

Mykorrhizapilze auf dem Rückzug – was bedeutet das für den Wald?

Simon Egli

WSL Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf
simon.egli@wsl.ch

Resultate aus einer 32jährigen Datenreihe aus dem Pilzreservat La Chanéaz FR zeigen auffällige Veränderungen in der Artenzusammensetzung der Pilzflora: die Mykorrhizapilze haben im Verhältnis zu den übrigen Waldpilzen deutlich abgenommen. Diese Entwicklung ist beunruhigend, wenn man die Funktionen, welche Mykorrhizapilze für das Ökosystem Wald erfüllen, in Betracht zieht.

Wir gehen möglichen Ursachen dieser Entwicklung nach und stellen die Frage, ob ein Rückgang der Mykorrhizapilze in einem Zusammenhang mit dem Gesundheitszustand der assoziierten Waldbäume stehen könnte.

1 Einleitung

In der Schweiz sind rund 5000 Grosspilzarten nachgewiesen (SENN-IRLET *et al.* 2007). Fast drei Viertel davon leben im Wald. Von diesen sind knapp die Hälfte (1550) Mykorrhizapilze, das heisst, sie leben mit Waldbäumen in einer Symbiose (Abb.1).

Mykorrhizapilze unterstützen die Pflanze bei der Aufnahme von Wasser und Mineralstoffen aus dem Boden, was besonders auf nährstoffarmen Böden oder bei Trockenstress von grosser Bedeutung ist. Zusätzlich können Mykorrhizapilze verschiedene Bäume unterirdisch miteinander vernetzen, was den Austausch von Kohlenstoff, Wasser und Nährstoffen zwischen Bäumen ermöglicht (SIMARD 2009).

Mykorrhizapilze schützen die Feinwurzeln vor pathogenen Krankheitserregern und vermögen gewisse Schadstoffe auszufiltern. Sie sind ihrerseits auf die höheren Pflanzen angewiesen, indem sie von Ihnen lebensnotwendige Kohlehydrate beziehen, die sie als Kohlenstoff-heterotrophe Organismen nicht selbst produzieren können. Viele Mykorrhizapilze sind artspezifisch und leben nur mit ganz bestimmten Baumarten in Symbiose, zum Beispiel der Goldröhrling (*Suillus grevillei*) mit der Lärche, der Zirbenröhrling (*Suillus*

plorans) mit der Arve oder der Buchenmilchling (*Lactarius subdulcis*) mit der Buche.

Neben den Mykorrhizapilzen findet man im Wald eine zweite wichtige Gruppe von Pilzen, die Saprophyten. Man unterscheidet zwischen bodenbewohnenden Saprophyten, welche mithelfen, Blätter, Nadeln und Streu abzubauen und deren Inhaltsstoffe wieder in den Nährstoffkreislauf zurückzuführen und den holzabbauenden Pilzen, welche auf absterbendem und totem Holz wachsen. Besonders wichtig sind hier die ligninabbauenden Porlinge, welche die Holzsubstanz zersetzen und den Weg bereiten für andere Abbauorganismen.

Die dritte Gruppe umfasst die parasitischen oder krankheitserregenden Pilze.

Und nicht zuletzt gibt es unter den Waldpilzen viele wertvolle Speisepilze, die nicht nur von uns Menschen geschätzt und gesammelt werden, sondern auch für Wildtiere eine wichtige Nahrungsquelle darstellen.

Die WSL inventarisiert seit 1975 auf Dauerbeobachtungsflächen im Pilzreservat La Chanéaz (FR) die Pilzflora. Die resultierende langfristige Datenreihe ist eine einzigartige Grundlage, um die Biologie und Ökologie der Pilze zu erforschen und Zusammenhänge

zwischen dem Auftreten von Pilzen und Umwelteinflüssen sowie dem Gesundheitszustand der assoziierten Wirtsbäume zu untersuchen.

2 Das Pilzreservat La Chanéaz – oder warum Pilzinventare langfristig angelegt sein müssen

Im Jahre 1975 wurde das Pilzreservat La Chanéaz begründet, um die Frage des Einflusses des Pilzsammelns auf die Pilzflora zu untersuchen. Auf fünf Dauerbeobachtungsflächen à je 300 m² inventarisierte die WSL von 1975 bis 2006 in wöchentlichen Begehungen von Mai bis November alle Pilzfruchtkörper der Makromyceten (Pilzarten mit Fruchtkörpern grösser als 1 cm Durchmesser). Um Doppelzählungen zu vermeiden, wurden alle registrierten Pilze mit einem blauen Farbstoff markiert. Die resultierende Datenreihe ist heute national wie international einmalig, nirgendwo wurde bisher die Pilzflora über einen so langen Zeitraum in einer so hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung inventarisiert.

Erhebungen von Pilzfruchtkörpern sind aufwendig. Pilze zeigen ihre Fruchtkörper nur während eines relativ kurzen Zeitabschnitts im Jahr und sind oft nur mit mikroskopischen Untersuchungen zu bestimmen. Zudem bilden viele Arten nicht jedes Jahr Fruchtkörper. Von den insgesamt 418 Arten, die auf den 1500 m² Untersuchungsfläche zwischen 1975 und 2006 inventarisiert wurden, haben nur gerade vier Arten jedes Jahr fruktifiziert, 106 Arten wurden nur in einem einzigen Jahr gefunden (Abb. 2). Es sind folglich Untersuchungszeiträume über viele Jahre notwendig, wenn man sich ein vollständiges Bild über die Zusam-



Abb. 1. Mykorrhizasymbiose zwischen dem Dunkelscheibigen Fälbling (*Hebeloma meso-phaeum*) und einer Fichte.

mensetzung der Pilzflora machen will. Retrospektiv kann man aus der Datenreihe herauslesen, dass bei einer angenommenen Untersuchungsdauer von 16 Jahren im Durchschnitt dreiviertel der Arten erfasst worden wären, nach sechs Jahren lediglich die Hälfte. Bei einer Untersuchungsdauer von einem Jahr hätte man nur ein Viertel erfasst, im pilzreichsten Jahr 2001 immerhin fast 50 %, im schlechtesten Jahr 1989 jedoch nur knapp 5 % (Abb. 3).

3 Die Mykorrhizapilze sind auf dem Rückzug

In den 1980er Jahren wurde beobachtet, dass Mykorrhizapilze in Abundanz und Artenvielfalt abnahmen, während dem Sabrobe zunahmen (BOUJON 1997; ARNOLDS 1991; FELLNER 1990). Diese Abnahme des Anteils an Mykorrhizapilzen wurde in einen Zusammenhang gesetzt mit Umweltveränderungen wie erhöhtem Stickstoffeintrag und Bodenversauerung.

Wir haben unsere langfristige Datenreihe auf eine mögliche Verschiebung des Anteils der Mykorrhizapilze überprüft und stellen auch hier eine markante Veränderung fest: der Anteil an Fruchtkörpern von Mykorrhizapilzen hat sich zwischen 1975 und 2006 fast halbiert, er ist von knapp 80 % auf rund 40 % zurückgegangen. Der Anteil an Arten ist ebenfalls zurückgegangen von knapp 75 % auf rund 60 % (Abb. 4).

Nach FELLNER und PESKOVA (1995) bedeutet ein Anteil an Mykorrhizapilz-Fruchtkörpern von 40 % bereits eine «latente Störung». Unter 40 % sprechen sie von einer akuten und unter 20 % von einer lethalen Störung. Das würde also heissen, dass im Pilzreservat La Chanéaz mit 40 % bereits ein kritischer Schwellenwert erreicht ist. Sind das Vorboten für eine Verschlechterung des Gesundheitszustandes der Wälder im Pilzreservat La Chanéaz? Oder sind die Annahmen, die man in den 80er Jahren getroffen hat, nicht richtig? Fest steht, dass die Waldbestände im Pilzreservat La Chanéaz heute kerngesund scheinen.

BOUJON (1997) hat in einem Wald im Kanton VD die Artenlisten von je fünf mykologischen Exkursionen aus verschiedenen Zeitperioden analysiert und ist dabei zu ähnlichen Ergebnissen

gekommen: der Anteil an Mykorrhizapilzarten betrug in der Periode 1925 bis 1937 58 %, in der Periode 1964 bis 1976 53 % und in der Periode 1977 bis 1989 31 %. Also auch hier ist eine deutliche Abnahme des Anteils der Mykorrhizapilze festzustellen, besonders ausgeprägt in den 80er Jahren.

4 Mögliche Gründe für einen Rückgang der Mykorrhizapilze

4.1 Stickstoff

Man weiss heute, dass Mykorrhizapilze sehr sensibel auf Umweltveränderungen reagieren, ganz besonders auf erhöhte Stickstoffkonzentrationen im Boden. In den stark stickstoffbelasteten Gebieten in den Niederlanden wurde in den 1980er Jahren ein drastischer Rückgang der Mykorrhizapilze festgestellt (ARNOLDS 1991; TERMORSHUIZEN und SCHAFFERS 1987). In Dün-

gungsversuchen konnte dieser Effekt experimentell reproduziert werden (TEMORSHUIZEN 1993). Aber nicht nur die Fruchtkörper, auch das unterirdische Pilzmycel von Mykorrhizapilzen zieht sich unter erhöhter Stickstoffzufuhr zurück und vermag die Baumwurzeln nicht mehr zu besiedeln, wie ein Düngungsversuch im Pilzreservat Moosboden im Kanton FR gezeigt hat (PETER *et al.* 2001). Dies ist eine ernst zu nehmende Entwicklung, deren Folgen für den Wald heute kaum abschätzbar sind. Zum Glück kehren die meisten Pilze aber wieder zurück, sobald die Stickstoffeinträge wieder auf

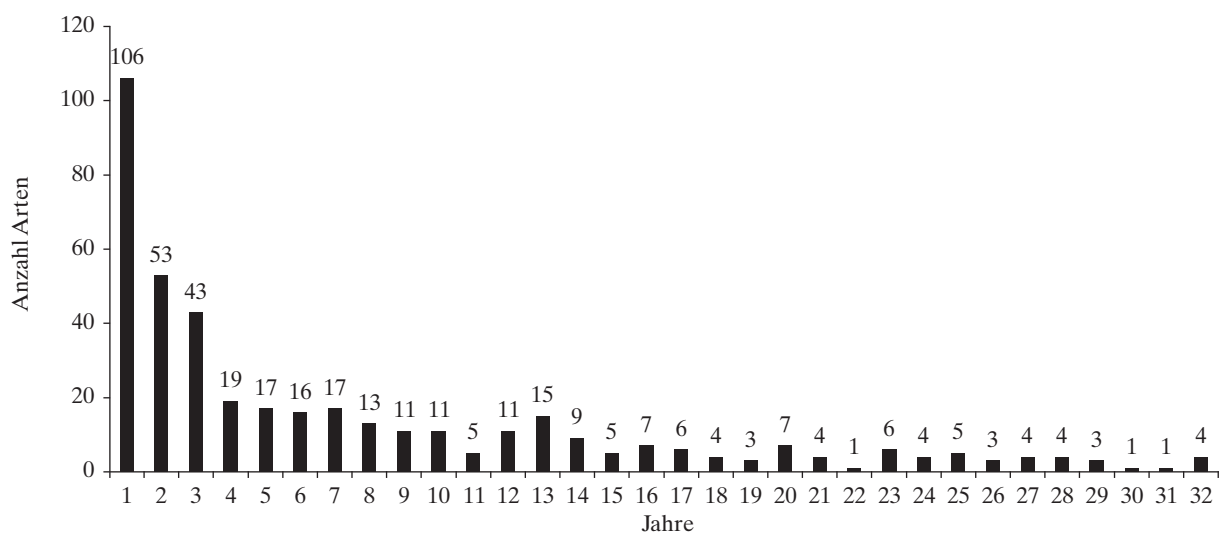


Abb. 2. Erscheinungshäufigkeit der 418 Pilzarten im Pilzreservat La Chanéaz von 1975 bis 2006: 106 Arten bildeten nur in einem einzigen Jahr Fruchtkörper, 4 Arten wurden in jedem der 32 Jahre gefunden.

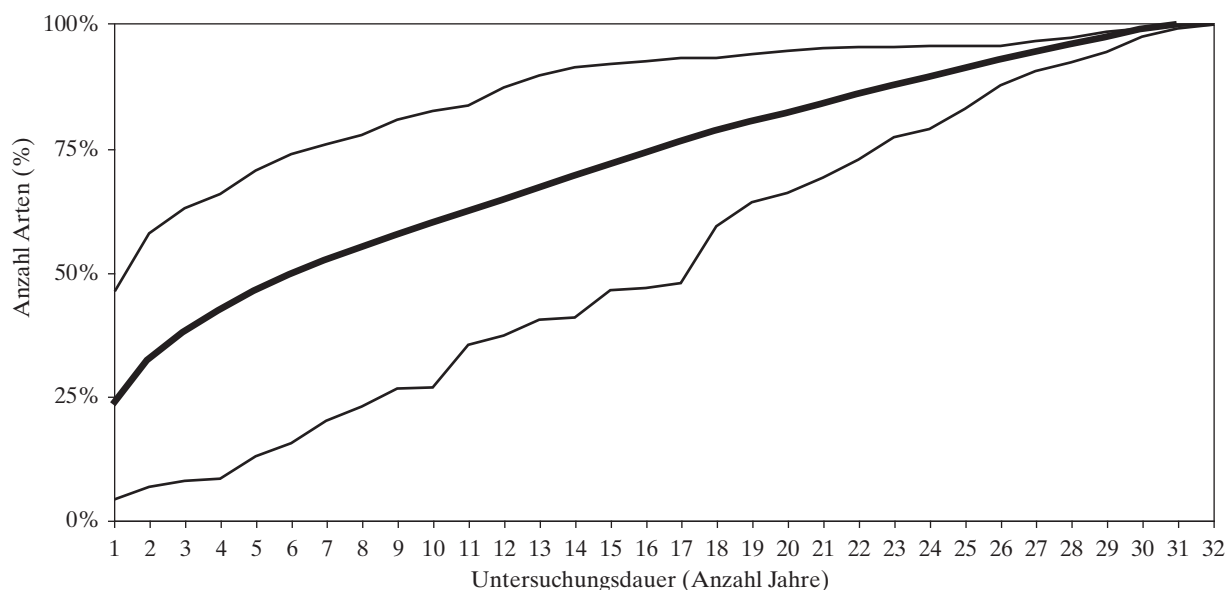


Abb. 3. Prozentualer Anteil der erfassten Arten in Abhängigkeit der Untersuchungsdauer (Anzahl aufeinanderfolgender Jahre) am Beispiel der 32jährigen Datenreihe aus dem Pilzreservat La Chanéaz. Die dicke Linie zeigt die durchschnittliche Anzahl erfasster Arten, die untere Linie den tiefsten, die obere den höchsten Wert.

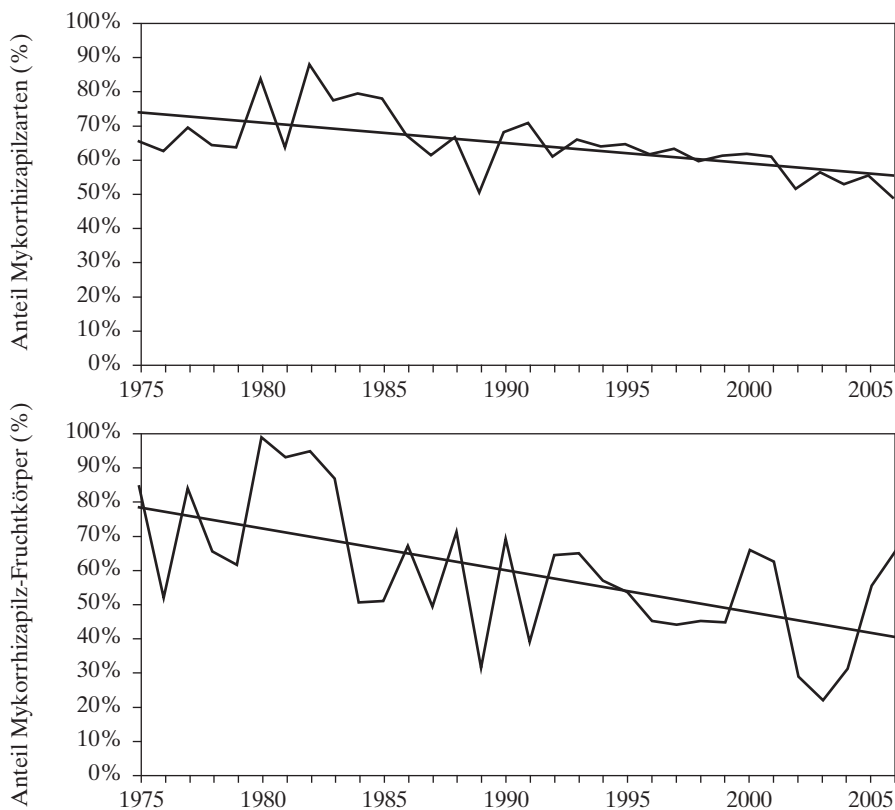


Abb. 4. Anteil der Mykorrhizapilze (%) im Pilzreservat La Chanéaz von 1975 bis 2006.

ein «normales Mass» zurückgehen. Dies kann heute im Süden der Niederlande beobachten werden, seit wirksame Massnahmen zur Reduktion der Stickstoffemissionen ergriffen wurden.

Auch in der Roten Liste der gefährdeten Grosspilze der Schweiz wird auf die Gefährdung der Mykorrhizapilze in Wäldern des Mittellandes durch Nährstoffeinträge aus der Luft hingewiesen (SENN-IRLET *et al.* 2007). Allerdings ist heute der Anteil der gefährdeten Arten im Wald relativ klein im Verhältnis zu den anderen Lebensräumen.

In der Waldsterbensdebatte in den 1980er Jahren und generell bei der Suche nach kausalen Zusammenhängen im Absterbeprozess von Bäumen wurde die Frage gestellt, ob Mykorrhizapilze mit dem Zustand des Waldes etwas zu tun haben könnten. Kausale Zusammenhänge zwischen der Mykorrhizadiversität und dem Baumzustand konnten bisher nicht schlüssig nachgewiesen werden und es wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass offenbar multifaktorielle Prozesse diese Absterbeerscheinungen der Waldbäume verursacht haben (DIGHTON 2003).

4.2 Physiologie des Baumes?

Auf leergelegten Sturmschadenflächen oder auf Kahlschlagflächen findet man in den folgenden Jahren keine Fruchtkörper von Mykorrhizapilzen mehr. Der Grund ist, dass die Pilze nicht mehr von den baumeigenen Kohlenhydraten versorgt werden können. Die Pilzmycelien im Boden können hingegen ohne Bäume noch einige Zeit weiter leben, ohne Fruchtkörper zu bilden. So waren auch 10 Jahre nach dem Sturm Vivian auf der Schadenfläche Schwanden GL noch einige infektiösfähige Mykorrhizapilze im Boden vorhanden, um aufkommende Sämlinge zu besiedeln und Mykorrhizen zu bilden (EGLI *et al.* 2002).

Pilze sind als heterotrophe Organismen davon abhängig, ob und wie viel Kohlenstoff in für sie nutzbarer Form zur Verfügung steht. Das konnte mit Ringelungsexperimenten sehr schön gezeigt werden (HÖGBERG *et al.* 2001): Mykorrhizapilze stellten ihre Fruchtkörperproduktion nach einer im Juni durchgeführten Ringelung in einem Waldföhrenbestand unmittelbar und

praktisch völlig ein und der Stärkegehalt in den Wurzeln nahm stark ab. Ähnliche Ergebnisse liegen aus Beschattungsexperimenten (LAMHAMED *et al.* 1994) und Entlaubungsexperimenten (KUIKKA *et al.* 2003) vor.

Interessant ist auch, dass während des Baumwachstums eine Sukzession der Mykorrhizapilzarten stattfindet (FERNANDEZ-TOIRAN *et al.* 2006). Sämlinge werden von anderen Pilzarten besiedelt als Altbäume. DIGHTON *et al.* (1986) haben die Begriffe «early stage fungi» und «late stage fungi» geprägt. Es kann vermutet werden, dass dies mit einer unterschiedlichen Zusammensetzung der Stoffwechselprodukte des Wirtsbaumes, insbesondere der Kohlenhydrate, in Verbindung steht.

Ein Zusammenhang zwischen Baumwachstum und Pilzwachstum wird von BONET *et al.* (2008) beschrieben. Sie haben festgestellt, dass die Fruchtkörpermenge mit der Basalfläche des Bestandes zusammenhängt. Waldföhrenbestände mit einer Basalfläche um 20 m²/ha produzierten in den Pyrenäen deutlich mehr Pilzfruchtkörper als solche mit einer grösseren oder kleineren Basalfläche. In Übereinstimmung dazu haben eigene Untersuchungen gezeigt, dass Baumbestände mittlerer Baumdichte mehr Pilze produzieren als zu lockere und zu dichte Bestände (AYER *et al.* 2007).

Ein weiteres Argument, dass ein Zusammenhang zwischen Baumwachstum und Pilzwachstum bestehen muss, ist die Tatsache, dass die Hauptfruktifikation der meisten Pilze im Spätsommer liegt, also in einer Zeit, in welcher der Baum sein Wachstum weitgehend abgeschlossen hat und der Eigenbedarf an Kohlenhydraten sinkt. Die produzierten Kohlenhydrate stehen also vermehrt den Mykorrhizapilzen zur Verfügung.

5 Gute und schlechte Pilzjahre: Der Einfluss des Wetters

Die Langzeituntersuchung über den Einfluss des Pilzsammelns hat gezeigt, dass das Pilzsammeln die Pilzflora nicht signifikant beeinflusst (EGLI *et al.* 2006). Sie hat aber aufgezeigt, dass die Fruchtkörpermengen von Jahr zu Jahr stark schwanken. Die Kurven der drei

Behandlungen folgen mehr oder weniger synchron den grossen Schwankungen von Jahr zu Jahr (Abb. 5). Im Jahr 1989 wurden auf den insgesamt 1500 m² lediglich 182 Fruchtkörper gezählt. Das Maximum datiert aus dem Jahr 1993 mit 9800 Fruchtkörpern. Im Mittel waren es 3600 Fruchtkörper pro Jahr. Man spricht in diesem Zusammenhang von guten und schlechten Pilzjahren.

In Pilzsammlerkreisen wird das Wetter als hauptverantwortlicher Faktor für das Pilzvorkommen betrachtet. Nach Niederschlägen und bei nicht zu kalten Temperaturen werden nach Meinung von Pilzsammlern am meisten Pilze erwartet. Doch immer wieder wird man überrascht und die Prognosen werden nicht erfüllt.

Das klimatisch aussergewöhnliche Jahr 2003 zeigt, dass Pilze sehr widerstandsfähig zu sein scheinen gegenüber langen Trockenperioden. Im Sommer blieben in weiten Teilen der Schweiz die Körbe der Pilzsammler leer und man erwartete allgemein einen Totalausfall der Pilzernte. Doch mit den Niederschlägen Ende Oktober wurde 2003 ganz unerwartet zu einem durchschnittlich guten Pilzjahr. Pilzmycelien können offenbar längere Trockenperioden im Boden unbeschadet überdauern. Dass Trockenheit die Fruchtkörperbildung reduziert, wurde auch experimentell nachgewiesen (OGAYA und PENUELAS 2005).

Klimatische Bedingungen können die Pilzflora offenbar auch langfristig beeinflussen. Dies zeigen Resultate von GANGE *et al.* (2007). Sie stellten fest, dass in Grossbritannien seit den 1950er Jahren die Pilzsaison früher beginnt und später endet. Zudem fruktifizieren einzelne Pilzarten seit Mitte der 1980er Jahre zweimal im Jahr statt wie bisher nur einmal. Die Autoren führen diese Entwicklung auf veränderte Klimabedingungen zurück. In Norwegen wurden ebenfalls Verschiebungen in der Phänologie der Pilze festgestellt (KAUSERUD *et al.* 2008). Auswertungen unserer Daten bezüglich dieser Frage sind im Gang.

Die Zusammenhänge zwischen Wetter und Pilzfruchtkörperbildung sind, wie verschiedene Untersuchungen zeigen, jedoch nicht ganz so trivial wie es auf den ersten Blick scheint (KREBS *et al.* 2008; BARROETAVENA *et al.* 2008; RICHTER 2005). Auch die ersten Aus-

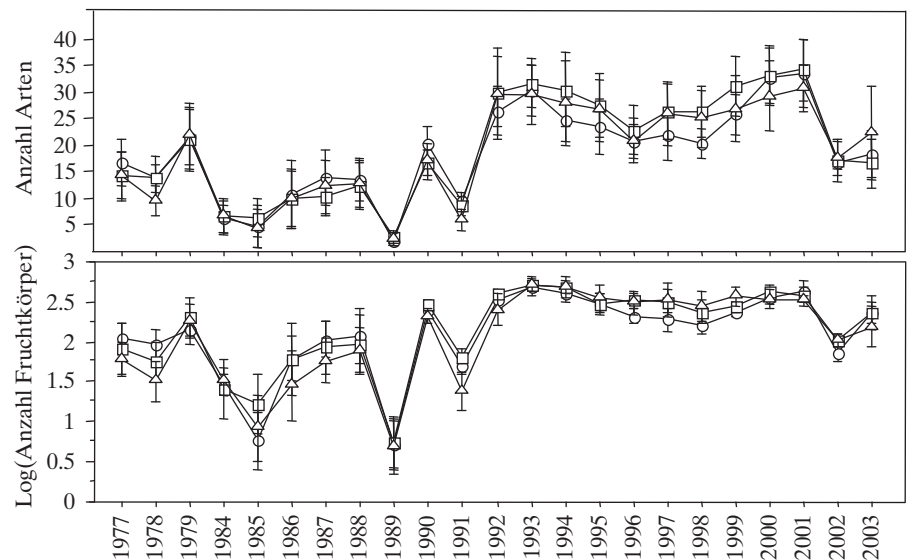


Abb. 5. Anzahl Pilzarten und Fruchtkörper (log-transformiert) im Pilzsammelexperiment im Pilzreservat La Chanéaz in den abgeernteten Flächen (□: pflücken; △: abschneiden) und in den Kontrollflächen (○). n = 5.

wertungen der Daten aus dem Pilzreservat La Chanéaz zeigen das. Temperatur und Niederschläge sind zwar wichtige Faktoren für das Pilzwachstum, doch kann damit allein das Fruchtkörpervorkommen nicht erklärt werden (STRAATSMAN *et al.* 2001). Die Frage, warum zu bestimmten Zeiten an gewissen Standorten mehr Pilze wachsen als an anderen und warum es gute und schlechte Pilzjahre gibt, ist also bis heute noch nicht geklärt.

6 Forschungsbedarf

Kenntnisse über die funktionelle Diversität von Mykorrhizapilzen

Der in dieser Datenreihe festgestellte Rückgang der Mykorrhizapilze ist eine ernst zu nehmende Erscheinung. Auch wenn die Artenanzahl der Mykorrhizapilze in unseren Wäldern hoch ist, ist jeder Verlust an Vielfalt nachteilig, und zwar aus funktionellen Überlegungen. Fest steht, dass wir heute mit verschiedenen Gefährdungspotentialen rechnen müssen, welche zu Veränderungen in der Diversität der Pilzflora führen können, von Eutrophierung über Habitatsverlust bis zu Klimawandel. Um die Auswirkungen des Verlusts einzelner Mykorrhizapilzarten abschätzen

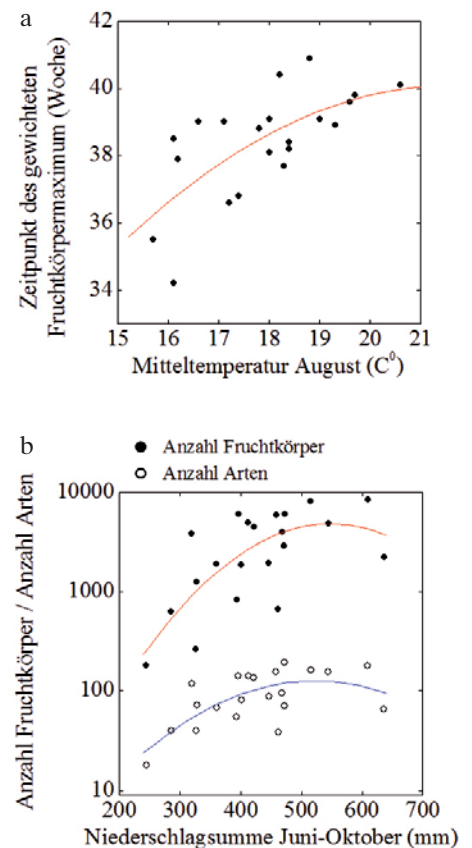


Abb. 6. a) Hohe Mitteltemperaturen im August führten zu einer Verzögerung des Beginns der Pilzsaison, b) Niederschläge von Juni bis November förderten die Pilzdiversität und -produktivität im Pilzreservat La Chanéaz (STRAATSMAN *et al.* 2001)

zu können, benötigen wir Kenntnisse über die funktionelle Diversität von Mykorrhizapilzen: welche der rund 1500 Mykorrhizapilzarten, die in Schweizer Wäldern wachsen, sind funktionell für den assoziierten Baum wichtig, welche weniger oder gar nicht? Was leisten die einzelnen Pilzarten unter bestimmten Stresssituationen? Diese Fragen sind Gegenstand von zwei laufenden Projekten der WSL zur funktionellen Diversität von Mykorrhizapilzen unter Trockenstress und erhöhtem Stickstoffeintrag. Untersucht werden dabei mykorrhizaspezifische Exoenzyme, welche Auskunft geben über die funktionellen Leistungen der einzelnen Pilzarten, sowie Untersuchungen zur Genexpression von Mykorrhizapilzen.

Mechanismen der Fruchtkörperbildung

Um die Kenntnisse über die Bioindikatorfunktion der Pilzflora zu verbessern, müssen wir mehr wissen über die Mechanismen, welche die Fruchtkörperbildung von Pilzen steuern. Diese sind heute noch immer weitgehend unbekannt. Nur bei einzelnen Zuchtpilzen, welche ausschliesslich zur Gruppe der saproben Pilze gehören, sind die Faktoren, welche die Fruchtkörperbildung beeinflussen, ausreichend erforscht. In der Gruppe der Mykorrhizapilze sind diese jedoch noch weitgehend unbekannt und es ist bis heute nicht möglich, die Pilzmycelien zum Beispiel von Steinpilz, Eierschwamm oder Trüffeln künstlich zur Fruktifikation zu bringen. MELIN und RAMA DAS (1954) haben bereits vor mehr als 50 Jahren postuliert, dass das Wachstum von Pilzen und die Fruchtkörperbildung der Mykorrhizapilze von baumeigenen Stoffen stimuliert werden muss, dem sogenannten «Faktor M». Eine Entschlüsselung dieses ominösen «Faktors M» könnte weiterhelfen, die Mechanismen der Fruchtkörperbildung besser zu verstehen.

Baumwachstum und Fruchtkörperdiversität und -produktivität von Mykorrhizapilzen

Über einzelne Indikatorarten unter den Pilzen, die auf Veränderungen des Gesundheitszustandes von Wäldern Hinweise geben, gibt es praktisch keine Angaben. Einzig FELLNER (1990) beobachtete, dass der Wieseltäubling

(*Russula mustelina*, Abb. 7) in den vom Waldsterben betroffenen Fichtenwäldern Mitteleuropas in den 1980er Jahren deutlich zurückgegangen war und in Nordböhmen praktisch völlig verschwand. In der Schweiz ist diese Pilzart nach wie vor häufig anzutreffen und nicht in der Liste der gefährdeten Arten aufgeführt (SENN-IRLET *et al.* 2007). Dies würde nach der Theorie von FELLNER (1990) heissen, dass unsere Fichtenwälder in ihrem Gesundheitszustand nicht gefährdet sind.

Produzieren gesunde Bäume mehr Mykorrhizapilze als geschwächte? Ein möglicher Forschungsansatz zur Beantwortung dieser Frage ist die Analyse unserer langfristigen Pilzdatenreihen im Zusammenhang mit geeigneten Parametern, die das Wachstum oder den Gesundheitszustand der assoziierten Bäume charakterisieren. Retrospektiv lassen sich Pilzdaten zum Beispiel mit Jahrringdaten oder Triebblängen vergleichen.

7 Schlussbemerkungen

Die vorliegende Datenreihe macht deutlich, dass bei Pilzen lange Untersuchungszeiträume notwendig sind. Das gilt für das eigentliche Monitoring als auch für experimentelle Untersuchungen. Das Pilzsammelexperiment schaut auf 32 Jahre zurück und die Auswertung hat gezeigt, dass bei Pilzen nur

lange Untersuchungszeiträume zu schlüssigen Resultaten führen können. Langzeituntersuchungen führen oft auch zu unerwarteten, ungeplanten Resultaten, deren Bedeutung erst retrospektiv, nach Abschluss der Zeitreihen, erkennbar werden.

Zu Waldpilzen ist unbedingt Sorge zu tragen, wenn man die vielfältigen Funktionen dieser Pilze berücksichtigt. Unzählige Gewächshausexperimente beweisen, dass Pflanzen mit Mykorrhizapilzen besser wachsen und stresstoleranter sind als Pflanzen ohne Mykorrhizapilze. Die Frage, ob ein Wald ohne Mykorrhizapilze auskommen würde, können wir bis heute aus methodischen Gründen nicht beantworten. Hierzu wären Experimente nötig, in welchen die Mykorrhizapilze selektiv eliminiert werden. Solche Versuche sind bisher erfolglos geblieben.

Neben der Bedeutung für die Ernährung und Gesundheit der Waldbäume stellen Waldpilze eine interessante Nischholz-Ressource des Waldes dar, welche einer breiten Bevölkerung als wichtige Freizeitbeschäftigung dient. Ein nachhaltig genutzter Wald mit einer grossen Baumartenvielfalt ist eine unabdingbare Voraussetzung für den Erhalt einer hohen Diversität an Waldpilzen. Und eine hohe Diversität an Mykorrhizapilzen ist eine Voraussetzung für einen gesunden Wald. Ganz nach dem Motto: ohne Wald keine Pilze – ohne Pilze kein Wald.



Abb. 7. Der Wieseltäubling (*Russula mustelina*): ein Mykorrhizapilz, der nach FELLNER (1990) nur in gesunden Fichtenwäldern wachsen soll (Foto: J.K. Lindsay).

Dank

François Ayer danken wir für die langjährige Erhebung der Pilzdaten, dem Forstdienst des Kantons FR für das zur Verfügung stellen der Versuchsflächen und die gute Zusammenarbeit, sowie Beatrice Senn-Irlet für die wertvollen Anregungen zur Verbesserung des Manuskripts. Dem BAFU danken wir für die finanzielle Unterstützung in der ersten Phase des Projekts.

8 Literatur

- AYER, F.; ZINGG, R.; PETER, M.; EGLI, S., 2007: Effets de la densité des tiges des pessières de substitution sur la diversité et la productivité des macromycètes d'une forêt du Plateau Suisse. *Revue Forestière Française* 5: 433–448.
- ARNOLDS E., 1991. Decline of ectomycorrhizal fungi in Europe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 35: 209–244.
- BARROETAVERNA, C.; LA MANNA, L.; ALONSO, M.V., 2008: Variables affecting *Suillus luteus* fructification in ponderosa pine plantations of Patagonia (Argentina). *For. Ecol. Manage.* 256: 1868–1874.
- BONET, J.A.; PUKKALA, T.; FISCHER, C.R.; PALAHI, M.; DE ARAGON, J.M.; COLINAS, C., 2008: Empirical models for predicting the production of wild mushrooms in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in the Central Pyrenees. *Ann. For. Sci.* 65: 206p1–206p9.
- BOUJON, C., 1997: Diminution des champignons mycorrhiziens dans une forêt suisse: une étude rétrospective de 1925 à 1994. *Mycol. Helv.* 9: 117–132.
- DIGHTON, J. 2003: Fungi in Ecosystem Processes. *Mycology Series Vol. 17*. New York, Marcel Dekker. 432 pp.
- DIGHTON, J.; POSKITT, J.M.; HOWARD, D.M., 1986: Changes in occurrence of basidiomycete fruit bodies during forest stand development with specific reference to mycorrhizal species. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 87: 163–171.
- EGLI, S.; PETER, M.; FALCATO, S., 2002: Dynamics of ectomycorrhizal fungi after windthrow. *For. Snow Landsc. Res.* 77: 81–88.
- EGLI, S.; PETER, M.; BUSER, C.; STAHEL, W.; AYER, F., 2006: Mushroom picking does not impair future harvests – results of a long-term study in Switzerland. *Biol. Conserv.* 129: 271–276.
- FELLNER, R., 1990: Mycorrhiza-forming fungi as bioindicators of air pollution. *Agric. Ecosyst. Environ.* 28: 115–120.
- FELLNER, R.; PESKOVA, V., 1995: Effects of industrial pollutants on ectomycorrhizal relationships in temperate forests. *Can. J. Bot.* 73 (suppl.): 1310–1315.
- FERNANDEZ-TOIRAN, L.M.; AGREDA, T.; OLANO, J.M. 2006: Stand age and sampling year effect on the fungal fruit body community in *Pinus pinaster* forests in central Spain. *Can. J. Bot.* 84: 1249–1258.
- GANGE, A.C.; GANGE, E.G.; SPARKS, T.H.; BODDY, L., 2007: Rapid and recent changes in fungal fruiting patterns. *Science* 316: 71.
- HÖGBERG, P.; NORDGREN, A.; BUCHMANN, N.; TAYLOR, A.F.S.; EKBLAD, A.; HÖGBERG, M.N.; NYBERG, G.; OTTOSSON-LÖFVENIUS, M.; READ, D.J., 2001: Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature* 411: 789–792.
- KAUSERUD, H.; STIGE, L.C.; VIK, J.O.; OKLAND, R.H.; HOILAND, K.; STENSETH, N.C., 2008: Mushroom fruiting and climate change. *PNAS* 105/10: 3811–3814.
- KREBS, C.J.; CARRIER, P.; BOUTIN, S.; BOONSTRA, R.; HOFER, E. 2008: Mushroom crops in relation to weather in the southwestern Yukon. *Botany* 86: 1497–1502.
- KUIKKA, K.; HÄRMÄ, E.; MARKKOLA, A.; RAUTIO, P.; ROITTO, M.; SAIKKONEN, K.; AHONEN-JONNARTH, U.; FINLAY, R.; TUOMI, J., 2003: Severe defoliation of Scots pine reduces reproductive investment by ectomycorrhizal symbionts. *Ecology* 84: 2051–2061.
- LAMHAMED, M.S.; GODBOUT, C.; FORTIN, J.A., 1994: Dependence of *Laccaria bicolor* basidiome development on current photosynthesis of *Pinus strobus* seedlings. *Can. J. For. Res.* 24: 1797–1804.
- MELIN, E.; RAMA DAS, V.S., 1954. Influence of root metabolites on the growth of tree mycorrhizal fungi. *Physiol. Plant.* 7: 851–858.
- OGAYA, R.; PENUELAS, J., 2005: Decreased mushroom production in a holm oak forest in response to an experimental drought. *Forestry* 78: 279–283.
- PETER, M.; AYER, F.; EGLI, S., 2001: Nitrogen addition in a Norway spruce stand altered macromycete sporocarp production and below-ground ectomycorrhizal species composition. *New Phytol.* 149: 311–325.
- RICHTER, D., 2005: Klima und Pilze. Eine Untersuchung zum Einfluss des Klimas auf das Pilzwachstum und dessen langzeitliche Veränderungen. *Der Tintling* 4: 33–50.
- SENN-IRLET, B.; BIERI, G.; EGLI, S., 2007: Rote Liste Grosspilze. Rote Liste der gefährdeten Arten der Schweiz. *Umwelt-Vollzug* Nr. 0718. Bern, Bundesamt für Umwelt; Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 92 pp.
- SIMARD, S.W., 2009: The foundational role of mycorrhizal networks in self-organization of interior Douglas-fir forests. *For. Ecol. Manage.* in press.
- STRAATSMAN, G.; AYER, F.; EGLI, S., 2001: Species richness, abundance, and phenology of fungal fruit bodies over 21 years in a Swiss forest plot. *Mycol. Res.* 105: 515–523.
- TERMORSHUIZEN, A., 1993: The influence of nitrogen fertilizers on ectomycorrhizas and their fungal carpophores in young stands of *Pinus sylvestris*. *For. Ecol. Manage.* 57: 179–189.
- TERMORSHUIZEN, A.J.; SCHAFFERS, A.P., 1987. Occurrence of carpophores of ectomycorrhizal fungi in selected stands of *Pinus sylvestris* in the Netherlands in relation to stand vitality and air pollution. *Plant Soil* 104: 209–217.

Abstract**Ectomycorrhizal fungi are declining – what does this mean for our forests?**

The results of a long-term study over 32 years in the fungus reserve La Chanéaz reveal striking changes in the species composition of the macromycetes: the mycorrhizal species considerably decreased in relation to the other species. This development is worrying, taking into account the crucial role these fungi play in forest tree health by enhancing nutrient acquisition, drought tolerance and pathogen resistance of their hosts. We search for causes of this development and raise the question about possible effects of a decrease of the mycorrhizal fungi in terms of tree health of the associated forest trees.

Keywords: forest mushrooms, mycorrhiza, tree growth, bioindication, long-term monitoring, Switzerland