

TELMA	Band 47	Seite 75 - 92	7 Abb.	Hannover, November 2017
-------	---------	---------------	--------	-------------------------

Langzeituntersuchungen in den Südlichen Chiemseemooren

Long term research in raised bogs southern of Lake Chiemsee

ROBIN KAULE, GISELHER KAULE und BERND HUWE

Zusammenfassung

In der Moorversuchsanstalt Bernau (Chiemseemoore) wurden von 1958 bis 1972 unter anderem Tageswerte von Niederschlag und Verdunstung aufgezeichnet. Mit der damaligen Rechnerkapazität konnten die Daten nur aggregiert ausgewertet werden. In dieser Arbeit werden aus den von uns geplotteten Originaldaten Moorwasserstände und Oberflächenabfluss berechnet und Trockenperioden identifiziert. Bei Annahme eines kritischen Wasserstandes von -20 cm im Akrotelm ergab die Modellierung von 2575 Tagen in 10 Vegetationsperioden 93 kritische Tage und 12 kritische Perioden, davon nur eine länger als 5 Tage. Zusammen mit einer Darstellung der Vegetationsentwicklung werden Schlüsse auf mögliche Erfolge für eine Hochmoorregeneration aus dem Niederschlagsgradienten gezogen.

Abstract

From 1958 to 1978 a bog research station was operated in the raised bogs near Lake Chiemsee in southern Bavaria (Bernau, Chiemseemoore). The station recorded daily data of the precipitation, evaporation and evapotranspiration (full program see SCHMEIDL et al. 1970). In this time, computing power was not sufficient to handle such large data volumes, so only aggregated data were published. The original data (12 files) were analyzed and plotted. The hydrologic balance model was adopted to the acrotelm. The water-level in the *Sphagnum* growing complex and the surface runoff of the saturated acrotelm was modelled with the original daily values of 10 growing periods. Model results indicate, that in 2575 modelled days only 93 days and 12 periods, only one period lasting longer than 5 days, with a critical water table (-20 cm) occurred (1958 to 1968). The model results were validated with runoff measurements. The vegetation development from 1961 to 2015 confirms the stability of the growing complex and the regeneration potential within the climatic borders. (1400 mm/a). The results allow a better understanding of the capillary system of the acrotelm and of the regeneration success of raised bogs.

1. Einleitung

Bereits kurz nach dem Zweiten Weltkrieg gab es in den deutschen Moorregionen zahlreiche Forschungsvorhaben mit ähnlicher Zielsetzung: Moorhydrologie, Moornutzung und Kultivierung, Vegetationsgeschichte, natürliche Vegetation. Diese Vorhaben waren nicht wie „moderne“ Verbundvorhaben formal vernetzt, aber die befreundeten Forscher arbeiteten aus persönlichem Interesse eng zusammen. Die Ergebnisse wurden zunächst in Fachzeitschriften veröffentlicht. Ab 1971 war mit der Gründung der Zeitschrift TELMA eine interdisziplinäre Diskussionsplattform verfügbar, in der ein großer Teil der Ergebnisse veröffentlicht wurde.

Eine der süddeutschen Untersuchungsflächen lag in den Südlichen Chiemseemooren. Die Ergebnisse von 10 Untersuchungsjahren in den Südlichen Chiemseemooren wurden in der Schriftenreihe des Kuratoriums für Kulturbauwesen zusammengefasst. Untersucht wurden in diesen Jahren das Feßlerfilz als „unberührte“ und die Kühwampen als kultivierte Moorfläche (SCHMEIDL et al. 1970). Im Rahmen der Wiederholungskartierung der bayerischen Moore (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2015) gelang es, die originalen Messprotokolle aufzuspüren und einzusehen. Im Gegensatz zu vielen anderen Untersuchungen aus dieser Zeit, hat ein Großteil der Daten mehrere Umzüge und Umstrukturierungen der Forschungsstellen überdauert. Ziel der damaligen Untersuchung war es, belastbare Ergebnisse zu den Hypothesen der Schwammtheorie im naturnahen Hochmoor zu erzielen.

Trotz guter Ergebnisse glaubten die Autoren schon damals, dass ihre Daten weitere Erkenntnisse zu neuen Fragestellungen liefern könnten, sobald entsprechend starke Rechner verfügbar wären. Die Ergebnisse einer Bearbeitung dieser Daten werden hier vorgestellt.

Es sollen, 45 Jahre nach Drucklegung der Arbeit von SCHMEIDL et al. (1970), mit bisher nur aggregiert veröffentlichten Daten, die Wasserstandsschwankungen im Hochmoor aus Verdunstung und Niederschlag tagesgenau berechnet werden. Die Bearbeitung beschränkt sich auf die Daten der Sommerhalbjahre 1958 bis 1972. Dabei wird die Anwendbarkeit auf aktuell diskutierte Fragestellungen, wie die Wasserrückhaltung und den Zusammenhang von Jahresniederschlag und Stabilität von Hochmooren, untersucht. Die bisherige Auswertung der Daten auf Monats-, Jahres- und Dekadenmittel ist für Fragen der Stabilität von Hochmooren zu ungenau. Das Wachstum von Torfmoosen (*Sphagnum*-Arten) ist fundamental für die Bildung und den Erhalt von Hochmooren. Sie sind jedoch nur bei hoher Wassersättigung konkurrenzfähig. Vergleichend wird die Vegetationsentwicklung zwischen 1972 und 2015 betrachtet.

2. Untersuchungsgebiet

Das engere Untersuchungsgebiet ist das Feßlerfilz, eine Restfläche der Südlichen Chiemseemoore (UM auf Abb.1); es ist nachweislich seit 1800 eine offene Hochmoorweite. Die älteste verfügbare Moorkarte, in der das Untersuchungsgebiet dokumentiert wird, stammt von ca. 1905 (LEININGEN-WESTERBURG 1907). In dieser Karte ist das Moorgebiet als gehölzfreies Hochmoor kartiert. In seiner „Rückschau“ auf 1800 nimmt LEININGEN-WESTERBURG (1907) dort ebenfalls ein offenes Hochmoor an. 1961 kartierten SCHMEIDL und Lutz hier eine offene Hochmoorfläche (SCHMEIDL et al. 1970). Im Nordteil kommt ein *Sphagnum magellanicum*-Wachstumskomplex vor, im Südteil ist das Moor durch einen Brand gestört, dort herrschte 1961 eine nasse Heide mit *Rhynchospora alba* vor (siehe Abb. 4). 1970 war die Versuchsfläche von Torfstichen und entwässertem Moor umgeben. Es ist also ein Ausschnitt aus einem Hochmoor, umgeben von einem Graben, der nur wenige Dezimeter tief war und bis 2015 weitgehend verfiel und mit Torfmoosen zuwuchs. In der Kartierung von 1992 (FRANKL 1996) wird der Zustand der beiden Haupteinheiten das *Sphagnum-Eriophorum*-Stadium und das *Calluna*-Stadium mit gegenüber 1962 kaum veränderten Grenzen dokumentiert. Den Zustand von 2015 dokumentiert unsere Karte in Abbildung 5. Die Nomenklatur wurde vereinheitlicht, die Karte aus SCHMEIDL et al. (1970) digitalisiert und mit der Wiederholung von 2015 wurden die Veränderungen flächenscharf ausgewertet.

Das Feßlerfilz hat eine Fläche von 21 ha und fällt von 529,7 m im Südosten auf 528 m im Nordwesten ab. Die nordwestliche Ecke ist ca. 10 m über dem Chiemsee gelegen. Das Gefälle beträgt etwa 0,3 % (FRANKL 1996: 6-7). Der Torfkörper ist ca. 2-4 m mächtig. Es handelt sich um ein wurzelechtes Hochmoor, die Niedermoor- und Übergangsmoor- torfe sind nur wenige Dezimeter mächtig (PAUL & RUDOLF 1927: 22). Eigene Bohrungen bestätigen dies.

Die voralpine Moorregion umfasst einen Niederschlagsgradienten von 900-1800 mm (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2015). Das Feßlerfilz befindet sich genau im Mittel des Niederschlagsgradienten (1400 mm). Die verwendeten Klimarasterdaten der Vergleichsuntersuchung aller Süddeutschen Hochmoore (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2015) haben den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 und wurden als Gemeinschaftsprojekt des Deutschen Wetterdienstes, Abteilung Agrarmeteorologie, des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft aufbereitet. Die interpolierten Werte stimmen erfreulich gut mit den Messdaten von SCHMEIDL et al. (1970) überein.

3. Material und Methoden

Jahres- und Monatsmittel des Niederschlages können die Stabilität und Dynamik von Hochmoorökosystemen nicht erklären, entscheidend sind Trockenperioden mit hoher Verdunstung. SCHMEIDL et al. (1970) konnten mit den damals verfügbaren Rechnerleistungen

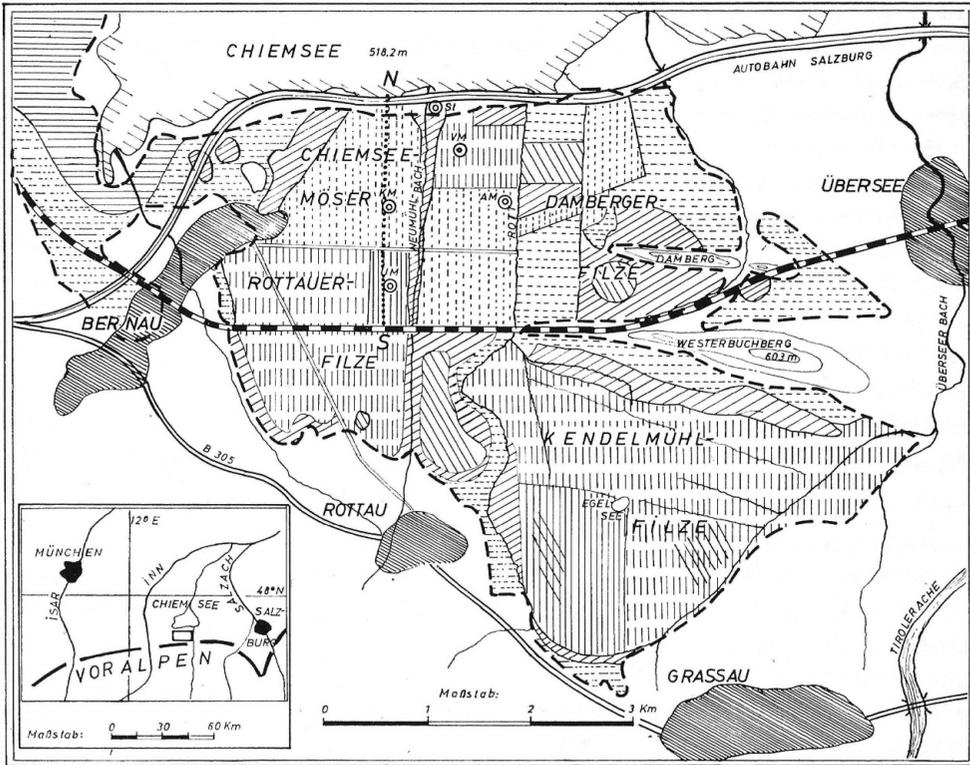


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes in den Südlichen Chiemseemooren. Karte aus SCHMEIDL et al. (1970: 12). „Die Moorgrenze ist dick gestrichelt eingetragen. Bei der Abbildung bedeuten: St = Basisstation an der Moorforschungsstelle nahe dem Moorrand; UM = unberührtes Hochmoor mit ständiger Meßeinrichtung seit 1958; VM = Vorentwässertes Hochmoor mit zeitweiligen Messeinrichtungen; AM = aufgeforstetes Hochmoor mit ständigen Meßeinrichtungen seit 1970; KM = kultiviertes Hochmoor mit ständigen Meßeinrichtungen seit 1958. Senkrecht schraffiert = UM; senkrecht schraffiert unterbrochen = VM; senkrecht gestrichelt = KM; waagrecht schraffiert = unkultiviertes Niedermoor und waagrecht gestrichelt = kultiviertes Niedermoor; schräg links schraffiert = Latschenbestände, schräg rechts schraffiert = Moorwald.“ SCHMEIDL et al. (1970: 12).

General map of the bog areas south of Lake Chiemsee. The border of the bog area is marked in a bold dashed line. The key to the meanings of the abbreviations in the map are: St = base station of the research program; UM = uncultivated raised bog with measuring devices (source of the data used in the model); VM = pre-drained raised bog; AM = afforested raised bog; KM = cultivated raised bog; vertically hatched = UM; vertically long dashed lines = VM; vertically long dashed lines = KM; horizontally hatched = uncultivated fen; horizontally dashed lines = cultivated fen; diagonally left hatched = *pinus mugo* raised bog and diagonally right hatched = bog forest.

ihre auf Tage aufgelösten Daten nicht so auswerten wie sie es eigentlich wollten und hofften, dass ihre Daten zu einem späteren Zeitpunkt Forschungsgegenstand würden. Die ausgewerteten Daten umfassen die Sommerhalbjahre (Mai bis Oktober) 1958-1972.

Zur Verdunstung wurden die tagesgenauen Messprotokolle der Evapotranspiration und Evaporation ausgewertet. Erstere wurde mit Popoff-Kleinlysimetern gemessen, letztere mit der Wildschen-Waage und Piche-Evaporimetern. Vergleicht man die Evaporation mit der Evapotranspiration, stellt man fest, dass diese nur geringfügig niedriger ist. Dies liegt daran, dass Torfmoose nicht transpirieren können und die Hochmoor-Gefäßpflanzen eher xeromorphe Eigenschaften aufweisen (FIRBAS 1931). Schon OLTMANN (1884) stellte fest, dass sich die Verdunstung lebender und toter Torfmoose kaum unterscheidet. Die hier genutzten Werte sind die der Popoff-Kleinlysimeter. Datenlücken wurden mit den Werten der Wildschen-Waage geschlossen, da die Daten besser korrelieren als die der Piche-Evaporimeter. Des Weiteren enthielten die Messprotokolle der Piche-Evaporimeter viele Lücken. Die höhere Verdunstung, die mit dem Popoff-Kleinlysimeter gemessen wurde, wird nicht durch Transpiration der Vegetation verursacht, da die Vegetation größtenteils aus *Sphagnum*-Arten und xeromorphen Phanerogamen besteht. Eine erhöhte Evaporation von *Sphagnum*-Rasen gegenüber Wasserflächen wurde schon von OLTMANN (1884) beobachtet. Mögliche Gründe hierfür sind die größere zur Verfügung stehende Oberfläche und das weniger starke Albedo von *Sphagnum*-Rasen. Wenn beide Werte nicht vorhanden waren, wurde für den entsprechenden Tag der Monatsmittelwert für die Verdunstung eines Torfmoosrasens aus SCHMEIDL et al. (1970: 58) verwendet. Zu erwähnen ist, dass die Daten zur Verdunstung deutlich lückenhafter sind als die zum Niederschlag, was darauf zurückzuführen ist, dass die Geräte empfindlicher auf Umwelteinflüsse wie z.B. Frost reagieren. Die durchschnittliche Verdunstung auf der Versuchsfläche (gemessen mit Popoff-Kleinlysimetern) betrug von Mai bis Oktober 2,4 mm, der maximale Wert betrug 8 mm (SCHMEIDL et al. 1970: 58). Das liegt in dem Bereich, den schon FIRBAS (1931: 575/576) im Roten Moor (Rhön) gemessen hat.

Der Niederschlag wurde mit einem Schreiber auf die Stunde genau aufgelöst. Außerdem wurden noch zwei Niederschlagssammler (100 cm² in 100 cm Höhe und 200 cm² in Geländehöhe) täglich entleert. Hier wurden die Daten des Sammlers in Geländehöhe genutzt und Lücken mit den Tagessummen des Schreibers aufgefüllt.

Der Abfluss wurde direkt aus SCHMEIDL et al. (1970: 95) entnommen. Dort sind die Monatsmittel tabellarisch dargestellt. Gemessen wurde der Abfluss mit einem flachen Graben, der die gesamte Fläche umschloss und im Nordwesten in ein Messwehr mündete.

4. Das Modell

Als Gedankenmodell kann man eine Hochmoor-Hochfläche und ihre Randzone als eine Pfanne mit einem schwach permeablen Rand betrachten. Im Grenzbereich zwischen Akrotelm und Katotelm kann die hydraulische Durchlässigkeit der Torfe innerhalb weniger Dezimeter um den Faktor 1000 geringer werden (JOOSTEN 1993). Das Katotelm wird daher als undurchlässig angenommen. Die Schwankungen im Moorwasserstand werden

von Niederschlag und Verdunstung verursacht. Sinkt der Wasserstand im Akrotelm, so sacken die Torfmoose in sich zusammen und der Lateralabfluss wird weiter verlangsamt, die Mooroberfläche oszilliert (Mooratmung bei JOOSTEN 1993). In diesem vereinfachten Modell wird lateraler Abfluss aus der Pfanne vernachlässigt. Nur bei Starkregen und einem wassergesättigten Akrotelm fließt das Wasser über den Rand ab, jedoch nur langsam, da die Mooroberfläche rau ist und die Muldenspeicherung den Abfluss verzögert. (Zum Abfluss nach Starkregen vergl. SCHMEIDL et al. 1970.) Muldenspeicherung wird im Modell allerdings nicht berücksichtigt.

Damit ein Hochmoor stabil bleiben kann, muss der Grundwasser- bzw. Moorwasserspiegel für die Torfmoose immer ausreichend hoch sein.

Um eine möglichst einfache Formel zur Abschätzung von Moorwasserständen zu erhalten, wurde die bekannte Wasserhaushaltsgleichung umgeformt zu:

$$MWS_x = MWS_{x-1} + (N-V) * SF$$

Dabei steht MWS_x für den Moorwasserstand am Tag x , MWS_{x-1} für den Moorwasserstand am Vortag, N für den Niederschlag, V für die Verdunstung, SF für einen als konstant angenommenen Speicherfaktor. Der Speicherfaktor wird experimentell bestimmt und gibt das Verhältnis der Wassermengenänderung $(N-V)$ zur Wasserstandsänderung $MWS_x - MWS_{x-1}$ an. Er beschreibt also das wasserverfügbare Porenvolumen.

Die Wasserhebekapazität der Torfmoose wurde in der Literatur bereits beschrieben (z.B. OVERBECK 1975: 294 mit trockenen Torfmoosen). Um diese realitätsnäher testen zu können, wurde eine Scheibe aus dem Akrotelm zwischen Plexiglasscheiben eingebracht und in einen Behälter mit konstantem Wasserstand gestellt. Der Abstand zur Oberfläche der Torfmoosköpfchen betrug 20 cm. Jeweils morgens und abends wurde die Austrocknung der Moose dokumentiert. Der Versuch begann mit wassergesättigten Torfmoosen und wurde nach 12 Tagen beendet.

Um den Speicherfaktor (der sich aus Substanzvolumen und Luftvolumen ergibt) zu bestimmen, wurden Monolithe entnommen und in passgenaue Behälter gesetzt. Danach wurde die Wasserstandsänderung im Monolith gegen die Wassermengenänderung (Beregnung/Verdunstung aufgetragen). Das Modell nimmt an, dass jeglicher Wasserstand, der über der Geländeoberkannte liegt, als Oberflächenabfluss direkt abfließt und am nächsten Tag nicht mehr zu Verfügung steht.

5. Ergebnisse

5.1 Wasserstandmodellierung

Die Auswertung der Monolithe ergab, dass Wassermengen- und Wasserstandsänderungen im Verhältnis 1:3 stehen. 1 mm Niederschlag oder Verdunstung sorgt im Akrotelm für eine Wasserstandsänderung von 3 mm. Für den Speicherfaktor in obiger Gleichung kann man also 3 einsetzen. Mit dem Statistikprogramm R (R CORE TEAM 2013) lässt sich die Formel dann einfach auf die von SCHMEIDL et al. (1970) gesammelten Daten anwenden.

Die Beobachtung des Saughöhenversuchs zeigte, dass bei 20 cm Abstand zwischen Moosköpfchen und Grundwasser der Torfmoosrasen nach mehreren Tagen austrocknet. Dies deckt sich mit den Angaben zum Vorkommen von *Sphagnum*-Arten in Abhängigkeit vom Wasserspiegel bei HÖLZER (2010). Man sieht, dass die Moose tagsüber ausbleichen, allerdings können sie über Nacht, insbesondere bei Taufall, wieder Wasser von unten in die Köpfchen ziehen. OVERBECK (1975) beschreibt die Torfmoose selbst, wie auch Torfmoosrasen als effizienten kapillaren Apparat. Perioden mit einem Grundwasserstand von weniger als 20 cm unter Geländeoberkannte müssen daher zumindest 3 Tage andauern und niederschlagsfrei sein, damit die Torfmoose ausbleichen.

Es zeigt sich, dass der Wasserstand nach dieser Formel in den insgesamt 2576 Tagen der Messperiode nur an 155 Tagen geringer als 20 cm unter der Geländeoberkannte war. Allerdings regnete es an 63 dieser Tage. Schon geringe Niederschlagsmengen reichen, um die Köpfchen der Torfmoose ausreichend feucht zu halten oder sie wieder zu befeuchten. Daher bleiben nur 93 Tage übrig, an denen die Torfmoose zu wenig Wasser zu Verfügung hatten. Da, wie oben beschrieben, der niedrige Moorwasserstand erst nach ungefähr 3 Tagen zum Ausbleichen der Torfmoose führt, müssen entsprechend lange Perioden betrachtet werden. Unter diesen Rahmenbedingungen gab es zwischen 1958 und 1978 in den Vegetationsperioden 12 niederschlagsfreie Ereignisse, bei denen der Moorwasserstand niedriger als 20 cm unter der Geländeoberkante war.

Im Folgenden (Abb. 2) sind modellierte Ganglinien des Moorwasserstandes abgebildet. Als Startwert für das Modell wurde der durchschnittliche Moorwasserstand der Versuchsfläche für den April des jeweiligen Jahres eingesetzt. Da aber in den verschiedenen Vegetationseinheiten unterschiedliche Wasserstände herrschen können, ist dieser Wert eher zu niedrig. Sobald aber die Ganglinie das erste Mal die 0-Linie überschreitet und Oberflächenabfluss entsteht, läuft das Modell mit eigenen Werten korrekt. Die Oszillation der Ganglinien ist nur von Niederschlag und Verdunstung verursacht. Die Niederschlagssummen für die Vegetationsperioden betragen 783 mm für das Jahr 1959, 905 mm für das Jahr 1964 und 947 mm für das Jahr 1965. Der Mittelwert für die Jahre 1959-1968 betrug 843 mm.

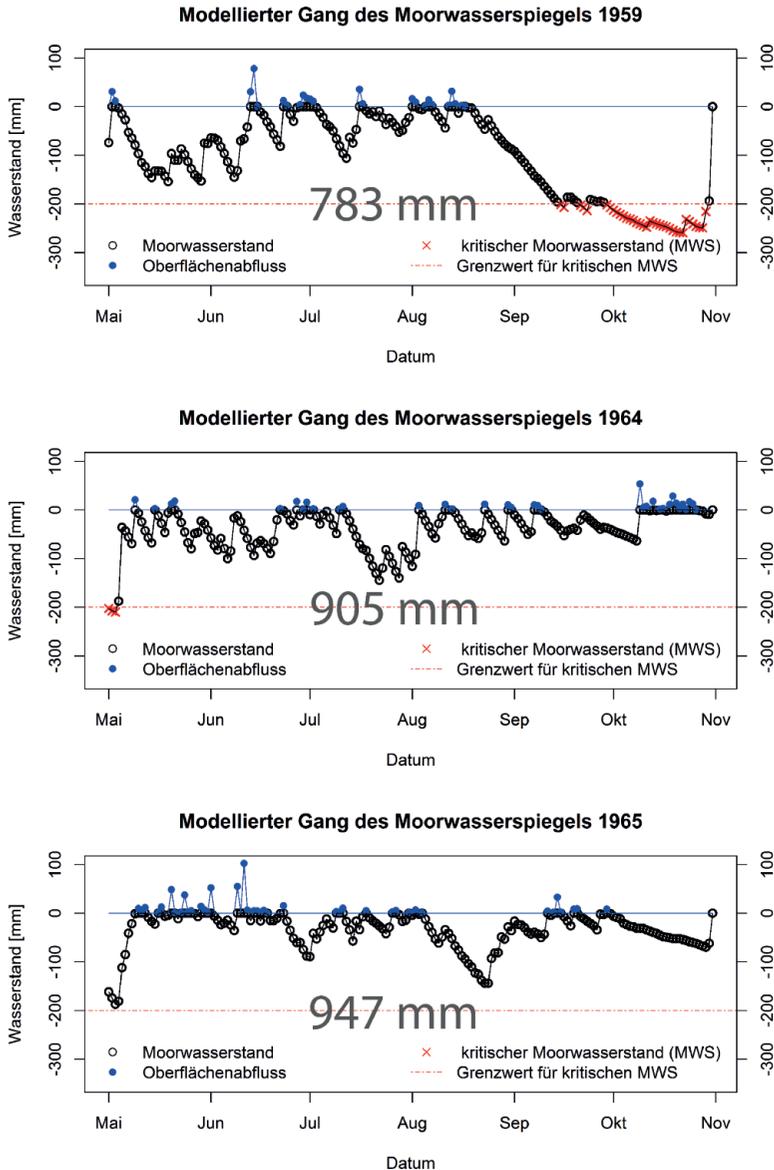


Abb. 2: Modellierte Moorwasserstandsganglinien aus den Messprotokollen der Moorversuchsanstalt Bernau. Die mm Angaben in der Mitte zeigen den Gesamtniederschlag der Vegetationsperiode. Jeder Punkt steht für einen Tag in der Messperiode. Blaue Punkte markieren einen Wasserstand über dem gesättigten Akrotelm, also Oberflächenabfluss. Rot: Moorwasserstand unter 20 cm. Modelling of the water table in the acrotelm with the original daily values of 3 exemplary vegetation periods (1959, 1964 and 1965). The mm values in the middle indicate the precipitation during the vegetation period. 1959 had an unusual dry fall, nevertheless during September and October several gentle rainfalls moistened the *Sphagnum* surface without refilling the acrotelm.

Das Jahr 1959 hatte vergleichsweise wenig Niederschlag in der Vegetationsperiode (SCHMEIDL et al. 1970: 87). Dennoch war bis Mitte August der Niederschlag gleichmäßig genug verteilt, um einen für die Torfmoose ausreichenden Wasserstand zu halten. Eine längere Trockenperiode zwischen Mitte August und Mitte September senkte den Moorwasserstand bis in den kritischen Bereich ab. Die niedrigen Niederschläge im September und Oktober konnten ihn nicht wieder auffüllen. Die sieben kleinen Niederschlagsereignisse im September und Oktober dürften aber dafür gesorgt haben, dass der Torfmoosrasen keinen bleibenden Schaden genommen hat.

Für den Erhalt konstanter Wachstumsbedingungen für Torfmoose ist nicht unbedingt die Niederschlagssumme, sondern vor allem die gleichmäßige Verteilung in der Vegetationsperiode entscheidend. Dies zeigt der Vergleich der Wasserstandsganglinien in Abbildung 2.

Um das Modell zu testen, wurde der berechnete Oberflächenabfluss mit den Abflussdaten von SCHMEIDL et al. (1970) verglichen (siehe Abb. 3). Es zeigt eine gute Übereinstimmung. Allerdings ist der Mai, wie oben erwähnt, durch den Startwert des Modells fehlerbehaftet. Im Vergleich mit Abbildung 2 unten stimmt die Oszillation der Ganglinie gut mit den gemessenen und den modellierten Abflüssen überein. Obwohl das Modell weder Lateralabfluss durch das Moor noch Muldenspeicherung berücksichtigt, werden die Monatsabflüsse gut abgebildet. Es sei aber nochmals darauf hingewiesen, dass die Modellierung ausschließlich den Wachstumskomplex (hellgrüne Flächen in Abb. 4) betrachtet. Die weiteren Vegetationseinheiten werden nur als Randbedingung betrachtet.

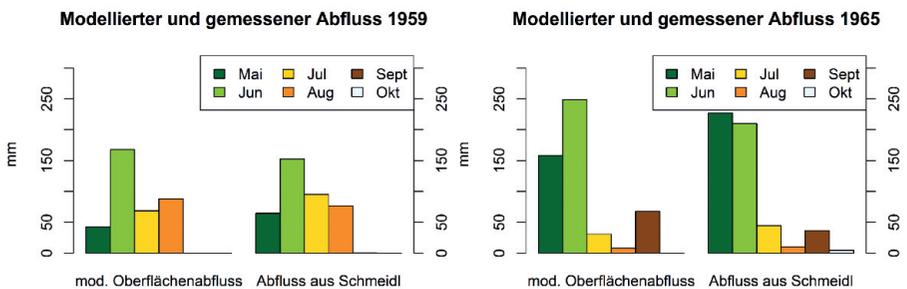


Abb. 3: Vergleich der Abflüsse von 1959 (links) und 1965 (rechts). Jeweils links: Die rein aus Niederschlags- und Verdunstungsdaten modellierten monatlichen Oberflächenabflüsse; rechts: Die von SCHMEIDL et al. (1970) gemessenen monatlichen realen Abflüsse.

Modelled run off using original daily values from precipitation and evaporation (left). Measured values from the gauging weir of the ring ditch surrounding the experimental site (right). The accordance validates the model.

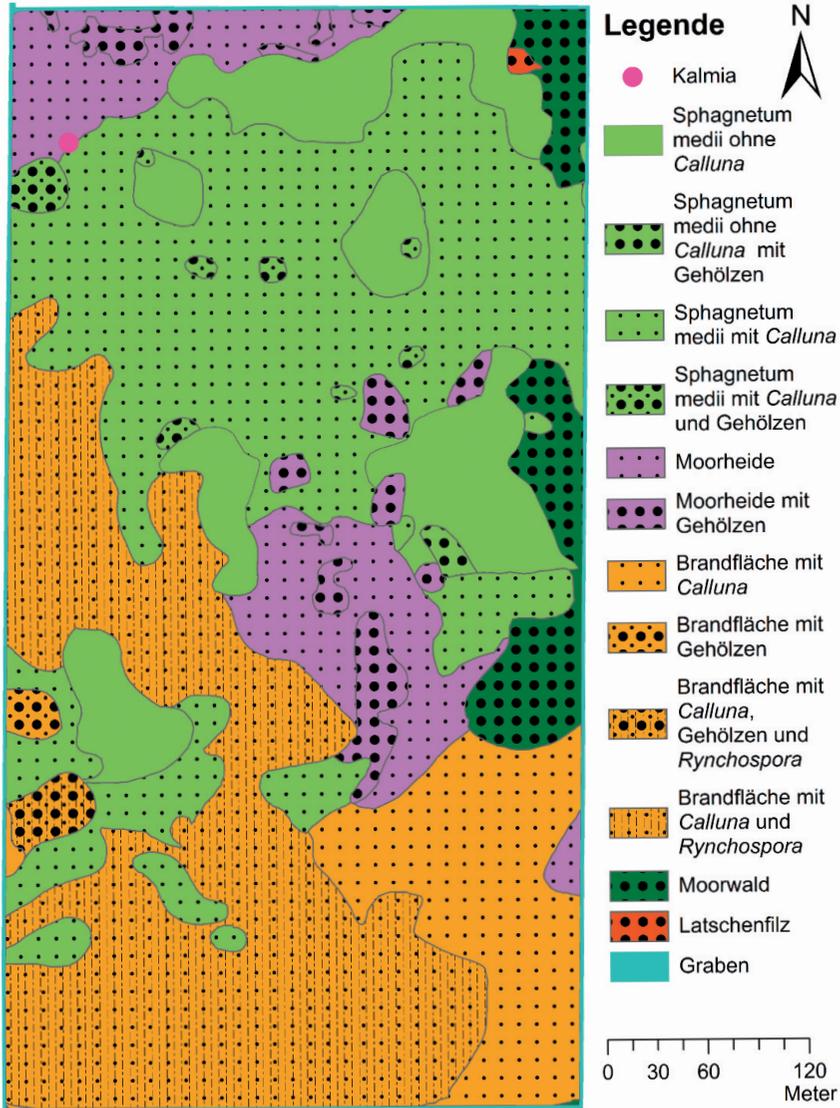


Abb. 4: Vegetationskarte von 1962, abgeändert nach SCHMEIDL et al. (1970)
 Vegetation map from 1962 SCHMEIDL et al. (1970). The orange colour shows the area burned some decades before 1960. Bright green the *Sphagnum* growing complex.

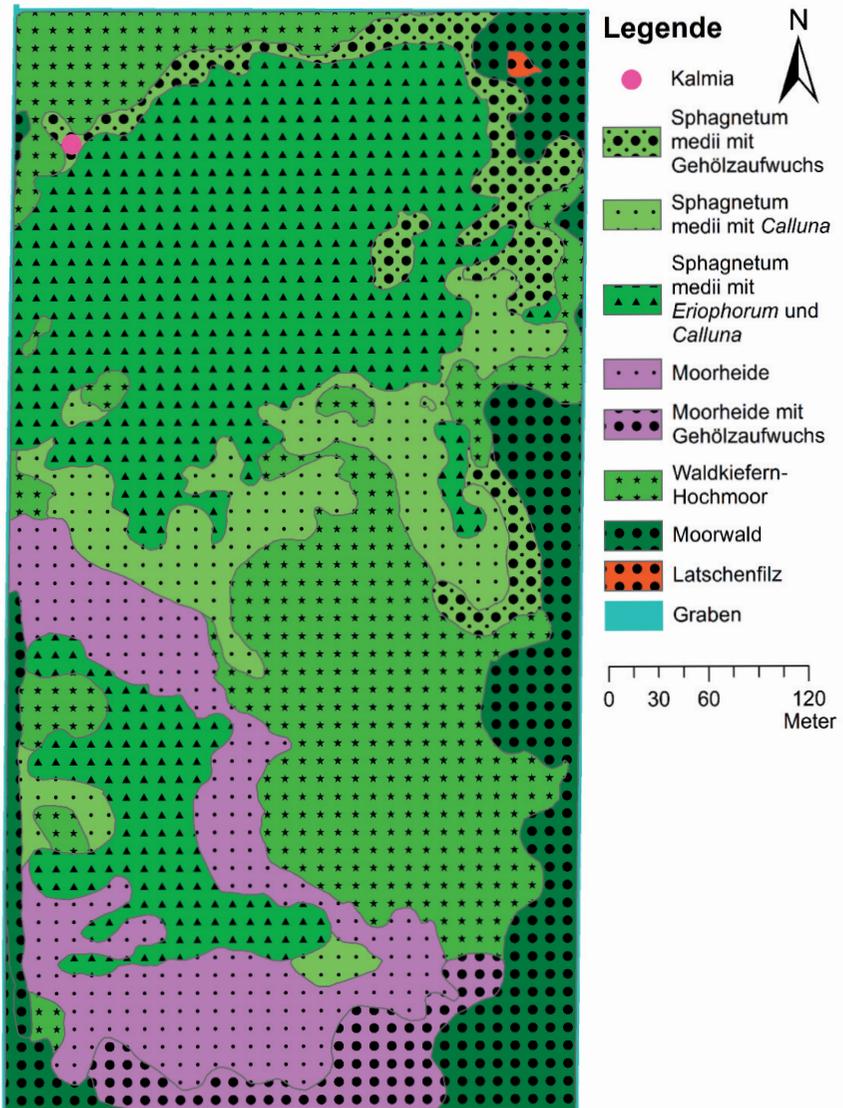


Abb. 5: Vegetationskarte von 2015 (eigene Erhebung)

Vegetation map from 2015. Important is the stability of the growing complex (north half) and the regeneration of parts of the burned heath with *Sphagnum* growing complex and pine bog forest with *Pinus sylvestris*, *Eriophorum vaginatum* and *Sphagnum* moss layer.

5.2 Vegetationsentwicklung

Die drei dominanten Vegetationseinheiten sollen hier genauer vergleichend analysiert werden: der Wachstumskomplex (dominiert vom *Sphagnetum medii*), die Moorheide (sekundäre Einheit nach Vorentwässerung und Brand) und der Moorwald.

SCHMEIDL et al. (1970) haben auf der offenen Moorweite drei Untereinheiten des *Sphagnetum medii* unterschieden. Den optimalen Zustand für ein wachsendes Hochmoor, d.h. ohne Heide (*Calluna vulgaris*) und solche mit Heide und Gehölzanflug. Etwa 10 ha waren 1970 mit *Sphagnetum medii*-dominierten Gesellschaften bewachsen, 2015 waren es 7,2 ha. Der überwiegende Teil entwickelte sich als Saum zu einem Wachstumskomplex mit Kiefernjungwuchs, ein geringerer Teil verheidete in den Randbereichen. Ein Teil der Fläche, die 2015 mit Wachstumskomplex bewachsen war, entwickelte sich aus der Brandfläche mit *Rynchospora alba* neu (ca. 1 ha), die Moorweite arrondierte sich.

Für die einzelnen, 1970 unterschiedenen Untereinheiten des *Sphagnetum medii* stellt sich dies wie folgt dar (Abb. 6): Das *Sphagnetum medii* mit *Calluna* stellte 1970 den größten Flächenanteil. Gefolgt von den Flächen ohne *Calluna*. 2015 ließ sich diese Differenzierung nicht mehr erkennen, *Calluna*-Bulte waren weitgehend gleichmäßig verteilt. Da die Einheit ohne *Calluna* 1970 vorwiegend an den Randbereichen vorkam, sind die Verheidung und die Einwanderung von Waldkiefern nachvollziehbar. Das *Sphagnetum medii* mit *Calluna* und Gehölzen entwickelte sich am Nordrand zu einem Waldkiefern-Hoch-

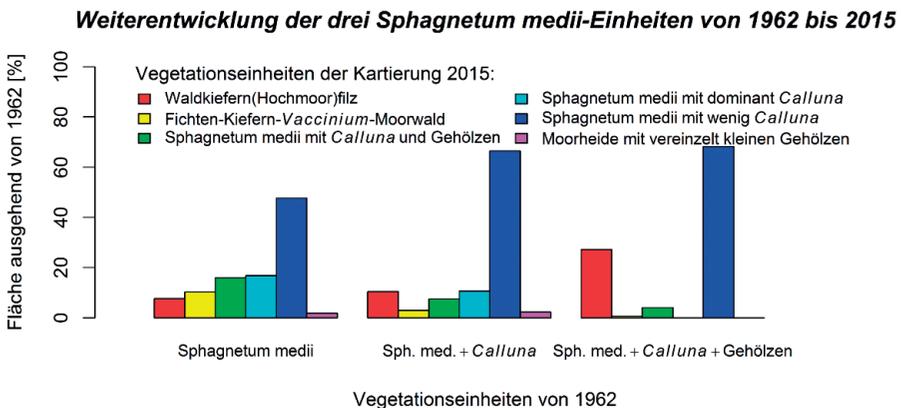


Abb. 6: Graphische Darstellung der Entwicklung der drei großen *Sphagnetum medii*-Einheiten aus Abbildung 4 zu den Vegetationseinheiten in Abbildung 5. Dargestellt wird, zu welchen Vegetationseinheiten sich die ursprünglichen drei *Sphagnetum*-Gesellschaften weiter entwickelt haben. Alle drei Einheiten haben sich zu ca. 60 % zu *Sphagnetum medii* mit wenig *Calluna* weiter entwickelt.

Dynamic of the *Sphagnetum medii* subunits between 1962 and 2015. The subunits with significant *Calluna* dwarf shrub layer (middle and right) regenerated to 60% with *Sphagnetum* growing complex. The edges the growing complex developed to *Pinus sylvestris* bog forests.

moorwald (ca. ein Drittel der ursprünglichen Gesamtfläche). Fast die gesamte restliche Fläche des *Sphagnetum medii* mit *Calluna* und Gehölzen regenerierte und vernässte zu *Sphagnetum medii* mit wenig *Calluna*, also zu einem typischen Wachstumskomplex.

Die 1970 in der nördlichen großen Moorweite mit Wachstumskomplex dokumentierten Waldkiefern gingen deutlich zurück, was bereits von SCHMEIDL et al. (1970: 20) angedeutet wurde: „In ihre Randpartien können zwar hier und da einzelne Krüppelkiefern und Birken eindringen, die aber durch Vernässung nach einigen Jahren zugrunde gehen.“

Im nördlichen Teil der Versuchsfläche stellte sich damit in 45 Jahren ein Zustand ein, den 1970 sicher niemand so prognostiziert hätte. Die Fläche mit dem Wachstumskomplex ist zwar etwas zurückgegangen, aber nicht als regressive Sukzession zu Degradationsstadien, sondern zu Gunsten der Entwicklung einer natürlichen Hochmoorzonierung. Es bildete sich eine Randzone mit Zwerggehölzen (*Vaccinium uliginosum*, *V. myrtillus*, *Calluna vulgaris*) und niedrigen Kiefern.

Betrachtet man die räumliche Sukzession der nördlichen Moorthälfte im Kartenvergleich, so sieht man, dass sich in 40 Jahren eine hochmoortypische Randzonierung entwickelt hat (siehe Foto in Abb. 7). Diese Zonierung trägt zur Eigenstabilität von Hochmooren bei. Der Lateralfluss in der obersten Torfschicht im Moorwald ist sehr langsam. Wasserstandsmessungen in und am Rand der Moorweite ergaben einen Moorwasserstand von maximal -25 cm im *Sphagnetum medii*, in den randlichen Gürteln mit Beersträuchern, Heide und im



Abb. 7: Nördliche Randzone: In die Randzone, die bei SCHMEIDL et al. (1970) noch als Heidesaum kartiert wurde, entwickelt sich ein typischer Hochmoorrandwald.

The research field is a section of a former large raised bog now surrounded by drained meadows and old industrial peat mining areas. In the northern edge of the growing complex a marginal slope forest with scattered *Pinus sylvestris* is developing.

Moorwald bis maximal -60 cm. Bei 20 m Abstand der Wasserstandsmessungen fanden wir im Sphagnetum-Wachstumskomplex -20 cm und im Randsaum -50 cm. Da Torfe mit unterschiedlichem Zersetzungsgrad verschiedene bodenhydrologische Eigenschaften haben (EGGELSMANN 1981), stellen sich in den Vegetationseinheiten der Hochmoorzonation unterschiedliche Wasserstände ein. Die äußeren Vegetationseinheiten weisen stärker zersetzte Torfe auf. Daher ist anzunehmen, dass der laterale Abfluss aus der Hochmoorweite durch Heide und Moorwald gebremst wird.

Die zweite dominante Vegetationseinheit war 1962 die Moorheide, diese entstand flächig durch Vorentwässerung und Brand als Saum zum Randgraben, der die Moorfläche umgab. Die Heiden entwickelten sich überwiegend zu Hochmoor-Kiefernwald (lichter Kiefernwald mit hohem Torfmoosanteil und *Eriophorum vaginatum*) und Übergangs-Moorwald mit Beersträuchern, hier kommen Torfmoose nur spärlich vor.

Die dritte dominante Vegetationseinheit, der Übergangsmoor-Moorwald hat in der Fläche sehr deutlich zugenommen und zwar von 1,1 ha auf 7,2 ha (siehe Abb. 4 und Abb. 5). Im Zentrum entwickelte sich ein Waldkiefern-Hochmoorwald zu einem Wald mit deutlich mehr Birke und Fichte. Der weitaus größte Zuwachs fand jedoch in den Randbereichen statt. Durch den natürlichen Verfall des Grabens und seine Verlandung mit *Sphagnum*-Watten stieg der Wasserspiegel im Randbereich, gleichzeitig kann stärker mineralisch beeinflusstes Wasser eindringen. Hier ist eine exogen beeinflusste Sukzession von Heide zu Moorwald eine sehr plausible Erklärung.

6. Diskussion

In den Protokollen der Versuchsanstalt Bernau liegen tagesgenaue Daten für mehr als 10 Vegetationsperioden vor. So lange exakte Datenreihen können derzeit nicht mehr produziert werden, da die Forschungsperioden generell zu kurz sind. Die Modellierung zeigte, dass die Daten, wie es sich die Autoren wünschten, genutzt werden können, um neue Forschungsergebnisse zu erzielen. Die Annahmen, die in das Modell einfließen, könnten jedoch noch besser validiert werden.

Um die Abhängigkeit der Torfmoose vom Grundwasserstand besser zu bestimmen, wäre es sinnvoll Photosynthesemessungen bei verschiedenen Wasserständen bzw. Wassergehalten der Torfmoospflänzchen durchzuführen. Es wurde nur bestimmt, wann die Torfmoose ihre Photosynthese mangels Wasser einstellen müssen, bzw. wann sie ausbleichen, dadurch können sich Konkurrenzverschiebungen einstellen. Wann sie irreversibel geschädigt werden, ist nicht bekannt. Dies könnte man in Gewächshausversuchen untersuchen. Für eine Übertragbarkeit wäre es sinnvoll zu überprüfen, ob die Verdunstung von Torfmoosrasen mit üblichen, auf Landschaftsbasis verfügbaren, meteorologischen Daten hinreichend genau bestimmbar ist.

Aufgrund seines Kapillarapparates ist höherer und kontinuierlicherer Niederschlag erforderlich, um einen Torfmoosrasen zu bilden als zu seinem Erhalt benötigt wird. Im bayerischen Voralpengebiet sind etwa 1300 mm/a notwendig, um eine unbeeinflusste Regeneration einer Moorheide zu einem Wachstumskomplex zu ermöglichen. Ab weniger als 1000 mm/a degradieren jedoch Wachstumskomplexe ohne erkennbaren äußeren Einfluss (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2015). In einer funktionstüchtigen „Pfanne“ kann der Wachstumskomplex Trockenperioden überbrücken. Ausgebleichte Torfmoosköpfchen reflektieren die Sonneneinstrahlung stärker als nasse, gefärbte, sie verringern die Verdunstung aus dem Akrotelm (EGGELSMANN in JOOSTEN 1993). In Süddeutschland sind ab 1200 mm längere Trockenperioden selten, bei 900 mm aber sehr viel häufiger. Modelliert ergeben sich folgende Zusammenhänge zwischen Niederschlag und kritischen Tagen. Nehmen wir als Referenz die Werte aus den Messungen der Versuchsstation Bernau: Dort ist bei 1400 mm Jahresniederschlag der Niederschlag in der Vegetationsperiode 601 mm, es treten 93 kritische Tage in 10 Jahren auf. Gibt man bei gleicher Verteilung weniger Gesamtniederschlag in das Modell ein, ergeben sich bei 1100 mm 176 und bei 900 mm bereits 501 kritische Tage.

Um klimatische Grenzen der Regenerationskapazität sicher ermitteln zu können, wäre es jedoch sehr wünschenswert Messreihen von Klimastationen bezüglich Niederschlag und Trockenperioden aus alten Datenreihen auszulesen. Diese könnten dann zur Validierung der empirisch ermittelten Grenzen in das Modell eingegeben werden.

Über den Wachstumskomplex, der nur ca. 60 % der Fläche ausmacht, lässt sich das Abflusgeschehen der Gesamtfläche in etwa abschätzen. Um die Randbedingungen einer komplex bewachsenen Fläche besser zu verstehen, sollten weitere Vegetationseinheiten genauer auf ihre hydrologischen Eigenschaften untersucht werden (Moorheide, Waldkiefern-Hochmoor, Latschenfilz). SCHMEIDL et al. (1970: 130) haben im unberührten Hochmoor und im entwässerten Hochmoor Durchlässigkeitsmessungen in verschiedenen Schichten (Dreiphasensystem) durchgeführt. Die von ihnen gemessenen Durchlässigkeitswerte liegen in der Größenordnung, die auch für norddeutsche Hochmoore ermittelt wurden (SCHMEIDL et al. 1970). Eine vollständige Übereinstimmung war laut SCHMEIDL et al. (1970) nicht zu erwarten, da aufgrund der anderen Moorvegetation auch die botanische Torfzusammensetzung eine andere ist. In einem erweiterten Forschungsansatz sollten in den verschiedenen Vegetationseinheiten vom zentralen Wachstumskomplex zum Randwald entsprechend den Schichten des Dreiphasensystems Proben gezogen und mit der rezenten Vegetation korreliert werden. Mit diesen Daten wäre der Lateralabfluss im Akrotelm zum Randwald modellierbar.

In der voralpinen Moorregion kann der entleerte Akrotelm ca. 70 mm Niederschlag aufnehmen bevor es zu einem Oberflächenabfluss kommt, im Durchschnitt beträgt seine Aufnahmekapazität etwa 30-40 mm. Für die Abflussverzögerung bei Starkregen sollte jedoch auch der Muldenspeicher ermittelt werden. Nach SCHMEIDL et al. (1970) ist die Abflussspitze gegenüber der kultivierten Fläche im naturnahen Hochmoor um ca. 10 Stunden verzögert.

Hier sei noch einmal betont, dass jede Übertragung in eine andere Region sehr sorgfältig geprüft werden muss. So ist der Jahresniederschlag in der norddeutschen Moorregion etwa halb so hoch wie in der voralpinen Moorregion. Der Jahresgang der Niederschläge, deren Kurzzeit-Periodizität und der Jahres-Temperaturverlauf sind nicht vergleichbar. Der Sommer in Oberbayern ist durch kurze Trockenperioden und Starkregen geprägt. Die Wasserstandsschwankungen im Akrotelm dürften daher in der norddeutschen Moorregion sehr viel geringer sein als im Voralpengebiet.

Langzeituntersuchungen in Mooren sind Basis für die Interpretation von Oszillationen versus Entwicklungstrend der Vegetation, Grundlagen für die Zielentwicklung bei Renaturierungen und für Prognosen zur Entwicklung unter Annahme verschiedener Klimaszenarien. Die Untersuchungsflächen in den Südlichen Chiemseemooren sind ein einmaliger „Glücksfall“, es gibt Vegetationskarten ab 1904, zeitlich hoch aufgelöste kleinklimatische Untersuchungen von 1958 bis 1972 und 2015/16, Untersuchungen zum Abflussverhalten und der Evaporation. Der Datensatz ermöglicht noch weitere wissenschaftlich interessante und für die Praxis unverzichtbare Auswertungen.

7. Danksagung

Wir bedanken uns bei Herrn Ulrich Sorg vom Bayerischen Landesamt für Umwelt für die Hilfe beim Auffinden des Standortes der originalen Messprotokolle. Besonderer Dank gebührt Herrn Dr. Gisbert Kuhn von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft für die Unterstützung bei der Suche nach den originalen Messprotokollen und der Möglichkeit, diese vor Ort einzuscannen. Für die Unterstützung bei der Digitalisierung und der Erstellung einer neuen Vegetationskarte bedanken wir uns bei Herrn Dr. Hans-Georg Schwarz von Raumer, Universität Stuttgart.

8. Literaturverzeichnis

- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.) (2015): Die Entwicklung der Übergangs- und Hochmoore im südbayerischen Voralpengebiet im Zeitraum 1969 bis 2013 unter Berücksichtigung von Nutzungs und Klimagradienten. *UmweltSpezial*; Augsburg.
- EGGELSMANN, R. (1981): Dränanleitung. Für Landbau, Ingenieurbau und Landschaftsbau. 2., neubearb. und erg. Aufl.; Hamburg (Parey).
- FIRBAS, F. (1931): Untersuchungen ueber den Wasserhaushalt der Hochmoorpflanzen. Mit 40 Textfig.; Leipzig (Borntraeger).
- FRANKL, R. (1996): Zur Vegetationsentwicklung in den Rottauer Filzen (südliche Chiemseemoore) im Zeitraum von 1957 bis 1992. Geobotanisch-standortkundliche Untersuchungen zur Vegetationsdynamik in einem naturnahen Hochmoorkomplex des bayerischen Alpenvorlandes. Zugl.: Bayreuth, Univ., Diss., 1996; Bayreuth: BITÖK, Wiss. Sekretariat, Univ (Bayreuther Forum Ökologie, Bd. 37).

- HÖLZER, A. (2010): Die Torfmoose Südwestdeutschlands und der Nachbargebiete; Jena (Weissdorn-Verl).
- JOOSTEN, H. (1993): Denken wie ein Hochmoor. Hydrologische Selbstregulation von Hochmooren und deren Bedeutung für Wiedervernässung und Restauration. – In: *Telma* **23**: 95-115; Hannover.
- LEININGEN-WESTERBURG, W. GRAF ZU (1907): Die Waldvegetation praealpiner bayerischer Moore, insbesondere der südlichen Chiemseemoore; München (Ungeheuer & Ulmer, Ludwigsburg).
- OLTMANN, F. (1884): Über die Wasserbewegung in der Moospflanze und ihren Einfluss auf die Wasser-
vertheilung im Boden; Breslau.
- OVERBECK, F. (1975): Botanisch-geologische Moorkunde unter besonderer Berücksichtigung der Moore Nordwestdeutschlands als Quellen zur Vegetations-, Klima- und Siedlungsgeschichte; Neumünster (K. Wachholtz).
- PAUL, H. & RUOFF, S. (1927): Pollenstatistische und stratigraphische Mooruntersuchungen im Südlichen Bayern. 1. Teil. Moore Im ausseralpinen Gebiet der diluvialen Salzach-, Chiemsee- und Inngletscher. – In: *Ber. Bayer. Bot* **19**: 4-84.
- R CORE TEAM (2013): R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. Online verfügbar unter <http://www.R-project.org/>.
- SCHMEIDL, H.; SCHUCH, M. & WANKE, R. (1970): Wasserhaushalt und Klima einer kultivierten und unbeherrschten Hochmoorfläche am Alpenrand. Bisherige Ergebnisse von 10 Beobachtungsjahren. – *Schriftenreihe des Kuratoriums f. Kulturbauwesen* **19**; Hamburg (Verl. Wasser u. Boden).

Anschriften der Verfasser:

R. Kaule
 Prof. Dr. B. Huwe
 University of Bayreuth
 Universitätsstrasse 30
 D-95447 Bayreuth
 E-Mail: robin.kaule@gmail.com
 E-Mail: Bernd.Huwe@uni-bayreuth.de

Prof. Dr. G. Kaule
 Institut für Landschaftsplanung und Ökologie
 Universität Stuttgart
 Keplerstraße 11
 D-70174 Stuttgart
 E-Mail: gk@ilpoe.uni-Stuttgart.de

