

Funktion und Verbreitung von Bryophytina in Waldgebieten

Klara Biesinger, WHG, 2025



(von links nach rechts: Polytrichum formosum, Bodenhorizonte, Waldbrand, Tensiometer, Vermehrung, Elatere, Quelle: Wikipedia)

Projektüberblick

In Waldgebieten zeigen Moose vielfältige Wirkungen: durch ihren positiven Einfluss auf das Ökosystem ermöglichen sie, eine gestörte CO₂-Bilanz ins Gleichgewicht zu bringen. Aktuell produziert der Wald in Summe mehr CO₂ als er aufgrund von zu trockenem Boden aufnimmt. Die verschiedenen Funktionen der Moose werden am Beispiel der in Wäldern häufig vorkommenden Laubmoose (Bryophytina) untersucht. Versuche zu Bodensubstraten und Resistenz im Hinblick auf Ausbildung der wichtigen Humusschicht, zur Brennbarkeit und zur Feuchtespeicherung in der Untererde (Modell) werden durchgeführt. Die Versuche zeigen, dass Moose den Erhalt des Ökosystems Wald sichern und vor Waldbränden schützen können. Zusätzlich werden Verbreitungsmechanismen von Moosen identifiziert und gentechnische Verfahren diskutiert. Aufgrund des derzeitigen Zustandes des Waldes ist es an der Zeit, die zahlreichen Vorteile von Moosen zur Rettung des Waldes einzusetzen.

Inhaltsverzeichnis

[Projektüberblick](#)

[1. Fachliche Kurzfassung](#)

[2. Motivation / Theorie](#)

[CO2 Bilanz des Waldes](#)

[Ableitung der Versuche](#)

[Primäre Funktionen](#)

[Ziel der Arbeit](#)

[3. Sekundäre Funktionen / Versuche](#)

[/V1/ Humifizierung](#)

[/V2/ Brandschutz](#)

[/V3/ Bodenfeuchte](#)

[/V4/ Verbreitung und Genetik](#)

[4. Fazit / Ausblick](#)

[Referenzen / Hilfsmittel](#)

1. Fachliche Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Funktion und Verbreitung von Bryophytina stellvertretend für Moose in Waldgebieten. Ein intakter Wald nimmt CO₂ auf, speichert Feuchte in der Untererde und brennt nicht leicht. Ist der Waldboden hingegen ausgetrocknet und fällt dann Regen, werden in beiden Phasen durch die Mikroorganismen zu große Mengen an CO₂ freigesetzt. Im Folgenden werden die wichtigsten Funktionen der Moose im Hinblick auf einen intakten Wald dargestellt und die Verbreitung von Moosen diskutiert. Eine Unterteilung in primäre und sekundäre Funktionen (Bild 1) hilft, den Fokus der Arbeit herauszustellen. Die sekundären Funktionen stehen im Vordergrund, da sie als Benefaktoren für das CO₂ Gleichgewicht und den Bestand des Waldes entscheidend sind.

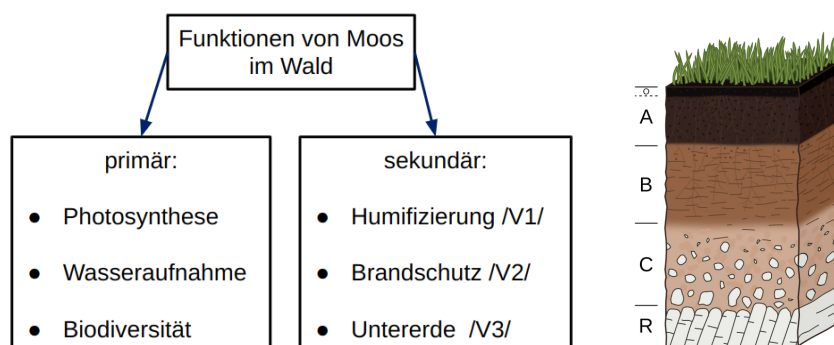


Bild 1: Primäre und sekundäre Funktionen von Moos im Wald und Bodenhorizonte (A: Humus, B: Untererde) aus Wikipedia

Zwei Teilversuche zum Mooswachstum und zur Resistenz sollen zeigen, dass Moose durch

ihre robuste Existenz eine Humifizierung (Zerkleinerung der Streuauflage plus Zersetzung durch Mikroorganismen oder Regenwürmern in feuchtem Milieu) vom Waldboden ermöglichen. Weiterhin wird die Brandschutzklasse von Moosen mit verschiedenen Feuchtegraden nach DIN 4102 bestimmt. Die relevanten Klassen sind A1, B1 und B2 jeweils für nasses, angetrocknetes und getrocknetes Moos. Dadurch sind gezieltere Prognosen der Waldbrandgefahr möglich. Ein qualitatives Modell zur Abnahme der Bodenfeuchte nach Niederschlag wird entwickelt und mit Hilfe von Experimenten validiert. In einer Analogie wird der Waldboden als Kondensator betrachtet. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass z.B. humifizierte Waldböden mit größerem Verdunstungswiderstand den aufgenommenen Niederschlag deutlich länger halten.

Verbreitungsmechanismen inklusive Genetik werden anschließend behandelt. Neben der sexuellen Verbreitung über die Sporen und der vegetativen über Pflanzenteile werden 4 kontrolliert gentechnische Ansätze in Form eines Gedankenexperiments vorgestellt. Sie zielen auf eine effizientere Sporenausbreitung, die Anpassung an besondere Lichtverhältnisse, der verbesserten Widerstandsfähigkeit (Kälteresistenz) und eine weitflächigere Sporenausbreitung ab. Das vollständige Genom muss vorliegen, um die Verfahren Homologe Rekombination oder CRISPR/Cas9 anzuwenden. Die Risiken der Gentechnik werden diskutiert. Das konkurrenzschwache Verhalten und beschränkte Wachstumshabitat von Moosen limitiert mögliche Folgen.

2. Motivation / Theorie

CO2 Bilanz des Waldes

Medien lassen verlauten, dass der Wald aktuell mehr Kohlendioxid abgibt als er aufnimmt [Faz24,Spe24]. Das Gleichgewicht zwischen Abgabe und Aufnahme von CO₂ ist gestört. Mehrere Ursachen wie Monokulturen, Dürren, Waldbrände und Schädlinge tragen zu dem Umstand bei. Neben der Flora und der Untererde erfüllen die Streuauflage und Humus [Bm], ihre Aufgabe nicht mehr (Bild 2). Die Streuauflage besteht u.a. aus Blättern oder Nadeln, Moos und Humus und nehmen CO₂ auf. Mikroorganismen in der Streuauflage produzieren als Stoffwechselprodukt CO₂:

- Ist der Waldboden stark ausgetrocknet und fällt im Anschluss Regen, dann werden durch die Mikroorganismen insgesamt zu große Mengen an CO₂ freigesetzt.

Dieser Mechanismus ist die Ursache für das Ungleichgewicht. Destruenten wie Regenwürmer (*Lumbricus terrestris*) erzeugen das schwarze Gold: Humus. Der Prozess der Humifizierung verläuft sonst über die Zerkleinerung und Zersetzung durch Mikroorganismen [Hum09]. Moos schafft die besten Voraussetzungen für eine Humifizierung durch Feuchteretention in mehrfacher Hinsicht.

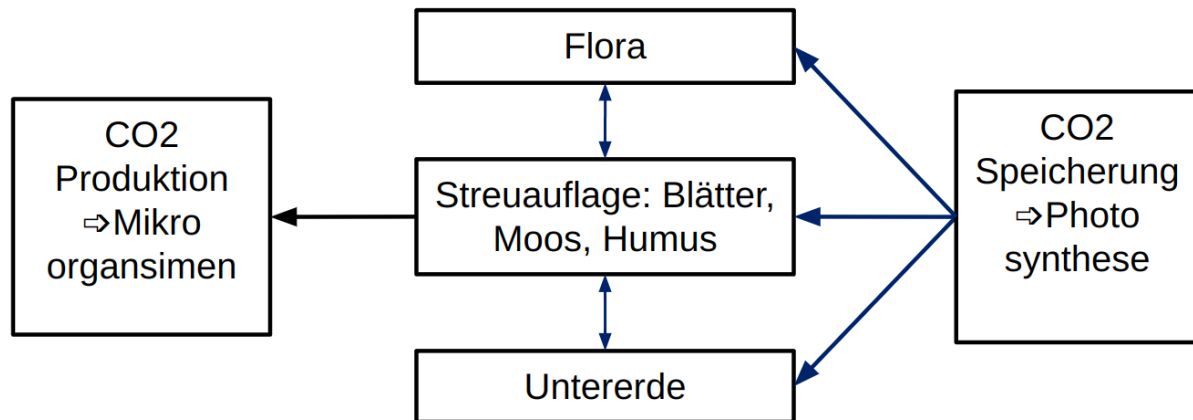


Bild 2: Die Streuauflage bestimmt das Gleichgewicht zwischen Produktion und Speicherung von CO₂.

Ableitung der Versuche

Moose vereinen mehrere positive Eigenschaften: Sie ermöglichen durch ihre Existenz eine Humifizierung des Waldbodens indem sie Destruenten und Mikroorganismen (Versuch Humifizierung) beherbergen. Sie sind kaum brennbar (Versuch Brennbarkeit) und sorgen für eine verzögerte Verdunstung von Feuchtigkeit aus der Untererde (Versuch Bodenfeuchte). Moose lassen sich durch den Einsatz von Gentechnik unter Beachtung von Risiken kontrolliert verbreiten (Gedankenexperiment). Nadelwälder wie Fichte, Kiefer etc. auf teilweise sauren Böden besitzen meist dicke Streuauflagen mit geringem Humusanteil und tragen dadurch zur Verschlechterung der CO₂ Bilanz bei. Laubwälder (Buche, Eiche etc.) sind vorteilhafter. Sie machen ungefähr die Hälfte der Waldfläche aus. Mischwälder sind ebenfalls verbreitet. Moose wachsen auch auf sauren Böden gut. Moose eignen sich dadurch zur Sanierung Waldes. Eine Minimierung der Waldbrandgefahr (Brennbarkeit) ist zur Sicherung des Waldbestandes und zur Erhaltung der Humusschicht wichtig. Die Waldbrandgefahr ist in Nordost- und Nordwestdeutschland und im Oberrheinischen Tiefland besonders groß [Bu2]. Hier besteht ein Bedarf für einen erhöhten Anteil an Moosen. Wie in Abschnitt /V4/ Verbreitung beschrieben, liegen keine Messungen zur Verbreitung der verschiedenen hauptsächlichen Moosarten vor.

Übergeordnet ist bei Moosen zwischen Primär- und Sekundäreffekten (Benefaktoren) im Hinblick auf heimische Wälder zu unterscheiden (Bild 1):

➤ primär:

- Photosynthese
- Wasseraufnahme
- Bioindikator

➤ sekundär:

- Humifizierung: Feuchtigkeit, Biodiversität; saure Böden, Hitzeresistenz /V1/
- Brandschutz: Brennbarkeit nach DIN4102 /V2/
- Untererde: Modell zur Bodenfeuchte /V3/

Die vorliegende Arbeit fokussiert auf die bedeutenden Sekundäreffekte (Benefaktoren). Ein Überblick zu weiteren Vorteilen, die Moose zu einem wesentlichen Beitrag zur Rettung des Waldes prädestinieren, ist gegeben:

- gedeihen zu jeder Jahreszeit
- besiedeln als Pionierpflanzen schnell und effizient (z.B. nach Waldbränden)
- genetisch einfach zu manipulieren

In der Arbeit sind die neben Leber- und Hornmoosen hierzulande weit verbreiteten Bryophytina oder Laubmoose nach [Fra18] stellvertretend für die Familie der Moose ausgewählt [Nat00]. Der Begriff "Moos" bezieht sich vornehmlich auf Laubmoose. Die Versuche wurden mit dem häufig anzutreffenden Polytrichum (Widertonmoos) durchgeführt. Dabei ist im heimischen Mischwald Polytrichum commune von Polytrichum formosum bei unmittelbarer Betrachtung nicht zu unterscheiden: Man benötigt optische Hilfsmittel. Ein eindeutiges Unterscheidungsmerkmal ist beispielsweise nur unter einem Mikroskop am Blattquerschnitt zu erkennen: Die Endzellen der Lamellen von Polytrichum commune weisen eine Einbuchtung auf. Sollte es sich beim gesammelten Moos um Polytrichum commune handeln, ist das unproblematisch, da beide Arten derselben Gattung Polytrichum angehören und sehr ähnliche Eigenschaften besitzen [Fra18].

Primäre Funktionen

➤ Ökosystem Wald

Als Pionierpflanzen führen Moose wie Bryophyta zu einer schnellen Besiedlung z.B. nach Waldbränden und steigern den Anteil des organischen Materials im Boden. Wird dieses abgebaut, nimmt der Mineralstoffgehalt des Bodens zu. Es entsteht die wertvolle Humusschicht, auf der auch Sekundärsukzession möglich ist. Moose betreiben auch eine R-Strategie, d.h. sie haben eine hohe Reproduktionsrate, aber im Verhältnis zu anderen Pflanzen im Wald nur eine kleine Wuchshöhe. Zusätzlich stellen Moose aufgrund ihres Charakters für viele Pflanzen und Tiere einen geeigneten Lebensraum bereit, der zu einer hohen Biodiversität führt. Die Moose enthalten polyphenolische Wirkstoffe, die verhindern, dass sie von den meisten Pflanzenfressern wie Insekten oder Schnecken gefressen werden.

➤ Wasserhaushalt Moos

Moose selbst tragen zur Speicherung von CO₂ und Wasser bei. Optimal verläuft die

Photosynthese in der turgeszenten Phase [Fac24]. Das zu den endohydrischen Moosarten gehörende *Polytrichum formosum* ist sowohl zur inneren als auch äußeren Wasseraufnahme fähig. Wasser- und Nährstoffaufnahme sind miteinander verbunden. Lamellen auf den Blattrippen fungieren als poikilohydre Wasserspeicher, die bis zum 15-fachen ihres Trockengewichts aufnehmen können [Fra18, S. 238].

➤ Bioindikator

Moose als poikilohydre Pflanzen nehmen radioaktive Elemente und andere Schadstoffe auf und sind dadurch gute Bioindikatoren.

Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist, die durch sekundäre Funktionen der Moose gegebenen Möglichkeiten zur Verbesserung der CO₂ Bilanz des Waldes zu erforschen:

- den Erhalt des Ökosystem Wald (Versuch 1, 3)
- Schutz vor Waldbränden (Versuch 2, 3)

Eine zusätzliche Verbreitung von Moosen mittels gentechnischer Verfahren wird von einem Gedankenexperiment (Versuch 4) beleuchtet. Dabei ist es wichtig, die Risiken im Blick zu behalten.

3. Sekundäre Funktionen / Versuche

/V1/ Humifizierung

Die Humifizierung (Zerkleinerung der Streuauflage plus Zersetzung durch Mikroorganismen oder Regenwürmer in feuchtem Milieu) von Waldböden ist ein Sekundäreffekt aus Moosbewuchs [Bm]. Die im Moos und der Untererde gespeicherte Feuchtigkeit zusammen mit der durch Moos bedingten Biodiversität schafft die notwendigen Bedingungen. Es wird so verhindert, dass der Waldboden zu stark ausgetrocknet und die Mikroorganismen zu großen Mengen an CO₂ freisetzen, besonders wenn im Anschluss einer Trockenperiode Regen fällt. Deshalb fokussieren die Teilversuche 1 und 2 auf das Mooswachstum an sich. Unter den entnommenen Bodenproben aus dem heimischen Mischwald nahe Neuwied befand sich stets eine 3-4 cm dicke Humusschicht.

Teilversuch-1: Wächst Moos auf sauren Böden?

Materialien-1:

1 Einmachglas mit Deckel und Gummiring zur Abdichtung, Kies, Holzkohle, Ziplock-Tüte,

Hammer, welke Laubblätter, Wasser, 1 Moospflanze, Waldboden, Pipette

Durchführung-1:

Zunächst wird zur Untermuerung der Boden des Glases mit einer ca. 1 cm hohen Kiesschicht bedeckt, dann etwas Holzkohlepulver verstreut bis diese nicht mehr zu sehen ist. Anschließend werden zur Isolation zerkleinerte, welke Blätter als dünne Schicht auf der Holzkohle verteilt. Dann wird eine dicke Schicht Waldboden darauf gegeben und die Moospflanze eingesetzt. Zuletzt wird die Pflanze mit etwas Wasser gegossen, der Behälter mit Gummiband und Deckel verschlossen und draußen an einen mäßig schattigen Ort gestellt. Das Ökosystem muss sich nun in ein Gleichgewicht bringen, das einige Tage dauern kann. Dieses wird dann mehrere Tage bis Monate beobachtet und bei Bedarf nachgegossen.



Bild 3: Beobachtung an Tag 2, Beobachtung an Tag 44, Beobachtung an Tag 96

Das Moos (*Polytrichum*) und der Waldboden wurden einem Mischwald nahe Neuwied entnommen. Ein Labor stellte einen mit $\text{pH} = 3.9$ relativ sauren Boden fest [Ra24].

Beobachtungen-1:

- Die zu erkennenden Wassertropfen am Glasrand verdeutlichen, dass Moose Transpiration betreiben (Tag 2)
- Erst nach etwa 44 Tagen beginnen sich Sporenkapseln zu entwickeln.
- An Tag 96 wurde bei engmaschiger Beobachtung eine voll ausgeprägte Sporenkapsel beobachtet.
- Zusätzlich wird festgestellt, dass in den Wintermonaten Moos eine sehr gute Kälteresistenz aufweist. Im Frühjahr besteht aufgrund der höheren Lichtintensität und Temperatur ein schnelleres Mooswachstum.
- *Polytrichum formosum* wächst auf dem sauren Boden aus einem Mischwald im Vergleich zu einer Gegenprobe auf Vulkanboden [Fac24] sehr gut. Der pH-Wert und liegt bei 5,5 pH (Analyse nach Ellenberg inklusive Spurenelement).

Teilversuch-2: Ist Moos resistent gegen Austrocknung?

Materialien-2:

Moosprobe 4 Wochen lang bei Raumtemperatur (ca. 20° C) getrocknet, Wasser, Petrischale, Pipette.

Durchführung-2:

Die Moosprobe wird in die Petrischale gelegt. Anschließend tropft man mittels einer Pipette etwas Wasser hinzu.

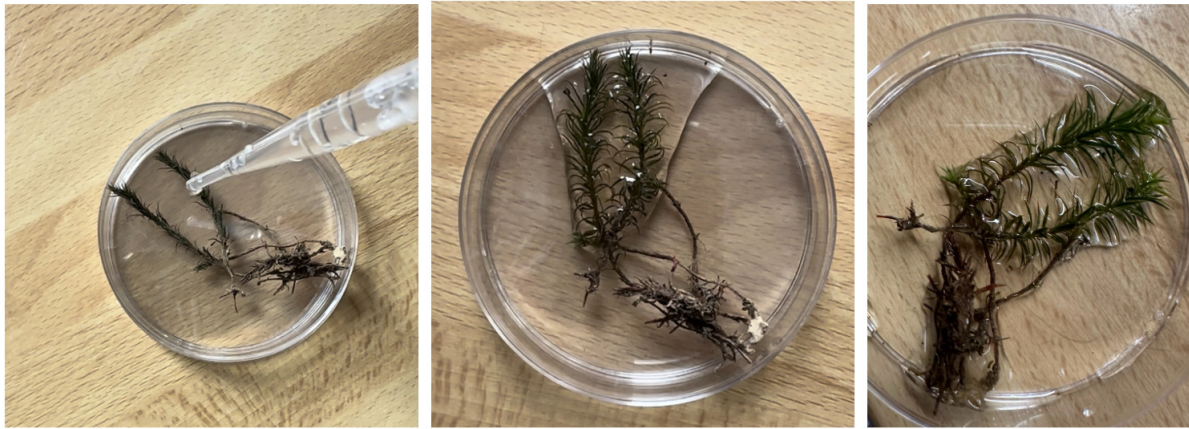


Bild 4: Petrischale mit Trockenmoos, 1 Minute nach Befeuchtung, 2 Minuten nach Befeuchtung

Beobachtungen-2:

- Es vergeht verhältnismäßig lange Zeit bis zur vollständigen Austrocknung von Moosen. Indem sich die Blätter der Moose krümmen und dicht um das Stämmchen anlagern, schränken sie die Wasserverdunstung ein und sind so über einen langen Zeitraum vor vollständiger Austrocknung geschützt.
- Die Moose fallen bei Austrocknung in einen Zustand latenten Lebens. Dies nennt man Dormanz. Ohne jegliches Wasser können sie zwar keinen Stoffwechsel betreiben, sie haben dafür aber im Vergleich zu Gefäßpflanzen keinen Welkstress oder Transpirationsprobleme. Die grün-braun gefärbten Blätter sind ein Indiz dafür, dass sich noch lebende Zellen in der Moospflanze befinden.
- Die Moospflanze kann durch den Kontakt mit Wasser wiederbelebt werden, indem das Wasser innerhalb kürzester Zeit über Rhizoide und Membranen aufgenommen wird. Somit kann der Gasaustausch wieder aufgenommen werden.

Zusammengefasst haben die beiden Teilversuche gezeigt, dass Moos eine sehr robuste Pflanze ist, die weder vom Bodensubstrat noch von stetiger Flüssigkeitszufuhr abhängt.

/V2/ Brandschutz

Materialien:

Feuerzeug, wenige Stunden lang getrocknetes Moos (Probe 1), 7 Tage lang getrocknetes Moos (Probe 2), 6 Wochen lang getrocknetes Moos (Probe 3).

Durchführung:

Alle Moosproben werden im Außengelände mit dem Feuerzeug angezündet.

Beobachtungen:

- Probe 1: Das Moos ist schwer entflammbar und glimmt nur leicht, es geht schnell wieder aus.
- Probe 2: Das Moos ist ebenfalls schwer entflammbar, aber brennt eher als Probe 1. Es ist ein schnelles Erlöschen der Flamme festzustellen.
- Probe 3: Das Moos ist normal entflammbar, die Entzündung ist besser als bei Probe 2. Ebenfalls besteht eine längere Brenndauer als bei Probe 2. Hier ist jedoch auch im Vergleich zu einem Holzästchen ein relativ schnelles Erlöschen der Flamme festzustellen.

Die Menge an Wasser, die die Moosproben in ihren Zellen gespeichert haben, wirkt sich auf die Entflammbarkeit aus. Das Erreichen der Brennstoffklasse B2, wie die Tabelle 1 zu den Brennstoffklassen nach DIN 4102 nahelegt, ist für vollständig getrocknetes Moos ein guter Wert. Es kann zwar Feuer fangen, trägt aber nicht zur Flammenausbreitung bei und verringert folglich die Waldbrandgefahr. Teilweise trockenes Moos ist schwer entflammbar und nasses Moos nichtbrennbar. Zusätzlich trägt in der Untererde gespeicherte Feuchtigkeit zur Verhinderung von Waldbränden bei.

| Brennstoffklasse | Typisierung mit Erläuterung | Beispiel |
|------------------|--|--------------------------------------|
| A1 | nichtbrennbar | nasses Moos (mit Wasser vollgesogen) |
| B1 | Schwer entflammbar. Das Material darf nach Entfernen der Zündquelle nicht selbständig weiterbrennen | angetrocknetes Moos |
| B2 | Normal entflammbar. Entzündbarkeit muss bei einer Kanten- oder Flächenbeflammung mit kleiner Flamme auf das in DIN 4102-1 vorgegebene Maß beschränkt bleiben | getrocknetes Moos |

Tabelle 1: Brennstoffklasse, Typisierung mit Erläuterung und Beispiel [Bre24]

/V3/ Bodenfeuchte

Eine wichtige Eigenschaft von Moos als Bodendecker ist, die Verdunstung von Feuchtigkeit aus der Untererde nicht zuletzt durch die Humusschicht zu reduzieren. Gängige Modelle zur

Bodenfeuchte sind komplex [And24], [Ufz24]. Im Folgenden wird ein vereinfachtes Modell basierend auf einer Analogie zu einem Kondensator mit Widerstand als Funktion der Zeit [Wik24K, Wik24B] entwickelt. Der Kondensator repräsentiert in dem Modell die Untererde, der Widerstand die Isolation, hier die Humusschicht. In Bild 5 ist der exponentielle Verlauf (e-Funktion) der Be- und Entladung gezeigt. Letztere ist hier von Bedeutung.

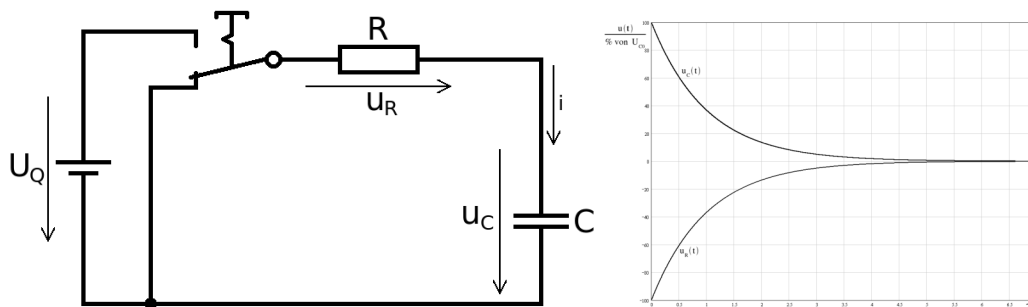


Bild 5: Analogie Kondensator zur Verdunstung von Moos.

Die e-Funktion ist in GeoGebra 6.0 umgesetzt und in Bild 6 dargestellt. Die Spannung U entspricht der Bodenfeuchte (Druckgefälle). Die Kapazität oder Aufnahmefähigkeit der Untererde (Lehm) wird mit $K=1$ angenommen: die gesamte Wassermenge (Q), die durch den Niederschlag (U_0) in den Boden gedrückt wird, wird aufgenommen. Der Niederschlag wird ebenfalls zu 1 bzw. 100% angekommen. Die einzige Unbekannte, die später im Versuch ermittelt wird, ist der Widerstand R. Dieser spiegelt z.B. die Humusschicht, die isolierend wirkt, wieder. Die Zeiteinheit skaliert lediglich die x-Achse und ist auf Stunden statt Sekunden festgelegt.

| | |
|----|---|
| 1 | Annahmen |
| 2 | $N := 1$ |
| 3 | $C := 1$ |
| 4 | $T := 120$ |
| 5 | Formel mit R für Verdunstung |
| 6 | $f(R) := N \cdot e^{-\frac{T}{R}}$ |
| 7 | Gleichung für Punkt |
| 8 | Punkt : $0.1 \cdot N = f(R)$ |
| 9 | $\rightarrow \text{Punkt} : \frac{1}{10} = e^{-\frac{120}{R}}$ |
| 10 | $\text{Solve}(\text{Punkt}, R)$ |
| 11 | $\rightarrow \left\{ R = 120 \cdot \frac{\ln(e)}{\ln(10)} \right\}$ |
| 12 | $\text{Numeric} \left(\left\{ R = \frac{120 \cdot \ln(e)}{\ln(10)} \right\} \right)$ |
| 13 | $\rightarrow \{ R = 52.12 \cdot \ln(e) \}$ |

$$u_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R_C \cdot C}}$$

$$\text{Bodenfeuchte}(t) := \text{Niederschlag} \cdot e^{-\frac{t}{R_K}}$$

Bild 6: Umsetzung des vereinfachten Modells in Geogebra (Gleichung aus Wikipedia).

Für die Versuche misst ein Tensiometer [Ten24] in ca. 15 cm Tiefe unter einer etwa 3-4 cm dicken Humusschicht den Wassergehalt der Untererde, Bild 7. Mit Hilfe eines Eisenstabes wurde dafür ein Loch präpariert. Die Messungen wurden im Sommer 2024 in Folge mehrerer aufeinanderfolgender Regentage mit anschließender längerer Trockenperiode aufgezeichnet.



Bild 7: links: Tensiometer eingesteckt in Moos, rechts: Tensiometer (Länge 23 cm).

Die Messergebnisse wurden auf der invertierten Skala abgelesen und in einen ungefähr geschätzten Prozentwert verwandelt (Startwert: 100%) und in Tabelle 2 eingetragen.

| | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 100% Niederschlag: | in 0.2m Feuchte unter Moos: |
| Messung sofort * | 100% Skalenwert (Vollkreis) * |
| Messung nach 24h = 1 Tag | ≈ 60% |
| Messung nach 72h = 3 Tage | ≈ 30% |
| Messung nach 120h = 5 Tage * | ≈ 10% Bestimmung von R (Vollkreis) * |
| Messung nach 240h = 10 Tage | ≈ 5% |

Tabelle 2: Versuche zur Ermittlung des Widerstandes R

Es lässt sich der angenommene Widerstand R für einen herausgegriffenen Punkt nach 5 Tagen oder 120 Stunden (gefüllter Kreis in Bild 8) zu einem Wert von ungefähr 52 bestimmen. Die anderen Werte (hohle Kreise) bestätigen mit Einschränkung aufgrund von Messungenauigkeit den exponentiellen Verlauf des vereinfachten Modells (rote Linie).

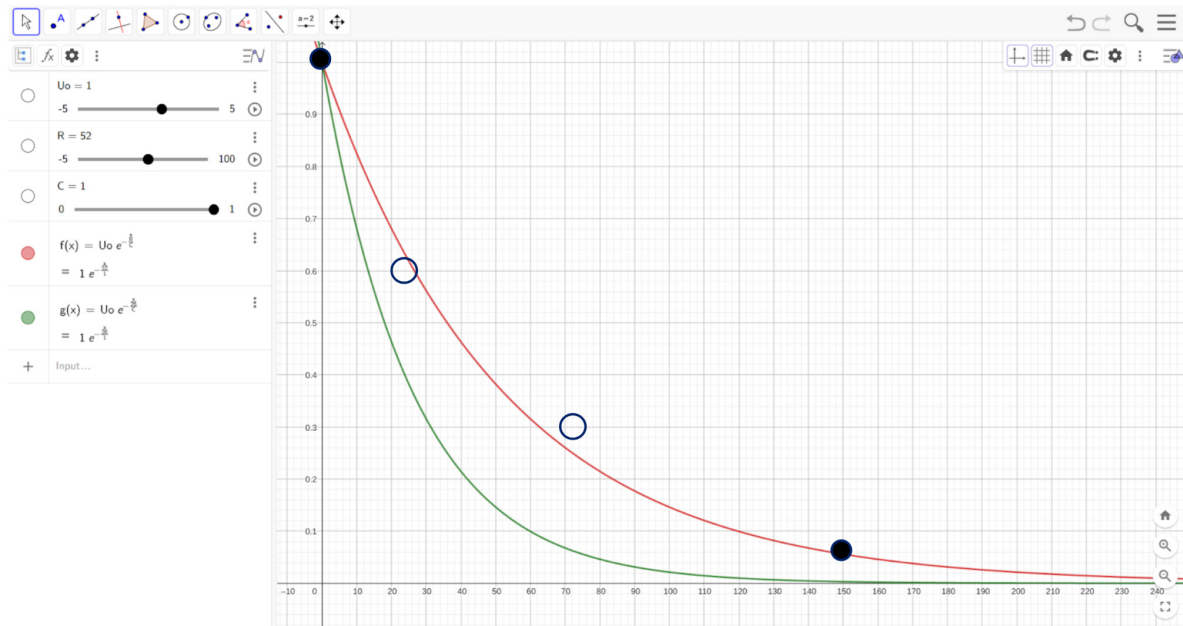


Bild 8: Exponentieller Verlauf der Bodenfeuchte für verschiedene Widerstände des Bodens.

Beobachtungen:

- Im Beispiel beträgt die Halbwertszeit knapp einen Tag, siehe oben. Die Feuchtigkeit in der Untererde fällt exponentiell nach fünf Tagen auf 10% ab.
- Bild 8 zeigt auch die Vorhersage des Modells (grün) für einen Boden mit nur halb so großem $R=26$. Das entspricht z.B. einer dünneren Humusschicht. Es ist auffällig, dass die Kurve dann viel bauchiger ist. Nach einem längeren Zeitraum nähern sich beide Kurven der Nulllinie an. Böden mit größerem Widerstand halten die Bodenfeuchte deutlich länger.
- Die Aufnahmefähigkeit der Untererde ist je nach Bodentyp anders. Das Modell kann diesen Effekt durch einen anderen K-Wert leicht wiedergeben (nicht Gegenstand der Arbeit).
- Die Aussagefähigkeit des Modells ist rein qualitativ. Es wurden nur wenige Datenpunkte bestimmt und die Ablesegenauigkeit vom Tensiometer ist gering.

Mit Hilfe des Modells kann der exponentielle Charakter der Bodenfeuchte in der Untererde qualitativ bestimmt werden. Es zeigt sich die Bedeutung einer Humusschicht zur Isolation. Die Aufrechterhaltung der Bodenfeuchte trägt zusätzlich zur Verhinderung von Waldbränden bei.

/V4/ Verbreitung und Genetik

Eine Karte zur aktuellen Verbreitung der verschiedenen hauptsächlichen Moosarten in Deutschland konnte nicht gefunden werden [Bu2]. Jedoch sind Sammelkarten für seltene Moosarten in [Md] und für Moose als Bioindikatoren beim Bundesumweltamt zu finden [Bu1].

Es ist davon auszugehen, dass vornehmlich in den Nadelwäldern der hohen Mittelgebirge und Alpen [Bf] der Anteil an Moosen nicht ausreichend ist. Die Verbreitungsmöglichkeiten der Moose inklusive der Genetik werden im Folgenden als Gedankenexperiment, das aus vier Ansätzen besteht, vorgestellt.

Bei Laubmoosen unterscheidet man zwei Vermehrungsarten: zum einen die vegetative durch die Brutkörper des **Gametophyten** und zum anderen die sexuelle Vermehrung durch die Sporen des **Sporophyten**. Bei dem untersuchten diözischen Polytrichum spielt erstere die entscheidendere Rolle:

- Die vegetative Vermehrung kann durch alle Teile der Moospflanze erfolgen. Jede Zelle ist in der Lage, sich zu regenerieren. Dies ist den Scheitelzellen geschuldet, die wie Stammzellen funktionieren. Somit können ganze geklonte Moospflanzen gebildet werden.
- Die sexuelle Vermehrung ist geringer vertreten als die vegetative, da an einem Standort oft nur ein Geschlecht vertreten ist und zur Vermehrung zwingend Wasser notwendig ist.

Moose gehören den Diplohaplonten an, d. h. es liegt mit dem Gametophyt eine haploide und mit dem Sporophyt eine diploide Generation vor. Sie gehen in einem heterophasischen und heteromorphen Generationswechsel ineinander über und sind in der Pflanze miteinander verbunden, Bild 9.

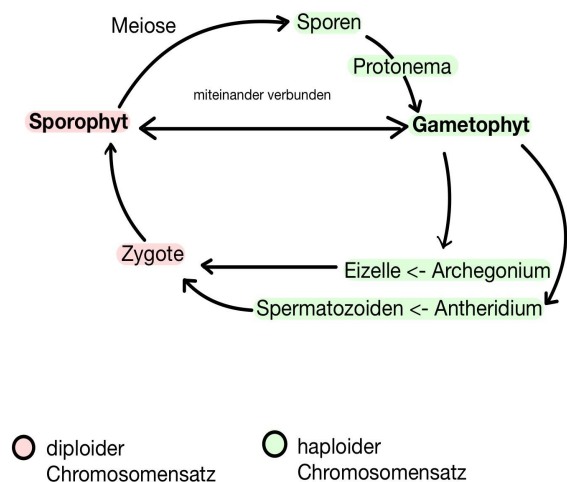


Bild 9: Generationswechsel vom Gametophyt zum Sporophyt [QB12]

Moose eignen sich gut für kontrollierte gentechnische Verfahren, da sie 1. eine dominante haploide Generation besitzen und somit genetische Veränderungen sofort im Phänotyp sichtbar sind und 2. jede ihrer Zellen zu einer vollständigen Moospflanze (vegetative Vermehrung) heranwachsen kann [Sch24]. Das Gefahrenpotential bei gentechnischen

Eingriffen ist allgemein hoch: einmal im Umlauf können die Veränderungen im Genom nicht mehr rückgängig gemacht werden (irreversibel). Jedoch ist das Risiko möglicher Folgen bei Moosen erheblich durch zwei Faktoren reduziert:

- Moos ist selbst als Pionierpflanze konkurrenzschwach, d.h. es kann an einem lokalen Standort leicht verdrängt werden. Nährstoffe und Wasser werden zum größten Teil direkt aus der Luft bezogen, ohne zu stören. Moose besiedeln nur die von Samenpflanzen nicht besetzten ökologischen Nischen. Das ist im Wald anhand der nicht zusammenhängenden Moosflächen leicht festzustellen.
- Moos wächst nur unter bestimmten, relativ feuchten Umgebungsbedingungen, wie sie im Wald oder Moor vorliegen. Das Wachstumshabitat ist beschränkt.

Es scheint unwahrscheinlich, dass kontrollierte gentechnische Veränderungen dazu führen, dass Laubmoose überhandnehmen. Jedoch bedarf es mindestens einer Experten- und Ethik-Kommission, alle Vor- und Nachteile sowie Risiken zu bewerten. Die folgende Ansätze gentechnischer Verfahren sind das Ergebnis der im Rahmen dieser Arbeit angestellten Überlegungen:

- **/Ansatz 1/** Transfer von Elateren der Lebermoose auf Laubmoose:
Da der Schleudermechanismus zur Sporenausbreitung trockene Wetterbedingungen voraussetzt, ist es optimal, die Elateren von Lebermoosen auf Laubmoose bzw. das Widertonmoos zu übertragen, um eine **effiziente Sporenausbreitung** auch bei trockenen Wetterbedingungen in den warmen Sommermonaten zu gewährleisten. Somit könnte eine Verbreitung von Laubmoosen in trockenen Waldbrandgebieten zum Brandschutz gewährleistet werden.
- **/Ansatz 2/** Transfer Verzweigungsmusteranpassung der Lebermoose auf Laubmoose:
Durch den Transkriptionsfaktor MpSPL1 und einen Transfer der lebermoospezifischen microRNA (miRNA) auf Polytrichum formosum, kann die Meristemaktivität von Polytrichum formosum gesteuert werden. Es lässt sich dadurch ein gezieltes Wachstum in Abhängigkeit der jeweils gegebenen **Lichtverhältnisse** erzielen.
- **/Ansatz 3/** Untersuchung von Polytrichum formosum auf Orphan Genes / Transfer der Orphan Genes von Physcomitrella patens auf Polytrichum formosum:
Eine Untersuchung des Laubmooses auf die Orphan Genes oder einen Gentransfer können dazu beitragen, das Wachstum von Polytrichum formosum zu steuern und seine **Widerstandsfähigkeit (Kälteresistenz)** zu verbessern.

- **/Ansatz 4/** Übertragung von Eigenschaften xerophyter Moose auf *Polytrichum formosum*:

Man verändert lediglich die Ausrichtung der Kapsel von *Polytrichum formosum*, um eine **weitflächige Sporenausbreitung** zu erreichen.

Um Moos genetisch zu verändern, muss das Genom des Mooses vorliegen. Dies ist bei *Physcomitrella patens* und *Polytrichum commune* der Fall [Com24]. Auch wenn bei *Polytrichum formosum* nicht das gesamte Genom vorliegt, sind Gemeinsamkeiten bei *Polytrichum commune* durch dieselbe Gattung *Polytrichum* und bei *Physcomitrella patens* durch dieselbe Klasse Bryopsida gegeben [Sch24]. Liegt das Genom vor, so sind die Homologe Rekombination oder CRISPR/Cas9 Methoden einfach anzuwenden [Min23].

4. Fazit / Ausblick

Die vorangehenden Betrachtungen zu sekundären Funktionen von Moosen in Waldgebieten zeigen vielfältige Vorteile auf. Sie machen ihre Rolle als Benefaktoren vor allem im Hinblick auf die CO₂ Bilanz deutlich:

- **/V1/ Humifizierung:**

Moose zeigen somit eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Trockenheit auf (Hitzeresistenz) und können sehr gut wiederbelebt werden. Moos wächst auf sauren Substraten gut und besitzt somit einen Vorteil für saure Waldböden. Sie bieten die Voraussetzung für den Aufbau der wichtigen Humusschicht mittels Feuchtigkeit und Biodiversität. Die Mikroorganismen produzieren dann während und nach Trockenperioden nicht übermäßig CO₂ und halten die CO₂ Bilanz im Rahmen.

- **/V2/ Brandschutz:**

Die Menge an Wasser, die die Moosproben in ihren Zellen gespeichert haben, wirkt sich auf die Entflammbarkeit aus. Moos kann folglich helfen, die Waldbrandgefahr zu minimieren, da es gemäß Brennstoffklasse (DIN 4102) selbst in vollständig getrocknetem Zustand nicht zur Flammenausbreitung beiträgt. Die Kenntnis der Brandschutzklasse bei verschiedenen Feuchtegraden erleichtert eine Zuordnung zum Waldbrandgefahrenindex.

- **/V3/ Feuchtespeicherung Untererde:**

Ein qualitatives Modell zum zeitlichen Verlauf der Verdunstung von Bodenfeuchte unter Moosbewuchs wird entwickelt. Es basiert auf einer Analogie zu einem Kondensator mit Widerstand als Funktion der Zeit (e-Funktion). Messungen werden mit Hilfe eines

Tensiometers durchgeführt. Eine wichtige Aussage des Modells ist, dass eine größere Isolation der Untererde, wie sie z.B. durch Humifizierung erreicht wird, überproportional länger die Bodenfeuchte hält. Das Ökosystem profitiert so länger davon und die Waldbrandgefahr ist reduziert.

➤ /V4/ Verbreitung:

Neben der sexuellen Verbreitung über die Sporen und der vegetativen über Pflanzenteile wird ein Gedankenexperiment zu kontrollierten gentechnischen Verfahren in 4 Ansätzen vorgestellt, um das vorhandene Potential aufzuzeigen. Die Ansätze zielen auf eine effizientere Sporenausbreitung, die Anpassung auf besondere Lichtverhältnisse beim Wachstum, der verbesserten Widerstandsfähigkeit (Kälteresistenz) und eine weitflächigere Sporenausbreitung ab. Hierzu muss das Genom, wie es z.B. bei *Polytrichum commune* der Fall ist, vorliegen, um die Verfahren Homologe Rekombination oder CRISPR/Cas9 anzuwenden. Die Risiken der Gentechnik sind durch das konkurrenzschwache Verhalten und das beschränkte Wachstumshabitat relativiert.

Da der Wald aktuell mehr CO₂ aufnimmt als abgibt und Waldbrände aufgrund des Klimawandels zunehmen, ist es an der Zeit zu handeln.

Referenzen / Hilfsmittel

Die vorliegende Arbeit beruht auf einer Weiterentwicklung der Facharbeit [Fac24]. Hinweise zur Genetik sind das Ergebnis eines Besuches im IZMB [Sch24]. Künstliche Intelligenz hat keine Verwendung gefunden.

[Bre24] Feuertrutz, Brandstoffklassen, 2024,

<https://www.feuertrutz.de/brandschutzklassen-nach-din-4102-und-en-13501-1-26072017>

[Bm]

<https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/boden-wald.html>

[Bu1] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/bioindikation-von-luftverunreinigungen#deutsches-moosmonitoring>

[Bu2]

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/waldbraende#ursachen-fur-waldbrande>

[Bf] <https://www.bfn.de/daten-und-fakten/waldformen-deutschland>

[Com24] Genom *Polytrichum commune*, National Library of Medicine

[https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/?term=txid3213\[organism:exp\]%20AND%20biomol_genomic\[prop\]](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/?term=txid3213[organism:exp]%20AND%20biomol_genomic[prop])

[Fac24] Facharbeit "Verbreitung und Funktion von Bryophytina in Waldgebieten",
Leistungskurs Biologie, 12. Klasse, Werner-Heisenberg-Gymnasium, Neuwied, Juni 2024.

[Faz24] A. Frey, Unter der Oberfläche, 2024, Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung,
Wissenschaft, 13.10.2024.

[Fra18] J.-P. Frahm, Biologie der Moose, 2018,

<https://www.amazon.de/Biologie-Moose-Jan-Peter-Frahm/dp/3662576066>

[Hum09]

<https://www.schulfilme-online.de/de/wirtschaftskunde/c/1231/humus-die-vergessene-klima-chance/p/109911>

[Min23] K. Biesinger, 2023, Teilnahme am CRISPR/Cas9 MINT-EC-Camp in Nürnberg

[Md] <https://www.moose-deutschland.de/daten/summenkarten/kalkgesteine-in-den-alpen>

[Nat00] Höper, 2000, Nationalpark Berchtesgaden, "Moose, Arten Bioindikation Ökologie",
Forschungsbericht 35.

[Ra24] <https://www.raiffeisen-laborservice.de/boden/gartenbau/bodenanalysen-gartenbau>.



(zoom)

[Sch24] Dr. rer. nat. Schallenberg-Rüdinger, im Juli 2024, Besuch am Institut für Zelluläre und
Molekulare Botanik (IZMB), Universität Bonn.

[Spe24] T. Krumenacker, Warum der Wald als Klimaschützer ausfallen wird, 2024, Spektrum
News, 5.10.24

[QB12] Generationswechsel bei Moosen, abgewandelte Darstellung aus [Fra18] Seite 3,
Abb.1-1 und <https://studyflix.de/biologie/moose-3419>