpunktsetzung.

1.2 Zum Begriff „Moor“ und vom Wesen der Moore

(H. Joosten, M. Succow)

Das Wort „Moor“ oder „Moorland“ war zunächst ein „vorwissenschaftlicher“ Begriff, womit der Mensch eine spezifische, durch Feuchteüberschuß geprägte Landschaft bezeichnete. Später wurde der Terminus von verschiedenen Wissenschaftszweigen aufgegriffen und damit differierend verwendet, was zu Verwirrungen beiträgt.

Auch international ist die Verwirrung groß, und es treten viele Übersetzungs- und Interpretationsfehler auf (Joosten 1995a). Das Englische kennt das Wort „peatland“, was Torf-land(schaft) bedeutet. Daneben wird im Englischen der (aus dem Schwedischen stammende) Terminus „mire“ verwendet, womit eine Landschaft gemeint wird, in der Torfakkumulation stattfindet. Im Deutschen würden wir diesen Begriff mit „wachsendes Moor“ oder auch „lebendes Moor“ übersetzen. Das finnische „suo“ steht (ähnlich wie das Russische „болото“), noch weitergehend, für eine Landschaft mit einer potentiell torfbildenden Vegetation, ohne daß es zur Torfbildung gekommen sein muß. Im Englischen gibt es auch noch das Wort „moor“, womit halbnatürliche Landschaften gemeint sind, in denen meist Heide dominiert. Oft besitzen diese „moors“ Torfböden und Moorvegetation (und sind damit Moore), vielfach aber auch nicht. Im Niederländischen muß man die Bedeutung für „veen“ (vgl. deutsch „Fehn“ bzw. „Fenn“) aus dem Kontext entnehmen, weil dieses Wort sowohl Moor als auch Torf bedeutet. Viele Sprachen besitzen überhaupt keinen spezifischen Begriff und umschreiben Moor entweder als eine Stelle, wo Torf gewonnen werden kann (turbera, tourbière, torfeira), oder ordnen Moore dem breiteren, aber nicht ganz deckenden Begriff „Wetlands/Feuchtgebiete“ zu.

In diesem Buch wollen wir den Begriff **Moor** für Landschaften verwenden, in denen Torf gebildet wird oder Torf oberflächlich ansteht. Es werden damit auch Lebensräume eingeschlossen, in denen noch keine deutlichen Torfschichten vorhanden sind, z.B. rezente Sümpfe, in denen jedoch Torfakkumulation möglich ist. Hierzu gehören in Mitteleuropa vor allem abgelassene Seen, in denen Mudden die Ober-

fläche bilden, oder Überflutungsräume. Auch Quellstandorte mit aufwachsenden organisch-anorganischen Ablagerungen sind Mooren zuzuordnen. In der Regel ist aber zumindest die oberste Schicht dieser Naturräume aus Torf aufgebaut.

Auf unserer Erde werden etwa 4 Millionen km² (= 3% der Landfläche) von Mooren eingenommen. Die größten Konzentrationen finden sich in Kanada und Alaska, Nord-Europa und West-Sibirien, Südost-Asien und Teilen des Amazonas-Beckens, wo mehr als 10% der Landfläche von Mooren bedeckt sind (s. Abb. 1-1). Auch Mitteleuropa gehört mit etwa 5% der Fläche zu den relativ moorreichen Gebieten (s. Abb. 1-2, 6.5, 8.2).

Wachsende, d.h. torfakkumulierende Moore nehmen im Stoffhaushalt der Natur eine Sonderstellung ein. Es sind Ökosysteme mit einer langfristig positiven Kohlenstoffbilanz, d.h. daß mehr organisches Material produziert als abgebaut wird. In Mooren findet diese Stoffspeicherung vornehmlich als **Torf** statt: abgestorbenes Pflanzenmaterial, das sedentär akkumuliert ist. „Sedentär“ (Substantiv **Sedentat**) bedeutet, daß das Material an Ort und Stelle aufgewachsen und nach seinem Entstehen und Absterben nicht transportiert worden ist (vgl. 2.1, 3.1). Torf unterscheidet sich in dieser Hinsicht von Mudden, die am Grunde von Still- und Fließgewässern abgelagert werden, also sedimentieren (Substantiv **Sediment**). Sie sind oft zeitlich, räumlich und funktionell mit Torfen verknüpft, können also Bestandteil von Moornaturräumen sein (s. 3.1.3, 7.1). Torf resultiert letztendlich aus kohlenstoffchemischer Biosynthese und ist damit in der Regel überwiegend **organisches Material**. Als solches ist Torf somit auch **organogen** (biogen), mit welchem Begriff alle Substanzen bezeichnet werden, die ihren Ursprung in Organismen haben.

Die positive Stoffbilanz, die zur Torfakkumulation führt, kann sowohl in der Produktions- als auch in der Abbauphase begründet sein. Torfakkumulation kann beispielsweise durch Stimulation (Vergrößerung) der Produktion von organischem Material gefördert werden. So haben die hohen atmosphärischen CO₂-Konzentrationen im Tertiär (Van den Burgh et al. 1993) ohne Zweifel eine wichtige Rolle bei der massiven Torfbildung in diesen Epochen gespielt. Eine reichliche Versorgung mit Pflanzennährstoffen führt dagegen neben einer erhöhten Produktivität meist auch zu einem beschleunigten Abbau des organischen Materials (s. 2.1). Wenn andere Faktoren (z.B. niedrige Temperaturen) den Abbau gering halten, kann „Düngung“ dennoch zu einer Torfakkumulation führen. Ein Beispiel dafür sind die guanogenen „bird tops“ in arktischen Gebieten, wo Düngung durch Vogelkot („Guano“) zu Torfbildung führt (Van der Knaap 1988a, b, Lag 1990, Gaston & Donaldson 1995).

In der Regel tritt Torfakkumulation aber infolge gebremsten Abbaus der organischen Substanz auf. Das kann seine Ursache darin haben, daß das organische Material selbst schwer abbaubar ist. Beispiele sind die „moss cushion mires“

Tab. 1-1: Übersicht der wichtigsten Faktoren, die (meist in Kombination) zu Torfakkumulation führen (nach Joosten & Couwenberg 1998).

Torfakkumulation durch						
mehr Aufbau durch „Düngung“ mit		weniger Abbau von organischem Material durch				
		endogene		exogene Faktoren		
CO ₂	NPK	Material ist schwer abbaubar	Material wird schwer abbaubar	„Abwesenheit“ von abbauenden Organismen durch:	„Abwesenheit“ von Oxidatoren durch:	niedrige Temperaturen
				*Abwesenheit von Oxidatoren (v.a. O ₂) *niedrige Temperaturen	*viel Abfuhr *wenig Zufuhr	

„Wasser-Moore“

in der Antarktis, wo bestimmte Moosarten selbst unter völlig aeroben Bedingungen Torf bilden (Fenton 1980). Auch Humifizierung kann zu schwieriger abbaubaren Substanzen führen (s. 2.1).

Geminderte Abbaubarkeit spielt zwar bei der Torfbildung immer eine Rolle, es sind jedoch meist exogene Faktoren, die den Abbau so stark bremsen, daß eine Torfakkumulation ermöglicht wird (s. 2.1). Dabei handelt es sich im wesentlichen um folgende Erscheinungen:

- die Abwesenheit, die verminderte Anwesenheit oder Inhibition von Organismen, die den Abbau ermöglichen oder vollziehen;
- die Abwesenheit (verminderte Anwesenheit) von Oxidatoren;
- das Vorherrschen von niedrigen Temperaturen, wodurch die Geschwindigkeit der meisten physikalischen (Diffusion), chemischen (Oxidation) und biologischen Prozesse verringert wird (Tab. 1-1).

Auch andere Faktoren können den Abbau verringern (Giftstoffe, Trockenheit, Sterilisation durch hohe Temperaturen), aber diese bremsen oder verhindern meistens auch den Aufbau organischen Materials.

Bei allen torfbildenden Faktoren spielt der **Wasserüberschuß** des Standortes eine zentrale Rolle (s. 2.1, 2.2, 3.5, 5). Moore haben sich demnach auf der Erde entwickeln können, seit es Sumpf- und Wasserpflanzen gab. Bekannt sind die tropischen Torfsümpfe aus dem Oberkarbon (320–286 Millionen Jahre) und die (sub)tropischen Moore aus dem Tertiär (65–3 Mill. Jahre), die zu den heutigen Stein- bzw. Braunkohlevorkommen in Mitteleuropa geführt haben (Averdieck 1990, Mai 1995). Der überwiegende Teil der heutigen Moore Europas ist aber erst ab dem Spätglazial, also in den letzten 15.000 Jahren, entstanden (Lang 1994, Lappalainen 1996, 7.9). Fast alle Moore der Erde und alle Moore in Mitteleuropa sind vom Wasser geprägt.

Deshalb werden wir uns in diesem Buch auf derartige „Wasser-Moore“ beschränken.

Seit Beginn der wissenschaftlichen Moorkunde werden Moore auf Grund ihrer Wasserspeisung in zwei Typen gegliedert. Hochmoore (besser **Regenmoore**, engl. bogs) erhalten ihr Wasser und ihre Nährstoffe nur aus der Atmosphäre, **Niedermoore** (engl. fens) werden zusätzlich auch von Grund- und Oberflächenwasser gespeist.

1.3 Naturraumkunde und Landschaftsökologie von Mooren

(H. Joosten, D. Kopp, M. Succow)

Die Landschaftsökologie wird als junge, transdisziplinäre Wissenschaft von einer kaum noch überschaubaren Fülle an Termini und Begriffen geprägt (vgl. Leser 1997), wodurch wichtige theoretische und praktische Aspekte in einem „semantischen Sumpf“ zu ersticken drohen (Naveh & Liebermann 1994). Im folgenden wird versucht, einige mit Bezug auf Moorlandschaften verwendete Konzepte der Landschaftsökologie und der Naturraumkunde zu erläutern und miteinander zu verknüpfen.

Objekt der Landschaftsökologie ist die **Landschaft**, also die räumliche (durch die äußere Struktur unterscheidbare) Realisierung eines Ökosystems. Die **Landschaftsökologie** ist eine Wissenschaft, die Landschaften als Ergebnis der komplexen Beziehungen zwischen abiotischen Bedingungen, Biozöosen und menschlichen Aktivitäten studiert. Wegen ihrer ökosystemaren Betrachtungsweise entlehnt die Landschaftsökologie viele Einsichten aus der allgemeinen Systemtheorie.

Ein System

- ist ein Netzwerk von räumlichen und zeitlichen Beziehungen mit den aus diesem Netzwerk hervorgehenden und dieses Netzwerk kennzeichnenden

Eigenschaften. Ein Ökosystem ist ein System, das auch lebende Organismen enthält;

- ist relativ stabil und hat relativ deutliche räumliche Grenzen;
- ist zusammengesetzt aus kleineren (Sub-)Systemen und Teil größerer Systeme;
- kann aus seiner Rolle in Beziehung zur Strömung, Lagerung und Umwandlung von Materie, Energie und Information verstanden werden;
- kann mit anderen Systemen in Serien geordnet werden, wobei der Output des einen den Input des nächsten Systems bildet. Zwischen diesen Systemen kann es Rückkopplung geben.

Ein System ist somit mehr als die Summe seiner Bestandteile. Die Wechselwirkung zwischen den Teilen führt zur Entstehung neuer, sog. „emergenter“ Eigenschaften (Schroever 1982, Klijn 1995, 5.1, 5.6, 6.2).

Beziehungen, die eine Wirkung haben, werden als Faktoren bezeichnet (vgl. Van Wirdum 1979a, Van Leeuwen 1981). Sie lassen sich in vier Typen aufgliedern (Van Wirdum 1979b, Zonneveld 1995, Aggenbach et al. 1998):

Die **operationalen Faktoren** wirken direkt (unmittelbar) physisch und chemisch auf das System ein. Direkt auf Pflanzen einwirkende Faktoren sind z.B. Wasser, Kohlendioxid, Nährstoffe, Gifte, Licht, Luftfeuchte, Temperatur und mechanische Beschädigung. Die Wirkung operationaler Faktoren kann meist nur mittels experimenteller (physiologischer) Forschung erfaßt werden und wird deshalb oft auf indirekte Weise abgeleitet. Alle anderen Faktoren wirken indirekt (mittelbar) auf das System ein und bestimmen letztendlich die Qualität, Quantität und Dauer von operationalen Faktoren.

Die **konditionalen Faktoren** sind in der direkten Umgebung des Systems (z.B. im Wurzelraum der Pflanze) wirksam und lenken die operationalen (oder andere konditionale) Faktoren. Der Sauerstoffgehalt im Boden z.B. beeinflusst mittels Mineralisation die Verfügbarkeit und die Form, in der Stickstoff vorkommt, z.B. als NH_4^+ oder NO_3^- (2.1.3.1). Die Vegetationsstruktur bestimmt die Luftfeuchte und Lichtverfügbarkeit für Pflanzen im Unterwuchs (4.1.2). Wichtig ist zu erkennen, daß unterschiedliche konditionale Faktoren letztendlich zu einer identischen operationalen Auswirkung führen können. So kann eine Phosphat-Limitierung bei Moorpflanzen sowohl durch einen absoluten Mangel an Phosphat als auch durch dessen geringe Verfügbarkeit verursacht werden, weil der Nährstoff an Calcium (Boyer & Wheeler 1989) oder an Eisen und Aluminium (Wassen et al. 1995, De Mars et al. 1996, Boeye et al. 1997) gebunden wird. Dadurch kann eine Pflanzenart unter augenscheinlich ganz unterschiedlichen (konditionalen), aber in Wirklichkeit ähnlichen (operationalen) Bedingungen vorkommen (vgl. Kap. 4). Beispiele von Reihen aufeinander einwirkender konditionaler Faktoren sind das Wasser im Boden, das via Sauerstoffgehalt und Redoxpotential die Phosphatverfügbarkeit oder via Sauerstoffgehalt und Bodentemperatur die Mineralisation und damit die Stickstoffverfügbarkeit beeinflusst (Vermeer & Joosten 1992).

Die konditionalen Faktoren werden von den **(ex)positionalen Faktoren** bestimmt, die aus der Lage in der Landschaft (Raum, Abstand, Relief) resultieren. Zuströmung von Grund-

wasser findet nur statt, wenn in der höher gelegenen Umgebung Wasser versickert ist. Kalkreiches Quellwasser gibt es nur, wenn das (ursprüngliche Regen-)Wasser unterwegs irgendwo Kalk aufnehmen konnte.

Unter **sequenzialen** („erblichen“) **Faktoren** werden schließlich alle Einflüsse der Zeit (Vergangenheit, Dauer) verstanden. Grundwasser, das heute an die Oberfläche tritt, ist schon seit Jahrzehnten oder Jahrhunderten unterwegs und in seiner Zusammensetzung geprägt von all dem, das während und seit der Versickerung auf dieses Wasser einwirkte. Düngung oder Überflutung können sich noch nach vielen Jahren auf den Nährstoff- und Basenhaushalt des Standortes auswirken. Frühere Nutzung hat noch lange Auswirkungen auf die aktuelle Vegetation. Die Entstehung mancher hydrogenetischer Moortypen braucht viel Zeit, um die notwendigen Selbstregulationsmechanismen aufzubauen (5.6.1).

Die **Naturraumkunde** ist ein Anwendungsbereich der Landschaftsökologie, der besonders darauf gerichtet ist, Grundlagen für Landesplanung, Landnutzung, Ressourcenschutz und Naturschutz zu liefern (Kopp et al. 1982, Haase et al. 1991). Die Praxisorientierung, vor allem die Flächenkartierung, bedingt, daß sie sich mehr mit strukturellen Merkmalen als mit funktional-prozessualen Eigenschaften befaßt. Korrelationen zwischen Merkmalen führen dabei aber gleichwohl zu Aussagen über auftretende Prozesse.

In der Naturraumkunde wird die Landschaft in mehreren räumlichen Bereichen betrachtet. In einem Betrachtungsbereich (Syn. Dimension, Ebene) ist eine gleiche inhaltliche Aussage möglich, werden gleiche Ziele verfolgt und wird ein bestimmtes Methodenniveau eingehalten (Neef 1963a, b).

Als Basiseinheit wird der **Top** verwendet: ein „Areal relativer Gleichförmigkeit“, d.h. ein Raum, dessen vertikale **Komponenten** (z.B. Lufthülle, Vegetation, Boden, Gestein) in flächiger Betrachtung homogen sind. Es ist damit ein räumlicher Bereich, in dem die internen Unterschiede kleiner sind als die Unterschiede zur Umgebung. Die Komponenten eines Tops werden an Hand konkreter Strukturmerkmale zu bestimmten Typen klassifiziert (Tab. 1-2, 1-3). Der Toptyp ist somit eine Klassifikationseinheit inhaltsgleicher Tope. Die Gesamtheit der abiotischen Eigenschaften eines Tops wird **Geotop** (= Standort) genannt. So werden Eigenschaften der Komponente „Wasser“, soweit sie flächig homogen auftreten (d.h. ein Hydrotop bilden), einem bestimmten Hydrotoptyp zugeordnet. Das Wasser ist die räumliche Manifestation eines Hydrosystems („wie hängt es strukturell und funktionell zusammen?“), das innerhalb der Hydrosphäre funktioniert („der Gesamtheit der Eigenschaften und Beziehungen des Wassers“). Ausgehend vom konkreten Objekt hin zur Wirkungssphäre wird so die Betrachtung immer mehr abstrakt (Tab. 1-2).

Parallel zur überwiegend vertikalen Gliederung der Komponenten der Naturraumkunde wird in der Landschaftsöko-

Tab. 1-2: Basiseinheiten der Landschaftsökologie und Naturraumkunde.

		← konkret		abstrakt ⇒					
Objekt ^{1,2)}	eher strukturelle Betrachtung ²⁾			eher funktionelle Betrachtung ²⁾		Wirkungsgefüge ¹⁾			
Landschaft	Naturraum			Landschaft als Ökosystem		Geobiosphäre			
Komponenten:	Einzelareal ³⁾ :	Typenbezeichnung ³⁾ :		Subsysteme:		Wirkungssphären:			
Weltall						Kosmosphäre			
Lufthülle	Geo-top	Klimatop	Geo-top-typ	Klimatoptyp	Geo-system	Klimasystem	Geo-sphäre	Atmosphäre	
Gestein		(Lithotop)		(Lithotoptyp)		(Lithosystem)			Lithosphäre
Georelief		Morphotop		Morphotoptyp		Morphosystem			
Schwerkraftwasser		Hydrotop		Hydrotoptyp		Hydrosystem			
Boden		Pedotop		Pedotoptyp		Pedosystem			
Vegetation	Phytotop		Phytotoptyp		Bio-system	Phytozönose		Biosphäre	
Tiere	Zootop		(Zootoptyp)			Zoocönose			
Kultur	(Nootop)		(Nootoptyp)		Anthroposystem		Noosphäre		
Standort	Geobiotop		Geobiotoptyp		Geobiocönose				

¹⁾ Van der Maarel & Dauvellier 1976, Schroevers 1982, Zonneveld 1995

²⁾ Kopp et al. 1982, 1991, Leser 1997

³⁾ in der topischen Betrachtungsebene

logie die „Hierarchie der Wirkungssphären“ als Analyse- und Ordnungsprinzip verwendet. Diese geht davon aus, daß die höher angeordneten Wirkungssphären letztendlich die darunter befindlichen stärker beeinflussen als umgekehrt (Tab. 1-2). So zeigt sich, daß der Kosmos (Plattentektonik, Sonneneinstrahlung, Gravitation) das Klima, Kosmos und Klima das Gestein, Klima und Gestein das Relief weitgehend bestimmen. Die letzten drei sind lenkend für den Wasserhaushalt, all diese bestimmen wiederum die Bodenentwicklung. Die Vegetation ist von allen genannten Faktoren abhängig, während die Tiere vor allem von der Vegetationsstruktur bestimmt werden (Klijn 1995). Zur Anwendung auf Moorlandschaften siehe z.B. Joo-sten (1988, 1991) und Evers & de Vries (1991). Durch die sehr starken Beziehungen zwischen Wasser, Vegetation und Torf (vgl. 5.6) ist diese Hierarchie im Fall der Moore oft vage (Joo-sten & Bakker 1987).

Die Gesamtheit der biotischen und abiotischen Eigenschaften eines Topes wird der **Geobiotop** genannt. Geobiotop-typen mit gleichartiger Vegetation werden zu Ökotopgruppen zusammengefaßt. Der **Ökotop** kennzeichnet also die Eigenschaften des Geobiotops, die sich in der Vegetation widerspiegeln, d.h. direkt oder indirekt vegetationswirksam sind (vgl. die operationalen und konditionalen Faktoren). Insbesondere die Standortfaktoren Wasserhaushalt, Trophie und Säure-Basen-Verhältnis bedingen bei den naturnahen Mooren die große Mannigfaltigkeit in der Vegetation. Sie sind als ökologische Hauptmerkmale zu sehen (s. Kap. 3, 4, 5). Die Substratschichtung spielt dagegen für die Vegetation eine untergeordnete Rolle. Im topischen Bereich werden die für die Typenbildung wichtigen Komponenten als flächig gleichförmig angesehen. Die Homogenität aller Eigenschaften innerhalb

der Komponenten wird nicht gefordert und ist grundsätzlich auch nicht möglich.


Weil die Naturraumkunde den Naturraum als Ganzes zu klassifizieren versucht, werden die Grenzen der Klassifikationseinheiten unterschiedlicher Komponenten weitestgehend aufeinander „abgestimmt“. So werden z.B. Vegetationstypen und Nährstoffverfügbarkeitsbereiche des Bodens so gegliedert, daß ihre Grenzen zusammentreffen. Solche aufeinander abgestimmten Typen unterschiedlicher Komponenten werden als „-formen“ bezeichnet. Eine Vegetationsform ist somit ein Vegetationstyp, dessen Grenzen mit den vegetationsökologisch bedeutsamen Standorteigenschaften zusammenfallen. Eine derartige Übereinstimmung ermöglicht eine optimale beiderseitige Indikation. Damit wird der Zerstückelung des komplexen Naturraumes, wie sie sich durch eine Verschneidung der fachgebietseigenen Klassifikationen, z.B. aus der Boden- und Vegetationskunde, üblicherweise ergibt, entgegengewirkt.


Die einzelnen Tope sind zu Mosaiken (den **Choren**), die räumlich heterogen sind, vernetzt. Eine Chore bildet somit ein Areal mehrerer Tope, die zueinander in lateraler Beziehung stehen. Die Chore wird auch als „Kommunikationsgefüge von Topen“ bezeichnet (vgl. die positionalen Faktoren). In Moorlandschaften kommt dem Wasserhaushalt als


Tab. 1-3: Topische und chorische Bezeichnungen der Naturraumkunde.

Komponenten:	topischer Betrachtungsbereich		chorischer Betrachtungsbereich	
	Einzelareal:	Typbezeichnung:	Einzelareal:	Typbezeichnung:
Lufthülle	Klimatop	Klimatoptyp (Klimaform)	Klimachore	Klimachorentyp (Klimamosaiktyp)
Georelief	Morphotop	Morphotoptyp (Reliefform)	Morphochore	Morphochorentyp (Reliefmosaiktyp)
Schwerkraftwasser	Hydrotop	Hydrototyp (Wasserform)	Hydrochore	Hydrochorentyp (Wassermosaiktyp)
Boden	Pedotop	Pedotoptyp (Bodenform)	Pedochore	Pedochorentyp (Bodenmosaiktyp)
Vegetation	Phytotop	Phytotoptyp (Vegetationsform)	Phytochore	Phytochorentyp (Vegetationsmosaiktyp)

 Geototyp
(Standortsform)

 Geobiototyp
(Naturraumform)

 Geochorentyp
(Standortsmosaiktyp)

 Geobiochorentyp
(Naturraummosaiktyp)

prägender Komponente innerhalb der Vernetzung eine besondere Bedeutung zu (Kap. 5, 6.2). Ähnlich wie im topischen Bereich (-top → -toptyp) werden im chorischen Bereich die Mosaike durch Komponentenmosaie charakterisiert, die zu Mosaiktypen klassifiziert werden (Tab. 1-3). So wird auch der Begriff **Ökochore** als Bezeichnung für diejenigen Eigen-

schaften der Geobiochore verwendet, die vegetationswirksam sind (vgl. Ökotyp).

Obwohl sich Tope und Choren grundsätzlich auf allen räumlichen Maßstäben unterscheiden lassen, bedingt die notwendige Kartierbarkeit, daß der Top, und damit die Choren, eine bestimmte Minimumgröße haben (Tab. 1-4). Der **chorische Betrachtungsbe-**

Tab. 1-4: Räumliche Betrachtungsebenen der Naturraumkunde.

	Betrachtungsebene	Naturraumeinheit	Größe in m ²	Kartiermaßstab	Differenzierende Strukturen (Beispiele)	Differenzierende Prozesse in Bezug auf Moore und Moorentwicklung (Beispiele)
flächig uniform/ homogen (<i>Element</i>)	subtopisch	Nanotop	$10^{-\infty} - < 10^0$	$10^{\infty} - 10^1$	Akrotelmdurchlässigkeit, Torfdicke, Wasserqualität, -stand, Porosität, Pflanze, Bult, Schlenke, Flark, Strang	Niederschlag, Verdunstung, atm. Emission, Pflanzenwachstum, Torfakkumulation, Wasserstandsschwankung, Kapillarwirkung, Redoxprozesse, Stoffumsetzung, Bodenbildung
		Mikrotop	$> 10^0$	$10^{-1} - 10^{-2}$		
	topisch	Top	$> 10^1$	$10^{-3} - 10^{-4}$	Akrotelm, Mikrorelief, Lagg, Vegetationsform, Moorrand	Bult-Schlenken-Bildung, Konkurrenz, Symbiose, Oberflächenwasserströmung
flächig pluriform/ heterogen (<i>Mosaik</i>)	chorisch	(Nanochore)	$> 10^1$	$10^{-3} - 10^{-4}$	Vegetationsformenabfolge, Moorkörper, Mesorelief	laterale Wasser- und Stoffumsetzungen, differentielle Torfakkumulation, Moorexpansion
		Mikrochore	$> 10^3$	$10^{-4} - 10^{-5}$		
		Mesochochore	$> 10^6$	$10^{-5} - 10^{-6}$	geologische Einheit, Einzugsgebiet, Makrorelief	Klima-Änderung, Flußbettverlegung, Dünenbildung
		Makrochore	$> 10^8$	10^{-6}	Höhenlage, geotektonische Strukturen	postglaziale Landhebung, Vulkanismus, Tektonik, Meeresspiegelanstieg

reich wird, auf der Basis von vor allem räumlichem Maßstab und z.T. funktionellen Eigenschaften, in (**Nano-**), **Mikro-**, **Meso-** und **Makrochore** untergliedert (Tab. 1-4, Zonneveld 1995, Leser 1997).

Neben diesen räumlichen Ebenen mißt die Naturraumkunde auch der zeitlichen Betrachtung eine wichtige Rolle zu. Mittels der Rekonstruktion früherer Bedingungen (vgl. die sequenzialen Faktoren) wird versucht, Entwicklungstendenzen zu erkennen, um damit eine Vorhersage der zukünftigen Entwicklungen zu ermöglichen (Kopp et al. 1991).

Jedes Moor kann so als eine Zusammensetzung einer mehr oder weniger großen Zahl von Topen betrachtet werden. Jeder dieser Tope ist durch ein spezifisches Wasserregime, Trophie- und Säure-Basen-Verhältnis und – damit ursächlich in Zusammenhang stehend – durch eine spezifische Vegetation und un-

tergeordnet auch Genese, Stratigraphie (Substrataufbau) und Reliefsituation gekennzeichnet (s. Kap. 3, 4). Die Tope zeigen eine gesetzmäßige Anordnung und Verknüpfung, z.B. entsprechend den sich verändernden hydrologischen Bedingungen und damit Ernährungsbedingungen vom Moorrand zum Moorzentrum bzw. umgekehrt (s. Kap. 5, 6). Dabei ist ausschlaggebend, welches die qualitativen und quantitativen Eigenschaften der für das Moorwachstum entscheidenden Wasserspeisung sind. Stammt das Wasser aus dem Niederschlag oder ist es längere Zeit mit dem Substrat (Untergrund) in Kontakt gewesen, tritt es periodisch oder permanent auf, überrieselt es oder überstaut es? Je nach den herrschenden Bedingungen ergeben sich innerhalb eines Moores charakteristische Abfolgen von Topen, die in ihrer Gesamtheit für das Moor eine Chore ergeben.

2 Prozesse auf Moorstandorten (topische Betrachtung)

2.1 Torfbildung (D. Koppisch)

2.1.1 Was ist Torf?

In Kap. 1 wurden Moore als Ökosysteme eingeführt, in denen aktuell oder früher Torf gebildet wird bzw. wurde. Was genau ist aber Torf? Bereits Mitte des vorigen Jahrhunderts gibt Kohl (1864) folgende Beschreibung:

„... eine höchst interessante Komposition von hübschen halbzerstörten Moosen, Sumpfgräsern, zierlichen Haideblumen, Blättern, Knospen, Stengeln und Zweiglein vieler anderer See- und Landpflanzen, hier und da vermischt mit allerlei Gesämen, ... so wie auch mit den Flügeln und Körperchen vor Jahrtausenden lebendiger Insekten, Käfern, Schalentieren, mit Fischgräthen und Thierknochen und dann und wann mit anderen wohlerhaltenen Kuriositäten, die alle zusammen mit Erdharzen geschwängert, mit Pflanzenlauge gegerbt und einförmig braun gefärbt wurden... Dieser zur größten Hälfte vegetabilische, zum Theil aber auch mineralische Stoff, der ein Verwandter und Vorläufer der Steinkohle ist, hat sich in den Gegenden, in denen Wasser ins Stocken gerieth, gebildet. Gewisse Sumpfpflanzen ..., die an feuchten Stellen wuchsen, gaben gewöhnlich zunächst dazu die Veranlassung, und indem sie ihre im Wasser verkommenen und absterbenden Leichname aufeinander häuften, rissen sie noch viele andere Pflanzen, die an und für sich und allein keinen Torf hätten bilden können, mit in das entstehende Quodlibet hinein ...“

Diese Beschreibung enthält bereits alle wichtigen Eigenschaften, die in der folgenden Definition genannt sind:

Torf

- ist eine organische, sedentäre (von unten nach oben aufgewachsene) Ablagerung,
- die überwiegend aus abgestorbenem, humifiziertem Pflanzenmaterial besteht,
- das (meist auf Grund eines durch Wassersättigung verursachten Sauerstoffmangels) nicht vollständig abgebaut wurde und

- dessen Struktur zumindest teilweise noch erkennbar ist.

In wachsenden Mooren wird Torf akkumuliert, indem die Primärproduktion den Abbau der organischen Substanz übertrifft. Vergleicht man die Primärproduktion in Mooren mit derjenigen in benachbarten Ökosystemen derselben Klimazone, so ist diese nicht höher, sofern es sich um Pflanzenarten der gleichen Lebensform handelt. Der ausschlaggebende Faktor für die Torfbildung in Mooren ist demnach nicht die Höhe der Primärproduktion, sondern der verzögerte Abbau des abgestorbenen Pflanzenmaterials (Clymo 1978, Malmer 1986). Im folgenden wird daher der Abbau von Pflanzenmaterial im allgemeinen und speziell in Mooren behandelt.

2.1.2 Stoffabbau

Die organische Substanz in Böden bzw. in Torfen ist aus den nicht vollständig abgebauten Resten abgestorbener Pflanzen und Tiere hervorgegangen. Allgemein kann diese Umwandlung vom lebenden Gewebe in die organische Substanz des Bodens, den Humus, in vier Phasen unterteilt werden (Gisi et al. 1990):

- 1) Absterbephase,
- 2) Auswaschphase,
- 3) Zerkleinerungsphase,
- 4) mikrobielle Phase.

Die erste Phase beginnt in der Pflanze mit der Rückverlagerung von Nährstoffen (v.a. Stickstoff und Phosphor) in die Speichergewebe. Außerdem setzt eine Spaltung polymerer Inhaltsstoffe (Stärke, Proteine, Wachse, bei Blättern auch von Chlorophyll) durch pflanzeigene Enzyme ein. Während der zweiten Phase werden gut wasserlösliche Verbindungen, z.B. Zucker und mineralische Ionen wie Kalium oder Magnesium, durch Regen- oder Bodenwasser ausgewaschen.

Während die erste und zweite Phase ohne die Mitwirkung weiterer Organismen ablaufen, spielen in der dritten Phase im Boden lebende Tiere die entscheidende Rolle. Sie zerkleinern die Streu mecha-

nisch und vergrößern damit die Oberfläche, auf der sich Mikroorganismen (Bakterien und Pilze) ansiedeln können. Außerdem durchmischen sie Streu und Bodenmaterial (Bioturbation), und es bilden sich sehr stabile Tonhumuskomplexe im Darm der Tiere.

Die Situation in **wachsenden Mooren** unterscheidet sich bezüglich der dritten Phase grundlegend von Mineralböden oder entwässerten Mooren. In wachsenden Mooren finden sich im Boden sehr wenige Tiere. Während es an den grünen Teilen von Torfmoosen in 0–2 cm Tiefe mit Milben, Collembolen und Oligochaeten noch Vertreter der wichtigsten Bodentiergruppen gibt, nimmt deren Anzahl bereits in 2–5 cm Tiefe ab. In 10–30 cm Tiefe konnten Dickinson & Maggs (1974) dann keine Tiere mehr nachweisen. Dies hat zur Folge, daß die dritte Phase fast fehlt. Daher sind im Torf im Gegensatz zum Humus der Mineralböden die Strukturen des pflanzlichen Ausgangsmaterials oft noch so gut erhalten, daß eine Bestimmung der betreffenden Pflanzenarten möglich ist.

Bei der letzten, der mikrobiellen Phase des Abbaus toter pflanzlicher und tierischer Gewebe, unterscheidet man zwei Gruppen von Prozessen. Unter **Mineralisierung** versteht man den Abbau der organischen Substanz bis hin zu niedermolekularen Verbindungen wie Kohlendioxid, Methan, Wasser oder mineralischen Salzen (Scheffer & Schachtschabel 1992).

Humifizierung bezeichnet hingegen die Bildung von Huminstoffen. Unter Huminstoffen faßt man die in der Regel dunkel gefärbte, amorphe organische Substanz des Bodens zusammen. Es handelt sich um Makromoleküle, die aus Spaltprodukten der ursprünglichen organischen Substanz (vor allem des Lignins, aber auch der Fette, Wachse, Kohlenhydrate und Proteine) aufgebaut sind. Die Spaltprodukte werden erst beim Abbau der pflanzlichen Ausgangssubstanzen als Zwischenprodukte freigesetzt, so daß Humifizierung immer mit einer gewissen Mineralisierung und damit auch mit einem Stoffverlust verbunden ist. Da Huminstoffe gegenüber mikrobiellem Abbau resistenter als die Ausgangsstoffe sind, verbleiben sie lange Zeit im Boden.

Welche Faktoren bestimmen nun im einzelnen, zu welchem Anteil organische Substanz humifiziert oder mineralisiert wird? Zu berücksichtigen sind dabei sowohl **endogene**, d.h. Eigenschaften des abzubauenden Materials, als auch **exogene Faktoren** (pH-Wert, Temperatur, Feuchte und Redoxpotential des Bodens) (Scheffer & Schachtschabel 1992).

Zu den endogenen Eigenschaften zählt der Gehalt folgender organischer Verbindungen, deren Stabilität gegenüber einem mikrobiologischen Abbau und damit gegenüber einer Mineralisierung wie angegeben zunimmt (Gisi et al. 1990):

Zucker, Stärke, Protein < Proteide < Pektin,
Hemicellulose < Cellulose < Lignin < Wachse
< Harze < Gerbstoffe.

Da Mikroorganismen für ihren Stoffwechsel auf Stickstoff und Phosphor angewiesen sind, kann für den Beginn der mikrobiellen Abbauphase der Phosphat- und Stickstoffgehalt des abgestorbenen Pflanzenmaterials geschwindigkeitsbestimmend sein (Aerts & De Caluwe 1997b). Wichtig ist dabei nicht nur der absolute Gehalt der beiden Elemente, sondern das Verhältnis zum Kohlenstoffgehalt im Pflanzenmaterial, das sogenannte C/N- oder C/P-Verhältnis, berechnet als Verhältnis der Konzentrationen in Gewichts-%. Eine andere Darstellung ist auch N_c bzw. P_c : Stickstoff bzw. Phosphor in % des gesamten Kohlenstoffgehaltes.

Im weiteren Verlauf des Stoffabbaues und bezüglich der Frage, wie hoch der Anteil der Ausgangssubstanz ist, der humifiziert wird, ist jedoch besonders der Gehalt der Nekromasse an den vier zuletzt genannten Stoffklassen wichtig. Daher nimmt die Abbaugeschwindigkeit von totem Pflanzenmaterial in dieser Reihenfolge ab: Krautige Leguminosen, andere Kräuter, grasartige Pflanzen, Laubhölzer, Nadelhölzer, Zwergsträucher, Braunmoose, Sphagnen.

Der Zusammenhang zwischen Abbaurate und exogenen Bedingungen verläuft in Form von Optimumkurven, da extreme Umweltbedingungen ungünstig für die Mehrzahl der (Mikro-)Organismen sind. Bezüglich der Temperatur und der pH-Werte liegt das Optimum für den Abbau dabei im höheren Bereich des Spektrums der auftretenden Werte. So sind basische Torfe in der Regel stärker zersetzt als saure. Im Falle der Bodenfeuchte finden sich die höchsten Abbauraten bei mittlerem Wassergehalt. In zu trockenen Böden ist Wasser die limitierende Ressource, in zu nassen Böden kommt der Abbau fast zum Erliegen, da anaerobe Bedingungen auftreten. Der Stoffumsatz nimmt im anaeroben Bereich des Torfkörpers aber nicht nur quantitativ ab, auch qualitativ ändern sich die Umsetzungen.

So kann z.B. Lignin nur unter Anwesenheit von Sauerstoff abgebaut werden, da die Bindungen im Ligninmolekül nicht durch hydrolytische Enzyme spaltbar sind, sondern nur durch oxidative Reaktionen (Schlegel 1992, Haider 1996). Da der Ligninabbau jedoch die wichtigsten Zwischenprodukte zum Aufbau komplexer Huminstoffe liefert, werden diese unter anaeroben Bedingungen nicht neu gebildet. Auch die biologische Humifizierung im Darm von Bodentieren findet im anaeroben, tierfeindlichen Milieu nicht statt. Hingegen kommt einer Humifizierung ohne Mitwirkung von Bodentieren in Mooren, besonders bei niedrigen pH-Werten und geringem Stickstoffgehalt des toten pflanzlichen Materials,

eine größere Bedeutung zu. Sie führt vorwiegend zur Bildung von niedermolekularen Verbindungen wie z.B. Fulvosäuren mit einem hohen Anteil von Polysaccharid-Bausteinen (Scheffer & Schachtschabel 1992).

Das niedrige Sauerstoffangebot spielt auf Moorstandorten bei der verminderten Stoffabbaurate also eine Schlüsselrolle. Die Redoxverhältnisse und ihr Einfluß auf Stoffumsetzungen sollen daher im nächsten Abschnitt eingehender behandelt werden.

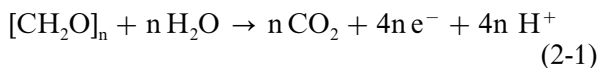
2.1.3 Redoxverhältnisse

Stoffabbau sowie die Atmung von Mikroorganismen, Pflanzenwurzeln und Tieren sind sauerstoffverbrauchende Prozesse. So wird zum Abbau von einem Gramm Glucose auch etwa ein Gramm Sauerstoff verbraucht. Dem stehen als Sauerstoffquellen in Mooren die Diffusion aus der Luft, der Eintrag mit sauerstoffangereichertem Wasser und die Abgabe von Sauerstoff aus Wurzeln von höheren Pflanzen gegenüber.

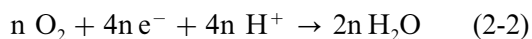
Torfakkumulierende Moore sind zumindest im unteren Teil ihres Profils ganzjährig wassergesättigt. Die Sättigungskonzentration von Sauerstoff in Wasser beträgt bei 10°C nur 11,1 mg O₂ l⁻¹ und bei 20°C nur 8,9 mg O₂ l⁻¹. Wie wenig dies ist, wird deutlich, wenn man bedenkt, daß Luft bei einer Temperatur von 20°C etwa 280 mg O₂ l⁻¹ enthält. Außerdem ist die Diffusion von Sauerstoff in wassergesättigtem Boden etwa 300.000 mal langsamer als in trockenem Boden (Stepniewski & Glinski 1988).

Viele (jedoch nicht alle) Feuchtgebietspflanzen verfügen über die Fähigkeit, Sauerstoff in unterirdische Organe zu transportieren und dann an die Umgebung abzugeben (Grosse et al. 1996), zum Beispiel *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *T. latifolia* und *Eleocharis* (Brix et al. 1992, Bendix et al. 1994, vgl. 2.3.2). Dieser Transportmechanismus stellt die wichtigste Sauerstoffquelle für den permanent wassergesättigten Bereich des Bodens von Naßstandorten dar.

Der Abbau organischer Substanz ist immer mit einer Oxidation von Kohlenstoff verbunden. Diese Reaktion, hier am Beispiel von Kohlenhydraten dargestellt, läßt sich gedanklich in zwei Schritte zerlegen:

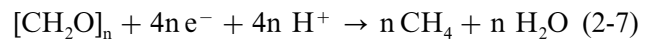
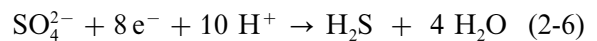
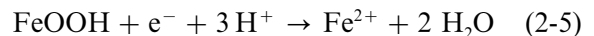
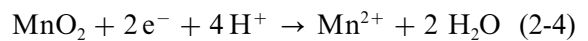
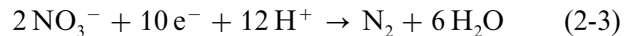


Bei diesem ersten Schritt werden Elektronen frei, die im zweiten Schritt auf einen Elektronenakzeptor übertragen werden. Im aeroben Fall ist dies Sauerstoff:



Da sauerstoffverbrauchende Prozesse im Torf überwiegen, treten sehr schnell anaerobe Bedingun-

gen auf. Ein Maß für das Verhältnis der Aktivität oxidierter und reduzierter Stoffe in einem System und damit für die Fähigkeit des Systems, bestimmte Substanzen zu oxidieren bzw. zu reduzieren, ist das Redoxpotential. Sinkt es unter einen bestimmten Wert, werden die Elektronen auf andere Stoffe, sogenannte Sauerstoffersatzquellen, übertragen. Ihrer abnehmenden Oxidationsstärke entsprechend werden nacheinander Nitrat, Mangan(IV), Eisen(III), Sulfat und Kohlenstoff durch anaerobe Bakterien reduziert:



Als Reaktionsprodukte können dann die in (2-3) bis (2-7) rechts stehenden reduzierten Formen entstehen. Letztlich bedeuten die mit den Umsetzungen in Gleichung (2-1) bis (2-7) verbundenen mikrobiellen Abbauprozesse, daß im dauernd anaeroben Bereich des Torfkörpers, wenn auch sehr langsam, eine Torfzersetzung stattfindet (vgl. 2.2).

In wachsenden Mooren überwiegen die reduzierten Formen als Endprodukte von Stoffumsetzungsprozessen, in belüfteten Torfen hingegen die in (2-3) bis (2-7) links stehenden oxidierten. Dies hat weitgehende Konsequenzen für gasförmige und flüssige Austräge aus diesen Ökosystemen (s. 2.3.2). Mengenmäßig spielen in diesem Zusammenhang die Umsetzungen von Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen die größte Rolle.

Auf die Angabe von Redoxpotentialwerten, bei denen die einzelnen Stoffe reduziert werden, wird verzichtet, da dies pH-, temperatur- und konzentrationsabhängig ist (Scheffer & Schachtschabel 1992). Wie schnell Sauerstoff und andere oxidierte Verbindungen verbraucht werden, hängt damit also auch vom pH-Wert und der Temperatur ab. Da Mikroorganismen für den Abbau schwer abbaubarer Stoffe außerdem auf die Energiezufuhr aus leicht abbaubaren organischen Substanzen angewiesen sind, spielt die chemische Zusammensetzung der abzubauenen organischen Substanz eine wichtige Rolle.

Die Energieausbeute beim Stoffabbau hängt davon ab, welche Substanz reduziert wird. So liefert der aerobe Abbau einer organischen Verbindung je Mol ungefähr fünfmal so viel Energie wie die Reduktion von Eisen(III) oder Sulfat (Reddy & D'Angelo 1994). Dies ist einer der Gründe, warum der Abbau unter anaeroben Bedingungen viel langsamer abläuft als unter aeroben. Entsprechend dem niedrigen Sauerstoffangebot findet man in Mooren sowohl fakul-

tativ als auch obligat anaerobe Mikroorganismen. Beim anaeroben Abbau ist das Zusammenspiel unterschiedlicher Organismen wichtig (Williams & Crawford 1983).

Die Pflanzenverfügbarkeit vieler Elemente ist abhängig vom Redoxpotential, da häufig die reduzierten Verbindungen leichter löslich sind als die Oxide. Außerdem bilden z.B. Fulvo- und Huminsäuren Komplexe mit Metallkationen. Beides bestimmt die Löslichkeit von Phosphat, Eisen, Mangan, Molybdän, Kobalt, Kupfer oder Zink und ist damit für die Versorgung der Pflanzen mit Spurenelementen wichtig. Aber auch toxische Schwermetalle wie Quecksilber, Cadmium und Blei sind unter reduzierten Bedingungen leichter löslich. Sinkt das Redoxpotential so weit ab, daß Sulfat reduziert wird, kann es hingegen wieder zum Ausfällen der Metalle als Sulfid kommen (Scheffer & Schachtschabel 1992).

Ob gasförmige Verbindungen wie Methan oder Schwefelwasserstoff in reduzierter Form vom Moor an die Umgebung abgegeben werden, hängt nicht nur von den Umsetzungen in der anaeroben Zone ab. Da die Stoffe, die in der Tiefe reduziert wurden, vor dem Ausgasen eventuell noch einmal aerobe Bereiche passieren, kann es sein, daß sie vor einer Abgabe in die Atmosphäre wieder oxidiert werden (s. 2.3.2).

2.1.4 Stoffabbauraten

Während der Abbau von Sphagnum in Regenmooren insgesamt relativ gut untersucht ist (s. z.B. Clymo 1965, Johnson & Damman 1991, Lütt 1992, Belyea 1996), gibt es dagegen über den Abbau von totem Pflanzenmaterial in Niedermooren wenige Untersuchungen. Meist wurde lediglich der Abbau der oberirdischen Streu höherer Pflanzen untersucht (Mason & Bryant 1975, Coulson & Butterfield 1978, Szumigalski & Bayley 1995, Aerts & de Caluwe 1997a und b). Oberirdische Organe höherer Pflanzen sind, von Pollen, Früchten und Samen abgesehen, jedoch selten als erkennbare Reste im Torf erhalten (Grosse-Brauckmann 1990).

Gerade in Niedermooren ist die Kenntnis des Abbaus unterirdischer Pflanzenorgane sehr wichtig, da diese neben den Moosen wesentlich an der Torfbildung beteiligt sind (Dickinson 1983). Wurzeln und Rhizome wachsen in bereits vorhandenen Torf hinein und verdrängen diesen damit teilweise („Verdrängungstorf“-Bildung). Moose sterben hingegen an der Basis ab, während sie an der Spitze weiterwachsen. Sie tragen zur Torfbildung also unmittelbar an der Untergrenze der lebenden Moosschicht bei.

Wichtige Auswirkungen hat diese Kombination von zwei Arten der Torfbildung auf die Frage der Altersbestimmung von Torfen, da die in bereits vor-

handenen Torf einwachsenden Wurzeln und Rhizome um mehrere hundert Jahre jünger sind als der durch sie „verdrängte“ Torf (Saarnisto 1988).

Oberirdische Streu wird relativ schnell abgebaut. *Phragmites communis*- und *Typha angustifolia*-Blätter waren bereits nach 16 bzw. 29 Monaten vollständig abgebaut (Mason & Bryant 1975). Blätter von *Carex*-Arten weisen oft geringere Abbauraten auf: Bei Exposition an der Bodenoberfläche zeigten *Carex acutiformis*-Blätter in 24 Monaten einen Trockenmasseverlust von etwa 50 % und *Carex rostrata*-Blätter von etwa 60 % (Aerts & De Caluwe 1997a).

Unter Abbauraten wird hier ein Masseverlust je Zeiteinheit in Bezug auf die ursprüngliche Masse verstanden.

Die Wechselwirkung exogener und endogener Faktoren beim Stoffabbau sei an einem Beispiel des Abbaus von *Carex rostrata*-Blättern in einem schwedischen Niedermoor erläutert. Innerhalb eines Moores wurden Blätter von *Carex rostrata* an zwei unterschiedlichen Standorten gesammelt und sowohl am Herkunftsort als auch am jeweils anderen Standort exponiert (Tab. 2-1 a, c). Entsprechend der unterschiedlichen Nährstoffsituation an den zwei Standorten unterschied sich auch der Nährstoffgehalt des Ausgangsmaterials (Tab. 2-1 b). Das nährstoffreichere Material des Quellbereiches zeigte signifikant höhere Abbauraten als die Blätter aus dem schwach sauren Bereich. Aber auch der Expositionsort spielte eine Rolle, so daß das Material jeweils im Quellbereich stärker abgebaut wurde als im schwach sauren Bereich. Außer auf die Nährstoffsituation führt Ohlson (1987) dies auf die reiche Invertebratenfauna an dem Quellmoorstandort zurück. Zu entsprechenden Ergebnissen in Regenmooren gelangten Johnson & Damman (1991) sowie Belyea (1996) in Versuchen über den Einfluß des Mikrostandortes (Bult, Rasen oder Schlenke) auf den Abbau der Bultarten *Sphagnum fuscum* bzw. *S. capillifolium* sowie der Schlenkenart *S. cuspidatum*.

Die bisher genannten Ergebnisse wurden mit der Litterbag-Methode erzielt. Bei dieser Methode wird totes Pflanzenmaterial in Gasesäckchen eingenäht und dann an der Torfoberfläche (bei oberirdischem Material) oder auch im Torf (bei unterirdischem Material) ausgebracht. Nach einer bestimmten Zeit werden die Säckchen wieder entnommen, das Material von anhaftendem Schmutz sowie von eingewachsenen Wurzeln befreit und der Trockenmasseverlust bestimmt.

Wie bereits erwähnt, wurde der Abbau von unterirdischen Organen höherer Pflanzen nur selten untersucht. Dies liegt zum einen daran, daß die Gewinnung von Wurzel- und Rhizommateriale viel zeitaufwendiger ist als die Ernte oberirdischer Materials. Zum anderen spielt das Problem der in die Litterbags einwachsenden Wurzeln eine Rolle. Nach der Entnahme der Litterbags aus dem Boden müssen die während der Zeit im Boden neu in die Säckchen eingewachsenen Wurzeln von dem ursprünglich eingebrachten Material getrennt

Tab. 2-1: Nährelementgehalt zu Beginn der Exposition auf der Mooroberfläche (b) und Trockenmasseverlust von *Carex rostrata*-Blättern nach einem Jahr (d). Mittelwerte aus 20 Proben (nach Ohlson 1987).

a) Herkunftsort des Blattmaterials	b) N, P, K (% Trockenmasse)			c) Ausbringungsort des Blattmaterials	d) Trockenmasseverlust (%)
	N	P	K		
Quellbereich (pH 7,3–7,5)	1,80	0,35	0,83	Quellbereich	81
				Schwach saurer Bereich	57
Schwach saurer Bereich (pH 5,8–6,1)	1,41	0,09	0,64	Quellbereich	64
				Schwach saurer Bereich	44

werden. Bei kurzer Verweilzeit im Boden gelingt dies sehr gut, bei längeren Zeiträumen besteht jedoch die Gefahr, daß die eingewachsenen Wurzeln bereits wieder abgestorben und damit nur noch sehr schwer vom ursprünglichen Material zu unterscheiden sind. Versuche auf wiedervernässten Niedermoorstandorten wiesen jedoch eine geringe Einwachsrate von Wurzeln auf (Hartmann 1995).

Bei Untersuchungen zum Wurzelabbau auf wiedervernässten Versuchsflächen in der Friedländer Großen Wiese (Mecklenburg-Vorpommern) zeigten *Typha latifolia*, *Phalaris arundinacea* und *Carex riparia* unabhängig von der Feuchtestufe eine Abbaurrate von 37–46 % in drei Monaten (Abb. 2-1). *Phragmites australis* wies hingegen mit 30 % in der feuchten bzw. 15 % in der nassen Versuchsvariante einen deutlich niedrigeren Trockenmasseverlust auf (Hartmann 1995). Gerade bei dieser Art, die in starkem Maße an der Torfbildung beteiligt sein kann, bewirkte die Anhebung des Grundwasserspiegels also eine deutliche Herabsetzung der Abbaugeschwindigkeit (s. auch 9.2.5). Interessanterweise sind die Artunterschiede im Trockenmasseverlust nicht mit dem Stickstoffgehalt der Wurzeln korreliert. Vielmehr wiesen die Wurzeln von *P. australis* mit $13,3 \text{ mg N g}^{-1} \text{ TM}$ höhere Werte auf als diejenigen von *C. riparia* ($6,5 \text{ mg N g}^{-1} \text{ TM}$), *T. latifolia* ($7,6 \text{ mg N g}^{-1} \text{ TM}$) und *P. arundinacea* ($9,7 \text{ mg N g}^{-1} \text{ TM}$) (Hartmann 1995). Wichtig für die artbedingten Unterschiede sind hingegen andere Eigenschaften, wie z. B. der Anteil der Cellulose, der mit Lignin inkrustiert ist, wodurch der Abbau erschwert wird (Benner et al. 1985, Fog 1988).

Im Gegensatz zu den oberirdischen Organen, die an der Luft absterben und zunächst dem schnelleren aeroben Abbau unterliegen, wachsen Wurzeln in einer Tiefe, die größtenteils anaerob ist. Die aeroben Bereiche beschränken sich auf die unmittelbare Umgebung lebender Wurzeln. Nach dem Absterben der Wurzeln wird dieser Sauerstoff durch die beginnenden Abbauvorgänge schnell aufgebraucht. Dadurch sind in der Tiefe, in der die Wurzeln absterben, bereits weniger Mikroorganismen zu finden als im oberen, aeroben Bereich (Dickinson 1983).

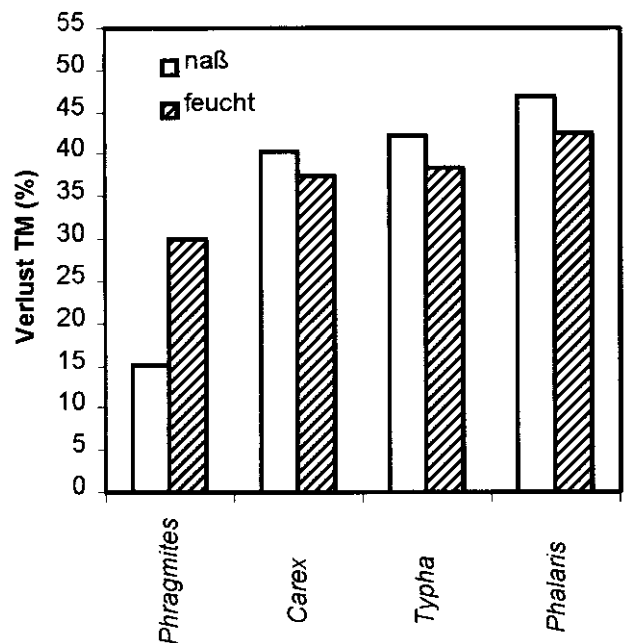


Abb. 2-1: Trockenmasseverlust von Wurzeln nach dreimonatiger Exposition in wiedervernässtem Niedermoorboden in 40 cm Tiefe. *Phragmites* = *P. australis*, *Carex* = *C. riparia*, *Typha* = *T. latifolia*, *Phalaris* = *P. arundinacea*, feucht: Grundwasserstand 28–75 cm unter Flur, naß: Grundwasserstand 16–29 cm unter Flur, n = 8–10 (nach Hartmann 1995).

2.1.5 Resümee: Wie entsteht Torf?

Torf entsteht nach dem oben Gesagten, wenn der Abbau von Pflanzenresten gehemmt ist. Wichtig ist es dabei festzuhalten, daß die bei der Torfbildung ablaufenden biochemischen Prozesse die gleichen sind wie beim Stoffabbau in Mineralböden. Der Unterschied liegt im Anteil, den diese Prozesse aufweisen, und in der Geschwindigkeit, mit der sie in beiden Ökosystemen ablaufen (Abb. 2-2):

1. In wachsenden Mooren gibt es im Vergleich zu Mineralböden sehr wenige Bodentiere, dadurch

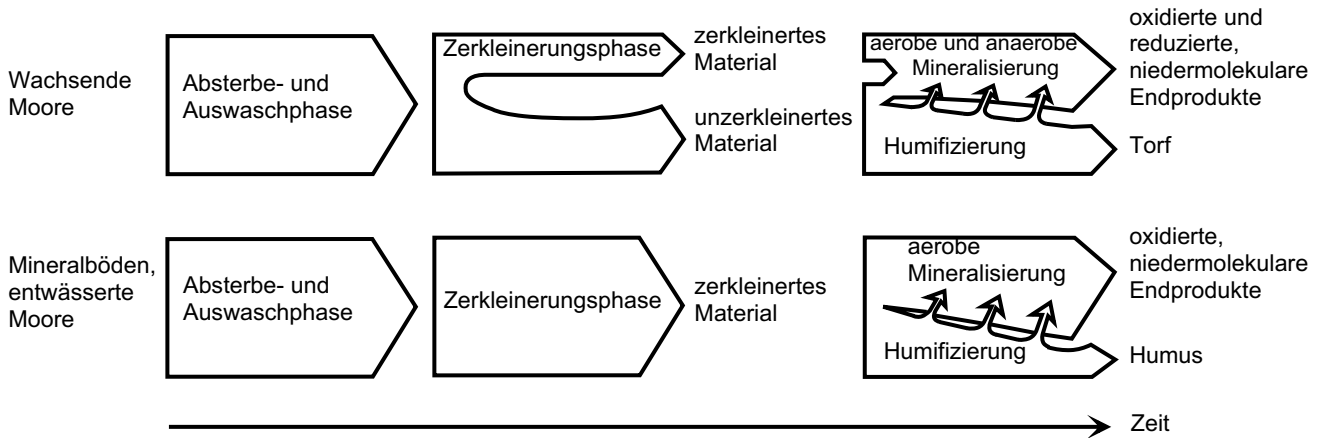


Abb. 2-2: Vergleichendes Schema der Bedeutung der einzelnen Abbauphasen in wachsenden Mooren und Mineralböden bzw. entwässerten Mooren. Die Dicke der Pfeile gibt den relativen Anteil der einzelnen Prozesse an.

spielt die Zerkleinerungsphase fast keine Rolle und es wird nur ein kleiner Anteil des toten Pflanzenmaterials zerkleinert. Dies ermöglicht den Erhalt von Pflanzenmakroresten im Torf.

- Der untere Bereich des Torfes ist in wachsenden Mooren immer wassergesättigt, dadurch entstehen anaerobe Bedingungen. Dies hat zur Folge, daß der Anteil des toten Pflanzenmaterials, der vollständig zu niedermolekularen Verbindungen mineralisiert wird, in wachsenden Mooren viel geringer ist als in Mineralböden.

Dennoch sind die toten Pflanzenreste im oberen, aeroben Bereich des Moores Mineralisierungs- und Humifizierungsvorgängen ausgesetzt, die durch belüftende Wasserstandsbewegungen oder O_2 -Austritt aus Pflanzenwurzeln ermöglicht sind. Durch Aufwachsen weiterer Torflagen gelangen die Pflanzenreste aus der stärker mit Leben erfüllten Zone in deren überwiegend anaeroben Untergrund, wo sie weitestgehend konserviert bleiben.

Die Anteile der Abbauprozesse in entwässerten Mooren entsprechen denen in Mineralböden (Abb. 2-2), d.h. in den entwässerten Torfschichten treten aerobe Abbaubedingungen auf, und die Zerkleinerung durch Tiere spielt eine größere Rolle (s. 2.4.3).

Die Vegetation der Moore ist entscheidend am Torfbildungsprozeß beteiligt. Sie liefert das Ausgangsmaterial für den Abbau und bestimmt damit die Menge und die chemische Zusammensetzung, also die „Qualität“ des Materials, aus dem Torf gebildet wird. Außerdem beeinflussen Pflanzen die Standortbedingungen durch die Abgabe von Stoffen. Wichtig ist hier Sauerstoff, der durch das Aerenchym (Luftspeicher- und -austauschgewebe) von Feuchtgebietspflanzen in den Boden transportiert und teilweise von den Wurzeln abgegeben wird (s. 2.3.2 und 2.4.2). Eine wichtige Rolle spielt auch der Ionenaus-

tausch an *Sphagnum*-Blättchen. Der Austausch von Wasserstoff-Ionen gegen Metall-Kationen führt zu einem Absinken des pH-Wertes im Moorwasser.

Es gibt kaum „obligat torfbildende Pflanzenarten“ in dem Sinne, daß unter natürlichen Bedingungen aus ihrem abgestorbenen Material in jedem Fall Torf entsteht. Notwendige Bedingung für Torfbildung sind spezifische, nasse und anaerobe Umweltbedingungen (s. 2.2), die den vollständigen Abbau der Phytomasse hemmen. Nur bei Pflanzen, deren Ansiedlung durch positive Rückkopplungen ihre Umwelt so beeinflußt, daß „torfbildende Standortbedingungen“ (s. 5.2) entstehen (z.B. bei wenigen *Sphagnum*-Arten, Joosten 1993), kann daher in dem genannten Sinn von torfbildenden Pflanzen gesprochen werden. Diese Pflanzen können sogar „moorbildend“ genannt werden. Die meisten „torfbildenden Arten“ sind hingegen als „fakultativ torfbildend“ einzustufen, in dem Sinne, daß sie Torf bilden, wenn sie unter torfbildenden Standortbedingungen wachsen. Wachsen sie jedoch an trockneren Standorten, bildet sich aus ihrem abgestorbenen Gewebe kein Torf. Als Beispiel sei hier *Phragmites australis* genannt.

2.1.6 Torfakkumulationsraten

Obwohl der Abbau des toten pflanzlichen Materials in wachsenden Mooren gehemmt ist, wird auch dort ein Großteil des durch die Primärproduktion angelieferten Materials mineralisiert. Nach Schätzungen von Päivänen & Vasander (1994) bleiben nur 2–16% der Primärproduktion im Torf erhalten. Da die Abbauraten sehr unterschiedlich sein können, liefern Daten über die Primärproduktion der Moorvegetation allein also keine Aussagen über die tatsächliche Torfakkumulation.

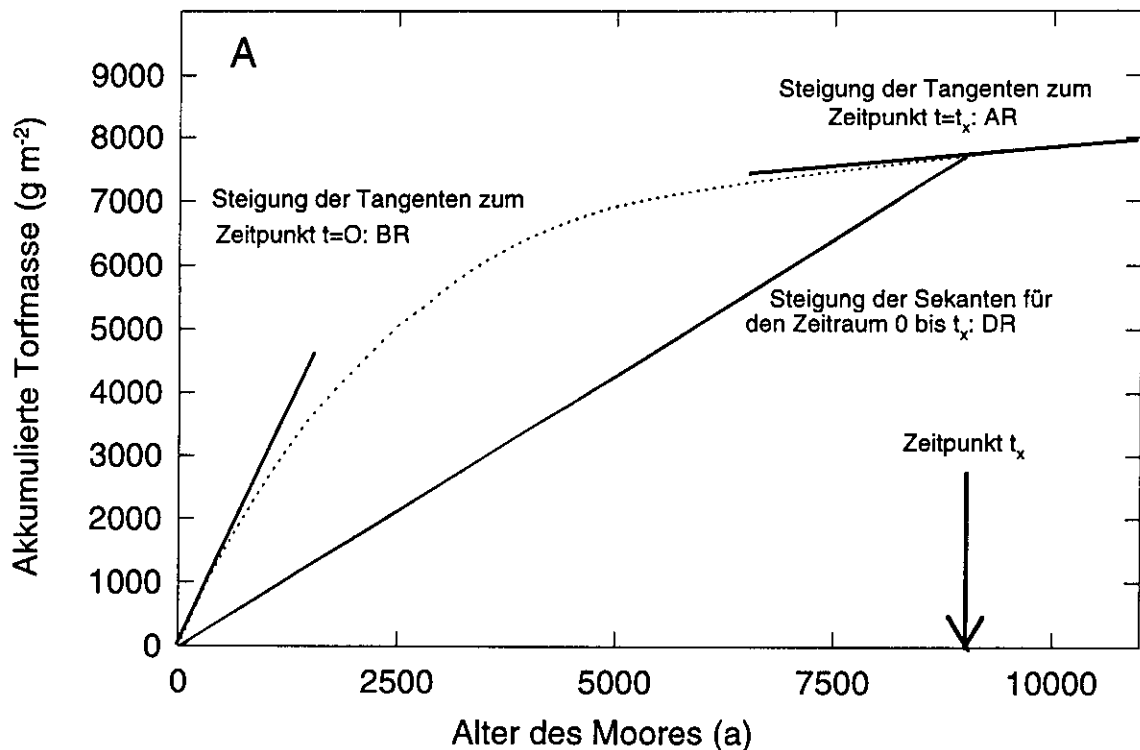


Abb. 2-3: Darstellung der Beziehung zwischen dem Alter eines Moores und der bis zu diesem Zeitpunkt akkumulierten Torfmenge. BR, DR und AR: Unterschiedliche Torfakkumulationsraten, Erläuterung im Text (nach Clymo et al. 1998).

Die Torfbildung je Zeiteinheit, die **Torfakkumulationsrate**, läßt sich erstens rückwirkend über eine Datierung von Torfprofilen abschätzen oder zweitens aktuell über Messungen des Stoffaustausches mit der Umgebung eines Moores (Gasaustausch s. 2.3.2, Austausch von im Wasser gelösten Stoffen).

Aus einem datierten Torfprofil ist es mit Hilfe der Trockenrohddichte der einzelnen Schichten möglich, die **durchschnittliche Torfakkumulationsrate über einen langen Zeitraum (DR)** abzuschätzen, indem man die in einer bestimmten Zeit akkumulierte Trockenmasse durch das Alter dieser Torfschicht teilt (Gleichung 2-8). Zur Altersdatierung von Torfen vgl. z.B. Lang (1994).

$$DR = d \cdot \rho_D / (\text{Alter}_{\text{unten}} - \text{Alter}_{\text{oben}}) \quad (2-8)$$

mit:

DR = durchschnittliche Torfakkumulationsrate
[g m⁻² a⁻¹]

d = Dicke der Torfschicht [mm]

ρ_D = Trockenrohddichte [g l⁻¹]

Alter_{unten} = Alter des unteren Endes der betrachteten Torfsäule

Alter_{oben} = Alter des oberen Endes der betrachteten Torfsäule

Diese durchschnittliche Akkumulationsrate resultiert aus der Differenz zwischen der Anlieferung von neuem Material und dem Abbau des bereits akkumulierten Torfes. Wie in 2.1.5 erwähnt, sinkt die Abbaurrate in der anaeroben Zone eines Profils stark

ab, so daß man zunächst versucht sein könnte, diese geringe Rate im Vergleich zum Abbau in der aeroben Zone zu vernachlässigen und als Torfakkumulationsrate pro Jahr die Stoffmenge zu betrachten, die nach dem aeroben Abbau in die anaerobe Zone gelangt. Man erhält dadurch die jährliche **Brutto-Torfproduktion (BR)**, die nur für das Anfangsstadium einer Moorentwicklung der Torfakkumulationsrate entspricht.

Da bei älteren Mooren Zeiträume von Hunderten bis Tausenden von Jahren betrachtet werden, gewinnt auch die fortlaufende Zersetzung in den tieferen Schichten des Moores an Bedeutung. Es muß daher von der Bruttorete noch der pro Jahr durch anaerobe Umsetzungen abgebaute Torf in den tieferen Schichten des Moores abgezogen werden. Dadurch erhält man die **aktuelle Torfakkumulationsrate (AR)**. Bei einer Auftragung der akkumulierten Torfmasse gegen die Zeit ist es möglich, diese aus der Steigung der Tangenten der Kurve zu berechnen (Abb. 2-3: AR).

Auch die beiden oben genannten Raten können aus der Beziehung zwischen der akkumulierten Torfmasse und der Zeit abgeleitet werden. Die durchschnittliche Torfakkumulationsrate über einen langen Zeitraum erhält man aus der Steigung der Sekanten (Abb. 2-3: DR). Der in Abb. 2-3 als Beispiel dargestellte konvexe Kurvenverlauf entsteht, wenn

die oben genannte **Brutto-Torfproduktionsrate** in dem betrachteten Zeitraum der Moorentwicklung konstant ist. Sie läßt sich dann aus der Steigung der Tangenten zum Zeitpunkt Null ablesen (Abb. 2-3: **BR**). Clymo (1996) weist im Zusammenhang mit der Kohlenstoffakkumulation in Mooren darauf hin, daß bei konstanter Produktionsrate BR gilt:

$$BR > DR > AR \quad (2-9)$$

Der durchschnittlichen Torfakkumulationsrate über einen langen Zeitraum (DR) und der aktuellen Torfakkumulationsrate (AR) entsprechende Raten für die Akkumulation von Kohlenstoff werden in der Literatur als **LORCA** (Englisch: **l**ong-term **a**pparent (or average) **r**ate of **c**arbon **a**ccumulation) und als **ARCA** (Englisch: **a**ctual net rate of **c**arbon **a**ccumulation) bezeichnet (Turunen & Tolonen 1996). Clymo (1996) bezeichnet letztere als **TRACA** (Englisch: **t** rue rate of **c**arbon **a**ccumulation).

Interessiert nicht die Akkumulationsrate von Torf, sondern eine Ökosystembilanz einzelner Elemente (wie Kohlenstoff, Stickstoff oder Phosphor), bietet sich eine Messung des Stoffaustausches zwischen dem Moor und seiner Umgebung an (Clymo 1996). Um z.B. eine Kohlenstoffbilanz aufzustellen, müssen dafür die Größen

- CO₂-Festlegung durch die Photosynthese,
- CO₂-Freisetzung durch Atmung der oberirdischen Pflanzenteile,
- CO₂-Freisetzung aus dem Boden durch Atmung der Wurzeln, der Bodentiere und der Bodenmikroorganismen
- CH₄-Freisetzung aus dem Boden und
- C-Austrag mit Grundwasser und Oberflächenabfluß

in hinreichender Genauigkeit erfaßt werden (Alm et al. 1997, vgl. auch 2.3.2). Da hierbei auch die Emissionen aus dem Stoffabbau im bereits vorhandenen Torf erfaßt werden, erhält man die aktuelle Torfakkumulationsrate AR.

Für eine **Modellierung der Abbauprozesse** ist es sinnvoll, den oberen aeroben Bereich des Profils vom darunter liegenden anaeroben Bereich abzutrennen. Beide unterscheiden sich z.B. stark in der Geschwindigkeit von Abbauvorgängen.

Die Veränderung der Trockenmasse **M** im aeroben Bereich ist eine Funktion des Eintrags aus der Primärproduktion **p_a** und der Austragsgrößen Weiterlieferung in den anaeroben Bereich **p_k** sowie Zersetzung im aeroben Bereich. Diese drei Vorgänge werden hier zunächst einzeln betrachtet:

- (1) Wachstum und Absterben der Pflanzen und dadurch Anlieferung von totem Pflanzenmaterial. Unter Annahme einer konstanten Produktion mit Rate **p_a** gilt:

$$dM/dt = p_a \quad (2-10)$$

- (2) Zersetzung von (ober- und unterirdischer) Streu. Die Zersetzungsgeschwindigkeit **dM/dt** hängt linear von der vorhandenen Menge **M** ab, der Proportionalitätsfaktor ist die Abbaurrate **a** im aeroben Bereich:

$$dM/dt = -aM \quad (2-11)$$

- (3) Übergang von Material in den anaeroben Bereich. Genauso wie bei der Anlieferung von totem Pflanzenmaterial wird hier ein konstanter Wert **p_k** angesetzt:

$$dM/dt = -p_k \quad (2-12)$$

Diese drei Vorgänge laufen gleichzeitig ab, und so erhält man als Gesamtbilanz für den aeroben Bereich eine Gleichung (vgl. Clymo 1978, 1984):

$$dM/dt = p_a - aM - p_k \quad (2-13)$$

Torfwachstum findet erst statt, wenn die organische Substanz nach einer ersten Abbauphase unter aeroben Bedingungen in den anaeroben Bereich gelangt und dadurch der vollständige Abbau unterbunden wird (s. 2.1.5). Die Nachlieferungsrate ist **p_k** in (2-12). Sie entspricht der oben genannten Brutto-Torfproduktionsrate BR. Ersetzt man **p_a** in (2-10) durch **p_k** und **a** in (2-11) durch **k** (Abbaurrate unter anaeroben Bedingungen), so ergibt sich für die Zunahme der organischen Substanz im anaeroben Bereich folgender Zusammenhang:

$$dM/dt = p_k - kM \quad (2-14)$$

Unter der Annahme, daß die Abbaurrate unter anaeroben Bedingungen **k** und **p_k** über das ganze Profil (und das bedeutet auch, über die ganze Zeit, seit der betreffende Torf abgelagert wurde) konstant sind, liefert die Integration von (2-14) die folgende Lösung:

$$M(t) = (p_k/k)(1 - e^{-kt}) \quad (2-15)$$

Diese Kurve steigt konstant an, der Wert nähert sich für große Zeiträume asymptotisch dem Wert **p_k/k**. Dieses Ergebnis von Clymo (1984) wird häufig zitiert als Nachweis für das begrenzte Höhenwachstum von *Sphagnum*-Mooren, ohne auf die Voraussetzung der konstanten Abbaurrate **k** hinzuweisen. Verschiedene Autoren nennen auch noch andere Gründe für ein begrenztes Höhenwachstum von Mooren (z.B. Glaser 1992, Joosten 1993).

Clymo (1992) erweiterte das Modell, so daß sich die Abbaurrate **k** mit zunehmendem Alter der Torfe verändert. Bei den dort genannten Beispielen hängt die anaerobe Abbaurrate davon ab, wieviel von der ursprünglichen Substanzmenge **T₀** zum Zeitpunkt **t**