

Wasser- und Stoffhaushalt in Mooren – Bedeutung für Treibhausgasflüsse und Gewässerqualität

Klaus-Holger Knorr

Zusammenfassung

Moore zeichnen sich durch ihren ganz eigenen Wasser- und Stoffhaushalt aus. Je nach Moorgenese finden sich Nieder- und Hochmoore mit ihrer spezifischen Struktur und Hydrologie in der Landschaft. Hochmoore sind natürlicherweise sauer, nährstoffarm und regenwassergespeist. Der Chemismus und die Hydrologie von Niedermooren ist variabel, je nach Grundwasserbeschaffenheit und -konnektivität. Während Moore in natürlichem Zustand zu einer hydrologischen Selbstregulierung befähigt sind, geht diese Funktion durch Degradierung meist weitgehend verloren und die Renaturierung der Standorte ist erschwert. Die durch den Klimawandel verstärkte Trockenheit im Sommer verschärft diese Problematik. Bei der Renaturierung ist daher eine großräumige hydrologische Betrachtung angebracht und Wasserverluste müssen durch eine genaue Kenntnis der Hydrologie minimiert werden. Nur eine möglichst vollständig wiederhergestellte Wassersättigung führt zur Erhaltung der Kohlenstoffspeicherfunktion; unter idealen Bedingungen und günstiger Vegetationsentwicklung kann sogar wieder eine Kohlenstoffsенke entstehen. Erschwerend für die Renaturierung kommt hinzu, dass Nutzung und Degradierung oft eine Anreicherung von Nährstoffen im Oberboden dieser sonst nährstoffarmen Systeme bewirken. Die Anreicherung von Nähr- und Schadelementen in Mooren kann auch zu erhöhten Stoffausträgen bei der Wiedervernässung oder bei Regenereignissen führen, vor allem bei hydrologisch gut angebundenen Niedermooren an Gewässern.

Summary

Ecohydrology and biogeochemistry of peatlands – implications for greenhouse gas fluxes and water quality

Peatlands are characterized by their specific ecohydrology and biogeochemistry. Depending on their genesis, minerotrophic fens or ombrotrophic bogs with their specific structure and hydrology can be found in the landscape. Bogs are typically acidic, nutrient-poor and rainwater-fed. Fens are variable and depend on groundwater chemistry and connectivity. While pristine peatlands are capable of a hydrological self-regulation, this function is mostly lost upon degradation and this hampers restoration efforts. Drought events arising from ongoing climatic change further exacerbate the problems of rewetting. Therefore, a large-scale hydrological restoration beyond the individual site is necessary, and water losses must be avoided. Only a fully restored hydrology and peat water saturation can secure the carbon stock stored in a peatland. Ideal hydrological conditions and suitable vegetation may even restore a carbon sink function. An enrichment of nutritional or even harmful elements due to degradation and land use may further negatively affect restoration of peatlands typically low in nutrients. Such enrichment may also lead to increase leaching upon rewetting and rain events, in particular from riparian fens and wetlands with high connectivity to the streams.

✉ Prof. Dr. Klaus-Holger Knorr, Universität Münster, Institut für Landschaftsökologie, Heisenbergstraße 2, 48149 Münster; kh.knorr@uni-muenster.de

Einführung

Nach Succow (1988) werden Moore zum einen nach ihren hydrologischen Bildungsbedingungen und dem Aufbau des Moorkörpers in acht hydrogenetische Moortypen eingeteilt. Zu Mooren mit horizontaler Oberfläche gehören dabei Versumpfungs-, Verlandungs-, Überflutungs- und Kesselmoore, zu solchen mit geneigter Oberfläche Quell-, Hang- und Durchströmungsmoore sowie Regenmoore. Mit Ausnahme von Regenmooren, die ombrogen, d. h. ausschließlich über den Niederschlag gespeist werden, werden alle anderen Moortypen geogen, d. h. über das Grundwasser gespeist (Abb. 1). Diese sog. Niedermoore haben sehr variable Eigenschaften und sind deutlich vielfältiger als die ombrogenen Hochmoore, da das Grundwasser sehr unterschiedliche Qualitäten haben kann (z. B. basenreich oder -arm, nährstoffreich oder -arm). Entsprechend werden Moore zum anderen nach Nährstoffgehalten und Säure-Basen-Verhältnissen des speisenden Wassers bzw. der resultierenden Torfe in fünf ökologische Moortypen (z. B. nährstoffarm-sauer) eingeteilt (Tab. 1). Diese Klassifizierung gibt wichtige Anhaltspunkte, wenn es um Stoffkreisläufe und den Ein- und Austrag sowie die Anreicherung von chemischen Elementen geht.

In Deutschland lassen sich grob vier Moorregionen unterscheiden (vgl. Tanneberger 2024 in diesem Band, Abb. 6, S. 20): Das nordwestdeutsche Tiefland (Hoch- und Niedermoore), das nordostdeutsche Tiefland (v. a. Niedermoore), die Mittelgebirge (v. a. Niedermoore oder kleinflächige Hochmoore) und das Alpenvorland (Nieder- und Hochmoore im Verhältnis von ca. 70 : 30). Generell finden sich Moore dort, wo ein Wasserüberschuss in der Landschaft gegeben ist, entweder durch hohen Niederschlag, wenig Verdunstung, geringen Abfluss oder durch orographische Niederschläge an den Westflanken der Gebirge.

Moortypen und Moorgenese

Die Abb. 1 zeigt stark schematisiert einen Vergleich von Hoch- und Niedermooren (Joosten 2008):

- Ein Hochmoor (Regenmoor, engl. *bog*) ist dem Grundwasser „entwachsen“ und wird ausschließlich vom Niederschlag gespeist.

Hochmoore sind daher nährstoffarm und sauer. Es dominieren Torfmoose (*Sphagnum*) und Zwergsträucher.

- Ein Niedermoor (engl. *fen*) hat Grundwasseranschluss. Sein Nährstoffzustand und Basenreichtum hängt vom Grundwasser am Standort ab, entsprechend sind Niedermoore sauer bis neutral-karbonatisch. Je nach Chemismus dominieren z. B. Torfmoose (sauer), Seggen (wechselnde Wasserstände), Binsen (Nährstoffanreicherung), Braunmoose (neutral-karbonatisch), Sträucher (meist sauer, aber auch neutral bis karbonatisch) etc. Sehr nährstoffarme, saure Niedermoore (beispielsweise auf Sanden oder in granitischen Einzugsgebieten) können in ihrer Vegetationszusammensetzung Hochmooren ähneln.

Die Moorgenese über Terrestrialisierung und Versumpfung ist je nach Moortyp verschieden (Gorham 1957, Luthardt et al. 2015). Niedermoore bilden sich vor allem in Senken, Quellmoore und Hangmoore meist in Mittelgebirgslagen am Fuße von Berghängen, Verlandungsmoore häufig in kleineren Gewässern und Überflutungsmoore (Auenmoore) oder Durchströmungsmoore entlang von Fließgewässern. Entwächst ein Moor dem lokalen Grundwasser, kann es zu einem regenwassergespeisten Hochmoor aufwachsen. Der Moorwasserspiegel wird dann ausschließlich vom Regenwasser gespeist, das Wasser bewegt sich lateral sowie vertikal und damit schwindet der Einfluss des lokalen Grundwassers. Vor allem in Nordwestdeutschland finden wir aber auch sehr viele „wurzelechte“ Hochmoore (Versumpfungsmoore), die ohne vorherige, ausgeprägte Niedermoorbildung entstanden sind. Sie entwickeln sich direkt auf sandigem und nährstoffarmem Untergrund über Paludifizierung (Versumpfung) und gehen aufgrund der Nährstoffarmut schnell in die Hochmoorbildung über. Die Niedermoorunterlage kann dort – wenn vorhanden – sehr geringmächtig sein. Wird auf solchen Standorten, wie in Nordwestdeutschland häufig, abgetorft, bleibt nur noch die (in Niedersachsen und Schleswig-Holstein vorgeschriebene) Resttorfmächtigkeit von 50 cm Hochmoortorf übrig, darunter liegt direkt die mineralische Unterlage. Eine Renaturierung solcher Standorte kann durch die geringe Resttorfaufgabe und das fehlende hydrologische Puffervermögen einer Niedermoorunterlage sehr schwierig sein.

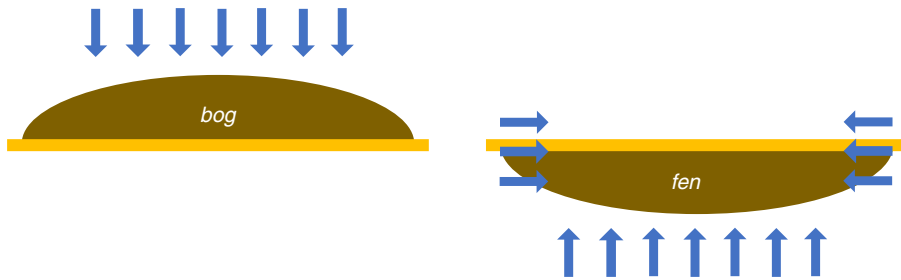


Abb. 1. Schematische Darstellung eines Hochmoores (engl. *bog*) und eines Niedermoors (engl. *fen*); blaue Pfeile: Wasserflüsse. – Nach Joosten (2008).

Nach den ökologischen Moortypen sind Hochmoore unter den nährstoffarm-sauren Mooren einzuordnen (Tab. 1). Zu diesem Typ gehören auch bestimmte Niedermoore, z. B. in sandigen oder granitischen Einzugsgebieten mit schwach gepuffertem nährstoffarmem Grundwasser. Nährstoffreiche Moore sind hingegen durchgängig Niedermoore auf nährstoffreichem Grundwasser oder entlang produktiver aquatischer Systeme (Rohrkolben, Erlenbruchwälder, u. a.) (Luthardt et al. 2015).

Struktur und Hydrologie von Hochmooren

Hochmoore sind durch eine uhrglasförmige Aufwölbung gekennzeichnet (Abb. 2). Sie sind dem regionalen Grundwasserspiegel entwachsen und regenwassergespeist (ombrotroph). Der Lagg oder Randsumpf umgibt das Moor und leitet den Abfluss aus dem mineralischen Einzugsgebiet um das Moor herum (Seitenkantenlagg).

Außerdem nimmt der Lagg das lateral aus dem Moor drainierende Wasser auf. Dieses stammt im Hochmoor fast ausschließlich aus dem Akrotelm, dem Torfbildungshorizont von ca. 20–30 cm Mächtigkeit und einer sehr hohen Durchlässigkeit. Der darunterliegende, mit Wasser gesättigte Katotelm (Torferhaltungshorizont), zeichnet sich dagegen durch eine geringe Durchlässigkeit aus.

Durch diese Eigenschaften von Akrotelm und Katotelm haben die Hochmoore die Fähigkeit zur hydrologischen Selbstregulierung:

- Ein Wasserüberschuss wird im durchlässigen Akrotelm in den Lagg abgeführt. Da die Vegetation sehr häufig eine geringe Wassernutzungseffizienz (engl. *water use efficiency*, WUE) hat, sind hohe Transpirationsraten möglich, die zusätzlich verhindern, dass es im Moor zu nass wird. Des Weiteren kann sich die Mooroberfläche durch Quellung (verstärkt durch eingeschlossene Gasblasen, Rhizome) „heben“.

Tab. 1. Ökologische Moortypen. – Zusammengestellt nach Succow (1988), Joosten (2008; dort nach Succow & Joosten 2001).

Typ	C/N-Verhältnis	pH-Wert (in KCl)	Dominierende Vegetation
Oligotroph (nährstoffarm), sauer („Armmoor“)	33–50	2,0–4,8	Torfmoose (<i>Sphagnum</i>), Wollgras (<i>Eriophorum</i>)
Mesotroph (mäßig nährstoffarm), sauer („Sauer-Zwischenmoor“)	20–33	2,0–4,8	Torfmoose, Kleinseggen
Mesotroph, schwach-sauer, („Basen-Zwischenmoor“)	20–33	4,8–6,4	Braunmoose, Kleinseggen
Mesotroph, kalkhaltig (alkalisch) („Kalk-Zwischenmoor“)	20–33	6,4–8,0	Braunmoose, Riedgräser (Sauergräser)
Eutroph (nährstoffreich) („Reichmoor“)	10–20	3,5–8,0	Großseggen, Riedgräser, Erlenbruchwälder; moosfrei

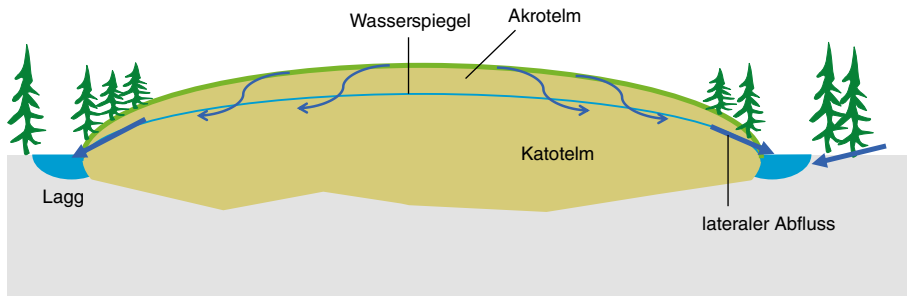


Abb. 2. Schematischer Schnitt durch ein Hochmoor (stark überhöht) mit Gliederung (vereinfacht dargestellt) in den leitfähigen, grobporigen und nicht ständig wassergesättigten Torfbildungshorizont (Akrotelm) und den ständig wassergesättigten, schwach leitfähigen Torferhaltungshorizont (Katotelm). Das Moor ist durch einen Lagg umgeben. Pfeile: hauptsächliche Wasserbewegung im Torfkörper.

- Bei Wassermangel wird das Wasser in dem permanent gesättigten Katotelm aufgrund dessen niedriger Leitfähigkeit gehalten. Die Evapotranspiration geht stark zurück; die grobporige Struktur des darüber liegenden Akrotelms verhindert den kapillaren Aufstieg des Wassers aus dem Katotelm. Die Torfmoose trocknen aus (erkennbar am Verlust der Färbung, daher der Begriff „Bleichmoose“). Zusätzlich wird durch eine „Senkung“ der Mooroberfläche ein zu starker Wassermangel für die Vegetation verhindert.

Das Heben und Senken eines Moorkörpers ist auch unter dem Begriff „Mooratmung“ bekannt.

Die spezifische Verdunstung fällt bei Niedermooren mit sinkendem Wasserstand unter Geländeoberfläche nur graduell ab, da die meist durch Gefäßpflanzen dominierte Vegetation über tief reichende Wurzeln ständig Kontakt zu Wasser hat und die Evapotranspiration auch bei sinkenden Wasserspiegeln noch vergleichsweise hoch bleibt. Bei Hochmooren hingegen bleibt die Evapotranspiration mit sinkendem Wasserstand zunächst relativ unverändert. Hat der Wasserstand die Grenze zum Katotelm erreicht, fällt sie jedoch abrupt und stark ab und nimmt bei weiterem niedrigerem Wasserstand konstant weiter ab (Edom 2001). Dieser Effekt ist im Wesentlichen durch die Eigenschaften der Torfmoose und die geringe Bedeutung der vaskulären Pflanzen bedingt. Da Torfmoose keine Wurzeln besitzen und Wasser nur ähnlich einem Docht über Kapillarkräfte aufnehmen, können sie ab einer kritischen Tiefe des Wasserspiegels am Katotelm kaum mehr Wasser aufnehmen und die Evapotranspiration

nimmt schlagartig ab, die Torfmoose trocknen aus. Wird ein Hochmoor entwässert, gehen die Akrotelm/Katotelm-Interaktionen und damit die wichtigen regulierenden Eigenschaften für die Moorhydrologie verloren und die Hydrologie des Moores wird nachhaltig gestört. So liegt beispielsweise nach Abtorfung meist stark zersetzter Torf des Katotelms an der Oberfläche, der keine hydrologische Pufferwirkung aufweist und die Renaturierung dadurch stark erschwert. An solchen Standorten sind daher oft umfangreiche und langfristig angelegte hydrologische Maßnahmen notwendig (z. B. Steuerung der Be- und Entwässerung, Entfernung von unerwünscht stark transpirierenden Bäumen etc.).

Wird es zu trocken für Moore?

Dass das Klima nicht allein für den Zustand der Moore verantwortlich ist, zeigt ein Vergleich zweier benachbarter wiedervernässter Moore. Im Dalum-Wietmarscher Moor (Niedersachsen) kann durch die Sandfreilegung aufgrund zu tiefer Abtorfung und durch zu tiefe Drainage – durch den darunterliegenden Ortstein hindurch – das infolge des Klimawandels ohnehin knappe Wasser kaum gehalten werden und das Moor trocknet aus (Abb. 3a). Im nur wenige Kilometer entfernten Bargerveen an der niedersächsisch-niederländischen Grenze, in dem das Wasser trotz des heißen Sommers im Moor steht, wurde um den zentralen Teil herum eine große Fläche als hydrologische Pufferzone vernässt, um den Grundwasserspiegel auch im darunterliegenden Aquifer weiträumig anzuheben und in trockenen Monaten abzupuffern; zusätzlich wurde eine

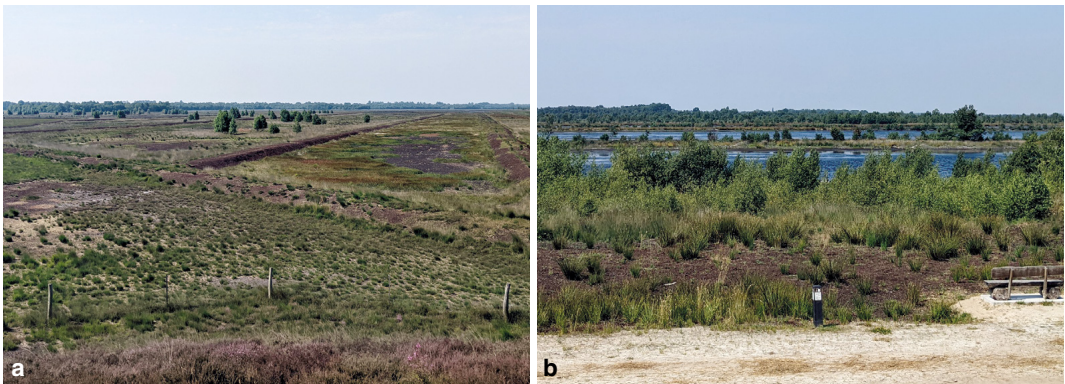


Abb. 3. Dalum-Wietmarscher Moor in Niedersachsen (a) mit Sanddurchragungen (helle Stellen links) sowie das nur wenige Kilometer entfernte Bargerveen an der niedersächsisch-niederländischen Grenze (b). Erläuterungen s. Text. – Fotos: K.-H. Knorr.

Dichtwand in Form eines Damms eingebaut, um den Grundwasserverlust zu begrenzen (Abb. 3b). Dies zeigt, dass bei der Wiedervernässung eine großräumige hydrologische Betrachtung notwendig ist und unter Umständen Pufferzonen und Dichtwände einzuplanen sind. Ebenso muss der darunterliegende Grundwasserleiter in die hydrologische Betrachtung einbezogen werden. Das Ziel sollte ein funktionierender Akrotelm zur Selbstregulierung der Hydrologie im Moor sein. Hierzu ist eine Dominanz der Torfmoose wichtig. Nicht nur in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen ist in der Umgebung von Mooren häufig der Grundwasserleiter durch Drainage der landwirtschaftlichen Flächen stark abgesenkt. Wird die Moorbasis des Hochmoores durch Torfabbau durchstoßen oder zu geringmächtig und wirken die darunterliegenden, in Nordwestdeutschland oft sandigen Schichten nicht mehr stauend, verliert das Moor bei zu geringer Resttorfaufgabe zunehmend Wasser; es läuft ab, ähnlich einer Wanne, aus der der Stöpsel gezogen wird. Auch hier müssen daher unterliegende Aquifere ggf. durch Pufferbereiche oder durch den Einzug von Dichtwänden von dem abgesenkten Grundwasserleiter der Umgebung abgegrenzt und wieder angehoben werden.

Versuche, Torf nachträglich zur Abdichtung aufzubringen, scheitern meist, da solche aufgebrauchten Torfe hydraulische Leitfähigkeiten (k_f -Werte) im Bereich von 10^{-6} bis 10^{-8} m/s haben, während die darunterliegenden, stark zersetzten Torfe deutlich geringere Leitfähigkeiten im Bereich von 10^{-10} bis 10^{-12} m/s haben. Analog

der Gesetzmäßigkeit von Strom kann man die Leitfähigkeit als Kehrwert eines Widerstands betrachten. In dem vorliegenden Beispiel dominiert die geringere Leitfähigkeit (hoher Widerstand) der unteren Schicht, d. h., die aufgebrauchte Torfschicht (vergleichsweise geringer Widerstand) kann das Wasser nicht zusätzlich halten, der Effekt ist daher meist vernachlässigbar.

In unserem Klima ist Wasserüberschuss vor allem auf die Wintermonate beschränkt. Daher ist das Wasser gerade im Frühjahr möglichst lange in der Fläche zu halten. Sehr viele degradierte Moorflächen verlieren einen messbaren Abfluss bereits im März oder April und werden dann zunehmend trocken. Eine durch Gefäßpflanzen mit tiefeichenden Wurzeln dominierte krautige Vegetation oder ein Baumbestand erhöhen zudem die Wasserverluste über Transpiration. Für Hochmoore muss darüber hinaus ausreichend Regenwasser zur Verfügung stehen; eine Renaturierung mit Grundwasser schlägt hier fehl, da sich keine hochmoortypische Vegetation einstellt. Hochmoortypische *Sphagnum*-Arten sind schließlich ebenfalls oft nur noch in Restbeständen vorhanden und erholen sich wegen der Konkurrenz unter ungünstigen Standortbedingungen nur langsam.

Das Wasser in der Fläche zu halten, kann in nivellierten Flächen z. B. über Wälle oder ähnliche Konstruktionen aus Schwarztorf gelingen, die größere Flächen unterschiedlicher Höhe bzw. Neigung separieren. Im besten Fall sind Wälle aus gewachsenem Torf vorhanden, da sie



Abb. 4. Nach industrieller Abtorfung durch Wälle aus Schwarztorf nachhaltig entstandene Vernässung im Rehdeiner Geestmoor, Naturraum Diepholzer Moorniederung. Der Boden/Torf des Damms besteht aus der oberen Vegetationsschicht, im Wesentlichen Bulden des Scheidigen Wollgrases und des Pfeifengrases, dem Bröckeltorf aus der Abtorfungszeit und darunter liegendem gewachsenem Schwarztorf. – Foto © Friedhelm Niemeyer/BUND Diepholzer Moorniederung, 2015.

deutlich weniger leitfähig und stabiler sind als geschüttete Dämme. In höhergelegenen Flächen können auch Abdichtungen eingebracht werden, indem (gewachsener, leitfähiger) Torf ausgehoben wird und der Graben durch stark zersetzten, wenig durchlässigen Torf wieder verfüllt wird. In den Niederlanden wurden Dämme häufig aus Sand gebaut, der an der Stauseite durch Lehm abgedichtet und anschließend mit Torf bedeckt wird. Durch geschickte Anlage der Dämme gilt es auch einen zu langen Überstau zu verhindern, da das Moor durch die Abtorfung und Entwässerung nicht mehr zu einer hydrologischen Selbstregulierung fähig ist (Abb. 4).

Speicherung von Kohlenstoff und Kohlenstoffflüsse im Hochmoor

Eine Wassersättigung ist Voraussetzung, damit Torf durch Sauerstoffabschluss erhalten bleibt. Unter einer mit Torfmoos bewachsenen Fläche sinkt der Sauerstoffgehalt von hoher Sättigung sprunghaft in Höhe des Wasserspiegels (Abb. 5a) ab und der darunterliegende, wassergesättigte Torf im Katotelm ist anoxisch. Die anaerobe Atmung im Katotelm ist stark verlangsamt (u. a. über die Hemmung von Enzymen, über thermodynamische Hemmung, aber auch durch Transport-

limitierung; Freeman et al. 2001, Beer & Blodau 2007, Bonaiuti et al. 2017), was die Zersetzung verhindert. Anoxische Bedingungen fördern zwar die Bildung von Methan, aber die Methanflüsse in naturnahen Mooren sind vergleichsweise gering und werden durch die entsprechen-

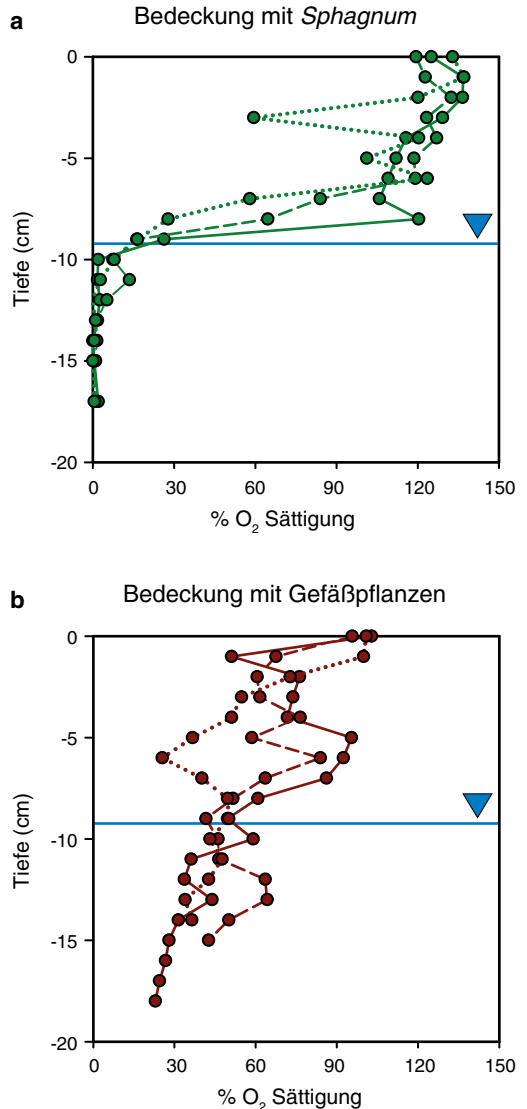


Abb. 5. Sauerstoffsättigung in Abhängigkeit von der Bodentiefe (blaue Linie: Wasserspiegel) in Moorböden am Standort „Seno Skyring“, Patagonien, bei einer Bedeckung mit *Sphagnum* (a) bzw. Gefäßpflanzen (b); Werte von jeweils drei Messungen. – Unveröffentlichte Daten (Werner Borken & Klaus-Holger Knorr, 2019); Standortsbeschreibung: Mathijssen et al. (2019).

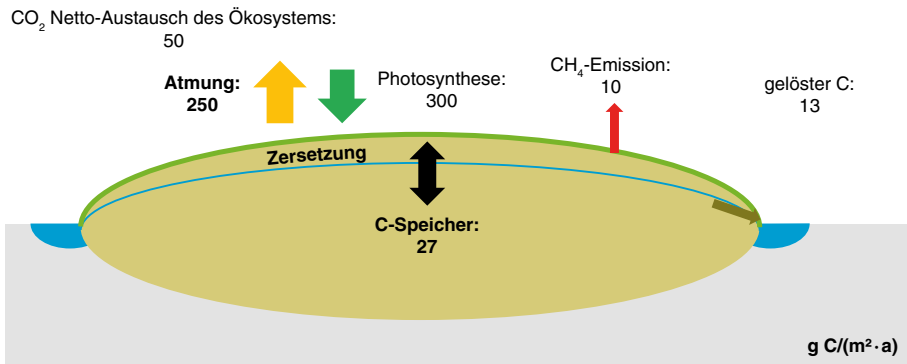


Abb. 6. Schematische Darstellung der Kohlenstoffflüsse durch ein Hochmoor (stark überhöht). – C-Flüsse nach Sagerfors et al. (2008), zusammengestellt in Limpens et al. (2008).

de CO₂-Aufnahme überkompensiert (Abb. 6).

Unter vaskulären Pflanzen mit luftleitenden Geweben (Aerenchym), wie sie häufig in Niedermooren, aber auch in Renaturierungsflächen auftreten, ist hingegen auch unterhalb des Wasserspiegels noch Sauerstoff vorhanden (Abb. 5b). Der Sauerstoffeintrag über Wurzeln und die Leitgewebe fördert eine Beschleunigung des Kohlenstoffkreislaufs und damit auch den Torfabbau. Durch die im Vergleich höhere Kohlenstoffaufnahme von Gefäßpflanzen gegenüber Torfmoosen kann die resultierende Speicherleistung in natürlichen Standorten jedoch ähnlich liegen wie in Torfmoos-dominierten Mooren. Die hohen, entgegengesetzten Flüsse von Kohlenstoffaufnahme und Atmung machen die Bilanz solcher Standorte jedoch anfällig für Störungen und bei degradierten Standorten sind solche mit Gefäßpflanzendominanz meist Netto-Kohlenstoffquellen (Couwenberg et al. 2011).

Bei Messungen mit aus dem Moorboden entnommenen Torfsäulen zeigte sich, dass der Torf ab einer Tiefe von 40–50 cm unter Wassersättigung kaum mehr zum CO₂-Fluss an der Oberfläche beiträgt (Beer & Blodau 2007 und unveröff. Daten, Cristian Estop-Aragonés). Die Atmung im anoxischen Teil des Torfs läuft vielmehr stark verlangsamt über reduktive Prozesse mit NO₃⁻, Fe(III), SO₄²⁻ und organischen Elektronenakzeptoren ab und es kommt zur Methanbildung (Blodau 2011, Gao et al. 2019).

Die Kohlenstoffbilanz in einem Moor wird generell von den Flüssen der Photosynthese und der Atmung dominiert. Die Kohlenstoffspei-

cherfunktion beträgt nur etwa 1/10 dessen, was veratmet oder aufgenommen wird (Abb. 6). Daher ist das System empfindlich und gerät schnell in ein Ungleichgewicht, wenn diese gegenläufigen Flüsse gestört werden. Werden zusätzlich die CH₄-Emission und der Abfluss an gelöstem Kohlenstoff berücksichtigt, verringert sich die Netto-C-Speicherfunktion weiter. Die Abhängigkeit der Kohlenstoffspeicherung vom Wasserspiegel in Mooren ist gut untersucht (Evans et al. 2021). Liegt dieser im Mittel bis ca. 20 cm unter der Oberfläche, fungiert das System als Kohlenstoffseneke, wird weiter entwässert, wird es zur Kohlenstoffquelle. Berücksichtigt man die Methanbildung bei zu hohen Wasserständen, so ergibt sich ein optimaler Bereich des Wasserspiegels von etwa 10–20 cm unter der Oberfläche (vgl. Drösler 2024 in diesem Band).

Anreicherung und Verteilung von Elementen im Hochmoor

Nährstoffe und weitere Elemente

Gerade bei Moorböden, die intensiv genutzt worden sind, kommen bei einer Wiedervernässung weitere Aspekte hinzu. Bei landwirtschaftlicher Nutzung kommt es häufig zur Anreicherung von Nährelementen und starker Torfzersetzung. Das C/N-Verhältnis fällt unter Nutzung auf < 20, während es im darunterliegenden Moorkörper und unter natürlichen Bedingungen bei > 60 (Hochmoor) oder > 30 (Niedermoor) liegt (Wang et al. 2015). Ähnliches gilt für das N/P-Verhältnis, das in einem von uns untersuchten Grünland durch extrem hohe Phosphorvorräte

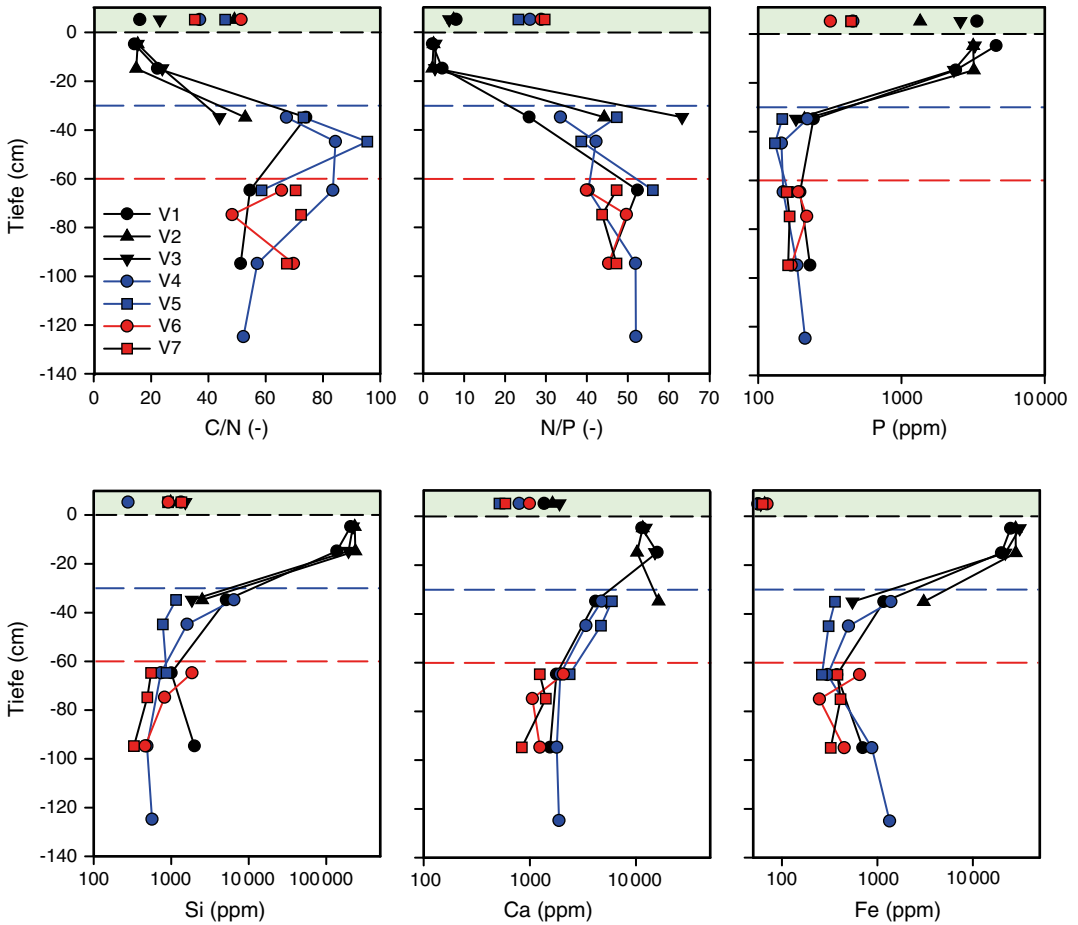


Abb. 7. C/N- und N/P-Verhältnisse sowie Konzentrationen von Phosphor, Silizium, Kalzium und Eisen (jeweils in ppm) im Boden von Grünlandflächen auf ehemaligen Mooren rote Linie: durch landwirtschaftliche Nutzung abgesenkter Wasserspiegel, blaue Linie: ursprünglicher Wasserspiegel; Symbole: schwarz: Kein Oberbodenabtrag als Kontrolle (V1), mit Vernässung (V2) und mit Vernässung und Mahdgutentfernung (V3), blau: 30 cm Oberbodenabtrag ohne (V4) und mit (V5) Aufbringung von Torfmoosen, rot: 60 cm Oberbodenabtrag ohne (V6) und mit (V7) Aufbringung von Torfmoosen. – Unpublizierte Daten (Cristian Estop-Aragonés & Klaus-Holger Knorr, 2022), Standorts- und Versuchsbeschreibung in Huth et al. (2020).

im Oberboden bei Werten < 10 liegt. Wenn Sand aufgetragen und gekalkt wurde, um die Fläche tragfähiger und besser nutzbar zu machen, sind die Silizium- und die Kalziumgehalte ebenfalls in der oberen Bodenschicht erhöht, und durch die Drainage sammelt sich Eisen in Form von Eisenhydroxiden an der Redoxgrenzfläche des abgesenkten Wasserspiegels (Abb. 7). Bei einer Wiedervernässung können hohe Frachten an Phosphat und Ammonium sowie DOC (gelöster organischer Kohlenstoff) freigesetzt werden, da es zu einer reduktiven Auflösung der Eisen-

hydroxide und zur Freisetzung der daran gebundenen Nährstoffe kommt. Um dies zu verhindern, kann in schwierigen Fällen Oberboden vor der Wiedervernässung abgetragen werden. Dieser *Top Soil Removal* bei sehr hohen Nährstoffvorräten im Grünland führt durch den Entzug der Nährstoffe und des labilen Materials der leicht zersetzbaren Grünlandvegetation zu einer wesentlich geringeren Methanfreisetzung bei ca. 30 cm Abtrag (Huth et al. 2020). Allerdings ist die Frage nach dem Verbleib bzw. der Zersetzung des entnommenen Torfs kritisch zu sehen.

Wird das abgetragene Material an anderer Stelle unter Sauerstoffzutritt zersetzt, entfällt letztlich ein großer Teil des günstigen Effekts durch die Freisetzung des Kohlenstoffs des Oberbodens. Sehr günstig hat sich der Oberbodenabtrag für die Vegetation erwiesen. Ein „Zurücksetzen der Fläche auf Null“ durch den Abtrag ermöglicht es den nicht sehr konkurrenzstarken Moorpflanzen, sich auf hydrologisch schwierigen Ausgangsbedingungen und trotz vergleichsweise hoher Nährstoffdeposition durchzusetzen. Eine Zusammenstellung verschiedener Faktoren bei der Ansiedlung von Torfmoosen zur Hochmoorrenaturierung findet sich in Hölzel et al. (2022).

Die Anreicherung von Elementen im Hochmoor stellt – neben den bei starker Anreicherung möglichen Problemen bei der Renaturierung – jedoch auch ein wichtiges Archiv der Moornutzung dar. Im Drebberschen Moor (Niedersachsen) konnte eine deutliche P-Anreicherung in etwa 20 cm Tiefe nachgewiesen werden, was der Oberfläche der damaligen Moorbrandkultur mit Buchweizenanbau entspricht (Abb. 8, blau). Die Analyse der im Torf konservierten pflanzlichen Makrofossilien ergab, dass sich anschließend nach Aufgabe der Nutzung und Vernässung wieder Torf gebildet hat (unveröff. Daten, Mariusz Gałka, 2023). Interessanterweise tendiert das aufwachsende Moor dazu, den Phosphor mit hochzunehmen (Indiz für P-Limitierung), während Elemente wie Aluminium oder Silizium aus Einträgen von mineralischem Material (Stäube, Erosion) mehr oder weniger passiv in der entsprechenden Tiefe erhalten bleiben. Im Moor Bagno Kusowo (Polen, nahe Neustettin) ist eine Phosphoranreicherung auf niedrigem Niveau deutlich in ca. 40 cm Tiefe nachweisbar (Abb. 8, grün). Dies entspricht etwa der Basis des Torfabbaus vor etwa 100 Jahren; seitdem ist wieder Torf aufgewachsen. Im Amtsvenn-Hündfelder Moor (NRW) schließlich haben die starke Drainage, Brände und Zersetzung dazu geführt, dass sich verschiedene Elemente residual anreichern (Abb. 8, rot). Diese und ähnliche Standortgegebenheiten sind bei einer Renaturierung von Hochmooren zu beachten, da auf einem Standort, an dem sich Nährstoffe oder andere Elemente angereicht haben, nicht zu erwarten ist, dass eine klassische Hochmoorvegetation entsteht. Eine residuale Nährstoffanreicherung führt vielmehr oftmals zu einer Niedermoor-

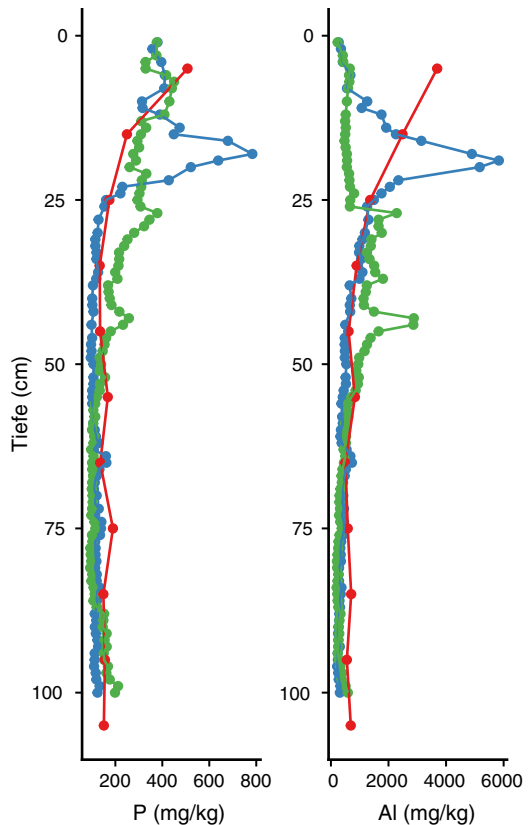


Abb. 8. Anreicherung der Elemente Phosphor und Aluminium in Böden des Drebberschen Moores in Niedersachsen (blau), des Bagno Kusowo in Polen, nahe Neustettin (grün) und des Amtsvenn an der deutsch-niederländischen Grenze (rot); Erläuterungen s. Text. – Unveröffentlichte Daten (Maxime Lemmens & Klaus-Holger Knorr, 2023).

ähnlichen Vegetation und ist, insbesondere im Zusammenhang mit unvollständig hergestellter Hydrologie, ein großer Konkurrenzvorteil für Gefäßpflanzen zum Nachteil von Torfmoosen.

Anreicherung und Austrag von Schadstoffen

Dass es sich bei den in Hochmoorböden angereicherten Elementen auch um Schadstoffe handeln kann, zeigt exemplarisch ein Moor im Changbai-Gebirge im Nordosten Chinas (Zhang et al. 2021 und unveröffentlichte Daten von Klaus-Holger Knorr, Zhiguo Yu und Harald Biester, 2014). Seitdem diese Gegend vor ca. 150 Jahren erstmals in größerem Umfang besiedelt worden ist und die Industrialisierung eingesetzt hat, kommt

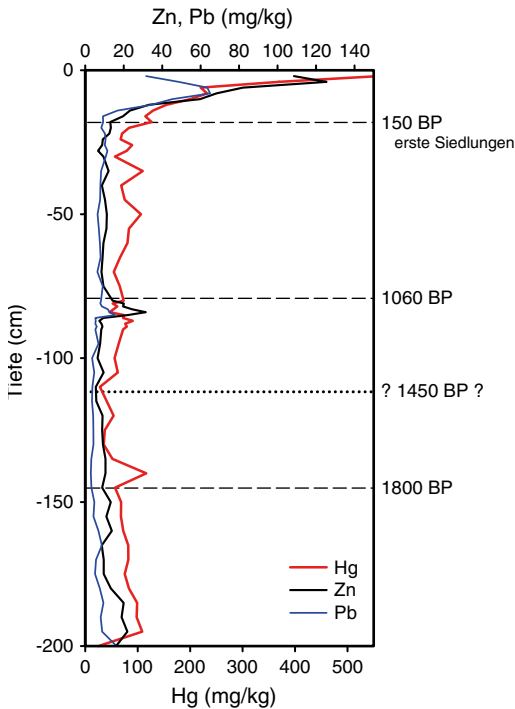


Abb. 9. Anreicherung der Schwermetalle Zink, Blei und Quecksilber im Boden eines Hochmoores (Tiefe bzw. Jahre BP) im Changbai-Gebirge (NO-China). – Nach Zhang et al. (2021).

es zu einer starken Anreicherung von Zink, Blei und Quecksilber, die als Schwermetalle stark an Torf binden. Weitere „Peaks“ im Bodenprofil auf geringem Niveau sind durch Vulkanaschelagen (Tephra) entstanden (Abb. 9; Zhang et al. 2021).

In Deutschland lässt sich der Eintrag von Schwermetallen sehr gut im Harz beobachten (Biester et al. 2012). Im Odersprungmoor sind im Torfprofil deutlich die Hochphasen des Bergbaus in Form von sehr hohen Gehalten an Kupfer, Blei und Zink zu sehen, aber auch der Einfluss von Rezessionen wie während des 30-jährigen Krieges im Bereich von 50–70 cm Bodentiefe. In dieser Zeit konnte weniger Metall verarbeitet werden, daher gingen die Einträge von Kupfer und Blei stark zurück (Galka et al. 2019). Gegenwärtig sind diese Moore eine bedeutende Quelle für Schwermetalle und Metalloide (> 2000 mg Pb, As pro kg Torf) für die Abflüsse bzw. Gewässer im Harz.

In einer weiteren Arbeit wurden die Arsen-, Eisen- und Kohlenstoffgehalte im Boden eines extensiven Grünlandes auf drainiertem Niedermoor

nördlich von München gemessen (Zahn & Seiler 1992, Bauer et al. 2008). Der Wasserspiegel lag zum Zeitpunkt der Studie bei ca. 50–100 cm Tiefe, es handelt sich um einen karbonatreichen Torf mit hohem Sandanteil (pH 6,8–7,2), in dem im Bereich von 10–20 cm Tiefe hohe Konzentrationen von geogenem Arsen aus dem Molassebecken angereichert sind. Unter reduktiven Bedingungen sind Arsenkonzentrationen im Porenwasser weit über 100 µg/l möglich. Wird eine derartige Fläche wiedervernässt, können hohe Konzentrationen an Arsen freigesetzt werden, das sich in einer Größenordnung von 2000–3000 mg/kg an den Eisenhydroxiden angelagert hat.

Hydrologische Dynamik bei Stoffausträgen: DOC aus Hoch- und Niedermooren

Bei der Dynamik von Stoffausträgen aus Mooeren ist zwischen Hoch- und Niedermooren zu unterscheiden.

Hochmoore speisen als hydrologisches Puffersystem den Basisabfluss, da der Katotelm nur langsam das Wasser abgibt (Abb. 10a). Daher puffern sie kurzfristige Niederschläge nur in beschränkten Rahmen bzw. nur bei niedrigen Wasserspiegeln (hydrologische Selbstregulierung). Ist das Hochmoor vollständig aufgesättigt, gibt es Starkniederschlagsereignisse bei vollem Speicher vergleichsweise rasch weiter, in Abhängigkeit von der Übergangszone um das Moor. Untersuchungen des abfließenden Wassers zeigen, dass aus einem Hochmoor bei Regenereignissen vor allem Regenwasser (Ereigniswasser) fließt, das der Akrotelm ableitet. Dadurch kommt es in Bezug auf Stoffausträge zu starken Verdünnungseffekten. Da der Akrotelm ohnehin nur vergleichsweise wenig an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) im Porenwasser enthält, sind Hochmoore daher generell eher geringe DOC-Quellen. Bei Regenereignissen sinkt die DOC-Konzentration darüber hinaus nochmals mit steigendem Abfluss (Verdünnungseffekt; Broder & Biester 2015).

In Niedermooren ist dagegen der Moorkörper sehr häufig (mindestens teilweise) durchströmt und DOC und weitere damit assoziierte Elemente können dabei mobilisiert werden (Abb. 10b). Die starke Zersetzung durch vergleichsweise labile Streu produziert viel DOC und auch schwankende Wasserspiegel und Redoxwechsel begünstigen

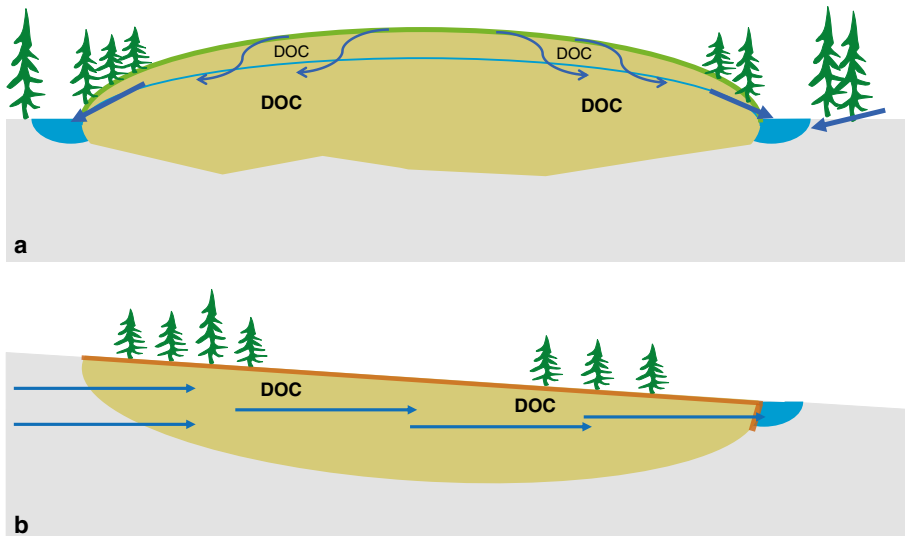


Abb. 10. Schematische Darstellung des Gehalts von gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) in einem Hochmoor (**a**, stark überhöht) und einem Niedermoor (**b**, mittelbraun: Redoxgrenzflächen).

die Zersetzung. Niedermoore haben häufig eine gute Konnektivität zum weiteren Einzugsgebiet und geben daher hohe Frachten an gelösten Stoffen ab (Strohmeier et al. 2013). Da viel mobilisierbares Wasser aus durchlässigen Schichten und von Sättigungsflächen vorhanden ist, stellen sie wichtige DOC-Quellen in vermoorten Einzugsgebieten dar. Dies gilt insbesondere für fließgewässerbegleitende organische Böden. Das Kalkkäls-Moor (Nordschweden, Krycklan Einzugsgebiet; Laudon et al. 2013) wird z. B. zusätzlich in einer hydrologisch aktiven Schicht in 200–300 cm Tiefe durchströmt, wie Isotopenuntersuchungen zeigen konnten (Peralta-Tapia et al. 2015). Der DOC steigt daher hier mit steigendem Abfluss (Mobilisierungseffekt).

In Einzugsgebieten sind daher flachgründige Niedermoore mit Redoxwechseln sowie anmoorige Böden häufig besonders wichtig für DOC-Austräge. Aktivierte Fließwege (hydrologische Konnektivität) und Redoxgrenzflächen sind dabei entscheidend für die kurzfristige DOC-Mobilisierung und -Immobilisierung (Laudon et al. 2011, Knorr 2013)

Fazit

Klimawandel und Entwässerung erfordern eine großräumige Betrachtung der Moorhydrologie. Wasserverluste durch Drainagen müssen

reduziert werden; wurde bei Hochmooren die Moorbasis durchstoßen, kann es zusätzlich zu unkontrolliertem Abfluss in den unterliegenden Aquifer kommen. In degradierten Mooren funktioniert die hydrologische Selbstregulierung daher in den meisten Fällen nicht mehr und zu Beginn einer Renaturierung muss unter Umständen stark regulatorisch eingegriffen werden. Ungünstige hydrologische Eigenschaften stark zersetzter Torfe erschweren zudem die Renaturierung. Der sogenannte Schwarztorf hält zwar Wasser sehr gut, kann jedoch aufgrund seiner Feinporigkeit nicht entwässern, wenn zu viel Wasser vorhanden ist. Ist er einmal ausgetrocknet, nimmt er Wasser schlecht wieder auf, bis hin zur Hydrophobizität.

Niederschläge führen in Hochmooren vor allem zu einer Verdünnung der Stoffkonzentrationen im Abfluss, zu den übrigen Zeiten speist das Hochmoor den Basisabfluss. Bei Niedermooren und anmoorigen Böden sind hohe DOC-Austräge sowie hohe Austräge assoziierter Elemente bei Niederschlagsereignissen möglich, da hier Porenwasser mit hohen Stoffkonzentrationen mobilisiert werden kann.

Eine Wiedervernässung von Mooren reduziert sofort und signifikant die Zersetzung der Torfe (Torferhaltung) und damit die Emission von CO_2 . Dies liegt vor allem daran, dass unter Wassersättigung der Torf vor Sauerstoffzutritt geschützt ist. Die unter Sauerstoffabschluss steigende

Methanemissionen ist meist nur moderat und vorübergehend. An intensiv vorgeutzten Standorten kann bei der Renaturierung ggf. ein Oberbodenabtrag der sehr nährstoffhaltigen Schichten sinnvoll sein. Dabei ist jedoch zu hinterfragen, was mit dem abgetragenen Torf geschieht, da er sich bei Sauerstoffexposition ebenso weiter zersetzt (angenommene Raten zwischen 1 und 7 % pro Jahr). Eine Anreicherung von (Nähr-)elementen im Bodenprofil kann als Indikator für eine anthropogene Nutzung und Degradierung gesehen werden, aber auch Schadstoffeinträge sind im Archiv der Moore abgebildet. Der Austrag mobilisierbarer Elemente findet oft gebunden an DOC statt. Besonders der Austrag redoxlabiler Elemente, z. B. an Eisenhydroxiden gebundenes Arsen und Phosphat, die unter reduzierenden Bedingungen mobilisiert werden, ist bei einer Vernässung besonders sorgfältig zu betrachten.

Danksagung

Die im Text gezeigten Arbeiten wurden u. a. finanziell unterstützt durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, den Deutschen Akademischen Austauschdienst, das Bayerische Hochschulzentrum für Lateinamerika, das Bayerische Landesamt für Umwelt, die Chinesische Akademie der Wissenschaften und die Fakultät Geowissenschaften der Universität Münster. Besonderer Dank geht stellvertretend für viele Mitwirkende an Prof. Dr. Werner Borken, Prof. Dr. Harald Biester, Dr. Tanja Broder, Dr. habil. Mariusz Galka, Prof. Dr. Stefan Peiffer, Prof. Dr. Egbert Matzner, Prof. Dr. Zhiguo Yu und an das Labor des Instituts für Landschaftsökologie der Universität Münster.

Literatur

- Bauer, M., B. Fulda & C. Blodau. 2008. Groundwater derived arsenic in high carbonate wetland soils: Sources, sinks, and mobility. – *Science of the Total Environment*, 401(1–3): 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.030>.
- Beer, J. & C. Blodau. 2007. Transport and thermodynamics constrain belowground carbon turnover in a northern peatland. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(12): 2989–3002. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.03.010>
- Biester, H., Y.-M. Hermanns & A. M. Cortizas. 2012. The influence of organic matter decay on the distribution of major and trace elements in ombrotrophic mires - a case study from the Harz Mountains. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 84: 126–136. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703707001317>
- Blodau, C. 2011. Thermodynamic control on terminal electron transfer and methanogenesis. – In: Tratnyek, P. G., T. J. Grundl & S. B. Haderlein (eds.): *Aquatic Redox Chemistry*. American Chemical Society, ACS Symposium Series, 1071: 65–82.
- Bonaiuti, S., C. Blodau & K.-H. Knorr. 2017. Transport, anoxia and end-product accumulation control carbon dioxide and methane production and release in peat soils. – *Biogeochemistry*, 133(2): 219–239. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0328-7>
- Broder, T. & H. Biester. 2015. Hydrologic controls on DOC, As and Pb export from a polluted peatland – the importance of heavy rain events, antecedent moisture conditions and hydrological connectivity. – *Biogeosciences*, 12(15): 4637–4649. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4651-2015>.
- Couwenberg, J., A. Thiele, F. Tanneberger, J. Augustin, S. Bärtsch, D. Dubovik, N. Liaschchynskaya, D. Michaelis, M. Minke, A. Skuratovich & H. Joosten. 2011. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. – *Hydrobiologia*, 674: 67–89. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0729-x>
- Drösler, M. 2024. Klimaschutz durch Moorschutz – Hintergrund und Handlungsmöglichkeiten. – In: Bayer. Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): *Moore: Ökosystemfunktionen, Biodiversität und Renaturierung*. Pfeil, München: 109–116.
- Edom, F. 2001. Moorlandschaften aus hydrologischer Sicht (chorische Betrachtung). – In: Succow, M. & H. Joosten (Hrsg.): *Landschaftsökologische Moorkunde*. 2. völlig neu bearb. Auflage, Schweizerbart, Stuttgart: 185–228.
- Evans, C. D., M. Peacock, A. J. Baird, R. R. E. Artz, A. Burden, N. Callaghan, P. J. Chapman, H. M. Cooper, M. Coyle, E. Craig, A. Cumming, S. Dixon, V. Gauci, R. P. Grayson, C. Helfter, C. M. Heppell, J. Holden, D. L. Jones, J. Kaduk, P. Levy, R. Matthews, N. P. McNamara, T. Misselbrook, S. Oakley, S. E. Page, M. Rayment, L. M. Ridley, K. M. Stanley, J. L. Williamson, F. Worrall & R. Morrison. 2021. Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. – *Nature*, 593: 548–552. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>
- Freeman, C., N. Ostle & H. Kang. 2001. An enzymic 'latch' on a global carbon store - A shortage of oxygen locks up carbon in peatlands by restraining a single enzyme. – *Nature*, 409(6817): 149. <https://doi.org/10.1038/35051650>
- Galka, M., M. Szal, T. Broder, J. Loisel & K.-H. Knorr. 2019. Peatbog resilience to pollution and climate change over the past 2700 years in the Harz Mountains, Germany. – *Ecological Indicators*, 97: 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.015>
- Gao, C., M. Sander, S. Agethen & K.-H. Knorr. 2019. Electron accepting capacity of dissolved and particulate organic matter control CO₂ and

- CH₄ formation in peat soils. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 245: 266–277. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.11.004>
- Forham, E., 1957. The development of peat lands. – *Quarterly Review of Biology*, 32(2): 145–166. <https://www.jstor.org/stable/2816118>
- Hölzel, N., K.-H. Knorr, T. Kleinebecker, P. Raabe & G. S. Gramann. 2022. Leitfaden zur Torfmoosvermehrung und -etablierung für Renaturierungszwecke. – Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, 109 S. <https://www.dbu.de/publikationen/> [abgerufen 26.05.2023]
- Huth, V., A. Günther, A. Bartel, B. Hofer, O. Jacobs, N. Jantz, M. Meister, E. Rosinski, T. Ulrich, M. Weil, D. Zak & G. Jurasinski. 2020. Topsoil removal reduced in-situ methane emissions in a temperate rewetted bog grassland by a hundredfold. – *Science of The Total Environment*, 721:137763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137763>
- Joosten, H. 2008. What are peatlands? – In: Parish, F., A. Sirin, D. Charman, H. Joosten, T. Minayeva, M. Silvius & L. Stringer (eds.): *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur, and Wetlands International, Wageningen: 8–19. <https://globalclimateactionpartnership.org/resource/assessment-on-peatlands-biodiversity-and-climate-change/> [abgerufen 26.05.2023]
- Knorr, K. H. 2013. DOC-dynamics in a small headwater catchment as driven by redox fluctuations and hydrological flow paths - are DOC exports mediated by iron reduction/oxidation cycles? – *Biogeosciences*, 10(2): 891–904. <https://doi.org/10.5194/bg-10-891-2013>
- Laudon, H., M. Berggren, A. Agren, I. Buffam, K. Bishop, T. Grabs, M. Jansson & S. Köhler. 2011. Patterns and dynamics of dissolved organic carbon (DOC) in boreal streams: the role of processes, connectivity, and scaling. – *Ecosystems*, 14(6): 880–893. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9452-8>
- Laudon, H., I. Taberman, A. Ågren, M. Futter, M. Ottosson-Löfvenius & K. Bishop. 2013. The Krycklan Catchment Study – A flagship infrastructure for hydrology, biogeochemistry, and climate research in the boreal landscape. – *Water Resources Research*, 49(10): 7154–7158. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20520>
- Limpens, J., F. Berendse, C. Blodau, J. G. Canadell, C. Freeman, J. Holden, N. Roulet, H. Rydin & G. Schaepman-Strub. 2008. Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis. – *Biogeosciences*, 5(5): 1475–1491. <https://doi.org/10.5194/bg-5-1475-2008>
- Luthardt, V., C. Schulz & R. Meier-Uhlher. 2015. *Steckbriefe Moorsubstrate*. – 2. Auflage, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (Hrsg.), 154 S. <https://doi.org/10.23689/figdeo-3724>
- Mathijssen, P. J. H., M. Gałka, W. Borken & K.-H. Knorr. 2019. Plant communities control long term carbon accumulation and biogeochemical gradients in a Patagonian bog. – *Science of the Total Environment*, 684: 670–681. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.310>
- Peralta-Tapia, A., R. A. Sponseller, D. Tetzlaff, C. Soulsby & H. Laudon. 2015. Connecting precipitation inputs and soil flow pathways to stream water in contrasting boreal catchments. – *Hydrological Processes*, 29(16): 3546–3555. <https://doi.org/10.1002/hyp.10300>
- Sagerfors, J., A. Lindroth, A. Grelle, L. Klemedtsson, P. Weslien & M. Nilsson. 2008. Annual CO₂ exchange between a nutrient-poor, minerotrophic, boreal mire and the atmosphere. – *Journal of Geophysical Research*, 113(G1): G01001. <https://doi.org/10.1029/2006JG000306>
- Strohmeier, S., K. H. Knorr, M. Reichert, S. Frei, J. H. Fleckenstein, S. Peiffer & E. Matzner. 2013. Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff from a forested catchment: insights from high frequency measurements. – *Biogeosciences*, 10(2): 905–916. <https://doi.org/10.5194/bg-10-905-2013>
- Succow, M. 1988. *Landschaftsökologische Moorkunde*. – Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 340 S.
- Succow, M. & H. Joosten (Hrsg.). 2001. *Landschaftsökologische Moorkunde*. – 2. völlig neu bearb. Auflage, Schweizerbart, Stuttgart, 622 S.
- Tanneberger, F. 2024. Verbreitung und Zustand der Moore weltweit, in Europa und in Deutschland. – In: Bayer. Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): *Moore: Ökosystemfunktionen, Biodiversität und Renaturierung*. Pfeil, München: 13–25.
- Wang, M., T. R. Moore, J. Talbot & J. L. Riley. 2015. The stoichiometry of carbon and nutrients in peat formation. – *Global Biogeochemical Cycles*, 29(2): 113–121. <https://doi.org/10.1002/2014GB005000>
- Zahn, M. T. & K. P. Seiler. 1992. Field studies on the migration of arsenic and cadmium in a carbonate gravel aquifer near Munich (Germany). – *Journal of Hydrology*, 133(1–3): 201–214. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90255-T](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90255-T)
- Zhang, L, M. Gałka, A. Kumar, M. Liu, K.-H. Knorr & Z.-G. Yu. 2021. Plant succession and geochemical indices in immature peatlands in the Changbai Mountains, northeastern region of China: Implications for climate change and peatland development. – *Science of the Total Environment*, 773:143776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143776>

Diskussion

S. Peiffer: Vielen Dank für den schönen Vortrag, der zu mich zu einer provokanten Frage führt. Du hast in einer Abbildung die Kohlenstoffspeicherung in einem Hochmoor mit 27 gC pro m² und Jahr angegeben und darauf hingewiesen, wie sensibel dieses System ist. Das ist im Grunde genommen nicht viel. Sind Moore dann wirklich als CO₂-Senken anzusehen?

K.-H. Knorr: Diese Frage sollte man sich tatsächlich öfter stellen. Es wird sehr häufig gesagt, dass Moore effektive Kohlenstoffspeicher sind. In Bezug auf eine kurzfristige Kohlenstofffestlegung wäre es aber sicher nicht ratsam, auf diese relativ kleinen Zahlen zu setzen, zumal es sich um ein sehr fragiles Gleichgewicht handelt. Bei der Diskussion wird meist vergessen, dass Moore gegenwärtig große Quellen sind – und diese abzustellen hätte einen riesigen Effekt. Wenn wir über die Senkenfunktion argumentieren, öffnen wir Kritikern Tür und Tor, die sagen, wir sollten lieber Wald anpflanzen als Moore zu renaturieren. Dabei geht es bei Wiedervernässung von Mooren prioritär darum, Quellen abzuschalten. Ich denke, dass wir durchaus in dem einen oder anderen Standort auch eine echte C-Senkenfunktion wieder etablieren können, und dies ist langfristig gesehen effektiver als der Wald. Denn wenn der Wald erst einmal steht und sich ein Gleichgewicht eingestellt hat, kommt die C-Speicherung zum Erliegen, während Moore weiter Kohlenstoff speichern, wenn auch oft mit niedrigeren Zahlen. Gegebenenfalls bieten sich Lösungen dazwischen an, wie z. B. ein Moorwald auf vielen feuchten Standorten, an denen kein Moor etabliert werden kann.

F. Tanneberger: Gegen Ende hattest du kurz erwähnt, dass wir möglicherweise Moorwasser nach unten verlieren, wenn die Moorbasis durchstoßen ist. Das ist eine Frage, die im Zusammenhang mit Photovoltaik auf Mooren jetzt öfter auftaucht, wenn es um die Verankerung der Module im Moorboden geht. Kennst du konkrete Beispiele, wo so etwas gemessen wurde?

K.-H. Knorr: Wir sind zum Beispiel im Austausch mit einem Planungsbüro, das sich mit Situationen beschäftigt, wo genau solche Fälle aufgetreten sind. Durch Abtorfung bis auf 30 cm Resttorfmächtigkeit – zu einer Zeit, als die Gesetzgebung noch eine andere war, – kann man erwarten, dass sehr häufig der Sand angekratzt wurde. Man weiß aus den Grundwassermessständen aus der Umgebung des Moores, dass der regionale Grundwasserspiegel meist deutlich tiefer ist als die Moorbasis. Wir haben Wasserspiegel in einem Moorkörper gemessen und gesehen, dass dort, wo man höhere Wasserspiegel erwarten würde, nicht mehr Wasser ist, weil es offensichtlich nach unten, in den unterliegenden Grundwasserleiter im mineralischen Untergrund verloren geht. Bei dem erwähnten Beispiel wurde auch versucht, abzudichten, indem man auf diese Flächen sehr stark zersetzten Torf aufgebracht hat. Wie ich in meinem Vortrag gezeigt habe, haben solche Torfe, wenn sie nicht gewachsen, sondern umgelagert sind, aber meist eine wesentlich höhere Leitfähigkeit als die Moorbasis und sind daher durchlässiger. In solchen Situationen wären andere abdichtende Strukturen im Untergrund hilfreich, wie z. B. eine Ortsteinbildung, wenn diese noch intakt ist. Im Dalum-Wietmarscher Moor und wahrscheinlich in vielen anderen Standorten wurde jedoch mit Tiefpflugmaßnahmen dieser Ortstein tatsächlich an einigen Stellen zerstört und damit gibt es keine Abdichtung des Moorkörpers nach unten. Bei der Einrichtung von Photovoltaikanlagen und deren Fundamenten sollte daher die Hydrologie unbedingt in die Planung einbezogen werden. Müssen Fundamente tief begründet werden, sollte unbedingt ein Nachweis erbracht werden, dass dies hydrologisch für eine Wiedervernässung keine Nachteile mit sich bringt. Da unterliegende Grundwasserleiter häufig ein Niveau deutlich unterhalb der Moorbasis haben, sind Wasserverluste nach unten ein großes Risiko. Leider findet derzeit nur in den seltensten Fällen eine großräumige hydrologische Betrachtung und Grundwasseranhebung statt.

M. Drösler: In der bereits angesprochenen Abbildung war der Kohlenstoffaustrag mit ca. 13 g C pro m² und Jahr angegeben. Kannst du noch etwas dazu sagen, wie sicher und unsicher diese wasserbürtigen Flüsse sind? Wir ringen immer etwas mit der Frage, welche Literaturwerte wir verwenden können, gerade wenn die Hydrologie eines Gebiets sehr schwierig einzuschätzen ist.

K.-H. Knorr: Zum Austrag gelösten Kohlenstoffs ist die Datenlage noch immer schlecht. Besonders gilt dies für Niedermoore, wo der Kohlenstoffaustrag über den Abfluss kaum zu erfassen ist. Aber auch bei Hochmooren ist die Messung und Bilanzierung sehr schwierig. Von den wenigen konsistenten Daten, die ich kenne, kommen viele aus Kanada, wie beispielsweise aus Mer Bleue (Ontario), einem der ganz wenigen Standorte, an denen man neben gelöstem Kohlenstoff auch den gelösten Gesamtstickstoff T_N gemessen hat. Hier sehe ich großen Forschungsbedarf. Wie die Zahlen in der Abbildung zeigen, könnte über den Austrag gelösten Kohlenstoffs sehr schnell die Senkenfunktion von Mooren entscheiden vermindert werden. Leider ist es schwierig, für Untersuchungen in diesem Zusammenhang an Fördermittelgeber heranzukommen, da der Beitrag zur Bilanz als klein eingeschätzt wird. In Gegenden, wo durch die Belastung mit gelöstem organischem Kohlenstoff die Trinkwassergewinnung beeinträchtigt wird, gibt es jedoch einige Projekte und Daten, dann häufig jedoch nicht einzelnen Mooren zuzuordnen.

R. Mosandl: Bevor ich an den Lehrstuhl für Waldbau der Universität München kam, war ich Forstamtsleiter in Selb im Fichtelgebirge und damit auch zuständig für das Häuseloh-Moor. Wir haben Anfang der 1990er Jahre angefangen, dieses Moor zu renaturieren und haben es auch geschafft, mit Spundwänden den Wasserstand hochzuhalten. Was uns aber nicht gelungen ist, ist, die Vegetation zurückzuhalten. Wir haben jedes Jahr die anliegenden Birken sozusagen „entbuscht“ – ich wurde damals von der Forstdirektion für diesen Begriff fast gesteinigt – und es war immer eine Riesenaktion, die Birken abzuhacken und aus dem Moor herauszubringen. Es war praktisch eine Sisypusarbeit. Gibt es eine Möglichkeit, die Ansiedlung von Bäumen oder sonstiger nicht-moortypischer Vegetation

zu verhindern? Sonst kommt es ja immer zu dem Sauerstoffeintrag über die Wurzeln, den Sie beschrieben haben, und das Ganze geht wieder von vorne los.

K.-H. Knorr: In dem Moor in Vechta zwischen Münster und Bremen gehen die Torfabbauer, die das Moor renaturieren müssen, so vor, dass sie die Flächen längere Zeit überstauen. Damit halten sie die Birken klein. Aber dies geht natürlich nur da besonders gut, wo man „schön abgetorfte Badewannen“ hat. Bei den unter Schutz stehenden Standorten mit noch intakten Hochmoor- oder anderen Moorresten, fehlt aber meistens das Wasser dafür. Im Bargerveen in den Niederlanden ist man sich der Problematik sehr bewusst und weiß, dass der Druck durch Birken und auch durch Seggen durch die Nährstoffdepositionen aus der Luft noch erhöht wird. Daher setzt man konsequent auf eine ideale Einstellung hoher Wasserstände, um den Effekt zu kompensieren. Zum Entbuschen gibt es verschiedenste Ansätze. Wir haben mit Biologischen Stationen zusammengearbeitet, die von Hand entbuschen und den ganzen Wurzelstock mit einer Wiedehopfhacke entfernen; andere fahren mit einem Forstmulcher in die Fläche. Hier wäre eine Auswertung wichtig, was nachhaltig einigermaßen funktioniert. Richtig erledigt hat sich das Problem vermutlich erst, wenn es wirklich sehr nass ist und die Akrotelm-Katotelm-Struktur funktioniert.

S. Müller-Kroehling: Auf einer EU-Konferenz habe ich einmal einen niederländischen Kollegen getroffen, der mir gesagt hat, in den Niederlanden sei nicht Wasser der Hauptsteuerungsfaktor für die Moorvernässung, sondern die Chancen für eine Renaturierung werden in mmol Stickstoff in der Luft gemessen. Durch die intensive, gülbasierte Landwirtschaft gibt es einen Schwellenwert für atmosphärischen Stickstoff, ab dem mit Wasser nichts mehr geheilt werden kann. Ich habe selbst einmal so ein Moor in den Niederlanden besichtigt. Da war in dem sehr nassen Moor anstelle von Torfmoosen eine Algensuppe geschwommen. Wie sehen Sie diesen atmosphärischen Nährstoffeintrag? Und noch eine praktische Frage. Sie haben davon gesprochen, dass abgetragener Oberboden richtig entsorgt werden muss, aber Sie haben nicht gesagt, wie.

K.-H. Knorr: Aus den Niederlanden gibt es Zahlen, wie viel Stickstoffdeposition eine Moorvegetation aushält. Über die Zahlen streitet man sich – sind es 5, 20 oder 50 kg pro Hektar und Jahr – und das scheint auch sehr viel damit zu tun zu haben, wie und in welcher Form dieser Stickstoff in die Moore gelangt. Je höher die Stickstoffdeposition ist, desto schlechter sind die Konkurrenzchancen der Hochmoorpflanzen und wir müssen besonders stark helfen, damit sie wieder Fuß fassen. Daher haben wir in einigen Projekten versucht, Torfmoose aktiv wieder einzubringen und die Fläche dafür zu präparieren. Eine weitere Hilfe ist ein hoher Wasserstand, den wir zu Beginn der Renaturierung wegen der fehlenden Selbstregulierung besonders gut einstellen müssen. Kommen noch Phosphat und Algenwachstum hinzu, sieht es natürlich schlecht aus. Phosphat ist limitierender Nährstoff, daher die besonders starken Effekte. Zum Verständnis der Dynamik lohnt sich ein Blick in die Literatur zu Flachseen und kleinen Gewässern. Überstaute Moore mit hoher Phosphatbelastung sind in einigen Punkten vergleichbar.

Die Problematik führt über zu Ihrer zweiten Frage, was man mit abgetragenem Moorboden machen sollte. Falls vor Ort Gräben vorhanden sind, kann man den abgetragenen Oberboden einfüllen und die Gräben unter Wasser setzen. Aber dann sollte man beobachten, ob sich die Nährstoffe von diesen Gräben verteilen und wir sie dadurch wieder in die Fläche einbringen. Es gibt tatsächlich Situationen, in denen wir das beobachten. An verschiedenen Standorten wurde Moorboden flach abgeschoben, daraus Wälle gemacht und Bassins erstellt, und man sieht durchaus, dass in der Umgebung dieser Dämme Nährstoffe austreten. Man muss also damit rechnen, dass dort eine andere Vegetation aufkommt, und man muss die Konkurrenz in der Fläche beobachten. Eine andere Möglichkeit ist, den abgetragenen Torf abzufahren. Dies wird

sehr scharf diskutiert und ich habe auch noch keine abschließende Meinung dazu. Ich weiß, dass es in Niedersachsen tatsächlich Aktivitäten im Naturschutz gibt, abgetragenen Oberboden mit einem Siegel zu versehen, um darauf hinzuweisen, dass dieser Torf sozusagen „grüner Torf“ ist und man ihn guten Gewissens kaufen darf. Hier muss man aber peinlichst darauf achten, dass der entsprechende Torfabbauer damit nicht einen zusätzlichen Torf generiert. Er müsste vielmehr nachweisen, dass er dadurch woanders eine entsprechende Menge Torf nicht abbaut und damit schützenswerte Moore andernorts erhält, also dass z.B. im Baltikum ein naturnahes, intaktes Moor trotz Genehmigung nicht abgetorft wird. Aber die Torfqualität im Baltikum ist leider sehr viel höher als die der degradierten, vorgeernteten Standorte in Deutschland. Auf Blumenerde mit Torf steht oft die Angabe „stark und schwach zersetzter Hochmoortorf“: Der schwach zersetzte ist dabei häufig der Torf aus dem Baltikum, der stark zersetzte wird häufig bei uns gewonnen. Der Torf aus den Oberböden ist extrem stark zersetzt und kann die bisherigen Substrate nicht direkt ersetzen. Daher besteht die Gefahr, dass durch den Verkauf stark degradierten Torfs ein zusätzlicher Markt generiert wird und wir zusätzlichen Torf verkaufen, anstatt andernorts Moore zu schonen. Aber natürlich gilt: Wenn ein Torfabbauer Oberboden als Substrat verkauft, kann er über diesen Verkauf letztendlich die Abtorfung finanzieren und dann mehr oder weniger kostenneutral die Fläche herrichten. Aber dieser Torf geht dann in ähnlicher Geschwindigkeit als CO₂ in die Luft, als wenn die Fläche drainiert wäre. Da ist abzuwägen, was letztlich das Bessere ist. Es fehlen uns auch noch Daten, wie viel Torf sich zersetzt, wenn man ihn deponiert oder im Garten nutzt. Je nachdem, welche Zahlen man einsetzt, 2, 5 oder 7 Prozent pro Jahr, lohnt sich der Oberbodenabtrag über kürzere oder längere Zeiträume – oder eben nicht.