Symbiózy

s autotrofními organizmy

Symbiózy s (nejen) rostlinami …

Arbuskulární (AM)
Erikoidní
- arbutoidní
- monotropoidní

Orchideoidní
- jungermannioidní

tzv. endomykorhizy

Ektomykorhiza (ECM)
- Ektendomykorhizy

Endofytizmus
Lichenizmus

Mykoheterotrofní rostliny
Parazité rostlin (příště)

Mykorhizní vs. mykotrofní

Mykotrofní – rostliny, schopnost tvořit funkční mutualistické spojení s myceliem

Mykorhizní – houby, schopny tvořit mutualistické symbiózy s rostlinami

Mykorhiza – funkční symbióza rostliny a houby *s. l.*; morfologie

x mykofágní (žeroucí houby)

Kolik rostlin mykotrofních?

- **86**(- 95) % druhů rostlin (225 000)
    - cca 2/3 druhů mají arbuskulární mykorhizu (AM)
    - cca 8.000 druhů má ektomykorhizu (ECM)
- zástupci každé větší taxonomické jednotky říše *Plantae* tvoří AM (tedy např. i játrovky, kapradiny, dřeviny, …)

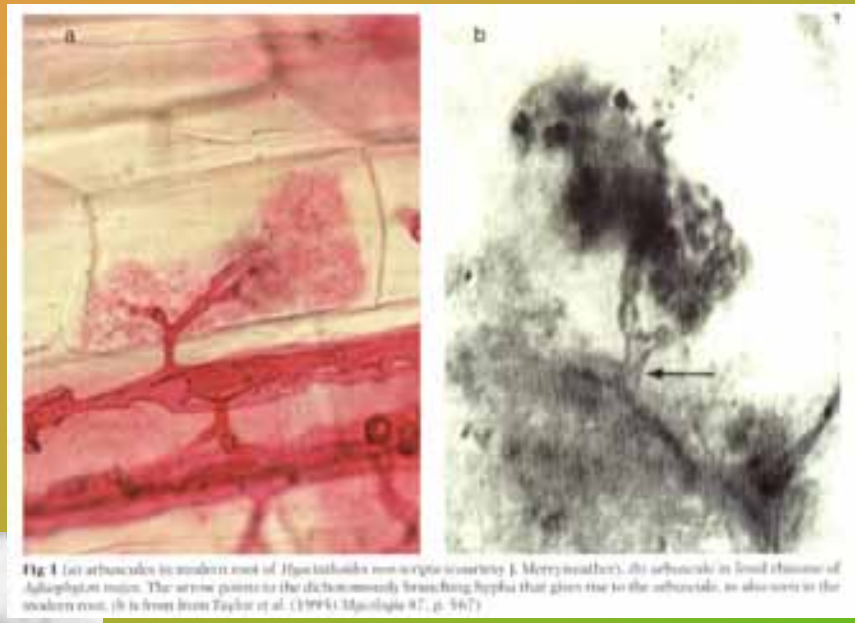
AM – patří sem i rostliny vodní (*Isoëtes*), ruderální (*Chenopodium*) a slaništní (*Spartina cynosuroides*)

http://www.plantatlas.usf.edu/plantimage/Spartina_cynosuroides2.jpg

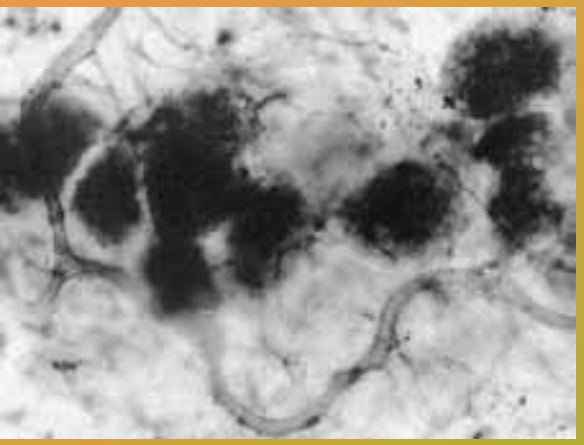
Historie mykorhizy

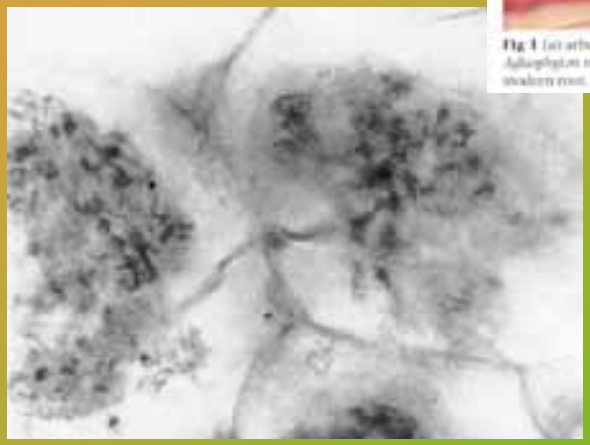
AM – cca před 460 mil. let

Aglaophyton major – před 400 mil. let (devon)
rhizomy s arbuskuly



Helgason & Alastar (2005)





http://mycorrhizas.info/evol.html

ECM – nejstarší fosilní nálezy 50 mil. let
x dle fylogeneze až 180 mil. let (koevoluce s *Pinaceae*)

(x kořenové symbiotické bakterie fixující N_2 před cca 200 – 160 mil. let)

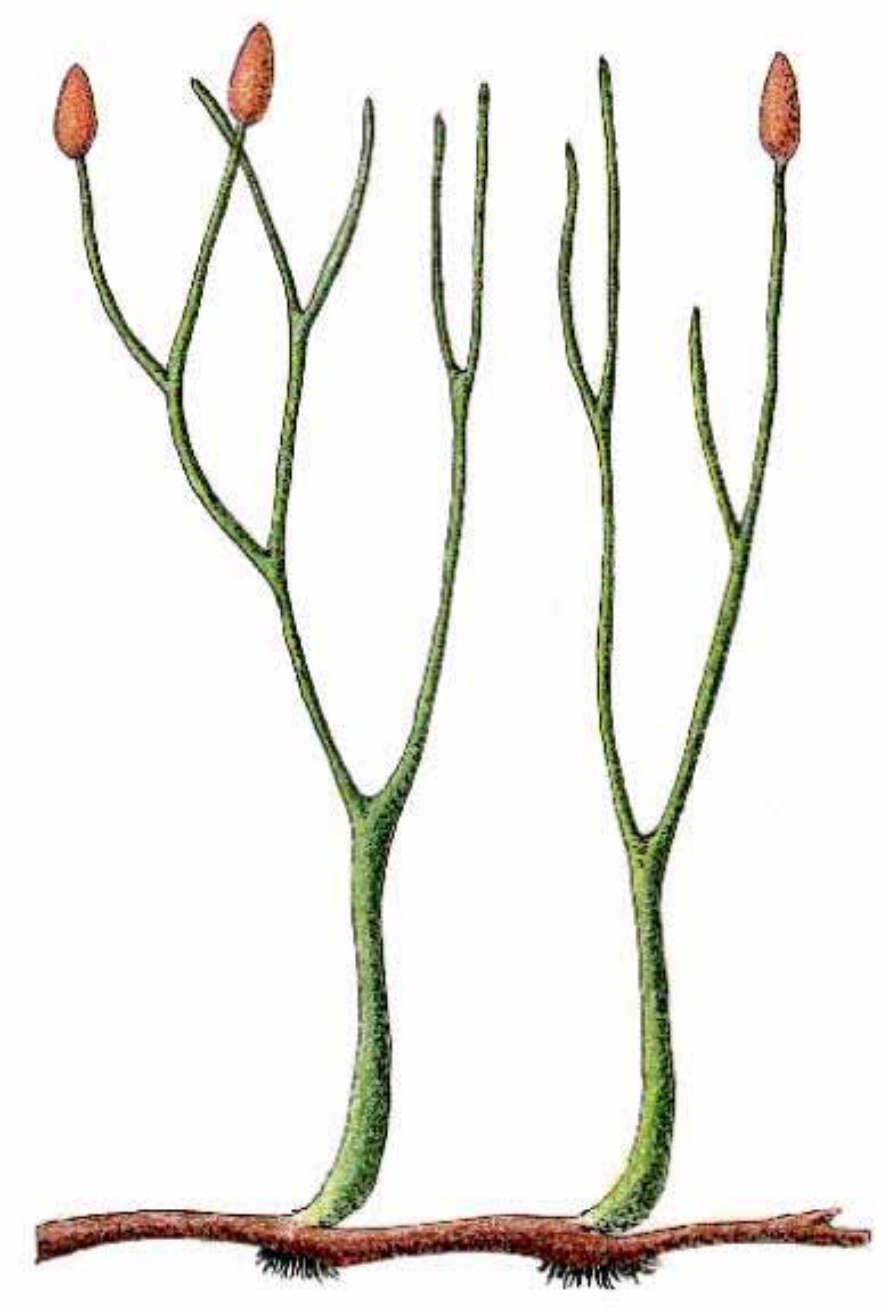
Jak vznikla?

- devonské rostliny kolonizace souše
- limitace fosforem

AM – pravděpodobně parazit

– fosfor z půdy

– část fosforu do rostliny



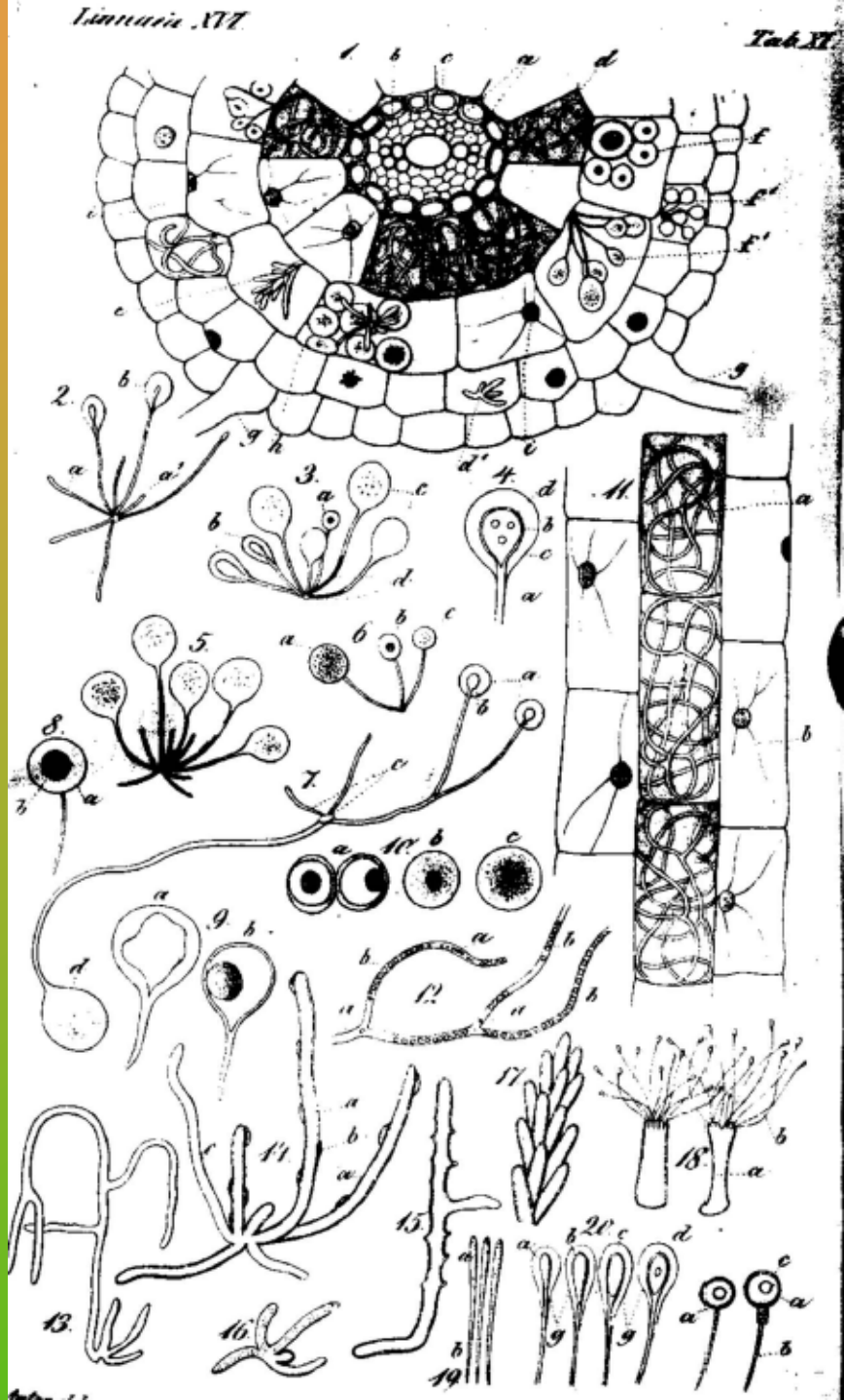
http://www.palaeos.com/Plants/Rhyniophytes/Images/Aglaophyton_major.jpg

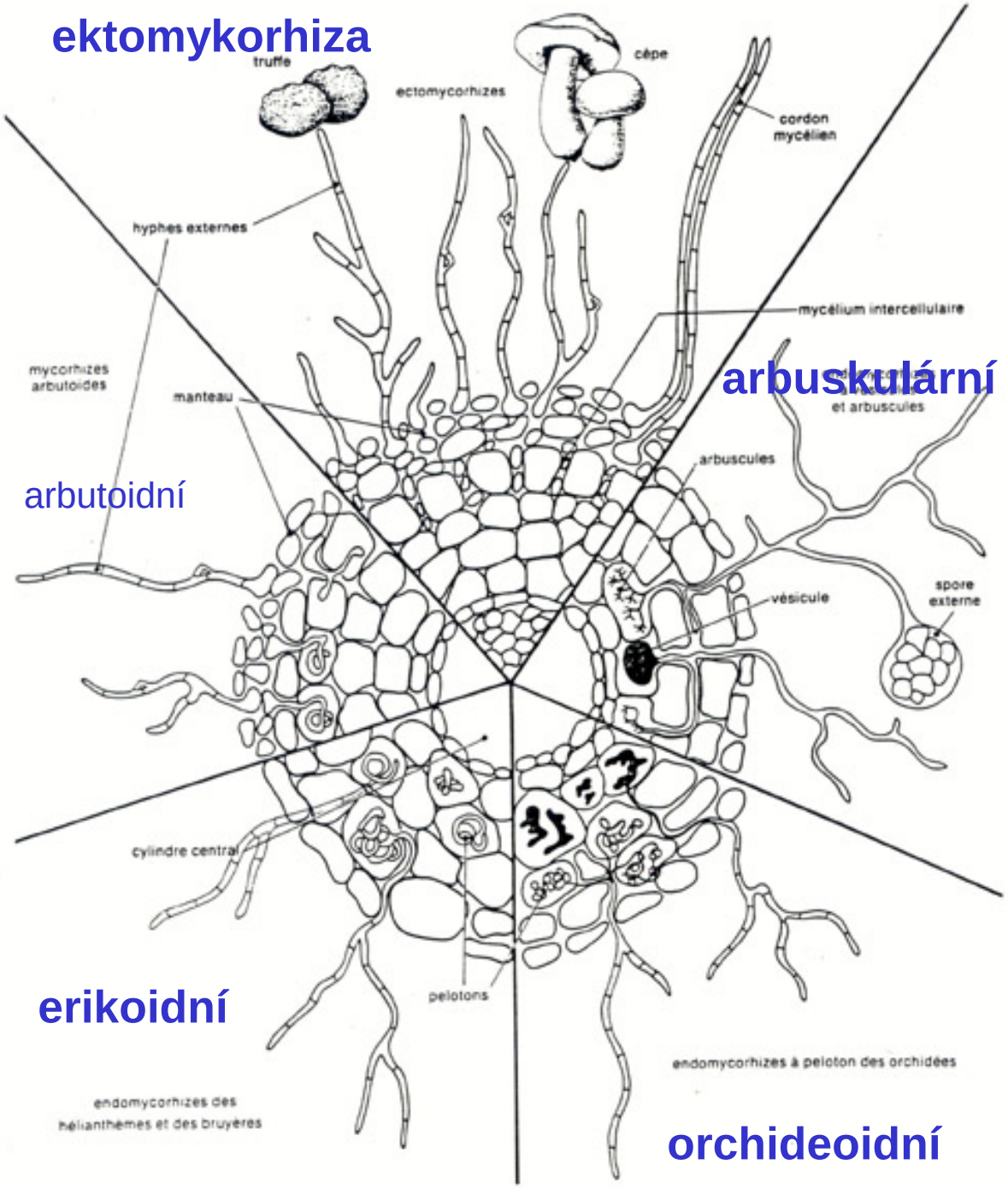
Objev mykorhiz

- AM 1842 (Nägeli 1842)

7) *Pilze im Innern von Zellen.*

Als ich letzten Herbst die Wurzeln mehrerer Irisarten zu anderweitigem Zwecke untersuchte, stiessen mir nicht selten in den alten Zellen Pilzbildungen auf. Die Wurzeln von Iris bestehen bekanntlich, wie überhaupt diejenigen der Monocotyledonen, aus einem centralen Gefässbündel und aus einer Rindenschichte von grossmaschigem Parenchym. In diesen parenchymatischen Zellen lebten 3 verschiedene Arten von Pilzen.





- rozdělení podle specifických struktur

http://www.theses.ulaval.ca/2005/22964/22964002.jpg

Symbiózy s (nejen) rostlinami …

Arbuskulání (AM)

Erikoidní

arbutoidní

monotropoidní

Orchideoidní

jungermannioidní

Ektomykorhiza (ECM)

Ektendomykorhizy

Endofyti

Lichenismus

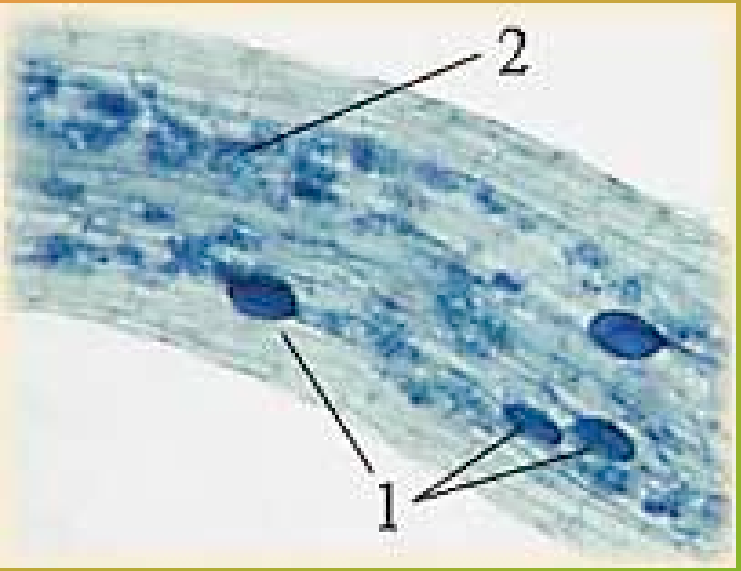
Mykoheterotrofní rostliny

Parazité rostlin (příště)

Arbuskulární mykorhiza

- hyfy pronikají **přes buněčnou stěnu** buněk primární kůry
- ***arbuskuly***
- ***extraradikální mycelium***

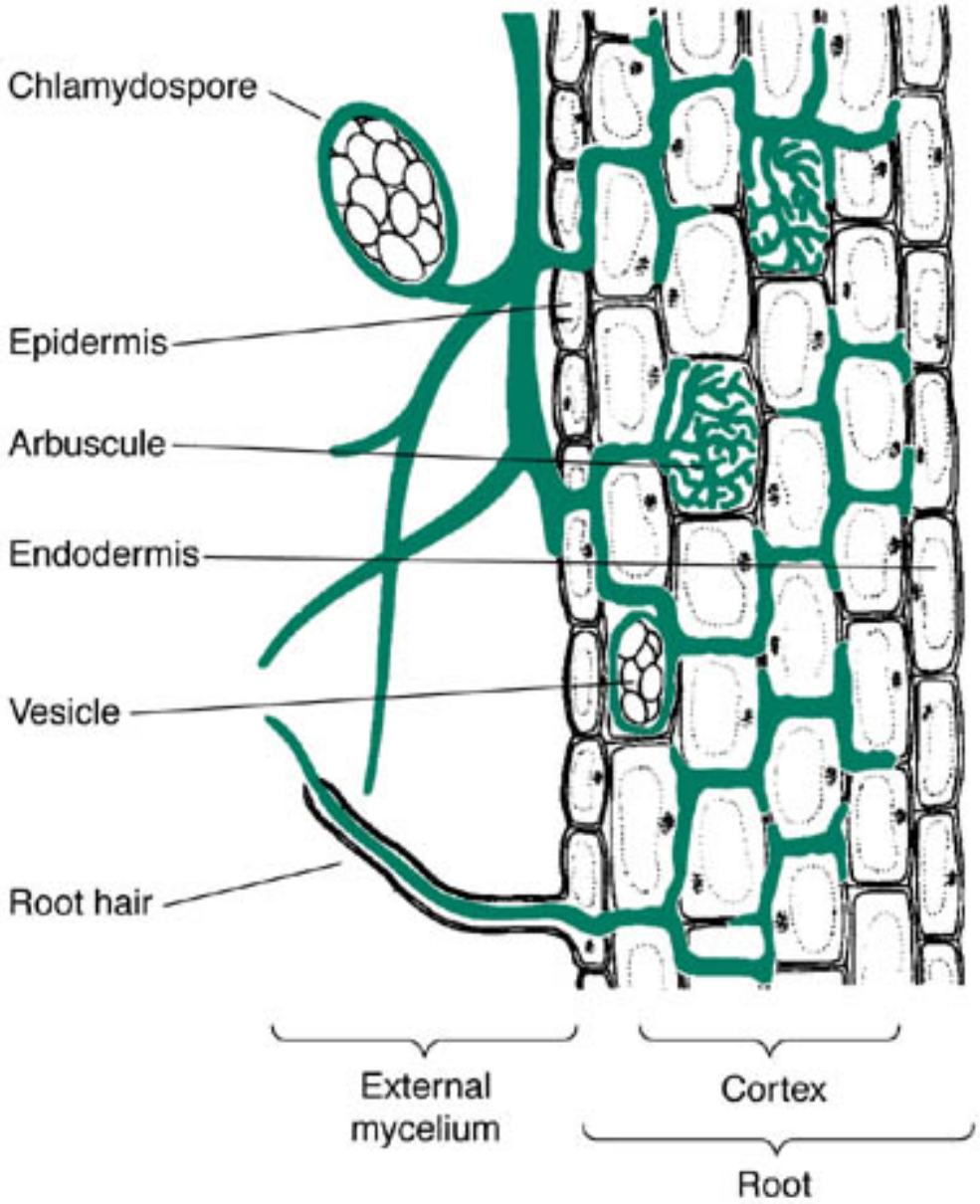
- ***vezikuly*** (zásobní látky)



Agrostis tenuis kořínky
© David Püschel

http://mycorrhizas.info/resource.html#photos

Arbuskulární mykorhiza



© 1998 Sinauer Associates, Inc.

Arbuskulární mykorhiza

- Glomeromycota (*Glomus*, *Gigaspora*, *…*)

- **minimální saprotrofní schopnosti**

= **příjem organických látek** z rostliny

= **obtížně kultivovatelné**

http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1236783922575&lang=eng

© David Püschel

Arbuskulární mykorhiza – funkce

Houba

- vyšší příjem P a vody
- ochrana před stresem ze sucha
- ochrana před těžkými kovy

Rostlina

- asimiláty

http://www.cotonmanor.co.uk/wild-flower_meadow.php

Symbiózy s (nejen) rostlinami …

Arbuskulání (AM)
Erikoidní

arbutoidní

monotropoidní

Orchideoidní

jungermannioidní

Ektomykorhiza (ECM)

Ektendomykorhizy

Endofyti
Lichenismus

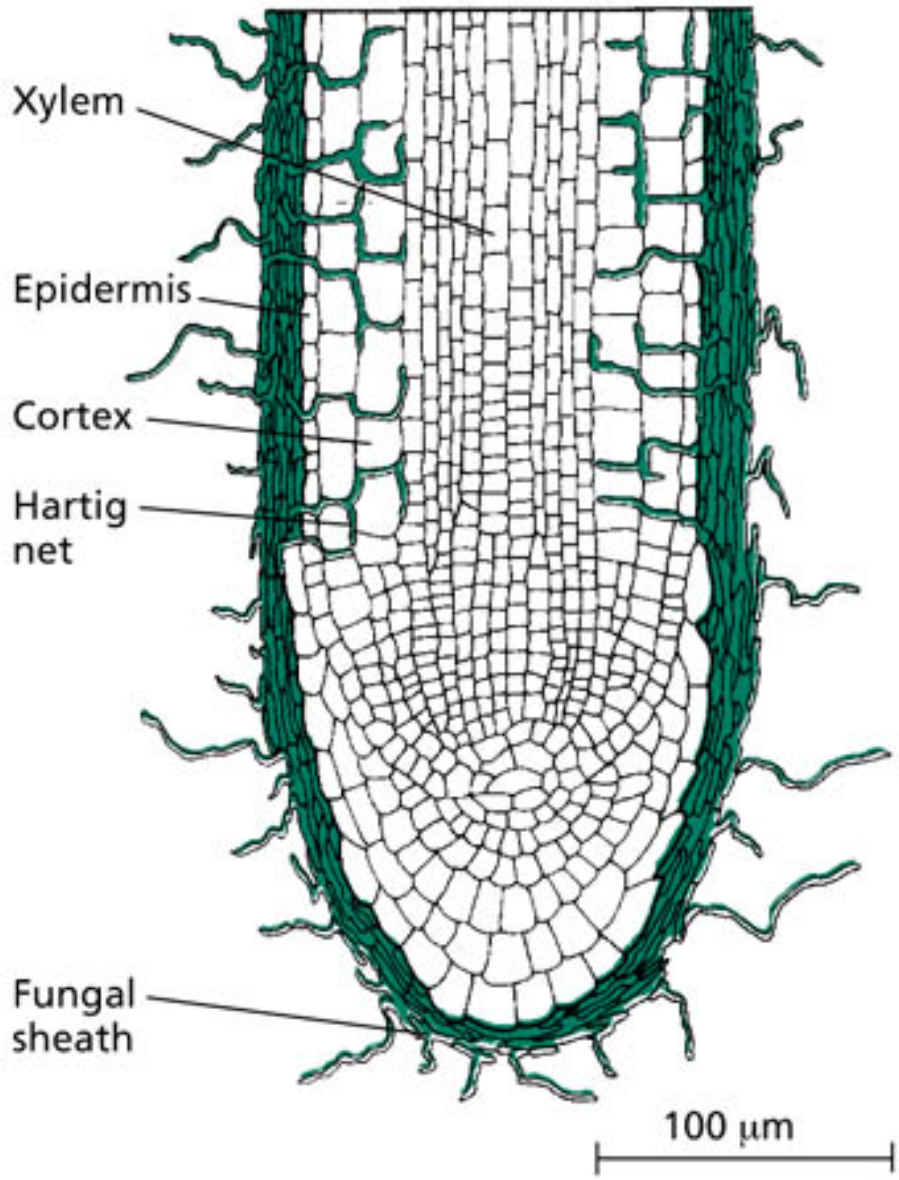
Mykoheterotrofní rostliny
Parazité

Ektomykorhiza

- hyfy v **mezibuněčných prostorách** primární kůry (***Hartigova síť***)
- ***plášť hyf***
- ***extraradikální mycelium***
- změna morfologie kořene

Picea abies kořínky

Ektomykorhiza



© 1998 Sinauer Associates, Inc.

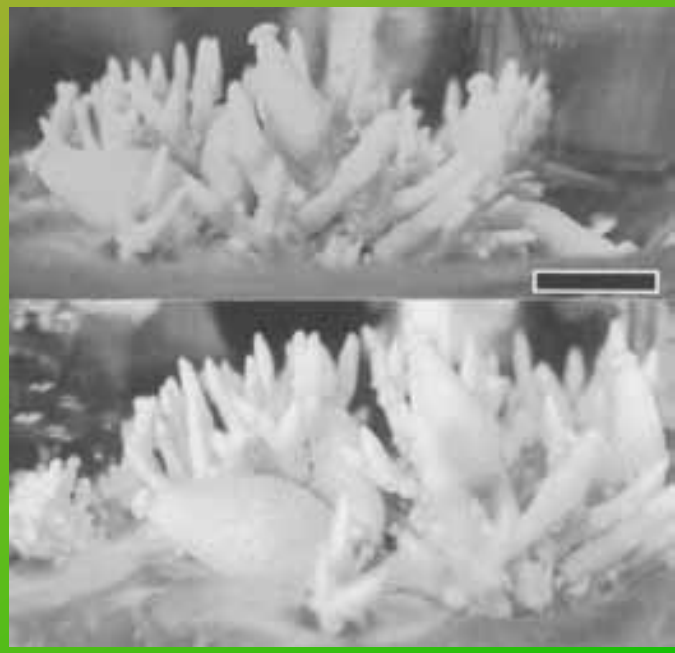
Ektomykorhiza

- **Agaricomycotina** (Russulales, Boletales, Thelephorales, …)
- **Pezizomycotina** (Helotiales, …)
- většina **organických sloučenin od rostliny**
- **některé kultivovatelné** na agaru

Boletus edulis

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a3/Boletus_edulis_(Tillegem).jpg

x jen základy plodnic
(*Boletus reticulatus*)



Ektomykorhiza – funkce

Houba

- transport P, N a vody
- ochrana před kořenovými parazity
- minerální živiny

Rostlina

- asimiláty
- fruktifikace

http://www.ecosystema.ru/08nature/world/us-mt/01.jpg

Specifika ECM

- živiny z půdy pouze extrarad. myceliem, hyfální plášť „**nepropustný**“
= izolace od půdy

- většinou 100% kořenového systému s vytvořenými mykorhizami

- ***mykorhizosféra***

- životnost mykorhizy (1 kořenové špičky) **řádově měsíce**, max. 2 roky
- dynamický systém
- více hub současně (až desítky druhů ECM hub na 1 stromě)
  + plasticita u ECM symbiontů

- vznik ECM až 66x v evoluci!
= různé enzymatické schopnosti ECM hub

Specifika ECM

- **fruktifikace pouze s hostitelem**

- indukce pec. látkami?

- organické látky pro plodnice
  = hyfální plášť jako **zásobárna živin**

= pro jednu plodnici potřeba cca 3 – 14 mil. špiček (!)
odpovídá ploše cca 1-2 m^2

Russula vesca
http://botany.upol.cz/atlasy/system/

Boletus edulis
http://www.naturfoto.cz/

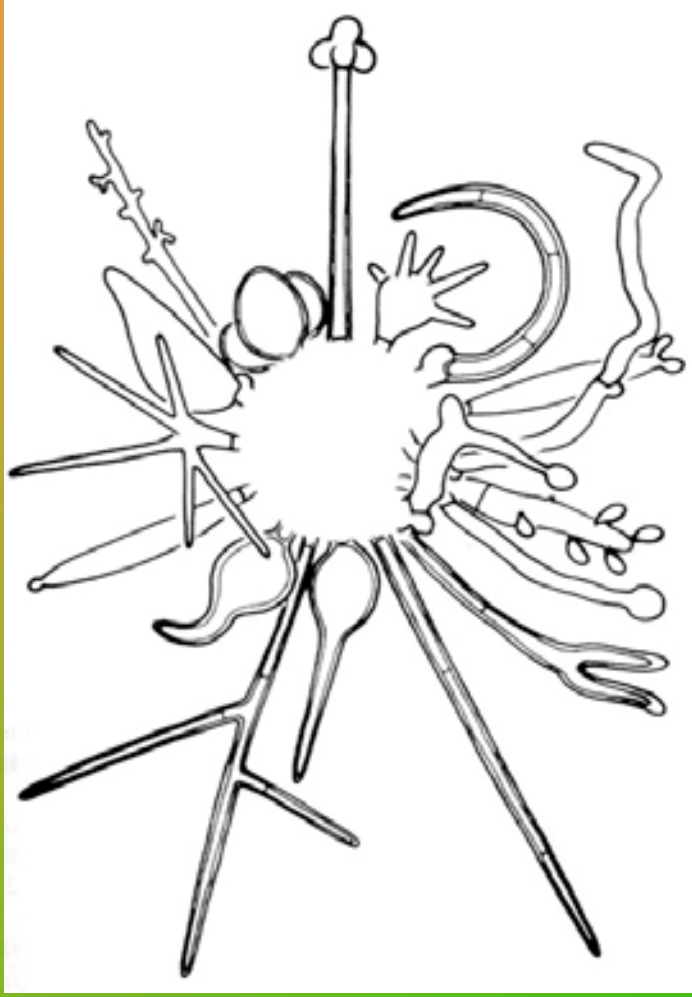
ECM houby a bezobratlí

- vysoká koncentrace P a N ve špičkách
- ochranné buňky na povrchu

  mechanická obrana (tlustostěnné jehlicovité)

  chemická obrana: **cystidy** (odpuzující látky)

  (Russulales, Agaricomycotina)



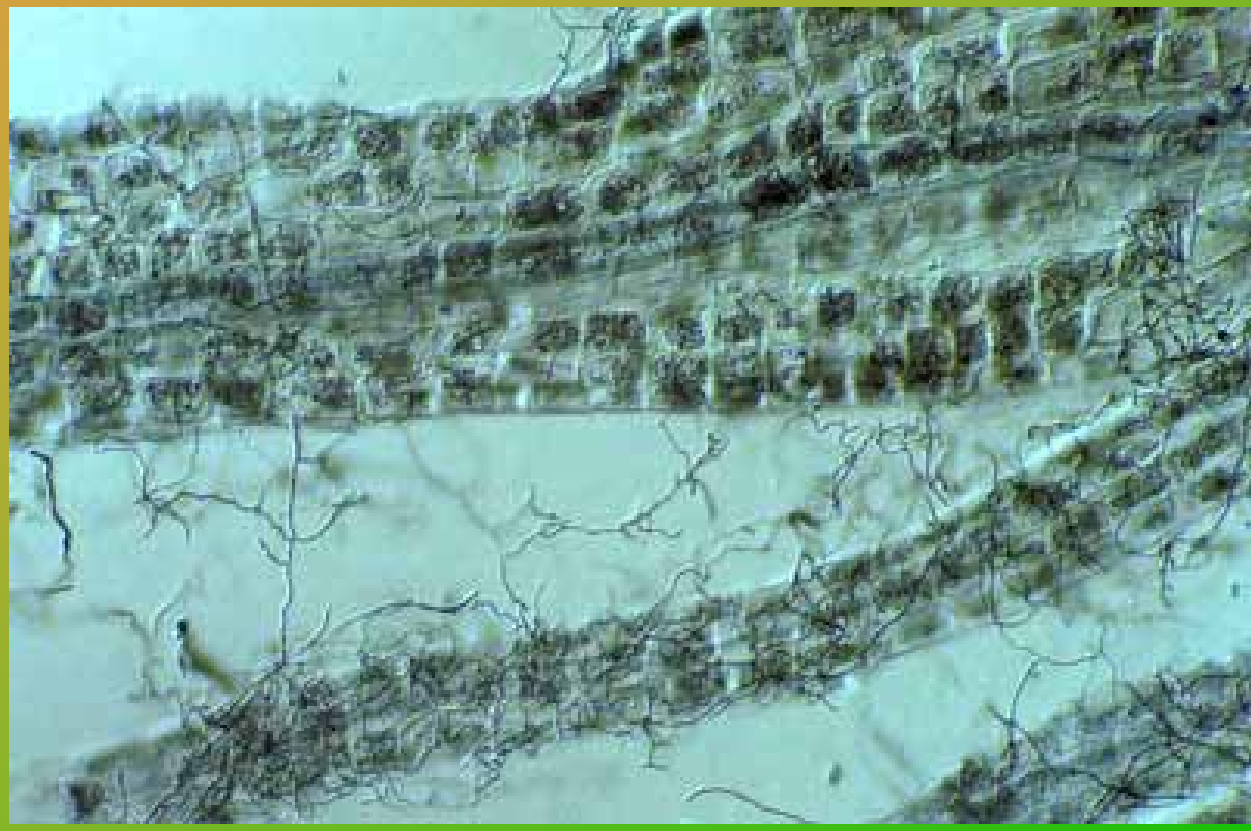
Taylor & Alexander (2005)

Lactarius (Russulales, Agaricomycotina)

- stearoylvelutinal (neaktivní) → oxidace na terpenoid **isovellerral** (odpuzovač bezobratlých)
- krystaly šťavelanu vápenatého

Erikoidní mykorhiza

- ***Ericaceae***
- **vlasové kořeny** (tenké kořínky)
- **klubka** a **smyčky** (rhizodermální buňky)
- **extraradikální mycelium**



http://mycorrhizas.info/

Erikoidní mykorhiza

- **Pezizomycotina** (*Rhizoscyphus ericeae*)
- **saprotrofové**
- silná enzymatická výbava (proteázy, fenol oxidázy)
- růst a rozklad humusu při nízkém pH

Rhizoscyphus ericeae
http://www.devonian2.ualberta.ca/uamh/

Rhododendron hirsutum
http://flora.nikde.cz/view.php?cisloclanku=2004082003

Erikoidní mykorhiza – funkce

Houba
- rozklad organických látek a transport N a P

Rostlina

- asimiláty

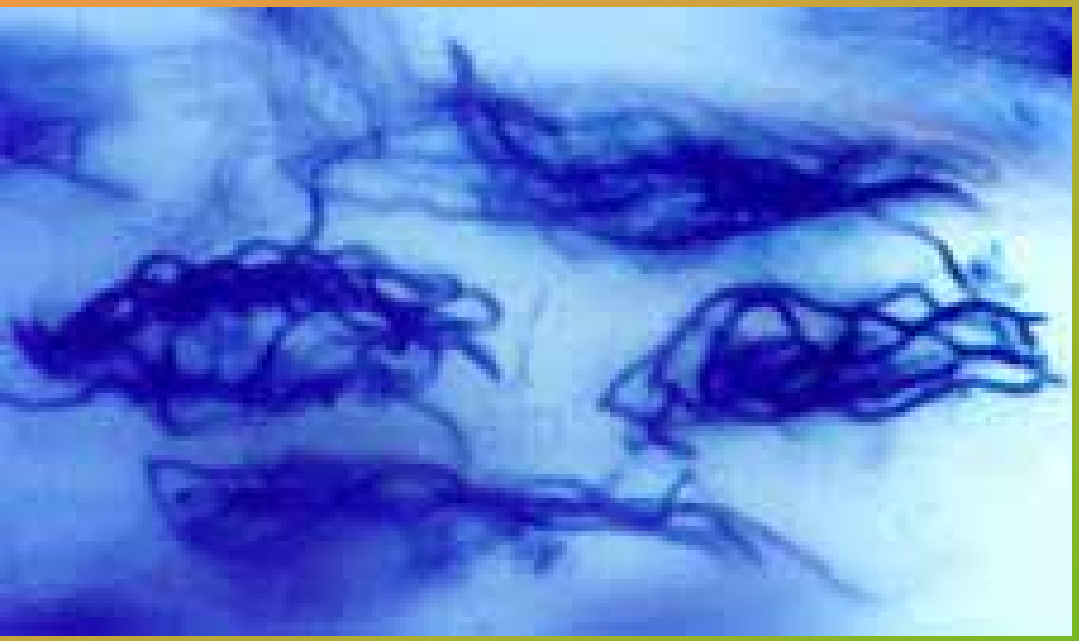
http://www.maion.com/photography/_photos/lapo0972.jpg

Phyllodoce caerulea

http://www.funet.com/pub/sci/bio/life/plants

Orchideoidní mykorhiza

- **Agaricomycotina** (*Rhizoctonia*)
- všechny orchideje (30 tis. druhů) klíčové pro ontogenezi
- ze začátku **organické i anorganické látky od houby**
- později výměna látek



kořenové buňky *Goodyera oblongifolia* s klubíčky hyf
http://www.mycolog.com/orchid_mycorrhiza3.jpg

Goodyera pubescens
http://www.missouriplants.com/Whitealt/Goodyera_pubescens_plant.jpg

Jungermannioidní mykorhiza

- **rhizoidy** játrovek

Glomus sp. (Glomeromycota) + *Pellia epiphylla*

Rhizoscyphus ericeae (Pezizomycotina) + *Cephaloziella varians*

Tulasnella, Sebacina (Agaricomycotina) + *Aneura*, *Cryptothallus*

THE ROYAL SOCIETY

Symbiotic fungal associations in 'lower' land plants

D. J. Read[1], J. G. Duckett[2], R. Francis[1], R. Ligrone[3] and A. Russell[2]

Phil. Trans. R. Soc. Lond. B (2000) 355, 815–830 — 815 — © 2000 The Royal Society

Mycol. Res. **107** (8): 957–968 (August 2003). © The British Mycological Society — 957

DOI: 10.1017/S0953756203008141 *Printed in the United Kingdom.*

Heterobasidiomycetes form symbiotic associations with hepatics: _Jungermanniales_ have sebacinoid mycobionts while _Aneura pinguis_ (_Metzgeriales_) is associated with a _Tulasnella_ species

Ingrid KOTTKE[1*], Alexander BEITER[1], Michael WEISS[2], Ingeborg HAUG[1], Franz OBERWINKLER[1] and Martin NEBEL[2]

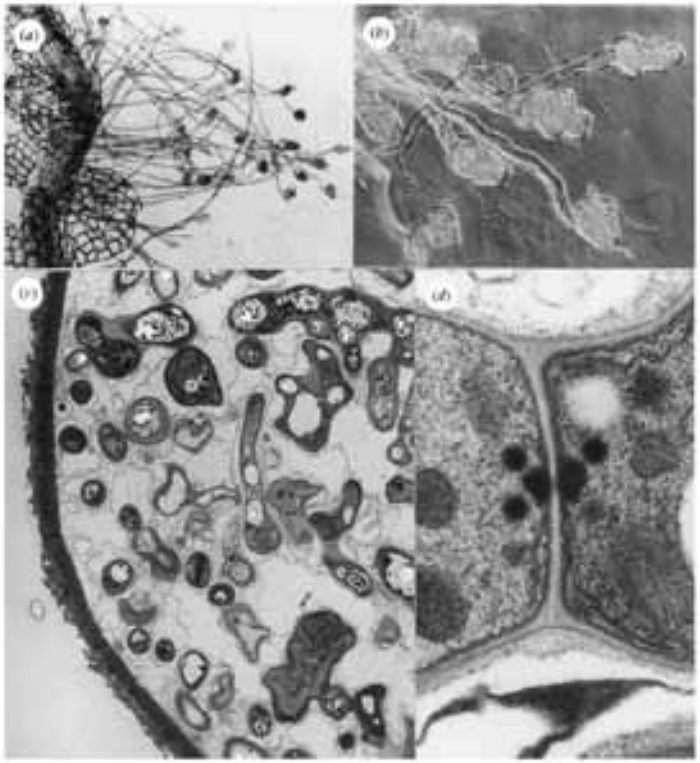
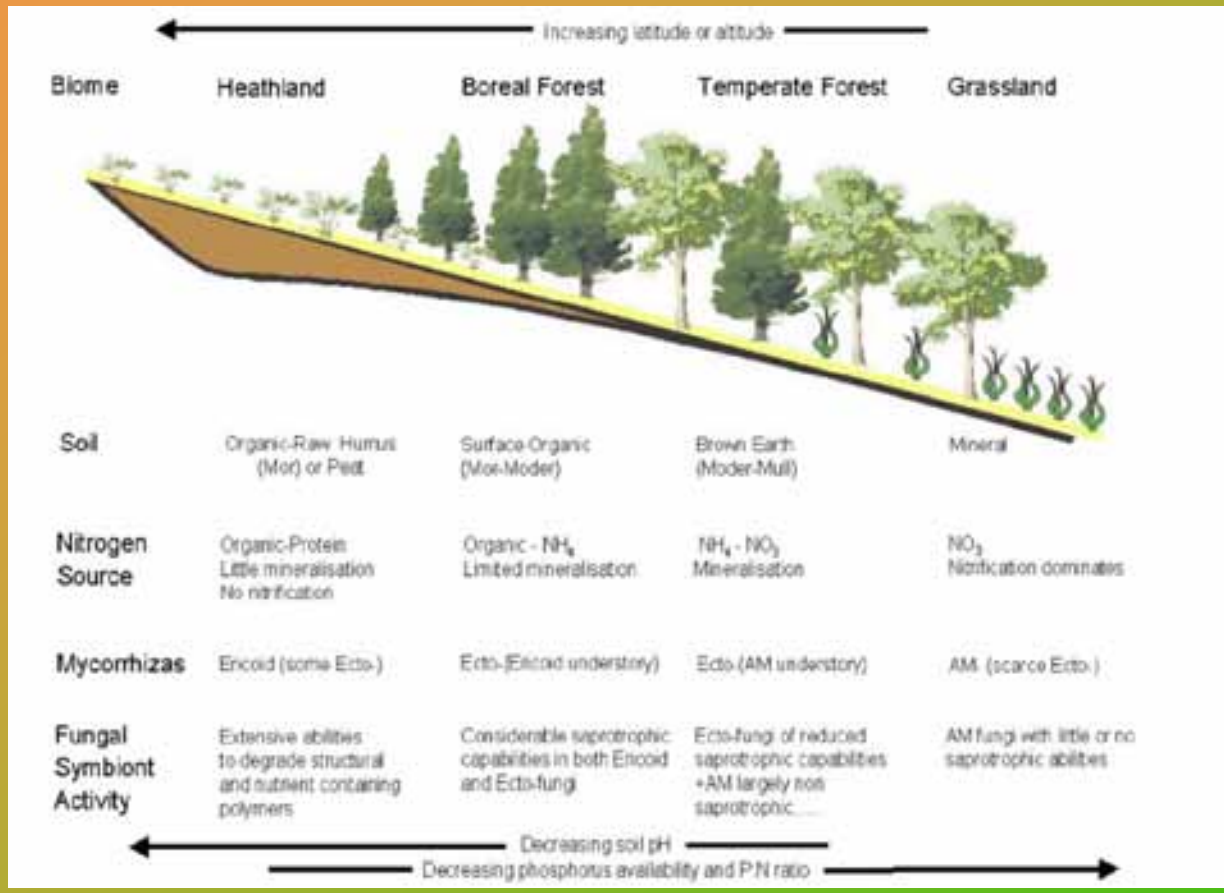


Figure 4. Swollen-tipped rhizoids of *Cephaloziella* common after experimental inoculation with the ericoid mycorrhizal fungi *Hymenoscyphus ericae*. (a,b) Light micrographs; (a) × 55, (b) × 230. (c) Transmission electron micrograph showing numerous hyphae surrounded by host cytoplasm; × 4500. (d) Detail of the fungus showing a simple septum with Woronin bodies; × 50 500.

Kde je najdeme?



Read et al. (2002)

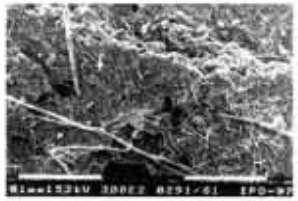
- typ půd, množství živin (lignin, fenolické látky, inorganické látky)
- v gradientu S – J a Vysoko v horách – Nížiny

erikoidní
ECM
AM

x podceněny tropy, *Cesalpiniaceae*, *Dipterocarpaceae*, …

K čemu jsou mykorhizy

Extraradical mycelium provides increased surface area for nutrient uptake, bridges nutrient depletion zones.



Ectomycorrhizal fungal hyphae colonising microsites in a rock surface

Jongmans et al. 1997 Nature 389 632-635

Penetration of microsites

mineral nutrients

Solubilisation of tri-calcium phosphate by ectomycorrhizal fungus and associated bacteria

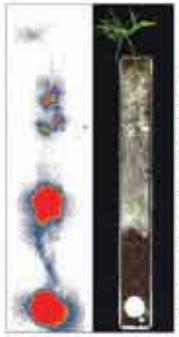
organic acids, siderophores and other chelating agents

weathering & solubilisation of minerals

Mobilisation of N & P from organic polymers from microbial biomass, micro- & meso-fauna and plant litter intervention in microbial mobilisation-immobilisation cycles

degradative enzymes, antibiotics & other chemically antagonistic compounds

organic nutrients



Lindahl et al. 1998 New Phytologist 144 183-193

Electronic autoradiography showing transfer of P from saprotrophic mycelium to a pine plant via an ectomycorrhizal fungus

Synergistic, competititve or antagonistic interactions associative N fixation exudation of organic compounds at hyphal tips

Possible effects of mycorrhizal symbiosis

H^+

Al^{3+}

mediation of stress

Increased drought tolerance capture and restricted leaching of base cations in acidified soils chelation of toxic heavy metals and aluminium

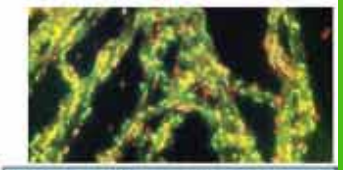
Ca^{2+}

organic acids, siderophores and other chelating agents

Mg^{2+}

K^{2+}

interactions with other organisms



Vital (green) & non-vital (red) bacteria associated with the mycelium of an ectomycorrhizal fungus

carbon cycling

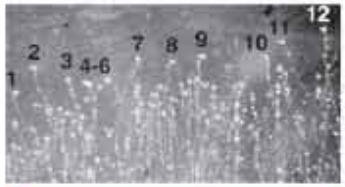
Flow of current assimilate drives soil respiration
selective exploitation of soil heterogeneity
effects on stability of soil aggregates (glomalin production)

carbon turnover and supply to soil aggregates and microbial populations

effects on plant communities

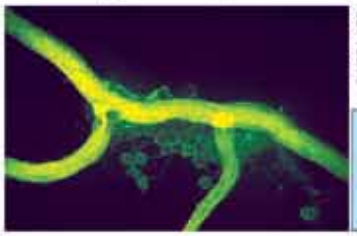
Effects on floristic diversity & productivity carbon transfer to myco-heterotrophic plants

© Jim Sugg @ USDA-NRCS PLANTS Database



Exudation of liquid drops at hyphal tips of *Suillus bovinus*. The droplets are rich in oxalic acid

Sun et al. 1999 Mycorrhiza 8 137-144



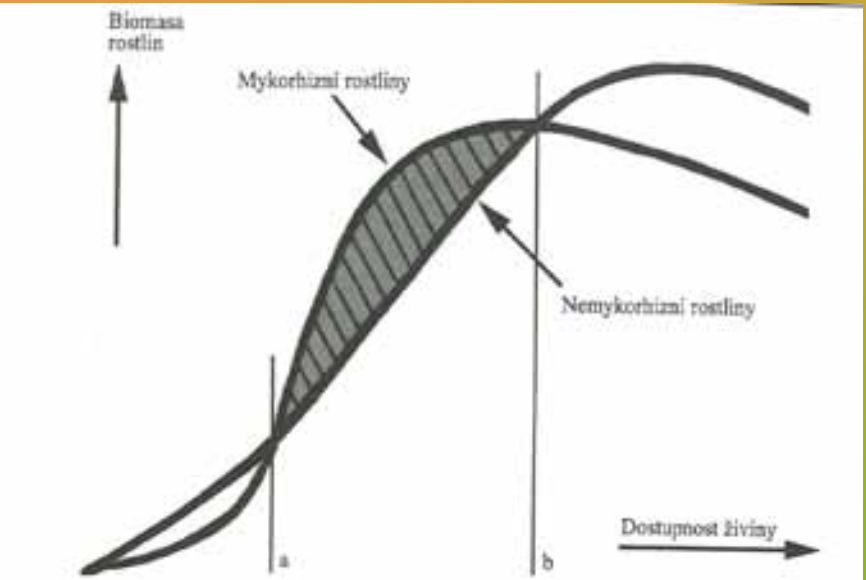
© USDA-ARS

The AM mycorrhizal glycoprotein glomalin, covering AM spores and hyphae, is revealed by a green dye tagged to an antibody against glomalin.

Finlay (2008)

K čemu jsou mykorhizy

- **mutualistický efekt** v **rozmezí abiotických podmínek**



Gryndler (2004)

Fig. 7 Pine trees (*Pinus halepensis*) grown in pots in a greenhouse (Biocomplexics Laboratory, University of Geneva). The picture was taken 1 year after they were transferred from Cyprus to the pots and the left one was inoculated with *Piriformospora indica*.

- není to pouze dvoustranná symbióza (houba + rostlina)

= *„nurse effect“* (starší rostlina zásobuje mladší)

+ výměna látek a informací i mezi rostlinami **různých druhů**

= *common mycorhizal network* (CMN), neboli WWW

Postupný vývoj studia

- řada hub nekultivovatelná

New Phytologist

Research

Culturing and direct DNA extraction find different fungi from the same ericoid mycorrhizal roots

Tamara R. Allen[1], Tony Millar[1], Shannon M. Berch[2] and Mary L. Berbee[1]

[1]Department of Botany, The University of British Columbia, Vancouver BC, V6T 1Z4, Canada; [2]Ministry of Forestry, Research Branch Laboratory, 4300 North Road, Victoria, BC V8Z 5J3, Canada

Postupný vývoj studia

Sebacina spp. (Agaricomycotina)

- rod s největším spektrem mykorhizních asociací

Sebacina incrustans

http://ydeneyer.ifrance.com/sebacina_incrustans_(yd)_1.jpg

Symbiózy s (nejen) rostlinami …

Arbuskulání (AM)
Erikoidní

arbutoidní

monotropoidní

Orchideoidní

jungermannioidní

Ektomykorhiza (ECM)

Ektendomykorhizy

Endofyti
Lichenismus

Mykoheterotrofní rostliny
Parazité rostlin (příště)

Mykoheterotrofní rostliny

- cca 400 druhů rostlin (játrovky, kapradiny, orchideje, *Ericaceae*, *Pyrolaceae, Monotropaceae*, Fabales, *Gentianaceae*)
- **epiparazitické**
- symbionty převážně Agaricomycotina
- přísná vazba druh hostitele + druh houby

Sciaphila sp.
http://phytosoc.h.kobe-u.ac.jp/~hyogobio/seibutu/plant/photo/uematsusou.JPG

Parasitaxus usta
http://www.parasiticplants.siu.edu/images/Parasitaxus3.jpg

Mykoheterotrofní rostliny

- některé nezelené po celý život, jiné jen zpočátku, některé druhy mají i jedince fotosyntetizující / nefotosyntetizující

Gymnosiphon minutum
http://staff-www.uni-marburg.de/~b_morpho/gallery.html

Diapensia laponica
http://www.parasiticplants.siu.edu/Mycotrophs/images/Diapensiaceae/DiapensiaLapponica3.jpg

Dictyostega orobanchoides
http://staff-www.uni-marburg.de/~b_morpho/gallery.html

Mykoheterotrofní rostliny

- asociované především s mykorhizními druhy hub

FIG. 1 Examples of myco-heterotrophic and partially myco-heterotrophic plants from different angiosperm families: (A) *Pterospora andromedea*, (B) *Sarcodes sanguinea* (both Pterosporeae; Monotropoideae; Ericaceae), (C) *Voyria clavata* (Gentianaceae), (D) *Cephalanthera damasonium* (Orchidaceae), (E) *Kupea martinetugei* (Triuridaceae), and (F) *Afrothismia hydra* (Thismiaceae).

Merckx & al. (2009)

Mykoheterotrofní rostliny

- i **játrovky** nezelené, organickými látkami i minerální výživou závislé na houbě

Tulasnella sp. (Agaricomycotina) + mykoheterotrofní játrovka *Cryptothallus mirabilis*
(+ ECM s *Betula*)

http://rbg-web2.rbge.org.uk/bbs/Resources/gallery/cryptothallus%20mirabilis%203.jpg

Mykoheterotrofní rostliny

- asociace i se **saprotrofními** druhy hub
Wullschlaegelia aphylla + **opad rozkládající** *Gymnopus* sp., *Mycena* sp.
Gastrodia similis + **dřevokazná** *Resinicium* sp. (vše Agaricomycotina)

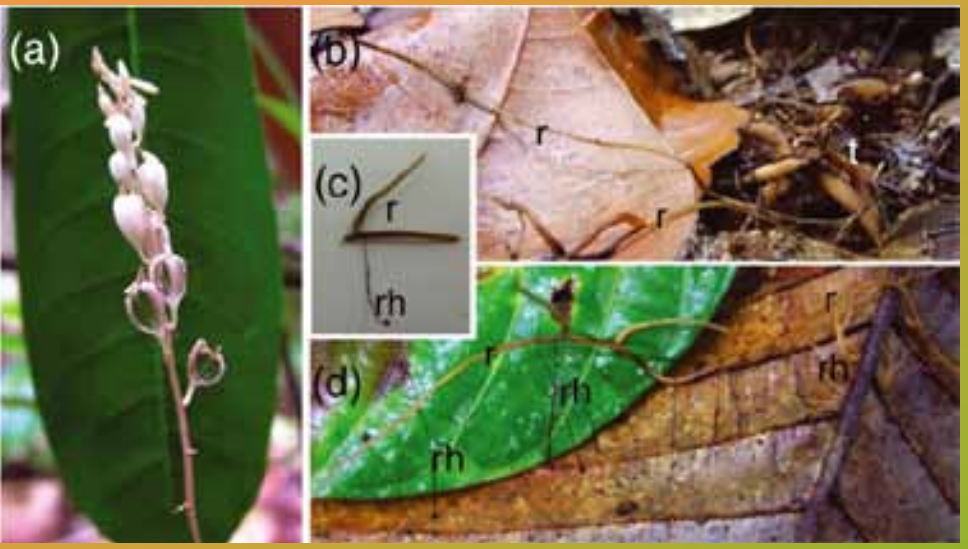


Fig. 1 Morphology of *Wullschlaegelia aphylla* (a–d) and *Gastrodia similis* (e–g). (a) Inflorescence of *W. aphylla*. (b) Ramified mycorrhizal roots (r) and short tuberous roots (t) in leaf litter. (c) Fungal rhizomorphs (rh) linking mycorrhizas and decaying leaves (rhizomorphs are dark on the left and pale on the right). (d) Contact between a rhizomorph and a mycorrhiza. (e) inflorescence of *G. similis*. (f) Thick starch-filled rhizomes (rz) and long mycorrhizal roots (r) in dead wood. (g) A rhizome with emanating mycorrhizas.

Martos & al. (2009)

Symbiózy s (nejen) rostlinami …

Arbuskulání (AM)
Erikoidní
- arbutoidní
- monotropoidní

Orchideoidní
- jungermannioidní

Ektomykorhiza (ECM)
- Ektendomykorhizy

Endofyti
Lichenismus

Mykoheterotrofní rostliny
Parazité

Endofyti

- **nesymptomatičtí** kolonizátoři pletiv rostlin
- **žádné známky kolonizace**
- po většinu sezóny **žádné projevy**

***Základní rozdělení**:*

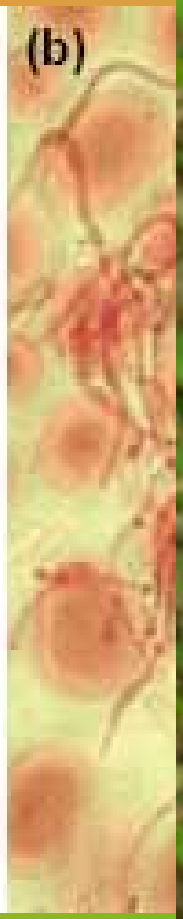
= u **travin** (Hypocreales, Ascomycetes)

- klasickým příkladem jsou trávy a *Neotyphodium* (teleom. *Epichloë*)

= u **ostatních rostlin a dřevin** (různé Pezizomycotina, vzácně Agaricomycotina)

- stovky až tisíce kmenů od desítek druhů
- v různých částech (kořeny, listy, jehlice, stonky, větvičky, …)

Endofyti travin



Epichloë typhina
Müller & Krauss (2005)

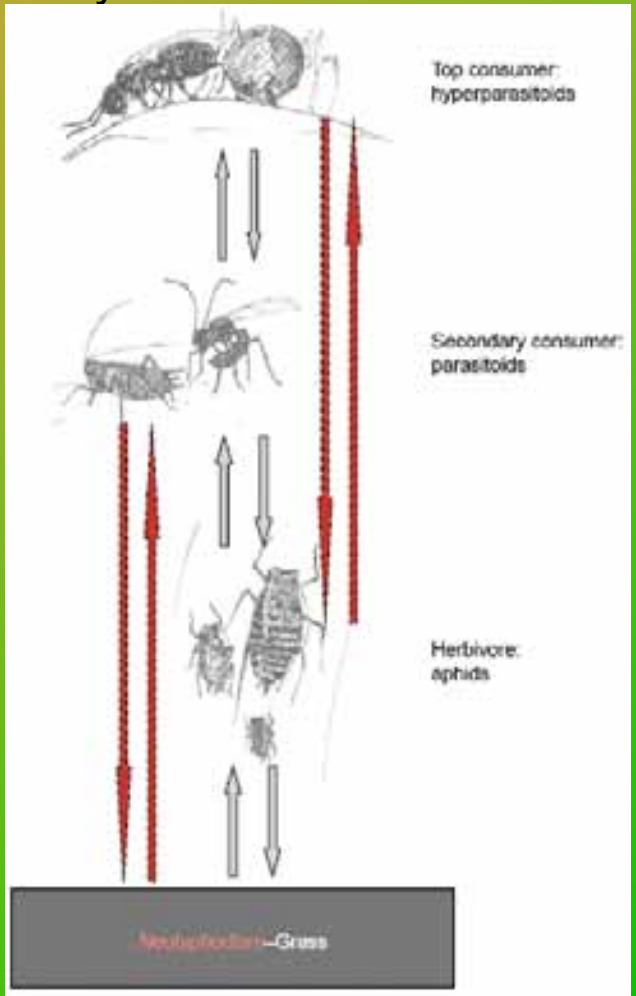
Neotyph

Endofyti travin

- **alkaloidy**
- **proti herbivorům**, **osmoregulační** funkce

- kromě vlivu na rostlinu a na herbivory i na parazity a predátory herbivorů

- **ergoty**, **loliny**, **lolitrem** (*Neotyphodium*)
- mohou vadit i hospodářskému dobytku, v mléce



Müller & Krauss (2005)

Endofyti ostatní

Funkce různá

- jsou **mutualisté**, sekundární metabolity s různou funkcí proti herbivorům

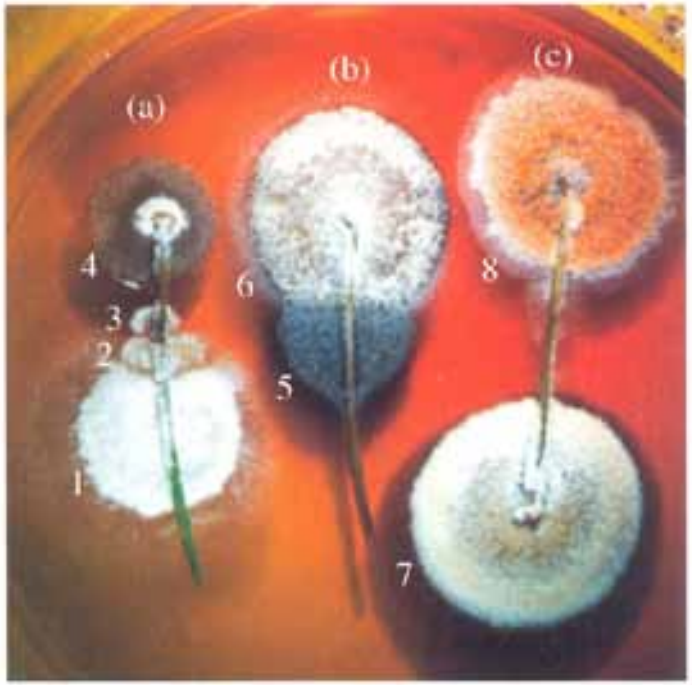
- jsou **mutualisté**, ochrana rostliny před stresovými podmínkami prostředí

- **patogeni**

- **dekompozice**, po opadu první kolonizátoři

x většinou neznámá

- gradient tropy vs. boreál = Xylariales vs. Helotiales



Colony number	Most closely related taxon	Unique ITS sequence no.
1	*Lophodermium*	1
2	*Lophodermium*	2
3	*Lophodermium*	3
4	*Lophodermium*	4
5	*Lophodermium*	2
6	*Lophodermium*	5
7	*Lophodermium*	6
8	*Helotiales*	7

Ganley & Newcombe (2006)

Endofyti ostatní

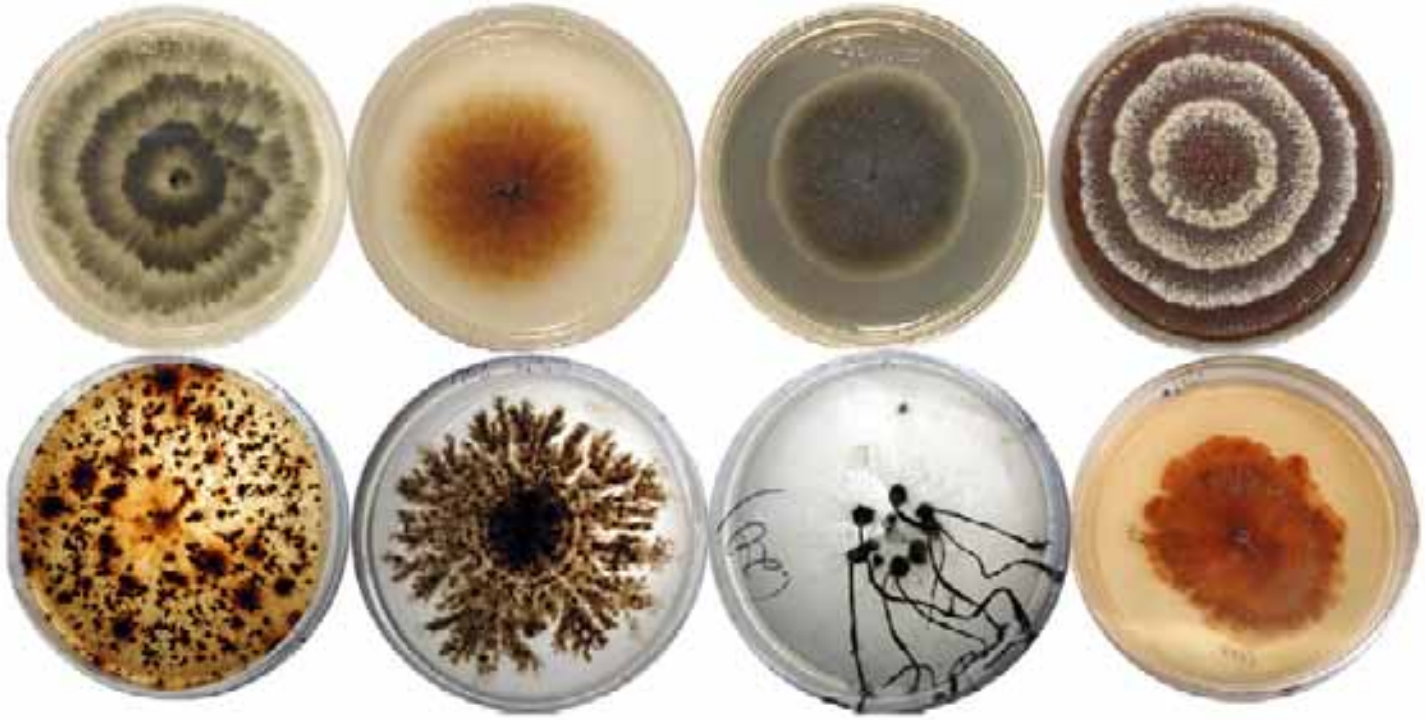


Fig. 1 – Assortment of ascomycetous endophytic fungi recovered from foliage of angiosperms and conifers in North America and Panama. These diverse fungi grow readily in culture and can be maintained in culture collections at little cost. With recent technological advances, the growing popularity of culture-free methods promises to discover ever-greater diversity and to expand our understanding of the structure of the fungal tree of life. One particularly useful aspect of culture-free methods may be to show that particular fungi are present in an environment, thus leading endophyte researchers to optimize culturing conditions as a means to capture those fungi *in vitro*. Such efforts are critical for establishing voucher specimens, which in turn can be used to empirically assess species interactions, as raw materials for bioprospecting or biological control, and as the basis for future research in systematics or genomics. Because many endophytes do not sporulate in culture, and thus are classified only as *mycelia sterilia*, they are not welcome at most established culture collections. Depositories are needed to house and maintain vouchers of these fungi, and to curate their ecological data (site of origin; host plant; season; tissue type). Both the specimens themselves and the data regarding their recovery have tremendous intrinsic value.

Arnold (2007)

Endofyti ostatní

- v živých pletivech metabol. aktivní?

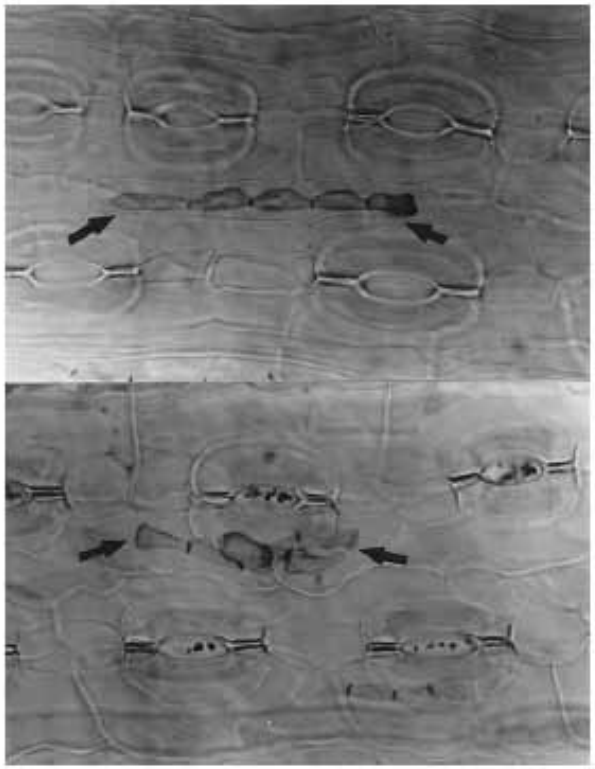


FIGURE 12.1 Intracellular *Rhabdocline parkeri* hyphae (*arrows*) in Douglas fir (*Pseudotsuga taxifolia*) needles (×500).

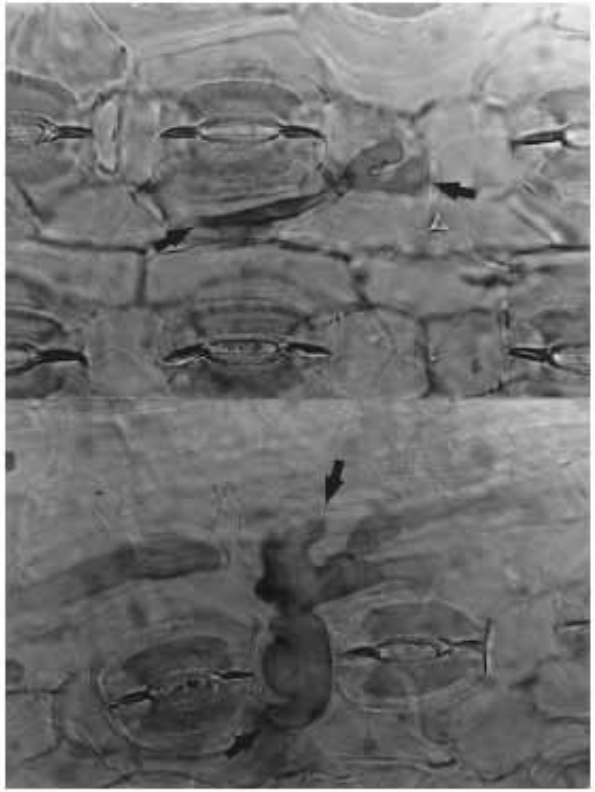


FIGURE 12.2 Intracellular *Phyllosticta abietis* hyphae (*arrows*) in Giant fir (*Abies grandis*) needles (×500).

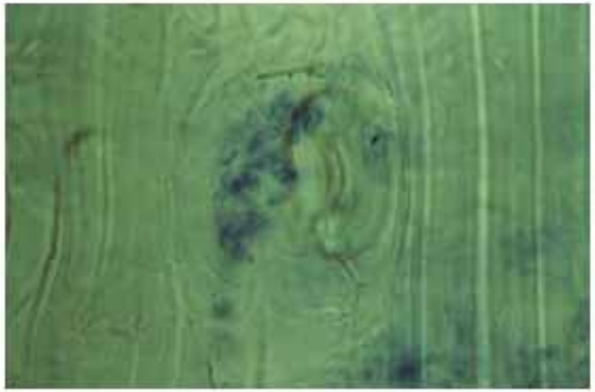


FIGURE 12.3 Hypha of an unidentified endophyte in epidermal cells of *Picea pungens*. Needles were cleared in 10% KOH and stained with 0.05% trypan blue in lactoglycerol.

FIGURE 12.4 Hypha of *Stagonospora innumerosa* in an epidermal cell of *Juncus effusus* var *pacificus*. The epidermis was excised with a razor blade, cleared by boiling in lactophenol-ethanol (1:2 v/v), and stained in acid fuchsin-malachite green (Cabral et al. 1993).

Mueller & al. (2004)

Endofyti ostatní

- vliv endofytní houby rodu *Curvular*

-

Dichanthelium lanuginosu

http://wfrc.usgs.gov/research/aquatic%

ECOLOGY

Thermotolerance Generated by Plant/Fungal Symbiosis

Regina S. Redman,[1,2] Kathy B. Sheehan,[2,5] Richard G. Stout,[4,5] Russell J. Rodriguez,[1,2*] Joan M. Henson[2,5]

All plants studied in natural ecosystems are symbiotic with fungi (*1*), which obtain nutrients while either positively, negatively, or neutrally affecting host fitness (*2*). Plant adaptation to selective pressures is considered to be regulated by the plant genome (*3*). To test whether mutualistic fungi contribute to plant adaptation, we collected 200 *Dichanthelium lanuginosum* plants from geothermal soils at 10 sites in Lassen Volcanic (LVNP) and Yellowstone (YNP) National Parks. These soils have annual temperature fluctuations ranging from about 20° to 50°C (*4*).

Plants and their roots were removed and assessed for fungal colonization (*5*). A fungal endophyte was isolated from the roots, crowns, leaves, and seed coats of all plants collected. Cultures established from single spores were analyzed by morphological (*6*) and rDNA sequence analyses (*7*) that suggested that the endophyte may be a new species of *Curvularia* (*5*). Soils from the base of 30 plants in YNP were devoid of the *Curvularia* sp., although other fungi were abundant (*4*). Moreover, axenically cultured *Curvularia* sp. was incapable of mycelial growth, spore germination, or survival at ≥40°C (*5*). Because geothermal soils were above 40°C all summer (*4*) and devoid of the fungus, we conclude that this *Curvularia* sp., like all known *Curvularia* species, is exclusively associated with plants.

To assess the effect of the endophyte on the thermotolerance of *D. lanuginosum*, we removed seed coats and surface sterilized seeds (*8*) to generate endophyte-free plants. Treated seeds were planted in sterile magenta boxes containing sand, and after 1 month, plants were either mock-inoculated or inoculated with *Curvularia* sp. by pipetting 10^5 spores between the crown and first leaf. In the absence of thermal stress, endophyte-colonized (symbiotic) and endophyte-free (nonsymbiotic) plants showed no measurable growth or developmental differences. When root zones were heated with thermal tape (Fig. S1), nonsymbiotic plants (45/45) became shriveled and chlorotic at 50°C (Fig. 1A). In contrast, symbiotic plants (45/45) tolerated constant 50°C soil temperature for 3 days and intermittent soil temperatures as high as 65°C for 10 days. All nonsymbiotic plants (45/45) died during the 65°C heat regime, whereas symbiotic plants (45/45) survived. The endophyte was reisolated from surface sterilized roots and leaves of all surviving plants, indicating that both the fungus and the host were protected from thermal stress.

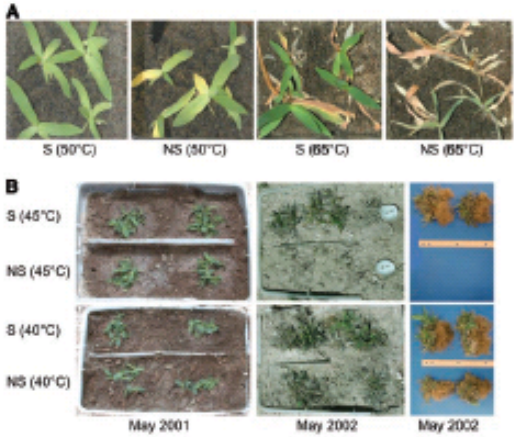


Fig. 1. Representative symbiotic (with *Curvularia* sp.) and nonsymbiotic *D. lanuginosum* plants with rhizosphere temperatures of 50°C for 3 days or 65°C for 8 hours/day for 10 days under laboratory conditions (A) and in 40° or 45°C soil under field conditions (B).

We also field-tested symbiotic and nonsymbiotic seedlings in pasteurized geothermal soil collected and returned to Amphitheater Springs (YNP) in May 2001 (Fig. 1B). By May 2002, symbiotic plants were greener with greater root and leaf masses (Table S2) than those of nonsymbiotic plants in soils ≤40°C. In soils above 40°C, nonsymbiotic plants did not survive while symbiotic plants thrived. The beneficial effect of fungal symbiosis increased with soil temperatures, demonstrating that *Curvularia* sp. provided thermal protection for *D. lanuginosum*. We reisolated *Curvularia* sp. from *D. lanuginosum* roots at 45°C field soil temperatures, indicating that thermal protection was also provided to the fungus, which corroborated our laboratory experiments.

In addition to thermotolerance, the basis of mutualism in this system may involve other benefits (e.g., nutrient acquisition by the fungus). Several possible symbiotic mechanisms could confer thermotolerance. In planta, the fungal endophyte produces cell wall melanin (Fig. S3) that may dissipate heat along the hyphae and/or complex with oxygen radicals generated during heat stress (*9*). Alternatively, the endophyte may act as a "biological trigger" allowing symbiotic plants to activate stress-response systems more rapidly and strongly than nonsymbiotic plants (*10*).

References and Notes

1. O. Petrini, in *Microbiology of the Phyllosphere*, N. J. Fokkema, J. van den Heuvel, Eds. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1986), pp. 175–187.
2. D. H. Lewis, in *The Biology of Mutualism*, D. H. Boucher, Ed. (Croom Helm, London, 1985), pp. 29–39.
3. M. F. Smallwood, C. M. Calvert, D. J. Bowles, Eds., *Plant Responses to Environmental Stress* (BIOS Scientific Publishers, Oxford, 1999).
4. R. S. Redman, A. Litvintseva, K. B. Sheehan, J. M. Henson, R. J. Rodriguez, *Appl. Environ. Microbiol.* 65, 5193 (1999).
5. Materials and Methods are available as supporting material on Science Online.
6. A. Sivanesan, *Mycol. Pap.* 158, 104 (1987).
7. T. J. White, T. Bruns, S. Lee, J. Taylor, in *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications*, M. A. Innis, D. H. Gelfand, J. J. Sninsky, T. J. White, Eds. (Academic Press, San Diego, CA, 1990), pp. 315–322.
8. R. S. Redman, D. D. Dunigan, R. J. Rodriguez, *New Phytol.* 151, 705 (2001).
9. J. F. Davidson, B. Whyte, P. H. Bissinger, R. H. Schiestl, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 93, 5116 (1996).
10. R. S. Redman et al., *Plant Physiol.* 119, 795 (1999).
11. We thank T. Al-Niemi, L. Brasche, H. Bateson, E. Kuhn, A. Litvintseva, and J. Duda for technical and field assistance. This project was made possible by the permission, assistance, and guidelines of YNP and LVNP. This work was supported by grants from the U.S. Geological Survey, the NSF (9977922), the U.S. Army Research Office (DAAH04-96-1-01194), and the MSU Thermal Biology Institute.

Supporting Online Material
www.sciencemag.org/cgi/content/full/298/5598/1581/DC1
Materials and Methods
Figs. S1 and S3
Table S2

[1]U.S. Geological Survey, WFRC, 6505 NE 65th Street, Seattle, WA 98115, USA. [2]Department of Botany, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA. [3]Department of Microbiology, [4]Department of Plant Sciences, and [5]Thermal Biology Institute, Montana State University, Bozeman, MT 59717, USA.

To whom correspondence should be addressed. E-mail: Rusty_Rodriguez@usgs.gov

Endofyti ostatní

- *Morchella elata* (Pezizomycotina) + *Bromus tectorum*
- vyšší biomasa trávy – vyšší pravděpodobnost požáru, lepší přežívání oproti jiným rostlinám

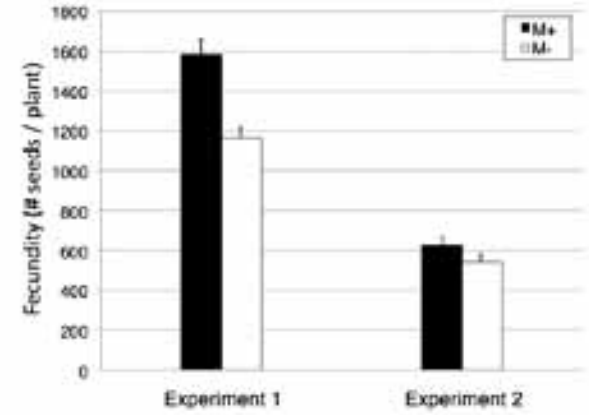
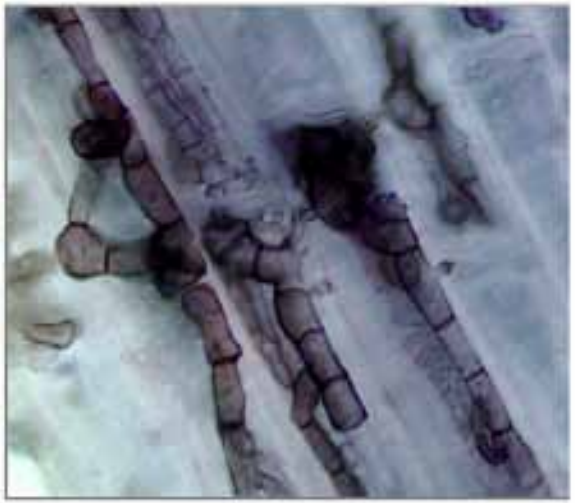


Fig 1 – Morchella increased cheatgrass fecundity in both experiments ($t = 6.80$, $P < 0.001$ and $t = 2.07$, $P = 0.05$, respectively).



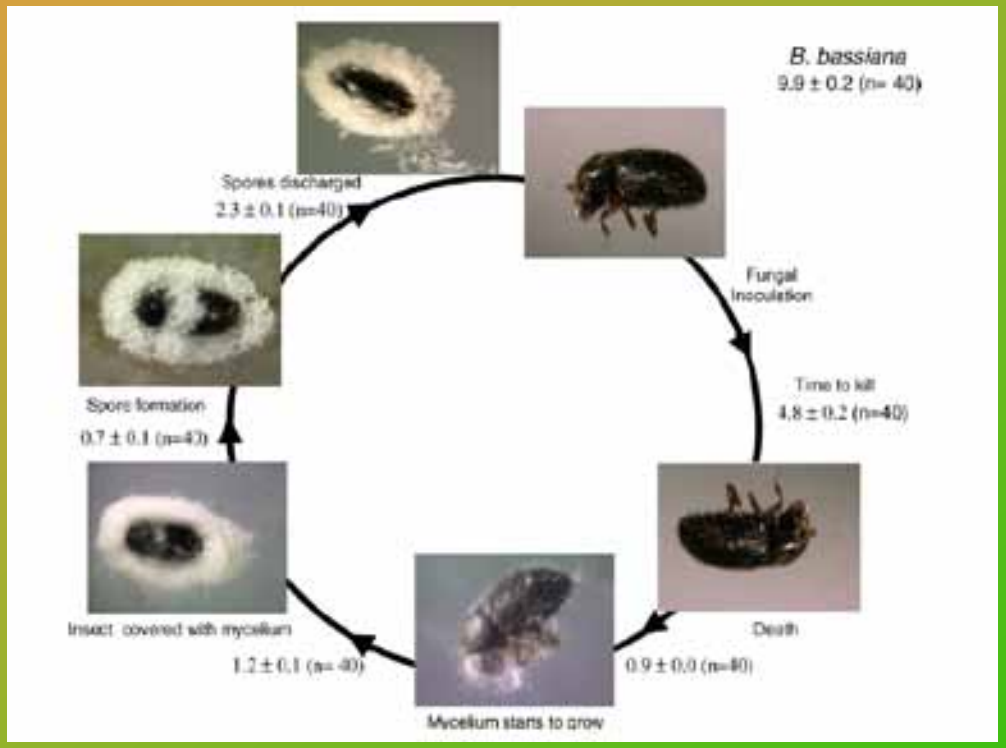
FUNGAL BIOLOGY 116 (2012) 133–144

A novel plant–fungal mutualism associated with fire

Melissa BAYNES[a], George NEWCOMBE[b,*], Linley DIXON[c], Lisa CASTLEBURY[c], Kerry O'DONNELL[d]

Endofyti ostatní

- **entomopatogenní** houby jako **endofyté**
- *Beauveria bassiana* (Sordariomycetes) v listech kávovníku

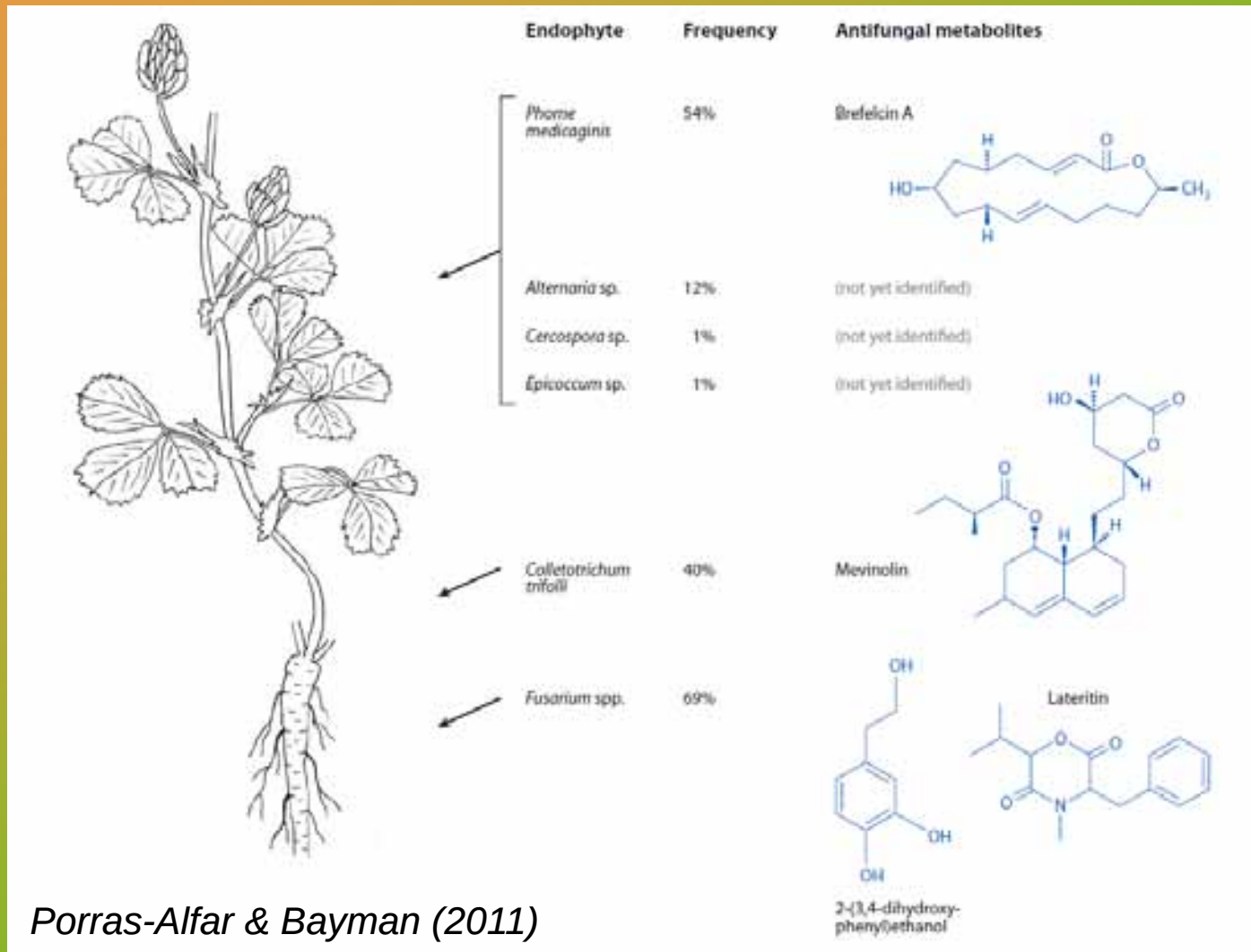


Vega & al. (2008)

Endofyti ostatní

- **různé houby v různých pletivech**

= různé metabolity



Porras-Alfar & Bayman (2011)

DSE

- *dark septate endophytes*
- nesymptomatická kolonizace **kořenů** bylin (trávy) a *Ericaceae*
- **tmavé mycelium**, tvorba mikrosklerocií
- saprotrofní askomycety, *Phialocephala fortinii, Meliniomyces variabilis, Cadophora finlandica* (Pezizomycotina)
- v chladných oblastech chudých na živiny

- výskyt zřejmě podhodnocen
- účinek mutualistický – neutrální – parazitický, lze je považovat za mykorhizy *s. l.* (?)

Schadt & al. (2000)

DSE

mikrosklerocium houby *Acephala applanata* v kořeni *Vaccinium myrthilus*

© P. Kohout 2008

Symbiózy s (nejen) rostlinami …

Arbuskulání (AM)
Erikoidní
- arbutoidní
- monotropoidní

Orchideoidní
- jungermannioidní

Ektomykorhiza (ECM)
- Ektendomykorhizy

Endofyti
Lichenismus

Mykoheterotrofní rostliny
Parazité

Lichenismus

- symbióza **řas** (**sinic**) a **hub** (Pezizomycotina, Agaricomycotina)

- většinu stélky tvoří **houba**,
- **řasa** pouze v tenké **vrstvě** pod svrchní kůrou

Xanthoria parietina

Omphalina hudsoniana

Lichenismus

- unikátní symbióza
- pohlavně se rozmnožuje pouze houba
- lišejníkové **řasy** mohou **růst i volně**, **houby nikoliv (?)**
- vznik řady jedinečných sekundárních metabolitů (***lišejníkové kyseliny***)
- kolonizace nových substrátů (skály)
- odolné proti stresu (chlad, nedostatek srážek, světla, …)
- málo odolné vůči znečištění = možnost ***bioindikace***
- potrava pro mnoho druhů živočichů
- úkryt a prostor pro mnoho živočichů

-***více viz přednáška Davida Svobody v Botanice bezcévných rostlin***

Symbiózy s (nejen) rostlinami …

Arbuskulání (AM)
Erikoidní
Ektomykorhizy

Ektendomykorhizy

arbutoidní

jungermannioidní

monotropoidní

orchideoidní

Mykoheterotrofní rostliny
Parazité

Endofyti
Lichenismus

mutualistické

prospěšné pouze pro jednoho

mutualistické až prospěšná pouze pro jednoho, nebo nejasné

Symbiózy s autotrofními organizmy - shrnutí

- které typy mykorhiz rozeznáváme
- jak je mykorhizní symbióza rozšířena v rostlinné říši
- co skrývají rostliny uvnitř pletiv

Náměty pro výuku, domácí úkoly, zamyšlení …

Které rostliny jsou zcela závislé na symbiotických houbách?