

Załącznik 4

**AUTOREFERAT
PRZEDSTAWIAJĄCY OPIS DOROBKU
I OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH**

Dr Leszek Karliński

Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk

Zakład Związków Symbiotycznych

ul. Parkowa 5

62-035 Kórnik

1. Imię i nazwisko.

Leszek Antoni Karliński

ORCID nr 0000-0002-5565-9596

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

14.06.2007 - stopień doktora nauk biologicznych, Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk w Kórniku, tytuł pracy doktorskiej: Zbiorowiska ektomikoryz świerka pospolitego i mikroorganizmów glebowych w dojrzałych drzewostanach, promotor: prof. dr hab. Barbara Kieliszewska-Rokicka, recenzenci: prof. dr hab. Hanna Dahm, prof. dr hab. Stanisława Pukacka

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

1.08.1996 – 30.09.1996: Wielkopolskie Centrum Onkologii, stanowisko: technik medyczny

1.09.2001 – 15.12.2001: Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, umowa – zlecenie

21.01.2003 – 18.07.2003: Danish Institute of Agricultural Sciences, Department of Integrated Pest Management, Research Centre Flakkebjerg, Stypendium Rządu Duńskiego, staż w trakcie doktoratu

1.07.2006 – 10.09.2006: Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, umowa – zlecenie

16.10.2006 – 27.11.2006: Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, umowa o dzieło

18.09.2007 – 12.10.2007: Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, umowa o dzieło

2.11.2007 – 15.12.2007: Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, stanowisko: biolog

16.12.2007 – 15.01.2008: Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, umowa o dzieło

15.01.2008 – 31.05.2008: Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, stanowisko: biolog

1.06.2008 – 30.03.2010: Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, stanowisko: biolog

31.03.2010 – 29.08.2019: Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, stanowisko: biolog

30.03.2011 – 29.07.2011: urlop bezpłatny w IDPAN, Aarhus University, Faculty of Agricultural Sciences, Department of Integrated Pest Management, Flakkebjerg, Stypendium Rządu Duńskiego, staż podoktorski

30.08.2019 – obecnie: Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk, stanowisko: adiunkt

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

Tytuł osiągnięcia:

Wpływ genotypu drzew i czynników środowiskowych na zbiorowiska mikroorganizmów glebowych topoli. [Impact of tree genotype and environmental conditions on microbial community of poplars]

Dziedzina nauk ścisłych i przyrodniczych

Dyscyplina: Nauki biologiczne

Wykaz publikacji składających się na osiągnięcie:

- **Karliński L.**, Rudawska M., Kieliszewska-Rokicka B., Leski T. 2010. Relationship between genotype and soil environment during colonization of poplar roots by mycorrhizal and endophytic fungi. *Mycorrhiza* 20, 315-324.

(IF₂₀₁₀ = 2,571, punktacja MNiSW₂₀₁₀ = 32 pkt.)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: współdziałaniu w opracowaniu koncepcji badań, opracowaniu ostatecznego modelu badań, zbiorze prób i wykonaniu analiz laboratoryjnych, opracowaniu wyników, przygotowaniu wstępnej wersji manuskryptu oraz korekty manuskryptu po recenzjach. Mój udział w powstaniu pracy oceniam na 82%.

- **Karliński L.**, Rudawska M., Leski T. 2013. The influence of host genotype and soil conditions on ectomycorrhizal community of poplar clones. *European Journal of Soil Biology* 58, 51-58.

(IF₂₀₁₃ = 2,146, punktacja MNiSW₂₀₁₃ = 25 pkt.)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zaplanowaniu badań, zbiorze prób i wykonaniu wszystkich analiz laboratoryjnych, opracowaniu wyników, przygotowaniu pierwotnej wersji manuskryptu oraz korekty manuskryptu po recenzjach. Mój udział w powstaniu pracy oceniam na 90%.

- **Karliński L.**, Ravnskov S., Rudawska M. 2020. Soil microbial biomass and community composition relates to poplar genotypes and environmental conditions. *Forests* 11, #262.

(IF₂₀₂₀ = 2,633, punktacja MNiSW₂₀₂₀ = 100 pkt.)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: zaplanowaniu badań, zbiorze prób i wykonaniu wszystkich analiz laboratoryjnych, opracowaniu wyników, przygotowaniu manuskryptu oraz korekty manuskryptu po recenzjach. Mój udział w powstaniu pracy oceniam na 88%.

- **Karliński L.** 2021a. Biomass of external mycelium of mycorrhizal fungi associated with poplars – the impact of tree genotype, tree age and soil environment. *Applied Soil Ecology* 160, #103847.

(IF₂₀₂₀ = 4,046, punktacja MEiN₂₀₂₁ = 140 pkt.)

- **Karliński L.** 2021b. The arbuscular mycorrhizal symbiosis of trees. Structure, function and regulating factors. W: Shrivastava N., Mahajan S., Varma A. (red.) *Symbiotic Soil Microorganisms. Biology and Applications*. Springer. 117-128.

(IF₂₀₂₀ = - , punktacja MEiN₂₀₂₁ = 20 pkt.)

Osiągnięcie naukowe stanowi cykl oryginalnych publikacji naukowych opublikowanych w latach 2010-2021 w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports oraz w rozdziale książkowym. Sumaryczny Impact Factor (zgodny z rokiem opublikowania) tych pozycji wynosi 11,396 a sumaryczna liczba punktów MEiN to 317.

WSTĘP

Topole są ważnym elementem biotycznym krajobrazu naturalnego jak i przekształconego ręką człowieka. Rodzaj *Populus*, wchodzący w skład rodziny wierzbowatych (*Salicaceae*) obejmuje około 40 gatunków topoli szeroko rozpowszechnionych na półkuli północnej od tundry aż po Afrykę Północną (Bugala 1973). Do dnia dzisiejszego nowe gatunki topoli są wciąż odkrywane, a ostatni z nich (*Populus primaveralepensis* sp. nov.) zidentyfikowano w 2019 r. w lasach stanu Jalisco w zachodnim Meksyku (Vázquez-García i in. 2019). Dokładna liczba gatunków jest trudna do oszacowania również ze względu na dużą łatwość międzygatunkowego krzyżowania się topoli (Bugala 1973; Eckenwalder i in. 1996). Z jednej strony cecha ta stanowi zaletę i jest wykorzystywana przez człowieka od dawna, co skutkowało powstaniem znacznej liczby mieszańców i klonów, wykazujących nieraz znaczne różnice pod względem cech morfologicznych i fizjologicznych, w tym także odporności na stesy biotyczne i abiotyczne jak np. oddziaływanie suszy, czy skażenia metalami ciężkimi i in. (np. Sebastiani i in. 2004; Laureysens i in. 2005). Z drugiej strony łatwość krzyżowania się topoli stanowi poważne zagrożenie dla lokalnych, naturalnych stanowisk np. topoli czarnej (*Populus nigra* L.) z czasem wypieranej przez tworzące się spontanicznie mieszańce z obcymi, najczęściej amerykańskimi, uprawnymi gatunkami topoli (Tylkowski 2010).

W warunkach naturalnych światło- i wilgociolubne drzewa jakimi są topole, zwykle występują wzdłuż cieków wodnych i w lasach łągowych. Przy podwyższonych poziomach wód topole wraz z olszami odgrywały niegdyś istotną funkcję strefy buforowej, ograniczając skutki powodzi. Regulacja rzek i osuszanie terenów na potrzeby rolnictwa, doprowadziły do zniszczenia większości naturalnych siedlisk rodzimych topoli, skutkując dzisiaj koniecznością podjęcia zakrojonych prac nad ich restytucją (Zsuffa i in. 1996; Smulders i in. 2008). Dzięki takim cechom jak szybki wzrost i produkcja biomasy, łatwość rozmnażania wegetatywnego poprzez zrzezy, czy odporność na niekorzystne warunki środowiskowe, drzewa te obok

naturalnych, kulturowych i estetycznych funkcji, znalazły zastosowanie w przestrzeni miejskiej (jako tzw. drzewa tlenowe, akumulujące znaczne ilości dwutlenku węgla i produkujące tlen oraz tworzące w relatywnie krótkim przedziale czasu zacieniającą i poprawiającą miejski mikroklimat szatę roślinną), w rolnictwie, leśnictwie (zalesiania porolnych, czy zdegradowanych terenów przemysłowych), a także w różnych gałęziach przemysłu drzewnego, papierniczego, chemicznego oraz przy produkcji bioenergii (np. Sebastiani i in. 2004; Yin i in. 2005; Monclus i in. 2006; Langer i in. 2012). Wieloletnie plantacje topolowe mogą także odgrywać znaczącą rolę w zwiększaniu zawartości węgla organicznego w glebie oraz w łagodzeniu wpływu zmian klimatu (Zheng i in. 2017). Ta wielofunkcyjność topoli znalazła odzwierciedlenie również w badaniach i programach uprawy selekcyjnej (Bradshaw i in. 2000) czyniąc z nich rośliny modelowe. Na przykład pierwszym drzewem, którego genom poddano sekwencjonowaniu była *Populus trichocarpa* (Tuskan i in. 2006).

Do niedawna większość prac badawczych dotyczących topoli i jej zróżnicowania genetycznego koncentrowało się wokół części nadziemnej tych drzew i ich reakcji na czynniki środowiskowe. Zdecydowanie mniej uwagi poświęcano części podziemnej topoli oraz relacjom z innymi grupami organizmów, co sprawiło, że dopiero w ostatnich latach drzewa te zostały w większym stopniu docenione jako organizmy modelowe w badaniach interakcji między rośliną a mikrobiotą glebową (Cregger i in. 2018).

Mikrobiom glebowy i wchodzące w jego skład grzyby mykoryzowe odgrywają kluczową rolę w pobieraniu przez rośliny wody i składników odżywczych, ochronie przed patogenami, immobilizacji różnego rodzaju zanieczyszczeń oraz w innych procesach obserwowanych w ekosystemach lądowych (Gotel i in. 2011; Shakya i in. 2013; Beckers i in. 2017; Chodak i in. 2013). Struktura zbiorowisk mikroorganizmów glebowych towarzyszących roślinom oraz ich biomasa stanowią czułe wskaźniki odzwierciedlające zmiany żyzności gleb (Peacock i in. 2001), składu zbiorowisk roślinnych (van der Heijden i in. 2008), depozycji różnego rodzaju związków w glebie (Stephen i in. 1999), czy klimatu (Zogg i in. 1997). Rośliny, jako główni dostawcy związków węgla w postaci eksudatów i innych produktów pochodzenia roślinnego mogą również w sposób istotny wpływać na mikrobiom glebowy (Bulgarelli in. 2015; Lottmann i in. 2010; Schweitzer i in. 2008).

Topole na tle innych gatunków należą do bardzo interesujących drzew, wykazujących zdolność do nawiązywania związków symbiotycznych zarówno z grzybami arbuskularnymi jak i ektomykoryzowymi. Jedynie niewielka grupa gatunków drzew, wśród których obok topoli można wskazać wierzby, olsze, dąb czerwony, niektóre orzeszniki, a także bardziej egzotyczne akacje, eukaliptusy, rzewnie, uapaca, czy damarzyki wchodzą jednocześnie w relacje z dwoma tak bardzo odmiennymi pod względem historii ewolucyjnej jak i cech morfo-anatomicznych i fizjologicznych grupami grzybów (Lodge 1989; Neville i in. 2002; Gehring i in. 2006; **Karliński i in. 2010; Karliński 2021a**).

Mykoryza arbuskularna jest najbardziej rozpowszechnionym na Ziemi typem symbiozy grzybów i roślin (71–90% gatunków roślin naczyniowych). Typ ten współtworzony przez grzyby należące do gromady *Glomeromycota* (Smith i Read 2008; Błaszczkowski 2012) najczęściej występuje u roślin strefy tropikalnej, a w klimacie umiarkowanym spotykany jest obok topoli i innych przedstawicieli Salicaceae także u drzew i krzewów owocowych oraz np. klonów, jesionów, kasztanowców i wiązów. Ponadto mykoryza arbuskularna jest obecna

wśród traw (w tym także zbóż), kukurydzy, truskawek, ziemniaków, czosnku, czy cebuli (Karliński et al. 2021b). Jest również ewolucyjnie najstarszym typem symbiozy grzybów z roślinami, który prawdopodobnie mógł towarzyszyć roślinom już w momencie ich wkraczania na ląd, a w każdym bądź razie zdecydowanie wspierał szybką kolonizację środowiska lądowego (Delaux 2017; Chen i in. 2018). Jak dotychczas pierwsze struktury przypominające grzybnię w tkankach roślinnych zaobserwowano w próbkach pochodzących z ordowiku, sprzed ponad 450 milionów lat (Brundrett 2002). Problemy z jednoznacznością interpretacją tych znalezisk sprawiają jednak, że za jako bardziej pewne uważa się nieco młodsze skamieniałości grzybni, anatomicznie bliższe współczesnym odpowiednikom i datowane na wczesny dewon ok. 407 milionów lat temu. Zbliżone wyglądem do arbuskul Glomeromycotina i strzępek Mucoromycotina struktury sugerują istnienie ich wspólnego przodka gdzieś pomiędzy 358 a 508 milionami lat temu (Martin i in. 2017). Natomiast dane molekularne wskazują, że związki grzybów i roślin mogą być znacznie starsze, niż ich obecność na lądzie (Brundrett 2002; Martin i in. 2017). Wraz z radiacją roślin i niejednokrotnie gwałtownymi zmianami zachodzącymi w środowisku lądowym rozwijały się lub zanikały związki symbiotyczne z grzybami. Struktury grzybów arbuskularnych u roślin drzewiastych odnotowano np. u należących do widłaków, 30-metrowych lepidodendronów, czy przodków iglastych – kordaitów w późnym karbonie (ponad 300 mln lat), a także okrytozależkowych cykad i ewoluujących gatunków iglastych stanowiąc główny typ mykoryzowy od triasu do kredy. We wczesnym okresie kredy (ok. 145 mln lat temu) symbioza z grzybami arbuskularnymi zawiązała się również u drzew okrytonasiennych, wczesnych jednoliściennych i dwuliściennych, a większość powstałych wówczas związków mykoryzowych w przypadku roślin zielnych pozostaje niezmienną do dnia dzisiejszego (Martin i in. 2017, Brundrett i Tedersoo 2018).

Wcześniej, bo w jurze i na początku kredy (140 – 180 mln lat temu) po raz pierwszy wykształciła się symbioza ektomykoryzowa u wczesnych Pinaceae na terenach półpustynnych w klimacie tropikalnym i subtropikalnym. Spadek temperatur w kenozoiku sprzyjał obecności ektomykoryz w ówczesnych lasach iglastych oraz u przedstawicieli okrytonasiennych. Symbioza ektomykoryzowa ewoluowała jeszcze wielokrotnie najprawdopodobniej ze swych saprotroficznych grzybowych przodków w wielu niezależnych od siebie liniach rozwojowych tak roślin jak i grzybów (Martin i in. 2017; Brundrett i Tedersoo 2018).

Kolejna fala zmian ewolucyjnych w kredzie (ok. 100 mln lat temu) dała początek także nowym typom związków symbiotycznych i nie tylko np. mykoryzowych z gatunkami należącymi do Orchidaceae, Ericaceae, roślin pasożytniczych, mięsożernych, czy wchodzących w związki z bakteriami wiążącymi azot (Brundrett 2002; Brundrett i Tedersoo 2018; Martin i in. 2017). W przeciągu ostatnich 65 milionów lat (paleogen) miała miejsce kolejna fala radiacji dotycząca głównie gatunków wcześniej arbuskularnych, a w wyniku specjacji ektomykoryzowych i niemykoryzowych, co uwarunkowane było głównie zmianami klimatycznymi oraz zwiększeniem siedlisk i ich złożoności. W większości linii rozwojowych rośliny ewoluowały od związków z grzybami arbuskularnymi do symbiozy ektomykoryzowej, obecnej dzisiaj u 2% roślin naczyniowych wchodzących w związki symbiotyczne z grzybami należącymi do gromady Ascomycota i Basidiomycota (Brundrett 2017). Większość z ektomykoryzowych gatunków roślin obecna jest w strefie umiarkowanej i borealnej, a w przypadku drzew, są one głównymi gatunkami lasotwórczymi takimi jak

iglaste sosna, świerk, jodła, daglezwja, czy liściaste buk, lipa grab, brzoza, dąb. Jak już wspomniano wykształciła się także grupa gatunków, do której zaliczają się również topole, zachowująca relacje z obydwoma grupami grzybów.

Środowisko lądowe, charakteryzujące się znacznym zróżnicowaniem i częstą zmiennością warunków w nim panujących, stanowi dominujący czynnik, rzutujący na zbiorowiska mikroorganizmów związanych z systemem korzeniowym drzew. W przypadku grzybów mykoryzowych warunki środowiskowe determinują zarówno globalne ich rozmieszczenie poczynając od bogatych, zróżnicowanych pod względem gatunkowym lasów tropikalnych będących siedliskiem głównie mykoryzy arbuskularnej po mniej zróżnicowane i uboższe w składniki pokarmowe lasy półkuli północnej, charakteryzujące się znacznie wolniejszym obiegiem składników odżywczych niż w tropikach, a zdominowanym przez ektomykoryzę (Gonçalves i Martins-Loução 1996; Smith i Read 2008; Karliński i in. 2010, 2013, 2020). Różnice pomiędzy tymi dwoma grupami symbiontów grzybowych szczególnie uwidaczniają się w przypadku topól i innych gatunków drzew wchodzących jednocześnie w relacje z grzybami arbuskularnymi jak i ektomykoryzowymi. Jako pierwsze ustalają się związki mykoryzowe z grzybami arbuskularnymi, które z czasem częściowo zastępowane są przez grzyby ektomykoryzowe (Dominik 1958; Smith i Read 2008). Z własnych obserwacji doświadczeń prowadzonych w ramach przedstawianego osiągnięcia jak i innych prac nad różnymi klonami i mieszańcami topoli wynika, że proces ten zachodzi bardzo dynamicznie i już po kilku miesiącach na korzeniach młodych siewek zaobserwować można w pełni wykształcone struktury szeregu grzybów ektomykoryzowych, w większości należących do Ascomycota (80%). Udział w tych zbiorowiskach grzybów należących do Basidiomycota wzrastał wraz z wiekiem roślin (Smith and Read 2008; Karliński, dane niepublikowane). Przyspieszeniu procesu kolonizacji młodych siewek przez grzyby symbiotyczne może znacząco sprzyjać sąsiedztwo dojrzałych drzew arbuskularnych (dla grzybów arbuskularnych) i ektomykoryzowych w przypadku grzybów ektomykoryzowych (Dickie et al. 2001).

Grzyby arbuskularne charakteryzując się większą amplitudą tolerancji na niekorzystne warunki środowiskowe (Smith i Read 2008) i ustępując miejsca grzybom ektomykoryzowym wykazują tendencję do częściowego przemieszczania się w głębsze warstwy gleby o ograniczonym stężeniu tlenu i składników pokarmowych (Neville et al. 2002; Karliński i in. 2010).

Czynnikami warunkującymi zaburzenia podwójnej symbiozy grzybów arbuskularnych i ektomykoryzowych z drzewami są okresowe powodzie (Watson i in. 1990; Teste i in. 2019). Mokre i słabo napowietrzone warunki glebowe sprzyjają grzybom arbuskularnym i niekorzystnie wpływają na ektomykoryzy *Alnus* (Truszkowska 1953), *Populus*, *Salix* (Lodge 1989) czy *Quercus rubra* (Watsoni in. 1990). Podobnie negatywnie na zbiorowiska grzybów ektomykoryzowych wpływa stres związany z suszą (Gehring et al. 2006; Quereyeta i in. 2009; Kilpeläinen i in. 2017). Również pożary lasów w większym stopniu zmniejszają inokulum ektomykoryzowe niż grzybów arbuskularnych, które są w stanie szybciej wspierać regenerację zniszczonych żywołem obszarów (Lapeyrie i Chilvers 1985; Horton i in. 1998; Teste i in. 2019). Istotny wpływ na kolonizację korzeni przez grzyby mykoryzowe ma również temperatura gleby. Wyższe jej wartości wpływają negatywnie na grzyby ektomykoryzowe (McGee 1988). Z drugiej strony niska temperatura jest czynnikiem

ograniczającym występowanie grzybów arbuskularnych, ale nie grzybów ektomykoryzowych (Kilpeläinen i in. 2016).

Czynnikami istotnie rzutującymi na kolonizację arbuskularną i ektomykoryzową korzeni drzew mogą być także kumulacja w glebie pierwiastków biogennych takich jak azot, czy fosfor (Baum i Makeschin 2000), ale także obecność metali ciężkich. Element skażenia gleby metalami ciężkimi jako czynnik warunkujący symbiozę mykoryzową oraz inne grupy grzybów (saprotroficzne edofity grzybowe), bakterii i pierwotniaków, podjęty został w publikacjach wchodzących w skład przedstawianego osiągnięcia.

Funkcja genotypu roślin w kształtowaniu zbiorowisk mikroorganizmów była dotychczas niezbyt szeroko badana, a większość studiów dotyczyła krótko żyjących roślinach uprawnych, takich jak np. jęczmień, pomidor, ogórek, słodka papryka, ciecierzycy (Bulgarelli i in. 2015; Ellouze i in. 2013; Ravnskov i in. 2016) lub drzew we wczesnej fazie wzrostu (Gamalero i in. 2012). Natomiast stosunkowo niewiele wiadomo na temat jak genotyp roślin wieloletnich jakimi są drzewa, wpływa na różne grupy mikrobiomu gleby (Fernández-González i in. 2019).

Dla niektórych topoli jak np. *Populus angustifolia* oraz ich pokolenia F1 i mieszańców wstecznych Schweizer i in. (2008) wykazali istotny wpływ genotypu drzew na ogólną biomasę mikroorganizmów glebowych. Ale już w przypadku *Populus fremontii* efektu genotypu nie stwierdzono (Schweizer i in. 2008). Na udział genotypu gospodarza w kształtowaniu zbiorowisk mikroorganizmów obecnych w różnych tkankach drzew tj. w korzeniach, pniu i liściach wskazali Gottel i in. 2011; Cregger i in. 2018; Bonito i in. 2019. Jego skład może być znacząco różny w odniesieniu do mikrobiomu ryzosfery drzew (Gottel i in. 2011; Beckers i in. 2017; Cregger i in. 2018; Bálint i in. 2013). Na wpływ genotypu roślin na biomasę i strukturę zbiorowisk mykoryz wskazywał Corredor i in. (2014), Gehring i in. (2006), Ghergel i in. (2014), czy Tagu i in. (2001). Większość cytowanych badań sugeruje oddziaływanie genotypu drzew na rekrutację grzybów ektomykoryzowych poprzez kontrolę ilości i składu uwalnianych do gleby eksudatów (Bakker i in. 2012). Niestety, wciąż jest stosunkowo niewiele danych dotyczących wpływu genotypu drzewa na mikroorganizmy inne niż grzyby ektomykoryzowe w środowisku glebowym oraz na temat wzajemnych relacji między różnymi ich grupami.

CELE NAUKOWE

Głównym celem pracy było stwierdzenie, czy czynniki wewnętrzne (genotyp drzewa) oraz zewnętrzne (środowisko glebowe) warunkują w sposób istotny rozwój korzeni drobnych topoli i związanych z nimi zbiorowisk grzybów mykoryzowych oraz innych mikroorganizmów glebowych.

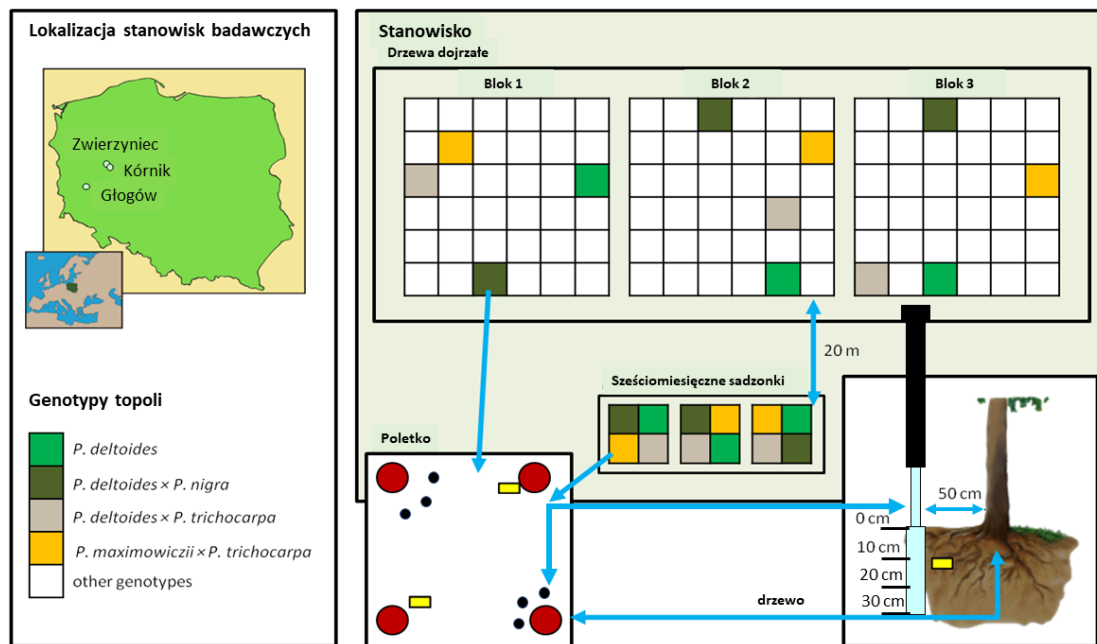
Drugim celem było oszacowanie w jakim stopniu wymienione czynniki rzutują na mikrobiom glebowy topoli oraz na relacje jakościowe i ilościowe wchodzących w jego skład mikroorganizmów.

W poszczególnych publikacjach, wchodzących w skład osiągnięcia skoncentrowano się na analizie oddziaływania genotypu drzew i czynników środowiskowych (ze szczególnym uwzględnieniem głębokości gleby i skażenia metalami ciężkimi) w różnych strefach wzajemnych relacji drzewo – mikrobiom poczynając od korzeni drobnych i ich kolonizacji przez grzyby mykoryzowe oraz grzbowe endofity korzeniowe, poprzez skład jakościowy zbiorowisk grzybów ektomykoryzowych, po biomasę i skład jakościowy mikroorganizmów obecnych w ryzosferze oraz produkcję biomasy grzybni zewnętrznej grzybów mykoryzowych w glebie.

POWIERZCHNIE DOSWIADCZALNE

Prace badawcze prowadzone były w oparciu o cztery wybrane genotypy/kłony topoli tj. *Populus deltoides* (klon S-1-8 „DUNAV”), *Populus deltoides* × *Populus nigra* (klon 490-1), *Populus deltoides* × *Populus trichocarpa* (klon „DONK”) oraz *Populus maximowiczii* × *Populus trichocarpa* (klon NE-42) oraz trzy powierzchnie doświadczalne założone w połowie lat 90-tych w obrębie należącego do Instytutu Dendrologii PAN Lasu Doświadczalnego Zwierzyniec koło Kórnika (w publikacjach wchodzących w skład przedstawianego osiągnięcia opisana jako Site 1), na terenie Arboretum Instytutu Dendrologii PAN w Kórniku (Site 2) oraz w strefie ochronnej huty miedzi Głogów (KGHM Polska Miedź) w Żukowicach (Site 3). Wytypowane genotypy topoli są znanymi, dobrze rosnącymi klonami, uprawianymi w Europie i USA od wielu lat. W przeszłości m.in. testowano ich przydatność do obsadzania terenów zdegradowanych przez zakłady przemysłowe będące emiterami zanieczyszczeń powietrza. Prowadzone wówczas badania wykazały w przypadku drzew rosnących na terenie skażonym zmniejszone wartości pierśnicy (DBH) i zróżnicowaną odporność poszczególnych genotypów na zanieczyszczenie metalami ciężkimi (Rachwał i in. 1992; Rachwał – informacja ustna). Materiał roślinny wykorzystany do założenia powierzchni badawczych w latach 90-tych jak i późniejszych, wysadzanych przeze mnie, reprezentowany był przez te same genotypy topoli pochodzące z kolekcji Instytutu Dendrologii Polskiej Akademii Nauk w Kórniku.

Wszystkie powierzchnie badawcze lokowały się na gruntach porolnych, przy czym Zwierzyniec i Kórnik zlokalizowane były na obszarze względnie wolnym od zanieczyszczeń (Ryc. 1). Pierwsza z powierzchni usytuowana była na skraju lasu iglastego i sąsiedowała z powierzchnią świerkową. Stanowisko w Kórniku usytuowane było pomiędzy topolami białymi, a kolekcją modrzewi na terenie Instytutu Dendrologii PAN. Stanowisko 3 pozbawione sąsiedztwa innych zadrzewień, znajdowało się w pobliżu rzeki Odry, w części strefy ochronnej huty miedzi, która ze względu na dominację wiatrów od strony zakładu, najsilniej poddana była presji skażenia przemysłowego. Tutejsza gleba charakteryzowała się podwyższonym stężeniem miedzi, ołowiu, cynku i kadmu oraz węgla, azotu, fosforu i potasu (Karliński i in. 2010; 2013; 2020; Karliński 2021a).



Ryc. 1. Lokalizacja i schemat powierzchni badawczych oraz sposób próbkowania gleby, korzeni drobnych topoli oraz grzybni ekstramatrykalnej grzybów ektomykoryzowych.

Obecność wybranych genotypów na trzech powierzchniach doświadczalnych, powtórzony układ doświadczalny w warunkach skażenia przemysłowego i wolnych od zanieczyszczeń, dostępność jednolitego materiału roślinnego oraz dystans czasowy od chwili założenia doświadczeń w połączeniu z brakiem wcześniejszych tego typu badań stworzyły unikalne warunki do przeanalizowania wpływu genotypu drzew oraz czynników środowiskowych na mikrobiom gleby topoli.

Realizując postawione cele badawcze w ramach prezentowanego osiągnięcia obejmującego cztery prace badawcze oraz jedną pracę przeglądową scharakteryzowano następujące elementy:

- oszacowano obfitość wierzchołków korzeni drobnych wybranych genotypów topoli w górnej warstwie gleby 0-30 cm
- określono stopień kolonizacji korzeni drobnych przez grzyby ektomykoryzowe, arbuskularne oraz grzybowe endofity korzeniowe
- scharakteryzowano zbiorowiska grzybów ektomykoryzowych
- określono ogólną biomasę grzybów glebowych w glebie
- określono biomasę oraz udział grzybów arbuskularnych, grupy grzybów glebowych (uwzględniając grzyby ektomykoryzowe), bakterii Gram dodatnich i Gram ujemnych, promieniowców i pierwotniaków
- określono biomasę grzybni ekstramatrykalnej grzybów ektomykoryzowych u drzew dojrzałych i porównano z rosnącymi w ich pobliżu 6-miesięcznymi sadzonkami topoli

Wpływ genotypu drzew i środowiska na kolonizację korzeni drobnych przez grzyby mykoryzowe i grzybowe endofity korzeniowe.

(Karliński L, Rudawska M, Kieliszewska-Rokicka B, Leski T. 2010. Relationship between genotype and soil environment during colonization of poplar roots by mycorrhizal and endophytic fungi. *Mycorrhiza* 20, 315-324.)

W celu określenia czy i w jakim stopniu genotyp topoli oraz warunki glebowe wpływają na zróżnicowanie morfologiczne korzeni drobnych, pobrano z górnej warstwy gleby 0-30 cm ich próby i zeskanowano z wykorzystaniem oprogramowania WinRhizo 5.0. Analizując próby korzeniowe czterech genotypów topoli (*P. deltoides*, *P. deltoides* × *P. nigra*, *P. deltoides* × *P. trichocarpa*, *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa*) na stanowiskach w Zwierzyńcu, Kórniku i Głogowie, stwierdzono istotny wpływ warunków glebowych oraz głębokości, z której pobierano próby (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) na obfitość wierzchołków korzeni drobnych, stanowiących potencjalne miejsce zawiązywania się symbiotycznych struktur korzeni i grzybów mykoryzowych – mykoryz. Uzyskany wynik wpisuje się w ogólną tendencję wskazującą na lokalne warunki glebowe (łącznie w sobie szereg cech takich jak skład fizyko-chemiczny gleby, jej wilgotność, temperaturę, czy historię wykształcenia się gleby i wpływ późniejszego jej użytkowania przez człowieka) jako na czynnik z reguły najsilniej oddziaływający na rośliny i zbiorowiska organizmów z nimi związanych (np. Leski i in. 2019; Rudawska i in. 2019). Skażenie gleby metalami ciężkimi, zwłaszcza w przypadku miedzi i ołowiu przekraczających dopuszczalne normy (Kloke 1980; Kabata-Pendias i Pendias 1993) skutkowało niższymi parametrami biometrycznymi korzeni drobnych topoli w Głogowie. Z drugiej strony warunki stresowe uwydatniły nieobserwowaną w przypadku stanowisk wolnych od zanieczyszczeń rolę genotypu drzew, generującego odmienne „strategie korzeniowe” poszczególnych topoli w profilu glebowym. W przypadku większości genotypów topoli korzenie drobne „uciekały” w głąb gleby do warstw o mniejszym stężeniu metali ciężkich. Na tym tle wyróżniała się *P. deltoides* × *P. trichocarpa*, dla której najwięcej korzeni drobnych odnotowano w wierzchniej, najbardziej zanieczyszczonej warstwie gleby.

Analiza mikroskopowa prób korzeniowych czterech genotypów topoli, po wcześniejszym wybarwieniu korzeni roztworem trypanu blue (Kormanik i McGraw 1982; McGonigle i in. 1990) ujawniła obecność w nich struktur grzybów arbuskularnych (AM), ektomykoryzowych (ECM) oraz grzybowych endofitów korzeniowych (FE). Stwierdzono pozytywną zależność między stopniem skolonizowania korzeni drobnych przez grzyby, a biomasą grzybni w glebie, określoną na podstawie stężenia ergosterolu. Stopień kolonizacji korzeni drobnych przez wszystkie trzy grupy grzybów warunkowany był przez lokalne warunki glebowe (czynnik dominujący), przez głębokość, z której próby pobierano oraz przez genotyp drzew gospodarzy. Skażenie gleby metalami ciężkimi w Głogowie szczególnie negatywnie oddziaływało na kolonizację korzeni przez grzyby arbuskularne i w nieco mniejszym stopniu przez grzyby ektomykoryzowe. Natomiast w przypadku grzybowych endofitów korzeniowych, ich udział w kolonizacji korzeni w Głogowie był istotnie wyższy, niż na stanowiskach wolnych od zanieczyszczeń. U innych gatunków drzew i roślin zielnych podobną tendencję obserwowali Jumpponen i Trappe (1998), Routsalainen i in. (2007) i Likar (2011). Wskazywać może to na istotną funkcję pełnioną przez tę grupę grzybów w korzeniach

roślin w warunkach skażenia gleby metalami ciężkimi. Interesującym jest, że w korzeniach wymienionego wcześniej jako najbardziej tolerancyjnego na skażenie metalami ciężkimi mieszańca *P. deltoides* × *P. trichocarpa*, którego korzenie drobne koncentrowały się w większym stopniu niż u pozostałych topoli, w wierzchniej, najbardziej skażonej warstwie gleby, stwierdzono także najwyższą kolonizację korzeni drobnych przez grzybowe endofity. Może to sugerować udział tej grupy grzybów w procesach adaptacji roślin do warunków skażenia gleby metalami ciężkimi. Uzyskane wyniki sugerują także potencjalną rolę tej grupy grzybów jako organizmów o charakterze wskaźnikowym w przypadkach obecności metali ciężkich w glebach.

Dominującą grupą kolonizującą korzenie drobne topoli były grzyby arbuskularne. W przeciwieństwie do negatywnego wpływu skażenia gleby na kolonizację mykoryzową korzeni drobnych, czynnikiem jej sprzyjającym (zwłaszcza w przypadku grzybów arbuskularnych) była wilgotność gleby. Na stanowisku wolnym od zanieczyszczeń jak i na skażonym, ale o większej wilgotności gleby (Zwierzyniec i Głogów) stosunek AM/ECM przyjmował wyższe wartości (odpowiednio 9,8 i 8,6), niż na bardziej suchym w Kórniku (2,3). Wynik ten wskazuje na istotność zawartości wody w glebie jako czynnika kształtującego stopień kolonizacji oraz relacje symbiotyczne roślin wchodzących w związku z zarówno z grzybami arbuskularnymi jak i ektomykoryzowymi (np. Lodge 1989; Querejeta i in. 2009).

Wpływ genotypu na różnice w kolonizacji korzeni drobnych topoli przez grzyby arbuskularne, ektomykoryzowe i grzybowe endofity korzeniowe obserwowano na wszystkich stanowiskach badawczych i był on modyfikowany przez lokalne warunki glebowe. Efekt genotypu gospodarza często łączył się także z różnicami wynikającymi z głębokości gleby, na jakiej pobrano próby. Uzyskane wyniki potwierdzają hipotezę nisz, wg której w górnych warstwach gleby system korzeniowy kolonizowany jest w większej części przez grzyby ektomykoryzowe, a w głębszych warstwach przez grzyby arbuskularne, lepiej znoszące ograniczony dostęp tlenu oraz składników odżywczych (Neville i in. 2002). Wskazują na to także obserwowane ujemne korelacje pomiędzy grzybami arbuskularnymi i ektomykoryzowymi kolonizującymi korzenie topoli na stanowiskach wolnych od zanieczyszczeń. Natomiast w warunkach zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi wyniki wskazywały na istnienie konkurencji pomiędzy grzybami arbuskularnymi i grzybowymi endofitami korzeniowymi.

Podsumowując prezentowane badania wykazały istotny wpływ analizowanych czynników warunkujących związku symbiotyczne pomiędzy grzybami mykoryzowymi i grzybowymi edofitami korzeniowymi, a topolami. Genotyp drzew zaznaczał swój istotny wpływ na dystrybucję korzeni drobnych w glebie, zdolność do nawiązywania związków symbiotycznych z grzybami oraz tolerancję skażenia gleby metalami ciężkimi. Jakkolwiek wpływ genotypu gospodarza był znacząco modyfikowany przez warunki środowiskowe rzutujące na rozwój korzeni drobnych topoli i ich kolonizację przez grzyby. Obecność metali ciężkich w glebie istotnie rzutowała na obniżenie biomasy grzybni w glebie i w różnym stopniu warunkowała udział poszczególnych grup grzybów w kolonizacji korzeni drobnych topoli.

Wpływ genotypu i warunków glebowych na zbiorowiska grzybów ektomykoryzowych topoli

(Karliński L, Rudawska M, Leski T. 2013. The influence of host genotype and soil conditions on ectomycorrhizal community of poplar clones. European Journal of Soil Biology 58, 51-58.)

W celu określenia, czy i w jakim stopniu genotyp gospodarza oraz warunki glebowe wpływają na skład i strukturę zbiorowisk grzybów ektomykoryzowych, analizie poddano ektomykoryzy grzybów mykoryzowych obecne na/w korzeniach drobnych czterech genotypów topoli (*P. deltoides*, *P. deltoides* × *P. nigra*, *P. deltoides* × *P. trichocarpa*, *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa*) w górnej warstwie gleby 0-10 cm, 10-20 cm i 20-30 cm na trzech powierzchniach doświadczalnych w Zwierzyńcu, Kórniku i Głogowie.

Łącznie na podstawie analiz cech morfologicznych mykoryz oraz identyfikacji metodami molekularnymi (sekwencjonowanie regionu ITS rDNA z wykorzystaniem primerów ITS1F i ITS4) wyróżniono 27 taksonów grzybów ektomykoryzowych. Analiza wariancji współczynników ekologicznych opisujących zbiorowiska ektomykoryz topoli wskazała na stanowisko jako czynnik istotnie oddziałujący na bogactwo gatunkowe, zróżnicowanie (współczynnik Shannona) oraz równocенność (evenness) gatunków grzybów w tychże zbiorowiskach. Największe bogactwo i zróżnicowanie gatunkowe zbiorowisk ektomykoryz stwierdzono w Zwierzyńcu, będącym w odniesieniu do pozostałych stanowisk także największym kompleksem leśnym, a więc także potencjalnym dostarczycielem inokulum grzybowego dla położonego na jego skraju doświadczenia topolowego. Natomiast w warunkach skażonego metalami ciężkimi stanowiska w Głogowie, współczynniki ekologiczne tutejszych zbiorowisk grzybów prezentowały wartości najniższe.

Na wszystkich powierzchniach badawczych wraz ze wzrostem głębokości gleby odnotowano spadek bogactwa i bioróżnorodności zbiorowisk mykoryzowych. Również równocенność gatunków grzybowych malała w głębszych warstwach gleby, charakteryzujących się mniejszą dostępnością tlenu i związków odżywczych.

Całościowe porównanie uzyskanych danych nie wykazało istotnego wpływu genotypu drzew na bogactwo i strukturę zbiorowisk ektomykoryzowych na korzeniach topoli. Tego typu istotne różnice obserwowano w przypadku szybko i wolno rosnących świerków pospolitych (Korkama i in. 2006). W naszych doświadczeniach wszystkie genotypy topoli należały do drzew szybko rosnących. Odnotowane dla *P. deltoides* wyższe parametry wzrostowe (pierśnica i wysokość drzew) nie przekładały się na obserwowalne w stosunku do pozostałych genotypów różnice w bogactwie i strukturze zbiorowisk ektomykoryzowych. Jednak w przypadku indywidualnej oceny poszczególnych stanowisk, analiza podobieństwa (ANOSIM) w Głogowie wykazała istotne różnice pomiędzy zbiorowiskami związanymi z korzeniami *P. deltoides* × *P. trichocarpa* oraz *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa*. Pierwszy z genotypów topoli jak wykazały wcześniejsze badania (Karliński i in. 2010) wyróżniał się spośród pozostałych tolerancją skażenia gleby metalami ciężkimi (najwyższe bogactwo korzeni drobnych w najbardziej skażonej, wierzchniej warstwie gleby). Natomiast drugi z nich wskazywany był jako bardziej wrażliwy na skażenie (Rachwał i in. 1992) i cechujący się najniższą kolonizacją korzeni drobnych przez grzyby ektomykoryzowe (Karliński i in. 2010).

Stwierdzona liczba 27 taksonów grzybów (odpowiednio 24 w Zwierzyńcu, 22 w Kórniku, 18 w Głogowie) lokowała się pomiędzy wynikami uzyskanymi dla *Populus tremula* (52) z terenów skażonych metalami ciężkimi (Krpata i in. 2008) a rezultatami obserwacji innych przedstawicieli Salicaceae (11-14) (Hrynkiewicz i in. 2008; Regvar i in. 2010). Czynnikiem negatywnie wpływającym na stwierdzoną liczbę gatunków na trzech stanowiskach badawczych mógł być fakt lokacji doświadczeń polowych na powierzchniach porolnych, gdzie mimo upływu czasu nawożenie monokultur nawozami azotowymi mogło ograniczyć bioróżnorodność grzybów (np. Merryweather 2001). W przypadku Głogowa obok negatywnego oddziaływania skażenia metalami ciężkimi, limitująco na zbiorowiska ektomykoryzowe wpływać mogło znacznie wyższe niż na pozostałych stanowiskach stężenie fosforu w glebie – pochodnej okresowych wylewów przepływającej w pobliżu rzeki Odry. Negatywny wpływ na liczbę wierzchołków mykoryzowych w podmokłych olszynach wykazywał np. Baar i in. 2002. Większość, bo 88,8-98,2% wierzchołków korzeniowych skolonizowanych było przez grzyby podstawkowe (Basidiomycota), a jedynie niewielki procent przez workowce (Ascomycota). Udział tych ostatnich wzrastał do 10,6% na stanowisku w Głogowie, wskazując na większą tolerancję Ascomycota skażenia gleby metalami ciężkimi. Podobną tendencję wskazywał Regvar i in. (2010) dla *Salix caprea* na glebach zanieczyszczonych ołowiem. Większość zidentyfikowanych grzybów należała do gatunków spotykanych również u innych przedstawicieli Salicaceae (np. Cripps 2004; Hrynkiewicz i in. 2008; Regvar i in. 2010; Bahram i in. 2011).

Skład chemiczny gleb warunkował również udział pojedynczych gatunków grzybów ektomykoryzowych. Przykładem może tu być zasłonak włóknistożółty - *Cortinarius saniosus*, którego mykoryzy najliczniej występowały w Głogowie, gdzie gleba obok skażenia metalami ciężkimi charakteryzowała się niską zawartością N-NO₃ i N-NH₄. Pod względem „typów eksploracyjnych” ektomykoryz, zaproponowanych przez Agerera (2001), *C. saniosus* reprezentuje typ średniego dystansu i wykazuje niską tolerancję wyższych stężeń azotu w glebie (Hobbie i Agarar 2010; Lilleskov i in. 2011). Podobnie w przypadku sosny zwyczajnej rosnącej w okolicach Głogowa, zaobserwowano dużą obfitość mykoryz typu średniego dystansu, tutaj reprezentowanych przez takson Atheliaceae (Rudawska et al. 2011). Tymczasem na stanowiskach wolnych od zanieczyszczeń w Zwierzyńcu i Kórniku, i cechujących się wyższym poziomem N-NO₃ i N-NH₄ w glebie, mykoryzy *C. saniosus* były nieliczne. Natomiast powszechnie występowały tutaj mykoryzy gatunków należących do Tomentella, reprezentujących typ eksploracyjny bliskiego kontaktu i znanych ze swojej nitrofilności (Lilleskov et al. 2011; Hobbie i Agarar 2010). Podobieństwo dwóch bardzo różnych gatunków drzew (topole i sosna) pod względem obfitości występowania mykoryz tego samego typu eksploracyjnego na podobnych stanowiskach, podkreśla rolę składu chemicznego gleb i depozycji w niej azotu w kształtowaniu zbiorowisk symbiontów grzybowych (Lilleskov et al. 2011; Hobbie i Agarar 2010; Rudawska i in. 2011).

Podsumowując, wyniki niniejszych badań wskazują na dominującą rolę warunków glebowych w kształtowaniu struktury i składu gatunkowego zbiorowisk grzybów ektomykoryzowych związanych z korzeniami topoli. Genotyp drzew odgrywał mniejszą rolę związaną z adaptacją do warunków stresowych.

Rola genotypu drzew i środowiska glebowego w kształtowaniu biomasy i zbiorowisk mikroorganizmów ryzosfery topoli

(Karliński L, Ravnskov S, Rudawska M. 2020. Soil microbial biomass and community composition relates to poplar genotypes and environmental conditions. *Forests* 11, #262)

W celu określenia wpływu genotypu drzew oraz czynników środowiskowych na biomasę i strukturę zbiorowisk mikroorganizmów w ryzosferze topoli pobrano próbki glebowo-korzeniowe z górnej warstwy gleby 0-10 cm, 10-20 cm i 20-30 cm czterech genotypów topoli (*P. deltoides*, *P. deltoides* × *P. nigra*, *P. deltoides* × *P. trichocarpa*, *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa*) rosnących na trzech powierzchniach doświadczalnych w Zwierzyńcu, Kórniku i Głogowie. Na podstawie zawartości w próbach estrów specyficznych kwasów tłuszczowych (frakcja całkowitych komórkowych kwasów tłuszczowych – WCFA – whole cell fatty acids) i wykorzystaniu technik chromatografii gazowej (Karliński i in. 2007) określono biomasę i udział w zbiorowiskach bakterii Gram dodatnich, Gram ujemnych, promieniowców, pierwotniaków, grzybów arbuskularnych i grupy grzybów glebowych, obejmujących w swym składzie zarówno grzyby ektomykoryzowe (brak specyficznych markerów dla tej grupy grzybów) oraz inne grzyby saprotroficzne i pasożytnicze. Na podstawie bazy danych TSBA41 (Parsley 1996) zidentyfikowano łącznie 81 kwasów tłuszczowych. Analiza wariancji wskazała na stanowisko jako główny czynnik warunkujący biomasę bakterii Gram-dodatnich, Gram-ujemnych, grzybów arbuskularnych, grupy grzybów glebowych oraz pierwotniaków. W przypadku większości grup mikroorganizmów najwyższe wartości ich biomasy, podobnie jak we wcześniejszych badaniach stopnia kolonizacji mykoryzowej i zbiorowisk grzybów ektomykoryzowych (Karliński i in. 2010; 2013) odnotowano w Zwierzyńcu, natomiast najniższe w Głogowie. Skażenie metalami ciężkimi szczególnie negatywnie oddziaływało na pierwotniaki, co sugeruje potencjalną rolę wskaźnikową tej grupy organizmów w przypadku obecności metali ciężkich w glebie. Drugą grupą wrażliwą na zanieczyszczenie gleb w Głogowie były grzyby arbuskularne, które w porównaniu do grzybów ektomykoryzowych, z reguły cechują się wyższą tolerancją czynników stresowych pochodzenia naturalnego takich jak susza, wysoka temperatura, pożar lasu, okresowe zalanie i ograniczony dostęp tlenu oraz związków odżywczych (Karliński 2021b i tam cytowana literatura). Niższe stężenie specyficznego dla grzybów arbuskularnych kwasu 16:1 ω 5c w próbach z Głogowa pozytywnie korelował z wcześniej obserwowaną niższą kolonizacją korzeni drobnych topoli przez tę grupę grzybów w Głogowie (Karliński i in. 2010) jak również z wynikami obserwacji stopnia skolonizowania korzeni sadzonek topoli rosnących w warunkach doświadczeń doniczkowych w glebie z trzech analizowanych miejsc (Karliński – dane niepublikowane). Negatywny wpływ metali ciężkich generalnie wyraźniej zaznaczał się w przypadku grzybów (zarówno arbuskularnych jak i pozostałych), niż bakterii. Wynik ten jest zbieżny z wykazywanym przez Pennanen i in. (1996) spadkiem stężenia frakcji fosfolipidowej kwasów tłuszczowych (PLFA), specyficznych dla grzybów w sąsiedztwie hut miedzi oraz cynku oraz z rezultatami badań prowadzonych w warunkach laboratoryjnych (Rajapaksha i in. 2004). Bakterie Gram ujemne stanowiły największą frakcję mikroorganizmów glebowych na wszystkich trzech stanowiskach, co sugeruje ich dużą tolerancję na skażenie gleb. Często wskazuje się właśnie na bakterie Gram ujemne jako na grupę dominującą w glebach

skażonych metalami ciężkimi, a bakterie Gram dodatnie traktowane są jako bardziej wrażliwe (O'Leary i in. 1988; Frostegård i in. 1993). Jednak nie brakuje także wyników przeciwnych, świadczących o wyższej tolerancji metali ciężkich w środowisku przez bakterie Gram dodatnie (Gupta i in. 2012). W przypadku opisywanych tutaj wyników również odnotowano wyższy udział proporcjonalny bakterii Gram dodatnich (oraz należących do nich promieniowców) w zbiorowiskach mikroorganizmów glebowych w Głogowie. Jakkolwiek ze względu na zróżnicowanie bakterii wchodzących w skład jednej i drugiej grupy, należy zachować pewną ostrożność w generalizacji uzyskanych wyników.

Innymi czynnikami istotnie wpływającymi na zróżnicowanie zbiorowisk mikroorganizmów glebowych badanych stanowisk były temperatura gleby (wyższa w Głogowie) i odczyn pH gleby (niższy w Głogowie). Wyższa temperatura pozytywnie wpływa na rozwój bakterii Gram dodatnich (Buyer i in. 2010), co mogło sprzyjać większemu udziałowi tej grupy mikroorganizmów w Głogowie. Natomiast wyższe pH gleby (Zwierzyńiec i Kórnik) zwiększa dostępność materii organicznej i stymuluje wzrost biomasy bakterii Gram ujemnych (Frostegård i Bååth 1996; Pennanen i in. 2001).

Oddziaływanie warunków środowiskowych rzutowało nie tylko na biomasę mikroorganizmów, ale w pewnym stopniu także na udział ich poszczególnych grup w zbiorowiskach np. stosunek grzybów do bakterii (F:B), korelujący pozytywnie z wartością C/N gleb (Ananyeva i in. 2006). Stosunek F:B wolnych od zanieczyszczeń stanowisk w Zwierzyńcu i Kórniku, wahał się w zakresie od 0,4 do 0,3 i odzwierciedlał dobrze także rolniczą przeszłość tych powierzchni (Bailey i in. 2002).

Obok warunków środowiskowych także genotyp drzew był czynnikiem istotnie rzutującym na zbiorowiska mikroorganizmów ryzosfery topoli, zarówno w porównaniu ogólnym jak i w obrębie pojedynczych stanowisk. Wielkość efektu oddziaływania genotypu drzewa na mikroorganizmy była zróżnicowana na poszczególnych stanowiskach. Najsilniej zaznaczał się w przypadku grzybów arbuskularnych, zwłaszcza w Głogowie, co stanowi odzwierciedlenie z jednej strony zróżnicowanej reakcji drzew na warunki stresowe, a z drugiej bliską współzależność obu symbiontów – topoli i grzybów arbuskularnych. Dobrym wskaźnikiem zróżnicowanego oddziaływania genotypu drzew na mikrobiom okazał się również wspomniany już stosunek F:B, którego funkcję indykacyjną wcześniej wiązano głównie z oddziaływaniem środowiska – wilgotnością gleby, sposobem jej użytkowania, czy zanieczyszczeniem (Bailey i in. 2002; Zhang i in. 2016). Wśród badanych genotypów topoli wyższymi wartościami F:B od pozostałych wyróżniał się *P. deltoides*. Wiązać się to może ze zdolnością roślin do pewnej strukturyzacji zbiorowisk mikroorganizmów glebowych (Schweitzer i in. 2008). Wyższe wartości F:B mogą sugerować, że w porównaniu z innymi badanymi topolami, *P. deltoides* wykazuje większą zdolność do nawiązywania relacji symbiotycznych z grzybami, zwłaszcza w warunkach stresogennych, co potwierdza również wyższa liczba gatunków grzybów ektomykoryzowych występujących na korzeniach tego genotypu w Głogowie (Karliński i in. 2013). Wzajemne oddziaływanie rośliny i grzybów może pozytywnie rzutować na stwierdzone wyższe parametry wzrostowe (wysokość i pierśnica drzew) *P. deltoides* w porównaniu z pozostałymi topolami (Karliński i in. 2013). Z drugiej strony większe rozmiary części nadziemnej - aparatu fotosyntetycznego drzewa mogą skutkować wyższą produkcją związków węgla, kierowanych poprzez korzenie do gleby i tworzeniem w ten sposób atrakcyjnej oferty dla szerszej grupy grzybów glebowych jako ich

konsumentów. Grzyby są znane jako grupa organizmów, bardziej efektywnie wykorzystująca substraty organiczne w produkcji biomasy niż bakterie (Holland i in. 1987; Joergensen i in. 2008). Z odnotowaną dla *P. deltooides* wyższą biomasą grzybów w ryzosferze dobrze koresponduje również stwierdzona dla tego genotypu wyższa od pozostałych topól produkcja biomasy grzybni zewnętrznej w glebie (**Karliński 2021a**).

Także stosunek biomasy grzybów arbuskularnych do biomasy grupy grzybów glebowych (AM:SF) zawierających w swym składzie grzyby ektomykoryzowe, saprotroficzne i patogeniczne, warunkowany był istotnie przez genotyp drzewa. Rola obu grup grzybów (AM vs. SF) w obiegu składników pokarmowych w glebie, z uwzględnieniem różnych głębokości i charakteru ich interakcji z korzeniami drzew nie są równoważne (Holste i in. 2017). Stosunek biomasy AM:SF wykazywał więc bardziej lokalny charakter zmienności między genotypami, utrudniającą wskazanie stałego trendu dla któregośkolwiek z nich na wszystkich powierzchniach badawczych. Uzyskane wartości jednak w sposób pozytywny korelowały z wynikami kolonizacji korzeni topoli przez grzyby arbuskularne i ektomykoryzowe (**Karliński i in. 2010**), co sugeruje także mimo braku specyficznego markera dla grzybów ektomykoryzowych o dominującym ich udziale w grupie grzybów glebowych.

Przykładem braku wpływu genotypu okazał się stosunek bakterii Gram dodatnich do bakterii Gram ujemnych, kształtowany przede wszystkim przez stanowisko i głębokość gleby.

Spadek wartości biomasy mikroorganizmów wraz ze wzrostem głębokości profilu glebowego jest wspólną cechą, obserwowaną dla różnych rodzajów gleb i różnych zbiorowisk roślinnych (Fierer i in. 2003; Ostonen i in. 2005). Jednak jak wykazały nasze badania trendy zmian udziału różnych grup organizmów w zbiorowiskach mogą się różnić i być warunkowanymi zarówno przez czynniki środowiskowe jak i genotyp rośliny. Na przykład udział bakterii Gram dodatnich w większości przypadków (poza *P. deltooides* w Głogowie) wzrastał wraz ze wzrostem głębokości. Ich większy udział w zbiorowiskach w głębszych warstwach gleby może wynikać z większej tolerancji bakterii Gram dodatnich na ograniczoną dostępność węgla i tlenu (Song i in. 2008; Hobley i Wilson 2016). Natomiast większa dostępność węgla w wierzchnich warstwach gleby sprzyjała bakteriom Gram-ujemnym oraz grzybom (Fierer i in. 2003). Tendencje te ulegały zaburzeniu w przypadku powierzchni doświadczalnej w Głogowie, gdzie skażenie metalami ciężkimi gleby sprzyjało wzrostowi udziału biomasy grzybów i niższej biomasy bakterii w najgłębszej warstwie gleby, charakteryzującej się najniższym stopniem skażenia. Wzrost udziału grzybów arbuskularnych w zbiorowiskach mikroorganizmów ryzosfery topoli w głębszych warstwach gleby (zwłaszcza w Kórniku i Głogowie) odzwierciedlał wyniki wcześniejszych badań stopnia kolonizacji korzeni topoli przez tę grupę grzybów (**Karliński i in. 2010**). W przeciwieństwie do grzybów arbuskularnych obecność pierwotniaków była silnie związana z wierzchnimi warstwami gleby i zdecydowanie malała wraz ze wzrostem jej głębokości. Związane jest to z dostępnością związków węgla i ogólnie wyższą biomasą mikroorganizmów glebowych, stanowiących źródło pokarmu dla stojących wyżej od nich w drabinie troficznej pierwotniaków (Henkes i in. 2018). Wzrost głębokość gleby był głównym czynnikiem warunkującym negatywnie także biomasę promieniowców na poszczególnych stanowiskach, co stoi w sprzeczności z obserwacjami Fritze i in. (2000) i Fierer i in. (2003). W przypadku naszych badań spadek biomasy wraz ze wzrostem głębokości w większym stopniu może być

wynikiem dostępności związków azotu (N-NO₃ i N-NH₄), niż pH gleby jak sugeruje Fritze i in. (2000).

Podsumowując przedstawione badania wykazały istotny wpływ zarówno warunków glebowych (czynnik dominujący), głębokości gleby, genotypu drzewa - gospodarza oraz interakcji tych faktorów na biomasę i strukturę zbiorowisk mikroorganizmów ryzosfery topoli. Oddziaływanie genotypu roślin na mikrobiom glebowy szczególnie wyraźnie obserwowany był w Głogowie, jak się wydaje głównie z uwagi na znaczącą presję skażenia gleby metalami ciężkimi. Genotyp topoli determinował także udział grup mikroorganizmów w zbiorowiskach, co uwidaczniało się na przykładzie stosunku biomasy grzybów i bakterii na poszczególnych stanowiskach i ich dystrybucji w profilu glebowym. Grzyby w większym stopniu podlegały oddziaływaniu genotypu roślin, podczas gdy bakterie warunkowane były przede wszystkim przez lokalne warunki glebowe. Także stosunek biomasy grzybów arbuskularnych do pozostałych grzybów glebowych był istotnie kształtowany przez genotyp topoli, pomimo różnych relacji tych grup z drzewami. Natomiast zróżnicowanie zbiorowisk mikroorganizmów glebowych w profilu głębokościowym gleby warunkowane było zarówno przez genotyp topoli jak i lokalne warunki środowiskowe.

Generalnie udział poszczególnych grup organizmów w mikrobiomie ryzosfery topoli charakteryzował się względnie stabilnym składem na trzech badanych stanowiskach i podkreślał znaczącą zdolność adaptacyjną topoli do zróżnicowanych warunków środowiskowych.

Wpływ genotypu drzew, ich wieku i środowiska glebowego na biomasę grzybni zewnętrznej grzybów ektomykoryzowych.

(Karliński L. 2021. Biomass of external mycelium of mycorrhizal fungi associated with poplars – the impact of tree genotype, tree age and soil environment. Applied Soil Ecology 160, #103847.)

Celem ogólnym badań było oszacowanie biomasy grzybni zewnętrznej (ekstramatrykalnej) grzybów ektomykoryzowych związanych z topolami w różnych warunkach środowiskowych. Danych literaturowych w tym względzie jest bardzo niewiele, a większość z nich dotyczy gatunków iglastych z terenu Skandynawii. Cel szczegółowy pracy stanowiło określenie wpływu genotypu topoli na biomasę grzybni zewnętrznej w glebie. Kolejnym celem było oszacowanie w jakim stopniu wiek drzew oraz warunki środowiskowe warunkują produkcję biomasy tych szybko rosnących drzew.

Prace badawcze realizowano wykorzystując trzy opisane wcześniej doświadczenia terenowe w Zwierzyńcu, Kórniku i Głogowie oraz te same cztery genotypy topoli – *P. deltoides*, *P. deltoides* × *P. nigra*, *P. deltoides* × *P. trichocarpa*, *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa*). W pobliżu drzew dojrzałych założono także doświadczenia z sadzonkami topoli, wyhodowanymi ze zrzesów pochodzących z tych samych czterech genotypów topoli, znajdujących się w kolekcji Instytutu Dendrologii PAN. Sadzonki ukorzeniane w doniczkach zawierających glebę z trzech stanowisk, po miesiącu wysadzono w sąsiedztwie dojrzałych drzew w układzie trzech bloków zawierających poletka (4 rośliny) czterech genotypów topoli (Ryc. 1.). Próbkę grzybni zewnętrznej grzybów ektomykoryzowych pozyskano stosując

metodę woreczków nylonowych (tzw. mesh bags) wypełnionych piaskiem kwarcowym, do których grzybnia wnikała w trakcie trwania doświadczenia (Wallander i in. 2001). Pułapki umieszczono w obrębie poletek czterech genotypów drzew dojrzałych oraz sadzonek na głębokości 10 cm na okres pięciu miesięcy. Okres ten jako optymalny przyjęto na podstawie dość nielicznych danych literaturowych oraz doświadczeń własnych (Karliński i in. 2015). Biomasa grzybni zewnętrznej oszacowano na podstawie stężenia specyficznego dla grzybów ergosterolu, oznaczanego z wykorzystaniem technik wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC) oraz uwzględniając przeliczniki biomasy zaproponowane przez Montgomery i in. (2000).

Analiza prób wykazała obecność grzybni zewnętrznej w woreczkach. Porównanie z kontrolą (woreczki umieszczone w rurach odcinających dostęp korzeni) pozwoliło stwierdzić, że jedynie niewielka część biomasy grzybni wykrywanej w woreczkach może być pochodną grzybów saprotroficznych. Górne wartości biomasy grzybni zewnętrznej dojrzałych drzew i sadzonek topoli były zbliżone i wyższe od tych odnotowanych dla lasów mieszanych brzoźowo-sosnowych z terenu Finlandii (Kalliokoski i in. 2010) i znacznie wyższe niż w przypadku buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.), dębu bezszypułkowego (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) i sosny nadmorskiej (*Pinus pinaster* Aiton.) rosnących we Francji. Tu jednak okres inkubacji woreczków w glebie wynosił jedynie trzy miesiące (Bakker i in. 2015). Wyniki odnotowane dla czterech genotypów topoli lokują się w zakresie wartości biomasy, odpowiadających skandynawskim drzewostanom iglastym (Ekblad i in. 2013). Jednak póki co ze względu na ubogość danych, czy rozbieżności metodologiczne trudno wskazać jakiegokolwiek ogólniejsze trendy biogeograficzne, czy odnoszące się do genotypu drzew.

Uzyskany w tych badaniach obraz wpisuje się w serię wcześniejszych wyników, wskazując na istotną rolę zarówno genotypu drzew – gospodarzy oraz środowiska, a w tej pracy także wieku drzew na biomasa i strukturę im towarzyszących zbiorowisk mikroorganizmów glebowych (Karliński i in. 2010; 2013; 2020).

Rola genotypu drzewa w kształtowaniu biomasy grzybni zewnętrznej zdecydowanie silniej zaznaczała się u młodych sadzonek, niż u drzew dojrzałych. Jest to zgodne z obserwowaną dla wielu cech roślin tendencją stopniowego zacierania się wraz z wiekiem szeregu różnic, co wiązać się może z procesem adaptacji drzew do lokalnych warunków (Grams i Anderssen 2007; Gratani 2014). Efekt genotypu podkreśla bliską relację pomiędzy drzewami i grzybami, co obserwowano również wcześniej analizując udział grzybów w zbiorowiskach mikrobiomu ryzosfery (Karliński i in. 2020). *P. deltooides* wykazujący istotnie wyższą w odniesieniu do pozostałych genotypów biomasa grzybów glebowych w ryzosferze (Karliński i in. 2020), również tutaj cechował się wyższą produkcją biomasy grzybni zewnętrznej. Prawie 30% węgla powstającego w liściach w wyniku procesu fotosyntezy może być transferowane do grzybowych symbiontów w glebie (Nehls i in. 2010; Smith i Read 2008). Większa produkcja cukrów związana z większymi rozmiarami części nadziemnej *P. deltooides*, a więc i aparatu fotosyntetycznego może stymulować wyższą produkcję grzybni zewnętrznej (Wright i in. 2000; Szuba i in. 2019; Karliński i in. 2020) bezpośrednio lub poprzez zmiany w strukturze gatunkowej grzybów mykoryzowych (Hoeksema i Classen 2012; Ekblad i in. 2013; Lamit i in. 2016).

Podobnie jak we wcześniejszych naszych pracach również tutaj najwyższe wartości biomasy grzybni zewnętrznej odnotowywano w Zwierzyńcu, a najniższe w Głogowie. Brak istotności

różnic w przypadku dojrzałych drzew wynikać może z wcześniej wspomnianego procesu ich adaptacji do lokalnych warunków środowiskowych jak i z sukcesywnego ograniczania emisji metali ciężkich do gleby przez hutę miedzi w Głogowie. W przypadku młodych topoli czynnikiem wyraźniej zaznaczającym się niż skażenie metalami ciężkimi był deficyt wody, co może świadczyć o istotności tego czynnika jako kluczowego w tworzeniu się grzybni zewnętrznej.

Całościowe porównanie drzew dojrzałych i sadzonek wykazało istotny wpływ wieku roślin na produkcję biomasy grzybni zewnętrznej grzybów ektomykoryzowych. Jakkolwiek w większości przypadków obserwowane różnice były stosunkowo niewielkie. Względnie wysoka biomasa grzybni zewnętrznej sześciomiesięcznych sadzonek topoli różniła się od obrazu odnotowanego przez Wallandera i in. (2010) dla skandynawskiego świerka pospolitego (*Picea abies* (L.) Karst). Autorzy ci obserwowali wyraźny wzrost produkcji biomasy grzybni zewnętrznej w drzewostanach do 10-20 lat i powolny jej spadek w starszych klasach wieku świerka. Różnice między topolami wykazującymi niewielkie zróżnicowanie biomasy grzybni zewnętrznej u drzew dojrzałych i sadzonek, a wyraźnymi różnicami u świerka pospolitego wynikać mogą z odmiennych strategii odżywiania mineralnego w okresie wegetacji (Kalliokoski i in. 2010). Ustanowienie sieci grzybni zewnętrznej w przypadku młodych roślin jest procesem znacznie bardziej energochłonnym, niż w dojrzałych drzewostanach (Wallander i in. 2010). Topole przynależące do wierzbawatych są drzewami pionierskimi, nawiązującymi związki symbiotyczne nie tylko z grzybami ektomykoryzowymi, ale także zwłaszcza we wczesnym wieku z grzybami arbuskularnymi, które są pod tym względem mniej wymagające (Smith i Read 2008). Stąd zależność od węgla we wczesnych etapach wzrostu może być niższa, niż u drzew iglastych. Relatywnie wysoką produkcję biomasy grzybni zewnętrznej można tłumaczyć strategią inwestycji związków odżywczych przede wszystkim w rozwój sieci grzybni i eksplorację środowiska. W przypadku drzewostanów dojrzałych, gdzie sieć grzybni jest już dobrze rozwinięta można więcej energii przeznaczyć na rozwój owocników kosztem produkcji grzybni zewnętrznej (Ekblad i in. 2016). Zarówno węgiel jak i azot są istotnymi czynnikami warunkującymi produkcję grzybni zewnętrznej w glebie i zbiorowisk grzybów (Cairney 2012; Hagenbo i in. 2018). Obserwowane przeze mnie u młodych sadzonek dodatnie korelacje biomasy grzybni zewnętrznej z zawartością węgla i azotu w glebie, podkreślają znaczenie dostępności tych składników pokarmowych dla formowania biomasy grzybni zewnętrznej we wczesnym okresie rozwoju drzew. Natomiast u dojrzałych topoli zależność taka nie została odnotowana. Stwierdziłem również ujemną korelację między biomasa grzybni zewnętrznej tworzącą się pod młodymi sadzonkami topoli a stężeniem N-NH₃ w glebie. Podobną, negatywną zależność zaobserwowali Nilsson i Wallander (2003) w drzewostanach świerkowych nawożonych siarczanem amonu, co prowadziło do zmniejszenia udziału grzybów w mikrobiomie glebowym i sprzyjało rozwojowi bakterii utleniających azot (Tatsumi i in. 2020). W przypadku stanowisk przeze mnie badanych ich rolnicza przeszłość oraz specyfika gleb, uwzględniając również skażenie metalami ciężkimi w Głogowie, mogły więc mieć wpływ na przemianę azotu i obniżoną produkcję biomasy grzybni zewnętrznej.

Podsumowując uzyskane wyniki wykazały porównywalne wartości biomasy grzybni zewnętrznej dla dojrzałych drzew jak i sześciomiesięcznych sadzonek. Biomasa grzybni

zewnętrznej istotnie warunkowana była przez genotyp topoli. Czynniki środowiskowe silniej oddziaływały w przypadku młodych sadzonek, niż dojrzałych drzew dla których istotnych różnic nie stwierdzono. Wilgotność gleby oraz zawartość węgla i azotu w glebie były czynnikami sprzyjającym rozwojowi grzybni. Wilgotność gleby również w większym stopniu warunkowała biomasa grzybni zewnętrznej niż skażenie metalami ciężkimi. Istotnym czynnikiem sprzyjającym produkcji grzybni zewnętrznej u topól we wczesnym okresie ich rozwoju była zawartość węgla i azotu w glebie.

Arbuskularna symbioza mykoryzowa drzew. Struktura, funkcja i czynniki regulujące. (Karliński L. 2021. The arbuscular mycorrhizal symbiosis of trees: Structure, function and regulating factors. W: Shrivastava N., Mahajan S., Varma A. (red.) Symbiotic Soil Microorganisms. Biology and Applications. Springer. 117-128.)

Celem pracy przeglądowej było przedstawienie najważniejszych faktów dotyczących grzybów arbuskularnych i współtworzonej przez nie z roślinami drzewiastymi symbiozy mykoryzowej. Mykoryza arbuskularna będąc najstarszym ewolucyjnie i najpowszechniej występującym typem symbiozy grzybów i roślin (ponad 200 tys. gatunków roślin) (Lee i in. 2013) obok swych istotnych naturalnych funkcji, odgrywa także bardzo ważną rolę w gospodarce człowieka nawiązując związki symbiotyczne z większością roślin uprawnych oraz drzew owocowych. Obecna jest również w korzeniach szeregu drzew ozdobnych, czy wykorzystywanych do celów przemysłowych. Występowaniu grzybów należących do Glomeromycota i tworzących mykoryzę arbuskularną sprzyjają zasobne, żyzne gleby, zaś czynnikiem limitującym jest fosfor. Strefa tropikalna jest obszarem, najpowszechniejszego występowania grzybów arbuskularnych oraz ich największego zróżnicowania gatunkowego, jednocześnie charakteryzującego się także wysoką niejednorodnością i zależnością od genotypu występujących tam roślin (Chen i i. 2018; Soudzilovskaia i in. 2019; Tedersoo i Bahram 2019). Dzięki szerokiej tolerancji często bardzo skrajnych warunków środowiskowych grzyby arbuskulane są także obecne na jałowych, półpustynnych jak i podmokłych terenach. Mimo powszechności występowania arbuskularnej symbiozy mykoryzowej, wiedza dotycząca tej grupy grzybów i ich zbiorowisk jest wciąż pełna luk i znaków zapytania. W przedstawianej pracy na podstawie obecnego stanu wiedzy oraz doświadczeń własnych w kolejnych podrozdziałach pokrótce omówiłem główne typy symbiozy mykoryzowej (mykoryza arbuskularna, ektomykoryzowa, erikoidalna oraz roślin storczykowych oraz monotropoidalna i arbutoidalna) oraz ich historię ewolucyjną. Przedstawiłem podział taksonomiczny gromady Glomeromycota oraz wyróżnianych tutaj czterech rzędów Archeosporales, Diversiporales, Glomerales i Paraglomerales (za: Błaszowski 2012) oraz charakteryzowałem specyficzne struktury tworzone przez grzyby arbuskularne oraz typy kolonizacji korzeni roślin. W dalszej części pracy omówiłem występowanie grzybów arbuskularnych w skali globu oraz wskazałem na gatunki drzew i krzewów nawiązujących związki symbiotyczne z grzybami arbuskularnymi oraz podwójnie mykoryzowych (symbioza z grzybami arbuskularnymi i ektomykoryzowymi). Następnie w oparciu o dane literaturowe jak i własne badania topolowe (uwzględniając prace tutaj charakteryzowane, wchodzące w skład osiągnięcia) omówiłem główne czynniki

środowiskowe kształtujące związki mykoryzowe grzybów arbuskularnych i drzew oraz różnice jakie wykazują grzyby arbuskularne i ektomykoryzowe.

Podsumowanie

Uzyskane w ramach przedstawianego osiągnięcia wyniki wskazują na warunki glebowe jako główny czynnik kształtujący na wielu poziomach relację drzewo – mikrobiom glebowy. Efekt środowiska glebowego rzutował zarówno na biomasę mikroorganizmów, stopień kolonizacji korzeni jak i bogactwo gatunkowe grzybów mykoryzowych i jego zróżnicowanie, a także na rozkład poszczególnych grup mikrobioty w profilu glebowym.

Funkcja genotypu zaznaczała się zwłaszcza w przypadku udziału poszczególnych grup mikroorganizmów w zbiorowiskach, szczególnie uwydatniając się w skrajnych warunkach środowiskowych (skażenie gleby metalami ciężkimi).

Analizowane grupy mikroorganizmów różniły się podatnością na oddziaływujące czynniki. Grzyby mykoryzowe, związane z gospodarzem roślinnym silniej warunkowane były przez jego genotyp. W przypadku bakterii takich zależności nie stwierdzono i czynnikiem kształtującym ich zbiorowiska były przede wszystkim lokalne warunki glebowe.

Różnice w podatności na oddziaływające czynniki zaznaczały się również w obrębie samych grzybów. Grzyby arbuskularne ogólnie charakteryzujące się w odniesieniu do grzybów ektomykoryzowych wyższą tolerancją na niekorzystne warunki środowiskowe, wykazywały tutaj szczególną podatność na niekorzystny wpływ skażenia gleby metalami ciężkimi. W przeciwieństwie do grzybów arbuskularnych grzybowe endofity korzeniowe wykazywały wysoką tolerancję na obecność metali w glebie, a ich udział w kolonizacji korzeni topoli wzrastał wraz ze wzrostem skażenia gleby.

Wykazane różnice pomiędzy genotypami drzew manifestowały się zarówno na poziomie ich mikrobiomu jak i samych korzeni drobnych, których rozkład ilościowy w profilu glebowym różnił się w warunkach skażenia środowiska.

Czynnikiem sprzyjającym uwidocznieniu się roli genotypu roślinnego w kształtowaniu zbiorowisk mikroorganizmów był również wiek drzew. Pomimo ogólnie większej podatności młodych topoli na czynniki środowiskowe, również różnice wynikające z ich podłoża genetycznego wyraźniej się tutaj zaznaczały.

Ściśle związaną z genotypem drzewa była obserwowana pozytywna zależność między wielkością części nadziemnej topoli (wielkość aparatu fotosyntetycznego rośliny), a biomasą grzybów mykoryzowych w ryzosferze oraz w glebie (grzybnia zewnętrzna/ekstramatrykalna), będących głównymi odbiorcami związków węgla transportowanych poprzez korzenie do gleby.

Uzyskane wyniki pozwoliły wskazać na niektóre grupy organizmów takie jak grzybowe endofity korzeniowe, czy pierwotniaki jako na potencjalne biowskaźniki skażenia środowiska. Obserwowane zależności na poziomie korzeni, ryzosfery i roztworu glebowego wskazują na ścisłe powiązania obecnych tu zbiorowisk mikroorganizmów współtworzących mikrobiom topoli, sięgający dalej poza zasięg ich korzeni.

Badania te potwierdziły także istotną rolę szeregu czynników takich jak wilgotność gleby, pH, zawartość związków węgla i azotu i in. na produkcję biomasy i kształt zbiorowisk mikroorganizmów glebowych.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Rozwój naukowy przed uzyskaniem stopnia doktora nauk biologicznych

W 2001 roku ukończyłem studia na Wydziale Biologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Pracę magisterską pt. „Zróżnicowanie sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z terenu Borów Tucholskich zbadane na podstawie cech morfologicznych igieł” przygotowałem pod kierunkiem dr hab. Lecha Urbaniaka, prof. UAM w Zakładzie Genetyki. Obok badań zmienności cech morfologicznych igieł populacji sosny zwyczajnej z terenów suchych i bagiennych Tucholskiego Parku Krajobrazowego, uczestniczyłem również w pracach badawczych na reliktowych stanowiskach sosny zwyczajnej Tatr i Pienin. Jako członek, a później jako przewodniczący Sekcji Genetycznej Koła Naukowego Przyrodników przy Wydziale Biologii UAM brałem także udział w pracach badawczych zróżnicowania populacji sosny zwyczajnej z terenu Wielkopolskiego Parku Narodowego z wykorzystaniem zarówno cech morfologicznych igieł jak i technik izoenzymatycznych. Okres ten zaowocował udziałem w kilku krajowych konferencjach naukowych oraz współautorstwem publikacji pięciu artykułów w czasopismach indeksowanych i pokonferencyjnych (Urbaniak i in. 2000a,b; Urbaniak i Karliński 2001; Urbaniak i in. 2001; Urbaniak i in. 2003).

Po studiach magisterskich karierę naukową kontynuowałem w ramach studiów doktoranckich, realizowanych w Instytucie Dendrologii Polskiej Akademii Nauk w Kórniku pod opieką prof. dr hab. Barbary Kieliszewskiej–Rokickiej. Moje badania koncentrowały się wokół zbiorowisk grzybów ektomykoryzowych i mikroorganizmów glebowych związanych ze świerkiem pospolitym na stanowiskach poddanych w różnym stopniu antropopresji i skażeniu metalami ciężkimi. Badania te wykazały znaczne zróżnicowanie ilościowe i jakościowe zbiorowisk grzybów ektomykoryzowych i innych grup mikroorganizmów glebowych obecnych w dojrzałych lasach świerkowych oraz ich silną zależność od warunków środowiskowych. Realizując pracę doktorską miałem możliwość zastosowania szeregu technik badawczych, także nowych, wcześniej nie wykorzystywanych zarówno w naszym Instytucie jak i w skali kraju, które z powodzeniem stosuję do dnia dzisiejszego.

W trakcie trwania doktoratu uzyskałem stypendium rządu duńskiego na półroczny staż zagraniczny w Centrum badawczym Flakkebjerg Instytutu Nauk Rolniczych w Danii. Pobyt w Centrum badawczym Flakkebjerg stał się zaczątkiem długoletniej współpracy ze stroną duńską, która do dnia dzisiejszego jest kontynuowana. Realizując tutaj projekt pod tytułem "The effect of inoculation with ectomycorrhizal fungi and mycorrhizal helper bacteria on the response of Norway spruce seedlings to lead" badałem wpływ koinokulacji siewek świerka pospolitego (*Picea abies* (L.) Karst) szczepami grzybów ektomykoryzowych *Paxillus involutus* (Batsch) Fr.) i *Amanita muscaria* (L.) Lam.) oraz bakterii sprzyjających rozwojowi mykoryz (mycorrhiza helper bacteria – MHB) - *Pseudomonas fluorescens* w glebach w różnym stopniu skażonych ołowiem (Karliński i in. 2003). Podczas pobytu zapoznałem się i zastosowałem w swoich badaniach techniki ekstrakcji estrów kwasów tłuszczowych i ich

analizy metodami chromatografii gazowej oraz poszeżyłem znacząco swoją wiedzę dotyczącą hodowli i analiz szczepów bakterii glebowych MHB. Obok realizacji podstawowego tematu badawczego osiągnięciem uzyskanym podczas stażu było wykazanie przeze mnie możliwości wykorzystania techniki analizy estrów kwasów tłuszczowych w badaniach ektomykoryz zawierających zarówno struktury grzybni oraz rośliny. W kolejnym roku ponownie gościłem z wizytą badawczą we Flakkebjerg analizując zmiany profili kwasów tłuszczowych wybranych grzybów ektomykoryzowych w czasie, rosnących w kulturach *in vitro* i ponownie wykazując przydatność tych technik w analizach zbiorowisk grzybów mykoryzowych. Uzyskane wyniki zostały włączone do rozprawy doktorskiej oraz były publikowane w międzynarodowych czasopismach indeksowanych (Karliński i in. 2003; Karliński i in. 2007) oraz prezentowane podczas międzynarodowych konferencji we Włoszech, Francji oraz w Polsce. Przebywając w Danii uczestniczyłem również w badaniach wpływu koinokulacji kultywarów pomidora szczepami grzyba arbuskularnego *Glomus intraradices* (obecnie - *Rhizophagus irregularis*) i grzyba typu biocontrol agent (*Clonostachys rosea*) na parametry wzrostowe roślin i zbiorowisko mikroorganizmów glebowych. Wyniki przedstawiające pozytywny wpływ obu gatunków grzybów omówione zostały w wielokrotnie cytowanej po dziś dzień pracy Ravnskov i in. (2006).

W 2007 roku obroniłem pracę doktorską zatytułowaną „Zbiorowiska ektomykoryz świerka pospolitego i mikroorganizmów glebowych w dojrzałych drzewostanach” i uzyskałem tytuł doktora nauk biologicznych. Praca doktorska została wyróżniona przez Radę Instytutu Dendrologii Polskiej Akademii Nauk w Kórniku.

Rozwój naukowy po uzyskaniu stopnia doktora nauk biologicznych

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk biologicznych moje zainteresowania naukowe skierowały się w stronę analiz wpływu genotypu drzew, środowiska glebowego i jego zróżnicowania na związane z topolą zbiorowiska grzybów mykoryzowych. Badania te początkowo prowadziłem w ramach projektu europejskiego EVOLTREE (Evolution of Trees), uczestnicząc w pracach grupy JERA3, które zaowocowały publikacją pracy przeglądowej (Gugerli i in. 2013) oraz szeregu komunikatów konferencyjnych (Załącznik 5). Przedmiotem tych badań były zbiorowiska grzybów ektomykoryzowych oraz owadów związanych z lokalnymi klonami topoli czarnej (*Populus nigra* L.) oraz mieszańców topoli pochodzących z wymiany międzynarodowej. Zachowanie założonych wówczas doświadczeń polowych umożliwiło uwzględnienie w badaniach kolejnych czynników jakimi są na przestrzeni dekady przeżywalność poszczególnych genotypów topoli oraz produkcja biomasy, co znajdzie swoje odzwierciedlenie w przygotowywanych obecnie pracach. Udział w projekcie EVOLTREE pozwolił mi pogłębić doświadczenia związane ze współpracą międzynarodową z różnymi grupami badawczymi oraz specyfiką dużych projektów europejskich, a także rozszerzyć wiedzę w dziedzinie statystyki i planowania doświadczeń (Załącznik 5). Uzyskany jeszcze w trakcie trwania EVOLTREE, projekt badawczy MNiSW, którego byłem kierownikiem, pozwolił rozszerzyć moje zainteresowania o analizy zarówno zbiorowisk grzybów ektomykoryzowych jak i arbuskularnych oraz zbiorowiska mikroorganizmów glebowych obecnych w górnej warstwie 30 cm gleby. Prace badawcze

oparte o genotypy topoli z kolekcji IDPAN oraz wieloletnie i nowozałożone doświadczenia polowe na terenach skażonych metalami ciężkimi jak i relatywnie wolnych od zanieczyszczeń stały się podstawą przedstawianej pracy habilitacyjnej.

Z topolą, a dokładnie z topolą czarną wiązały się także badania prowadzone we współpracy z Katedrą Biologii Środowiska Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, której tematem była ocena wpływu warunków hydrologicznych na aktywność enzymatyczną mikroorganizmów glebowych. Badania te wykazały istotny wpływ uwodnienia gleby jak również stężenia węgla, azotu i fosforu na mikrobiom topoli (Frymark-Szymkowiak i Karliński 2022).

Obok badań oddziaływania genotypu roślin i warunków środowiskowych na zbiorowiska grzybów mykoryzowych i innych mikroorganizmów glebowych, w ramach współpracy wewnątrz instytutowej uczestniczyłem również w badaniach wpływu różnych genotypów grzyba ektomykoryzowego *Paxillus involutus* na zdolność nawiązywania symbiozy z topolą (*Populus x canescens*). Prace prowadzono w kulturach *in vitro* z wykorzystaniem izolatów grzybowych, pochodzących z terenów skażonych metalami ciężkimi oraz wolnych od zanieczyszczeń. Uzyskane wyniki wykazały różnice w zdolności do nawiązywania związków symbiotycznych przez szybko i wolno rosnące szczepy *P. involutus* z topolą oraz ich zróżnicowany wpływ na parametry wzrostowe roślin i na zmiany zachodzące w proteomie liści topoli (Szuba i in. 2017; Szuba i in. 2019).

Badaniom wpływu genotypu grzyba *Rhizoctonia solani* (szczepy patogeniczne i niepatogeniczne) na zbiorowiska towarzyszących im bakterii poświęcony był również mój staż podoktorski, który w ramach otrzymanego stypendium Rządu Danii realizowałem na Wydziale Nauk Rolniczych Uniwersytetu w Aarhus – Centrum Badawcze Flakkebjerg. Realizując projekt „Community characterization and identification of bacteria associated to hyphae of pathogenic fungi growing in different soil conditions” wykazałem istotne różnice jakościowe i ilościowe zbiorowisk bakterii towarzyszących szczepom tego groźnego pasożyta wielu gatunków roślin (praca w przygotowaniu). Ponadto kilkadziesiąt wyizolowanych i zidentyfikowanych szczepów bakterii, może stanowić punkt wyjściowy dla dalszych badań ich roli w interakcjach grzyb – roślina.

Poza wieloletnią współpracą z Danią i wspomnianym uczestnictwem w projekcie europejskim EVOTREE, uczestniczyłem również w pracach międzynarodowych zespołów w projektach typu COST – BioLink (FP1305 - Linking belowground biodiversity and ecosystem function in European forests) oraz SENSFOR (ES1203 - Enhancing the resilience capacity of SENSitive mountain FORest ecosystems under environmental change). Pierwszy z projektów zaowocował krótkoterminowym stażem zorganizowanym w ówczesnej Pracowni Badania Mikoryz Instytutu Dendrologii PAN w Kórniku, w trakcie którego goszcząc dr Jovanę Devetaković z Wydziału Leśnego Uniwersytetu w Belgradzie, analizowaliśmy związki mykoryzowe wiązu szypułkowego ze stanowisk w Serbii (Devetaković i in. 2015). W przypadku drugiego z projektów prace związane z analizą czynników rzutujących na zmiany linii lasów górskich, będących czułym wskaźnikiem zmian zachodzących w środowisku, znalazły swoje zwieńczenie w postaci raportu i publikacji w czasopiśmie Soil Research (Broll i in. 2016; Moscatelli i in. 2017).

Od momentu obrony doktoratu, kontynuując prace badawcze w Instytucie Dendrologii Polskiej Akademii Nauk w Kórniku, uczestniczyłem w szeregu projektów i zadań badawczych realizowanych w Zakładzie Związków Symbiotycznych a związanych z gospodarką leśną i poświęconych m.in. wpływowi nawożenia (różne nawozy i ich dawki) na siewki sosny i ich symbionty mykoryzowe w szkółkach leśnych, czy też porównujących zbiorowiska grzybów ektomykoryzowych gatunków drzew liściastych (brzoza brodawkowata, grab pospolity, lipa drobnolistna, buk zwyczajny) uprawianych w warunkach szkółek leśnych (Rudawska i in. 2019; Pietras i in. 2013).

W ramach wieloletniej współpracy naszego zakładu z Ogrodem Botanicznym Uniwersytetu Wileńskiego brałem udział w badaniach wpływu wzbogacania gleby ściolą sosnową na siewki sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w warunkach szkółki leśnej. Nasze wyniki wykazały pozytywny wpływ zastosowanego zabiegu na polepszenie jakości systemów korzeniowych siewek sosny, na których występował bogaty garnitur mykoryz, zwłaszcza suiloidalnych oraz na wyższą przeżywalności siewek sosny, wysadzanych w niekorzystnych warunkach ekologicznych (Rudawska i in. 2017).

Z gospodarką leśną i ochroną rezerwatową wiązał się również projekt, którego byłem współwykonawcą. Uzyskane w toku kilkuletnich badań wyniki pozwoliły wysnuć między innymi twierdzenie, że zarówno rezerwaty leśne jak i lasy gospodarcze przyczyniają się do utrzymania różnorodności grzybów z różnych grup troficznych. Gospodarka leśna ogólnie sprzyja obecności większej puli gatunków grzybów w europejskich borach mieszanych (*Quercus robur*-*Pinetum*). Każda z analizowanych form zarządzania warunkuje też obecność pewnej specyficznej dla niej grupy gatunków grzybów (Leski i in. 2019).

Współuczestniczyłem także w projekcie finansowanym przez Dyрекję Generalną Lasów Państwowych, którego tematem była bioróżnorodność gatunkowa grzybów na terenie Białowieskiego Parku Narodowego i poza jego granicami z uwzględnieniem zamierających drzewostanów świerkowych. Badania te dostarczyły szeregu interesujących informacji na temat zbiorowisk grzybów ektomykoryzowych, a zwłaszcza grzybów tomentelloidalnych. Bioróżnorodności gatunkowej grzybów poświęcone były również coroczne warsztaty Polskiego Towarzystwa Mykologicznego, w których przez szereg lat uczestniczyłem. Miały one na celu w ciągu tygodnia ich trwania określenie możliwie największej liczby gatunków grzybów z różnych grup taksonomicznych w parkach narodowych oraz rezerwatach, gdzie wiedza na temat mykobioty tam występującej pozostawała dotychczas szczególnie uboga. W ten sposób bogactwo gatunkowe grzybów Biebrzańskiego, Narwiańskiego, czy Parku Narodowego Gór Stołowych, a także Puszczy Boreckiej i Nadleśnictwa Polanów zostało znacząco dookreślone (Kujawa i in. 2012; Kujawa i in. 2016).

Bioróżnorodności grzybów w lasach sosnowych i bukowych południowego i południowo-wschodniego pobraża Morza Bałtyckiego poświęcone są również projekty, w których obecnie uczestniczę, w ramach współpracy z Ogrodem Botanicznym Uniwersytetu Wileńskiego oraz z Uniwersytetem Szczecińskim. Dotychczasowe analizy pozwoliły lepiej poznać zbiorowiska grzybów mykoryzowych buczyn pobraża bałtyckiego i ich zmienność sezonową. W przypadku sosny zwyczajnej zanotowaliśmy znaczące różnice w obfitości

i składzie gatunkowym grzybów mykoryzowych związaną z wertykalnym rozkładem stanowisk sosny na wydmach nadmorskich.

Obok prac badawczych o tematyce leśnej, moje zainteresowania naukowe kierowały się także ku warunkom miejskim będącym specyficznym, silnie przekształconym środowiskiem o charakterze mozaikowym, w którym zachodzą interakcje między grzybami mykoryzowymi a gatunkami drzew, często obcych dla Polski. W przypadku kasztanowca zwyczajnego (*Aesculus hippocastanum* L.), będącego drzewem bardzo popularnym i powszechnie spotykanym, lecz bardzo słabo poznanym pod względem morfologii korzeni i ich relacji z grzybami mykoryzowymi (arbuskularnymi), badania prowadzone w warunkach miejskich Poznania i w krajobrazie rolniczym Trzebawia, w znaczącym stopniu uzupełniły tę lukę w literaturze (Karliński i in. 2014). Nasze badania wskazały na znaczącą plastyczność tego gatunku, zarówno pod względem jego systemu korzeniowego jaki związków symbiotycznych z grzybami arbuskularnymi i dobre przystosowanie tak do warunków miejskich jak i pozamiejskich. Uczestniczyłem również w badaniach innych przedstawicieli gatunków obcych dla flory polskiej jakimi były orzeszniki rosnące w Arboretum Kórnickim (orzesznik siedmiolistkowy (*Carya laciniosa* (Michx.) Don) i orzesznik gorzki (*Carya cordiformis* (Wangenh.) Koch)), również słabo poznanych od względem ich związków z grzybami mykoryzowymi. Analiza ich korzeni wykazała podobnie jak w przypadku topoli obecność podwójnej kolonizacji korzeni drobnych przez grzyby ektomykoryzowe i arbuskularne (Rudawska i in. 2018). Natomiast w przypadku orzesznika pięciolistkowego (*Carya ovata* (Mill.) Koch) rosnącego w warunkach leśnych, obecność jedynie struktur ektomykoryzowych (Wilgan i in. 2020). Z terenami miejskimi i poddanymi silnej antropopresji wiążą się także badania, w których obecnie uczestniczę, dotyczące symbiozy grzybów arbuskularnych z korzeniami wiązu szypułkowego (*Ulmus laevis* Pall).

Poza wymienionymi tutaj zagadnieniami badawczymi, brałem udział również w pracach doświadczalnych mających na celu dostosowanie metod analitycznych do specyfiki badań naszego zakładu i wykorzystanie ich w naszych dalszych badaniach, czy też optymalizacji już stosowanych np. analizy kwasów tłuszczowych mykoryz, owocników i kultur *in vitro* grzybów mykoryzowych (Karliński i in. 2007); ekstrakcja ergosterolu metodą MAE (Karliński i in. 2010; 2015; 2021), koinokulacja kultur *in vitro* topoli szarej (*Populus x canescens*) grzybami ektomykoryzowymi (*Paxillus involutus* i *Hebeloma crustuliniforme*) oraz arbuskularnym (*Rhizophagus* (*Rhizophagus irregularis* – szczep BEG 87) i aklimatyzacja uzyskanych roślin w warunkach skażenia metalami ciężkimi (Bojarczuk i in. 2015); metody izolacji DNA grzybów ektomykoryzowych (Janowski i in. 2019).

Podsumowując mój dotychczasowy dorobek naukowy wraz z publikacjami wchodzącymi w skład przedstawianego osiągnięcia naukowego w punkcie 4. jestem współautorem 24 artykułów indeksowanych przez Journal Citation Reports oraz 9 nieindeksowanych, powstałych we współpracy z różnymi zespołami badawczymi tak krajowymi jak i zagranicznymi. Łączny impact factor dla roku opublikowania wynosi: 80,614, sumaryczna liczba punktów MNiSW zgodnie z rokiem opublikowania wynosi 1477. Jestem także autorem 8 prac popularnonaukowych. Biorąc udział w międzynarodowych konferencjach naukowych

byłem autorem lub współautorem 17 referatów i 23 plakatów oraz 33 referatów i 9 plakatów prezentowanych podczas konferencji krajowych (Załącznik 5).

W trakcie mego zatrudnienia podnosiłem również swoje kwalifikacje uczestnicząc w dwóch długoterminowych stażach zagranicznych, dwu i jedno tygodniowych oraz krótszych stażach i kursach zagranicznych i krajowych (Załącznik 5).

Wykonałem również 27 często kilkietapowych recenzji artykułów dla międzynarodowych czasopism naukowych (Załącznik 5) oraz dwukrotnie uczestniczyłem w recenzowaniu projektów zadań badawczych młodych naukowców realizowanych w ramach funduszu badań własnych w Instytucie Dendrologii Polskiej Akademii Nauk.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

W okresie studiów magisterskich uczestniczyłem w spotkaniach ze studentami młodszych roczników prezentując zagadnienia badawcze realizowane w Zakładzie Genetyki Wydziału Biologii UAM. Celem spotkań była pomoc w wyborze miejsca realizacji pracy magisterskiej

i zachęta do rozwijania zainteresowań badawczych w murach Zakładu Genetyki. Będąc członkiem, a następnie przewodniczącym Sekcji Genetycznej Koła Naukowego Przyrodników przy wydziale Biologii, obok realizacji prac badawczych, uczestniczyłem w spotkaniach oraz podejmowałem inne akcje popularyzujące działalność w naszej Sekcji.

W toku studiów magisterskich ukończyłem dodatkowo blok pedagogiczny uprawniający do nauczania przyrody oraz biologii w szkołach podstawowych i średnich, gdzie też odbywałem praktyki.

W trakcie studiów doktoranckich prowadziłem ćwiczenia z fizjologii roślin oraz mykologii na Uniwersytecie Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy. Uczestniczyłem także w opiece naukowej nad studentami z Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, realizującymi część swoich prac licencjackich i magisterskich w naszym Zakładzie (wcześniej Pracownia Badania Mikoryz), zapoznając ich z technikami analiz ektomykoryz, przygotowaniem przekrojów poprzecznych korzeni, preparatów mikroskopowych oraz dokumentacji fotograficznej, a także skanowaniem prób korzeniowych w celu określenia ich parametrów biometrycznych, przygotowania pułapek na grzybnie ekstramatrykaną, prowadzenia kultur in vitro grzybów ektomykoryzowych, opracowania danych z wykorzystaniem różnych technik statystycznych itp. W przypadku części z wymienionych technik badawczych, zapoznanie z nimi było także celem kilku wizyt naukowców zagranicznych z Danii i Litwy.

Ponadto prowadziłem w naszym Zakładzie kilkudniowe kursy technik wybarwienia i oceny stopnia kolonizacji korzeni drobnych różnych gatunków drzew przez grzyby arbuskularne dla pracowników naukowych i studentów z Polski (Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Instytut Dendrologii PAN) oraz z zagranicy (Serbia). Prezentowałem również techniki ekstrakcji ergosterolu (wskaźnik biomasy grzybów) i analizy jego zawartości w próbach z wykorzystaniem wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC) dla pracowników z Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy i Instytutu Dendrologii PAN.

Podczas stażu podoktorskiego w Centrum Badawczym Flakkebjerg (Wydział Rolniczy Uniwersytetu Aarhus w Danii) w ramach współpracy z Instytutem Badań Ekosystemów i Zrównoważonego Rozwoju, Autonomicznego Narodowego Uniwersytetu Meksyku (UNAM) sprawowałem opiekę naukową nad studentką tegoż uniwersytetu podczas jej analiz zbiorowisk mikroorganizmów glebowych, zapoznając ją z technikami ekstrakcji estrów kwasów tłuszczowych, ich rozdziałem i identyfikacją z wykorzystaniem chromatografii gazowej (GC) oraz z późniejszą analizą uzyskanych danych.

Byłem również współopiekunem dwóch prac licencjackich realizowanych w Instytucie Dendrologii PAN, których wyniki opublikowane zostały w wysoko impaktowanym czasopiśmie naukowym (Karliński i in. 2014).

Uczestniczyłem także w serii wykładów dla doktorantów Poznańskiej Szkoły Doktorskiej Instytutów Polskiej Akademii Nauk, wygłaszając w ramach przedmiotu Ekologia roślin drzewiastych wykład „The arbuscular mycorrhizal symbiosis of trees. Structure, function and regulating factors”.

W trakcie doktoratu jak i w późniejszym czasie miałem okazję wielokrotnie z jednej strony edukować, a z drugiej popularyzować tematykę badawczą naszego zakładu podczas wizyt badaczy i studentów z Polski jak i innych krajów (np. Słowenii, Portugalii, Federacji Rosyjskiej) oraz w trakcie wycieczek szkolnych z Kórnika, Poznania, czy Trzemeszna. Również podczas ogólnopolskich konferencji naukowych organizowanych cyklicznie przez Instytut Dendrologii PAN w czasie przeznaczonym na zwiedzanie Instytutu, pełniłem dyżur w Zakładzie starając się przybliżyć zainteresowanym osobom tematykę naszych badań.

Obok prac naukowych trafiających głównie do naukowców publikuję także prace popularnonaukowe (Karliński 2019; 2020; 2021c; Leski i in 2019) skierowane do leśników i przyrodników (Las Polski, Aura) jak również do lokalnych odbiorców (Kórniczanie) (Karliński 2021d; 2021e; 2022; Karliński i Karlińska 2021).

Formą popularyzacji wiedzy o różnych gatunkach grzybów obecnych w polskich lasach był także mój udział w corocznych warsztatach terenowych Polskiego Towarzystwa Mykologicznego, odbywających się na terenach o słabo poznanych zbiorowiskach grzybów. Ich rezultatem były listy gatunków grzybów różnych grup systematycznych i troficznych, zidentyfikowanych podczas naszego pobytu i w trakcie późniejszych analiz laboratoryjnych. W ten sposób zarówno specjaliści jak i osoby zainteresowane, odwiedzające np. Biebrzański Park Narodowy, Narwiański Park Narodowy, Park Narodowy Gór Stołowych, teren Puszczy Boreckiej, czy Nadleśnictwa Polanów zyskały dostęp do znacznie poszerzonej (często o kilkaset gatunków) informacji o występującej na danym terenie mykobiocie.

Część z realizowanych badań oprócz punktów i liczby cytowań zyskała także dodatkowe uznanie wśród gremiów naukowych i związanych z lasami. W 2007 roku wyróżniona została moja praca doktorska przez Radę Naukową Instytutu Dendrologii PAN. W tym samym roku otrzymałem także nagrodę Dyrekcji Instytutu Dendrologii PAN za zajęcie 2 miejsca w konkursie „na najlepszą pracę w roku 2006 z afiliacją Instytutu”, a rok później nagrodę Dyrekcji Instytutu Dendrologii PAN za zajęcie 3 miejsca w konkursie „na najlepszą pracę w roku 2007 z afiliacją Instytutu”.

Z pozytywnym odbiorem spotykały się także prezentacje badań, w których współuczestniczyłem, a które prezentowała pani dr Marta Kowalska-Kujawska uzyskując kilka nagród podczas konferencji naukowych:

- „Drzewa i Lasy w zmieniającym się środowisku”, organizowanej przez Instytut Dendrologii PAN w 2016 roku, poster: Kowalska M, Rudawska M, Stasińska M, Leski T, **Karliński L.** – Czy gospodarka leśna wpływa na różnorodność biologiczną grzybów mykoryzowych?
 - nagroda Dyrektora RDLP w Poznaniu za zajęcie I miejsca w konkursie dla młodych naukowców na najlepszy plakat prezentujący wyniki badań,
 - nagroda Dyrektora Instytutu Dendrologii Polskiej Akademii Nauk za zajęcie II miejsca
 - nagroda Przewodniczącego Zarządu Oddz. Wielkopolskiego PTL za zajęcie III miejsca
- 7th International Symposium on Physiological Processes in Roots of Woody Plants (Woody Root 7), 2017, Tartu, Estonia, poster: Kujawska M, Leski T, **Karliński L**, Stasińska M, Rudawska M. - How forest management influence ectomycorrhizal community in continental mixed coniferous forests?
 - II nagroda w konkursie dla Młodych Naukowców fundowana przez Centre of Excellence „Ecology of global change:natural and manager ecosystems” (EcolChange)
- „Biologia i ekologia roślin drzewiastych” organizowanej przez Instytut Dendrologii PAN w 2018 roku, poster: Kujawska M, **Karliński L**, Rudawska M, Leski T. – Struktura zbiorowisk grzybów ektomykoryzowych na sadzonkach brzozy, graba i lipy, w polskich szkółkach leśnych. Konferencja naukowa, 11-15.06.2018, Kórnik – Poznań, Polska
 - nagroda Dyrektora RDLP w Poznaniu za zajęcie II miejsca w konkursie dla młodych Naukowców

Literatura

- Agerer R. 2001. Exploration types of ectomycorrhizae. A proposal to classify ectomycorrhizal mycelial systems according to their patterns of differentiation and putative ecological importance. *Mycorrhiza* 11, 107-114.
- Baar J, Bastiaans T, van de Coevering MA, Roelofs JMG. 2002. Ectomycorrhizal root development in wet Adler carr forests in response to desiccation and eutrophication, *Mycorrhiza* 12, #147e151.
- Bahram M, Põlme S, Kõljalg U, Tedersoo L. 2011. A single European aspen (*Populus tremula*) tree individual may potentially harbor dozens of *Cenococcum geophilum* ITS genotypes and hundreds of species of ectomycorrhizal fungi, *FEMS Microbiology Ecology* 75, 313-320.
- Bailey VL, Smith JL, Bolton H, Jr. 2002. Fungal-to-bacterial biomass ratios in soils investigated for enhanced carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 997– 1007.
- Bakker MG, Manter DK, Sheflin AM, Weir TL, Vivanco JM. 2012. Harnessing the rhizosphere microbiome through plant breeding and agricultural management. *Plant and Soil* 360, 1-13.
- Bakker MR, Delerue F, Andreasson F, Ngao J, Dannoura M, Zeller B, Epron D. 2015. Hyphal growth in ingrowth mesh bags in *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus pinaster* stands in France. *European Journal of Soil Biology* 70, 111–117.
- Bálint M, Tiffin P, Hallström B, O’Hara RB, Olson MS, Fankhauser JD, Piepenbring M, Schmitt I. 2013. Host genotype shapes the foliar fungal microbiome of balsam poplar (*Populus balsamifera*). *PLoS ONE* 8, #e53987.

- Baum Ch, Makeschin F. 2000. Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on mycorrhizal formation of two poplar clones (*Populus trichocarpa* and *P. tremula* × *tremuloides*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences* 163, 491–497.
- Beckers B, Op De Beeck M, Weyens N, Boerjan W, Vangronsveld J. 2017. Structural variability and niche differentiation in the rhizosphere and endosphere bacterial microbiome of field-grown poplar trees. *Microbiome* 5, #25.
- Błaszczkowski J. 2012. *Glomeromycota* W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków, Polska, ss. 303.
- Bojarczuk K, **Karliński L**, Hazubska-Przybył T, Kieliszewska-Rokicka B. 2015. Influence of mycorrhizal inoculation on growth of micropropagated *Populus* × *canescens* lines in metal-contaminated soils. *New Forests* 46, 195-215.
- Bonito G, Benucci GMN, Hameed K, Weighill D, Jones P, Chen K-H, Jacobson D, Schadt, Ch, Vilgalys R. 2019. Fungal-bacterial networks in the *Populus* rhizobiome are impacted by soil properties and host genotype. *Frontiers in Microbiology* 10, 481.
- Bradshaw HD, Reinhart C, Davis J, Stettler R. 2000. Emerging model systems in plant biology: poplar (*Populus*) as a model forest tree. *Journal of Plant Growth Regulation* 19, 306-313.
- Broll G, Jokinen M, Aradottir AL, Cudlin P, Dinca L, Gömöryová E, Grego S, Holtmeier FK, **Karliński L**, Klopčic M, La Porta N, Máliš F, Monteiro A, Moscatelli MC, Palombo C, Rudawska M, Sarkki S, Tolvanen A, Thorsson J, Zhiyanski M. - Enhancing the resilience capacity of sensitive mountain forest ecosystems and environmental change (SENSFOR) Working Group 2: Indicators of changes in the treeline ecotone. COST Action ES1203 - Enhancing the resilience capacity of SENSitive mountain FORest ecosystems under environmental change (SENSFOR).
- Brundrett MC. 2002. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytologist* 154, 275–304.
- Brundrett MC, Tedersoo L. 2018. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist* 220, 1108–1115.
- Brundrett MC. 2017. Global diversity and importance of mycorrhiza and nonmycorrhizal plants. W: Tedersoo L, (red.) *Biogeography of mycorrhizal symbiosis*. Cham, Switzerland, Springer International, 533–556.
- Bugała W. 1973. *Systematyka i zmienność*. W: Białobok S. (red.), *Topole, Nasze drzewa leśne*, vol. 12, PWN.
- Bulgarelli D, Garrido-Oter R, Münch PC, Weiman A, Droge J, Pan Y, McHardy AC, Schulze-Lefert P. 2015. Structure and function of the bacterial root microbiota in wild and domesticated Barley. *Cell Host & Microbe* 17, 392-403.
- Buyer JS, Teasdale JR, Roberts DP, Zasada IA, Maul JE. Factors affecting soil microbial community structure in tomato cropping system. *Soil Biology and Biochemistry* 42, 831-841.
- Cairney JWG. 2012. Extramatrical mycelia of ectomycorrhizal fungi as moderators of carbon dynamics in forest soil. *Soil Biology and Biochemistry* 47, 198–208.
- Chen M, Arato M, Borghi L, Nouri E, Reinhardt D. 2018. Beneficial services of arbuscular mycorrhizal fungi – from ecology to application. *Frontiers in Plant Science* 9, #1270.
- Chodak M, Gołębiewski M, Morawska-Płoskonka J, Kuduk K, Niklińska M. 2013. Diversity of microorganisms from forest soils differently polluted with heavy metals. *Applied Soil Ecology* 64, 7-14.
- Corredor AH, Van Rees K, Vujanovic V. 2014. Host genotype and health status influence on the composition of the arbuscular mycorrhizal fungi in *Salix* bioenergy plantations. *Forest Ecology and Management* 314, 112-119.

- Courty PE, Labbé J, Kohler A, Marçais B, Bastien C, Churin JL, Garbaye J, Le Tacon F. 2011. Effect of poplar genotypes on mycorrhizal infection and secreted enzyme activities in mycorrhizal and non-mycorrhizal roots, *Journal of Experimental Botany* 62, 249-260.
- Cregger MA, Veach AM, Yang ZK, Crouch MJ, Vilgalys GA, Tuskan GA, Schadt CW. 2018. The *Populus* holobiont: dissecting the effect of plant niches and genotype on the microbiome. *Microbiome* 6, #31.
- Cripps CL. 2004. Ectomycorrhizal fungi above and below ground in a small, isolated aspen stand: a simple system reveals fungal fruiting strategies and an edge effect. W: Cripps CL. (red.) *Fungi in Forest Ecosystem: Systematics, Diversity, and Ecology*, The New York Botanical Garden, 249-264.
- Delaux PM. 2017. Comparative phylogenomics of symbiotic associations. *New Phytologist* 213, 89–94.
- Devetaković J, Karliński L, Pietras M, Leski T, Rudawska M. - Mycorrhizal status of European white elm from Veliko Ratno Ostrvo island, Belgrade (Serbia). 3rd Annual Meeting “Soil Biological Communities and Aboveground Resilience” COST Action FP1305 BioLink: Linking belowground biodiversity and ecosystem function in European forests. 17-19.11.2015, Rzym, Włochy (e-plakat)
- Dickie IA, Koide RT, Fayish AC. 2001. Vesicular-arbuscular mycorrhizal infection of *Quercus rubra* seedlings. *New Phytologist* 151, 257–264.
- Dominik T. 1958. Study of mycotrophism of the genus *Populus*. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa* 181, 117–172.
- Eckenwalder JE. 1996. Systematics and evolution of *Populus*. W: Stetter RF, Bradshaw Jr. HD, Heilman PE, Hinckley TM. (red.), *Biology of Populus and Its Implications for Management and Conservation*, NRC Research Press, Ottawa, 7-32.
- Ekblad A, Wallander H, Godbold DL, Cruz C, Johnson D, Baldrian P, Bjork R.G., Epron D, Kieliszewska-Rokicka B, Kjoller R, Kraigher H, Matzner E, Neumann J, Plassard C. 2013. The production and turnover of extramatrical mycelium of ectomycorrhizal fungi in forest soils: role in carbon cycling. *Plant and Soil* 366, 1–27.
- Ekblad A, Mikusinska A, Ågren GI, Menichetti L, Wallander H, Vilgalys R, Bahr A, Eriksson U. 2016. Production and turnover of ectomycorrhizal extramatrical mycelia biomass and necromass under elevated CO₂ and nitrogen fertilization. *New Phytologist* 211, 874–885.
- Ellouze W, Hamelb C, Vujanovic V, Ganb Y, Bouzid S, St-Arnaud M. 2013. Chickpea genotypes shape the soil microbiome and affect the establishment of the subsequent durum wheat crop in the semiarid North American Great Plains. *Soil Biology and Biochemistry* 63, 129–141.
- Fernández-González AJ, Villadas PJ, Gómez-Lama Cabanás C, Valverde-Corredor A, Belaj A, Mercado-Blanco J, Fernández-López M. 2019. Defning the root endosphere and rhizosphere microbiomes from the World Olive Germplasm Collection. *Scientific Reports* 9, #20423.
- Fierer N, Schimel JP, Holden PA. 2003. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 167-176.
- Frey B, Stemmer M, Widmer F, Luster J, Sperisen Ch. 2006. Microbial activity and community structure of a soil after heavy metal contamination in a model forest ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 1745-1756.
- Fritze H, Pietikäinen T, Pennanen T. 2000. Distribution of microbial biomass and phospholipid fatty acids in Podzol profiles under coniferous forest. *European Journal of Soil Sciences* 51, 565-573.
- Frostegård Å, Bååth E. 1996. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil. *Biology and Fertility of Soils* 22, 59-65.

- Frostegård Å, Tunlid A, Bååth E. 1993. Phospholipid fatty acid composition, biomass, and activity of microbial communities from two soil types experimentally exposed to different heavy metals. *Applied and Environmental Microbiology* 59, 3606-3617.
- Frymark-Szymkowiak A, **Karliński L**. Impacts of hydrological conditions on the activities of soil enzymes in temperate floodplain forest sites. *Soil Research*. doi:10.1071/SR21156.
- Gamalero E, Cesaro P, Cicatelli A, Todeschini V, Musso Ch, Castiglione S., Fabiani A., Lingua G. 2012. Poplar clones of different sizes, grown on a heavy metal polluted site, are associated with microbial populations of varying composition. *Science of the Total Environment* 425, 262–270.
- Gehring CA, Mueller C, Whitham TG. 2006. Environmental and genetic effects on the formation of ectomycorrhizal and arbuscular mycorrhizal associations in cottonwoods. *Oecologia* 149, 158–164.
- Gherghel F, Behringer D, Haubrich S, Schlauß M, Fey-Wagner Ch, Rexer K-H, Janßen A, Kost G. 2014. Former land use and host genotype influence the mycorrhizal colonization of poplar roots. *Forests* 5, 2980-2995.
- Gonçalves MT, Martins-Loução MA. 1996. Mycotrophic conditions of *Populus nigra* and *P. euramericana*. Evolution of endo vs ectomycorrhiza. Evaluation of endo vs ectomycorrhizal. W: Azcon-Aguilar C, Barea JM (eds) *Mycorrhizas in integrated systems from genes to development*. Proceedings of fourth European symposium on mycorrhizas. ECSC-EC-EAEC, Brussels, 118–120.
- Gottel NR, Castro HF, Kerley M, Yang Z, Pelletier DA, Podar M, Karpinets T, Uberbacher E, Tuskan GA, Vilgalys R, Doktycz MJ, Schadt ChW. 2011. Distinct microbial communities within the endosphere and rhizosphere of *Populus deltoides* roots across contrasting soil types. *Applied Environmental Microbiology* 77, 5934-5944.
- Grams TEE, Anderssen ChP. 2007. Competition for resources in trees: physiological versus morphological plasticity. In: Esser K, Lüttge U, Beyschlag W, Murata J. (red.) *Progress in Botany. Genetisc, Physiology, Systematics, Ecology*. Springer 68, 356–381.
- Gratani L. 2014. Plant phenotypic plasticity in response to environmental factors. *Advances in Botany*, #208747.
- Gugerli F, Brandl R., Castagnyrol B, Franc A, Jactel H, Koelewijn H-P, Martin F, Peter M, Pritsch K, Schroder H, Smulders MJM, Kremer A, Ziegenhagen B. and EVOLTREE JERA3 CONTRIBUTORS: Augustin S, Brandle M, Burban C, Burczyk J, Cavers S, Chybicki I, Conord C, Cremer E, DeWoody J, Donges K, Fady B, **Karliński L**, Kerdelhue C, Kieliszewska-Rokicka B, Kost G, Kulczyk-Skrzeszewska M, Lakatos F, Lefevre F, Liepelt S, Oddou-Muratorio S, Rexer K-H, Rudawska M, Schadler M, Taylor G, Tuba K, Viger M, Villani F, Villar M. 2013. Community genetics in the time of next generation molecular technologies. *Molecular Ecology* 22, 3198-3207.
- Gupta K, Chatterjee Ch, Gupta B. 2012. Isolation and characterization of heavy metal tolerant Gram-positive bacteria with bioremedial properties from municipal waste rich soil of Kestopur canal (Kolkata), West Bengal, India. *Biologia* 67, 827-836.
- Hagenbo A, Kwaschenko J, Clemmensen KE, Lindahl BD, Fransson P. 2018. Fungal community shifts underpin declining mycelia production and turnover across a *Pinus sylvestris* chronosequence. *Journal of Ecology* 106, 490–501.
- Henkes GJ, Kandeler E, Marhan S, Scheu S, Bonkowski M. 2018. Interactions of mycorrhiza and protists in the rhizosphere systemically alter microbial community composition, plant shoot-to-root ratio and withinroot system nitrogen allocation. *Frontiers in Environmental Science* 6, 117.
- Hobbie EA, Agerer R. 2010. Nitrogen isotopes in ectomycorrhizal sporocarps correspond to belowground exploration types, *Plant and Soil* 327, #71e83.

- Hobley EU, Wilson B. 2016. The depth distribution of organic carbon in the soils of eastern Australia. *Ecosphere* 7, #e01214.
- Hoeksema JD, Classen AT. 2012. Is plant genetic control of ectomycorrhizal fungal communities an untapped source of stable soil carbon in managed forests? *Plant and Soil* 359, #197e204.
- Holland EA, Coleman DC. 1987. Litter placement effects on microbial and organic matter dynamics in an agroecosystem. *Ecology* 68, 425-433.
- Holste EK, Kobe RK, Gehring CA. 2017. Plant species differ in early seedling growth and tissue nutrient responses to arbuscular and ectomycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* 27, 211-223.
- Horton TR, Cázares E, Bruns TD. 1998. Ectomycorrhizal, vesicular-arbuscular and dark septate fungal colonization of bishop pine (*Pinus muricata*) seedlings in the first 5 months of growth after wildfire. *Mycorrhiza* 8, 11-18.
- Hryniewicz K, Haug I, Baum Ch. 2008. Ectomycorrhizal community structure under willows at former ore mining sites. *European Journal of Soil Biology* 44, 37-44.
- Joergensen RG, Wichern F. 2008. Quantitative assessment of the fungal contribution to microbial tissue in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 2977-2991.
- Jumpponen A, Trappe JM. 1998. Dark septate endophytes: a review of facultative biotrophic root colonizing fungi. *New Phytologist* 140, 295-310.
- Kabata-Pendias A, Pendias H. 1993. *Biochemia pierwiastków śladowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kalliokoski T, Pennanen T, Nygren P, Sievänen R, Helmisaari H-S, 2010. Belowground interspecific competition in mixed boreal forests: fine root and ectomycorrhiza characteristics along stand developmental stage and soil fertility gradients. *Plant and Soil* 330, 73-89.
- **Karliński L.** 2019. Torfowiska – zagrożenia i ochrona [Peatlands – Threats and Protection]. *Aura Ochrona Środowiska* 10, 6-10.
- **Karliński L.** 2020. Topole, drzewa wielu kontrastów. *Las Polski* 22, 18-20.
-
- **Karliński L.** 2021a. Biomass of external mycelium of mycorrhizal fungi associated with poplars – the impact of tree genotype, tree age and soil environment. *Applied Soil Ecology* 160, #103847.
- **Karliński L.** 2021b. The arbuscular mycorrhizal symbiosis of trees. Structure, function and regulating factors. W: Shrivastava N, Mahajan S, Varma A. (red.) *Symbiotic Soil Microorganisms. Biology and Applications*. Springer. 117-128.
- **Karliński L.** 2021c. Ekstramatrykalna grzybnia mykoryzowa – niewidoczny sprzymierzeniec drzew. *Las Polski* 17, 20-21.
- **Karliński L.** 2021d. Axis mundi i historia jednego drzewa. *Kórniczanie* 13, 19.
- **Karliński L.** 2021e. Wiele twarzy topoli. *Kórniczanie* 21, 16.
- **Karliński L.** 2022. Grzybowi towarzysze topoli. *Kórniczanie* 3, 12.
- **Karliński L., Karlińska A.** 2021. Bukszpan a ćma bukszpanowa, notatki z frontu. *Kórniczanie* 7, 12-13.
- **Karliński L, Jagodziński AM, Leski T, Butkiewicz P, Brosz M, Rudawska M.** 2014. Fine root parameters and mycorrhizal colonization of horse chestnut trees (*Aesculus hippocastanum* L.) in urban and rural environments. *Landscape and Urban Planning* 127, 154-163.
- **Karliński L, Larsen J, Ravnskov S, Kieliszewska-Rokicka B.** 2003. The effect of inoculation with ectomycorrhizal fungi and mycorrhiza helper bacteria on the response of Norway spruce seedlings to lead. *Proceedings - XXXIII Annual Meeting of ESNA, Viterbo, Włochy, WG 3, Soil-Plant-Relationships. Fachhochschule Ravensburg-Weingarten, Niemcy, 68-73.*

- **Karliński L**, Ravnskov S, Kieliszewska-Rokicka B, Larsen J. 2007. Fatty acid composition of various ectomycorrhizal fungi and ectomycorrhizas of Norway spruce. *Soil Biology & Biochemistry* 39, 854-866.
- **Karliński L**, Ravnskov S, Rudawska M. 2020. Soil microbial biomass and community composition relates to poplar genotypes and environmental conditions. *Forests* 11, #262.
- **Karliński L**, Rudawska M, Kieliszewska-Rokicka B, Leski T. 2010. Relationship between genotype and soil environment during colonization of poplar roots by mycorrhizal and endophytic fungi. *Mycorrhiza* 20, 315-324.
- **Karliński L**, Rudawska M, Leski T. 2013. The influence of host genotype and soil conditions on ectomycorrhizal community of poplar clones. *European Journal of Soil Biology* 58, 51-58.
- Kilpeläinen J, Vestberg M, Repo T, Lehto T. 2016. Arbuscular and ectomycorrhizal root colonisation and plant nutrition in soils exposed to freezing temperatures. *Soil Biology and Biochemistry* 99, 85–93.
- Kilpeläinen J, Barbero-Lopez A, Vestberg M, Heiskanen J, Letho T. 2017. Does severe soil drought have after-effects on arbuscular and ectomycorrhizal root colonisation and plant nutrition? *Plant and Soil* 418, 377–386.
- Kloke A. 1980. Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden. *Mitt. VDLUFA H.*
- Korkama T, Pakkanen A, Pennanen T. 2006. Ectomycorrhizal community structure varies among Norway spruce (*Picea abies*) clones, *New Phytologist* 171, 815-824.
- Kormanik PP, McGraw AC. 1982. Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant roots. W: Schenck NC. (red) *Methods and principles of mycorrhizal research*. APS, St. Paul, 37–45.
- Krpata D, Peintner U, Langer I, Fitz WJ, Schweiger P. 2008. Ectomycorrhizal communities associated with *Populus tremula* growing on heavy metal contaminated site, *Mycological Research* 112, 1069-1079.
- Kujawa A, Wrzosek M, Domian G, Kędra K, Szkodzik J, Rudawska M, Leski T, **Karliński L**, Pietras M, Gierczyk B, Dynowska M, Ślusarczyk D, Kałucka I, Ławrynowicz M. 2012. Preliminary studies of fungi in forests and inland dunes of the Biebrza National Park. Part II. Macromycetes. - *Acta Mycologica* vol. 47, 215-240.
- Kujawa A, Gierczyk B, Domian G, Wrzosek M, Stasińska M, Szkodzik J, Leski T, **Karliński L**, Pietras M, Dynowska M, Henel A, Ślusarczyk D, Kubiak D. 2016. Preliminary studies of fungi in the Biebrza National Park. Part IV. Macromycetes – New data and the synthesis. *Acta Mycologica* 50, 1070, 1-28.
- Janowski D, Wilgan R, Leski T, **Karliński L**, Rudawska M. 2019. Effective molecular identification of ectomycorrhizal fungi: revisiting DNA isolation methods. *Forests* 10, #218.
- Lamit LJ, Holeski LM, Flores-Rentería L, Whitham TG, Gehring CA. 2016. Tree genotype influences ectomycorrhizal fungal community structure: ecological and evolutionary implications. *Fungal Ecology* 24, 124–134.
- Langer I, Santner J, Krpata D, Fitz WJ, Wenzel WW, Schweiger PF. 2012. Ectomycorrhizal impact on Zn accumulation of *Populus tremula* L. grown in metalliferous soil with increasing levels of Zn concentration, *Plant and Soil* 355, 283-297.
- Lapeyrie FF, Chilvers GA. 1985. An endomycorrhiza-ectomycorrhiza succession associated with enhanced growth of *Eucalyptus dumosa* seedlings planted in a calcareous soil. *New Phytologist* 100, 93–104.

- Laureysens I, De Temmerman L, Hastir T, Van Gysel M, Ceulemans R. 2005. Clonal variation in heavy metal accumulation and biomass production in a poplar coppice culture. II. Vertical distribution and phytoextraction potential. *Environmental Pollution* 133, 541–551.
- Lee EH, Eo JK, Ka KH, Eom AH. 2013. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and their roles in ecosystems. *Mycobiology* 41, 121–125.
- Leski T, Rudawska M, Kujawska M, Stasińska M, Janowski D, Karliński L, Wilgan R. 2019. Both forest reserves and managed forests help maintain ectomycorrhizal fungal diversity. *Biological Conservation* 238, #108206.
- Leski T, Wilgan R, Pietras M, **Karliński L**, Rudawska M. 2019. Podziemny świat grzybów ektomykoryzowych. *Las Polski*. 24: 20-21.
- Likar M. 2011. Dark septate endophytes and mycorrhizal fungi of trees affected by pollution. W: Pirttilä AM, Frank AC. (red.) *Endophyte of forest trees. Biology and applications*. Springer. 189-21.
- Lilleskov EA, Hobbie EA, Horton TR. 2011. Conservation of ectomycorrhizal fungi: exploring the linkages between functional and taxonomic responses to anthropogenic N deposition, *Fungal Ecology* 4, #174e183.
- Lodge DJ. 1989. The influence of soil moisture and flooding on formation of VA-endo- and ectomycorrhizae in *Populus* and *Salix*. *Plant and Soil* 117, 243–253.
- Lottmann J, O’Callaghan M, Baird D, Walter Ch. 2010. Bacterial and fungal communities in the rhizosphere of field-grown genetically modified pine trees (*Pinus radiata* D.). *Environmental Biosafety Research* 9, 25-40.
- Martin FM, Uroz S, Baker DG. 2017. Ancestral alliances: plant mutualistic symbioses with fungi and bacteria. *Science* 356, #eaad4501.
- McGee PA. 1988. Vesicular-arbuscular and ectomycorrhizas on the annual composite. *Podotheca angustifolia*. *Symbiosis* 6, 271–280.
- McGonigle TP, Miller MH, Evans DG, Fairchild GL, Swan JA. 1990. A new method, which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular–arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 115, 495–501.
- Merryweather J. 2001. Meet the Glomales - the ecology of mycorrhiza. *British Wildlife* 86-93.
- Monclus R, Dreyer E, Villar M, Delmotte M, Delay D, Petit JM, Barbaroux C, Le Thiec D, Brechet C, Brignolas F. 2006. Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* × *Populus nigra*. *New Phytologist* 169, 765–777.
- Montgomery HJ, Monreal CM, Young JC, Seifert KA. 2000. Determination of soil fungal biomass from soil ergosterol analyses. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 1207–1217.
- Moscatelli CM, Bonifacio E, Chiti T, Cudlin P, Dinca L, Gömöryova E, Grego S, La Porta N, **Karliński L**, Pellis G, Rudawska M, Squartini A, Zhiyanski M, Broll G. 2017. Soil properties as indicators of treeline dynamics in view of anthropogenic pressure and climate change. *Climate Research* 73, 73-84.
- Nehls U, Gohringer F, Wittulsky S, Dietz S. 2010. Fungal carbohydrate support in the ectomycorrhizal symbiosis: a review. *Plant Biology* 12, 292–301.
- Neville J, Tessier JL, Morrison I, Scarratt J, Canning B, Klironomos JN. 2002. Soil depth distribution of ecto- and arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Populus tremuloides* within a 3-year-old boreal forest clear-cut. *Applied Soil Ecology* 19, 209–216.
- Nilsson LO, Wallander H. 2003. The production of external mycelium by ectomycorrhizal fungi in a Norway spruce forest was reduced in response to nitrogen fertilization. *New Phytologist* 158, 409–416.

- O'Leary WM, Wilkinson SG. 1988. Gram-positive bacteria. W: Retledge, C.; Wilkinson, S.G., (red.). Microbial lipids. Vol. 1, Academic Press Ltd., London, 117-185.
- Ostonen I, Lõhmus K, Pajuste K. 2005. Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and ingrowth core methods. *Forest Ecology and Management* 212, 264-277.
- Parsley R. 1996. Operation manual, version 6. Microbial Identification System, MIDI Inc., Newark, Delaware, USA.
- Peacock AD, Macnaughton SJ, Cantu JM, Dale VH, White DC. 2001. Soil microbial biomass and community composition along an anthropogenic disturbance gradient within a long-leaf pine habitat. *Ecological Indicators* 1, 113-121.
- Pennanen T, Frostegård Å, Fritze H, Bååth E. 1996. Phospholipid fatty acid composition and heavy metal tolerance of soil microbial communities along two heavy metal-polluted gradients in coniferous forests. *Applied Environmental Microbiology* 62, 420-428.
- Pennanen T, Strømmer R, Markkola A, Fritze H. 2001. Microbial and plant community structure across a primary succession gradient. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 16, 37-43.
- Pietras M, Rudawska M, Leski T, **Karliński L**. 2013. Diversity of ectomycorrhizal fungus assemblages on nursery grown European beech seedlings. *Annals of Forests Science* 70, 115-121.
- Quereyeta J, Egerton-Warburton LM, Allen MF. 2009. Topographic position modulates the mycorrhizal response of oak trees to interannual rainfall variability. *Ecology* 90, 649-662.
- Rachwał L, De Temmerman LO, Istaş JR. 1992. Differences in the accumulation of heavy metals in poplar clones of various susceptibility to air pollution. *Arboretum Kórnickie* 37, 101-111.
- Rajapaksha RMCP, Tobor-Kapłon MA, Bååth E. 2004. Metal toxicity affects fungal and bacterial activities in soil differently. *Applied Environmental Microbiology* 70, 2966-2973.
- Ravnskov S, Jensen B, Knudsen IMB, Bødker L, Funck Jensen D, **Karliński L**, Larsen J. 2006. Soil inoculation with the biocontrol agent *Clonostachys rosea* and the mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* results in mutual inhibition, plant growth promotion and alteration of soil microbial communities. *Soil Biology & Biochemistry* 38, 3453-3462.
- Ravnskov S, Larsen J 2016. Functional compatibility in cucumber mycorrhizas in terms of plant growth performance and foliar nutrient composition. *Plant Biology* 18, 816-823.
- Regvar M, Likar M, Piltaver A, Kugonic N, Smith JE. 2010. Fungal community structure under goat willows (*Salix caprea* L.) growing at metal polluted site: the potential of screening in a model phytostabilisation study, *Plant and Soil* 330, #345e356.
- Routsalainen AL, Markkola A, Kozlov MV. 2007. Root fungal colonization in *Deschampsia flexuosa*: effect of pollution and neighbouring trees. *Environmental Pollution* 147, 723-728.
- Rudawska M, Leski T, Stasińska M. 2011. Species and functional diversity of ectomycorrhizal fungal communities on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees on three different sites. *Annals of Forest Science* 68, 5-15.
- Rudawska M, Kujawska M, Leski T, Janowski D, **Karliński L**, Wilgan R. 2019. Ectomycorrhizal community structure of the admixture tree species *Betula pendula*, *Carpinus betulus*, and *Tilia cordata* grown in bare-root forest nurseries. *Forest Ecology and Management* 43, 113-125.
- Rudawska M, Leski T, Wilgan R, **Karliński L**, Kujawska M, Janowski D. 2018. Mycorrhizal associations of the exotic hickory trees, *Carya laciniosa* and *Carya cordiformis*, grown in Kórnik Arboretum in Poland. *Mycorrhiza* 28, 549-560.
- Rudawska M, Leski T, Aučina A, **Karliński L**, Skridaila A, Ryliškis D. 2017. Forest litter amendment during nursery stage influence field performance and ectomycorrhizal community of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings outplanted on four different sites. *Forest Ecology and Management* 395, 104-114.

- Schweitzer JA, Bailey JK, Fischer DG, LeRoy CJ, Lonsdorf EV, Whitham TG, Hart S.C. 2008. Plant-soil-microorganism interactions: heritable relationship between plant genotype and associated soil microorganisms. *Ecology* 89, 773–781.
- Sebastiani L, Scebba F, Tognetti R. 2004. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* x *maximowiczii*) and I-214 (*P.* × *euramericana*) exposed to industrial waste. *Environmental and Experimental Botany* 52, 79–88.
- Shakya M, Gittel N, Castro H, Yang ZK, Gunter L, Labbe J, Muchero W, Bonito G, Vilgalys R, Tuskan G, Podar M, Schadt ChW. 2013. A multifactor analysis of fungal and bacterial community structure in the root microbiome of mature *Populus deltoides* trees. *PLoS ONE*, 8, #76382.
- Smith SE, Read D. 2008. Mycorrhizal symbiosis. Academic, London.
- Smulders MJM, Cottrell JE, Lefèvre F, van der Schoot J, Arens P, Vosman B, Tabbener HE, Grassi F, Fossati T, Castiglione S. i in. 2008. Structure of the genetic diversity in black poplar (*Populus nigra* L.) populations across European river systems: Consequences for conservation and restoration. *Forest Ecology and Management* 255, 1388-1399.
- Song Y, Deng SP, Acosta-Martínez V, Katsalitou E. 2008. Characterization of redox-related soil microbial communities along a river floodplain continuum by fatty acid methyl ester (FAME) and 16S rRNA genes. *Applied Soil Ecology* 40, 499-509.
- Soudzilovskaia NA, van Bodegom PM, Terrer C, van't Zelfde M, McCallum I, McCormack ML, Fisher JB, Brundrett MC, César de Sá N, Tedersoo L. 2019. Global mycorrhizal plant distribution linked to terrestrial carbon stocks. *Nature Communication* 10, #5077.
- Stephen JR, Chang YJ, Gan YD, Peacock AD, Pfiffner SM, Barcelona MJ, White DC, Macnaughton SJ. 1999. Microbial characterization of a JP-4 fuel-contaminated site using a combined lipid biomarker/polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis (PCR-DGGE)-based approach. *Environmental Microbiology* 1, 231-241.
- Szuba A, Karliński L, Krzesłowska M, Hazubska-Przybył T. 2017. Inoculation with a Pb-tolerant strain of *Paxillus involutus* improves growth and Pb tolerance of *Populus* × *canescens* under *in vitro* conditions. *Plant and Soil* 412, 253-266.
- Szuba A, Marczak Ł, Karliński L, Mucha J, Tomaszewski D. 2019. Regulation of the leaf proteome by inoculation of *Populus* × *canescens* with two *Paxillus involutus* isolates differing in root colonization rates. *Mycorrhiza* 29, 503–517.
- Tagu D, Rampant PF, Lapeyrie F, Frey-Klett P, Vion P. 2001. Variation in the ability to form ectomycorrhizas in the F1 progeny of an interspecific poplar (*Populus* spp.) cross. *Mycorrhiza* 10, 237-240.
- Tatsumi Ch, Taniguchi T, Du S, Yamanaka N, Tateno R. 2020. Soil nitrogen cycling is determined by the competition between mycorrhiza and ammonia-oxidizing prokaryotes. *Ecology* 101, #e02963.
- Tedersoo L, Bahram M. 2019. Mycorrhizal types differ in ecophysiology and alter plant nutrition and soil processes. *Biological Reviews* 94, 1857–1880.
- Teste FP, Jones MD, Dickie IA. 2019. Dual-mycorrhizal plants: their ecology and relevance. *New Phytologist* 225, 1835–1851.
- Truszkowska W. 1953. Mycotrophy of *Alneta* in the Białowieża National Park and in Domaszyn near Wrocław. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 22, 737–752.
- Tuskan GA, DiFazio S, Jansson S, Bohlmann J, Grigoriev I, Hellsten U, Putnam N, Ralph S, Rombauts S, Salamov A. i in. 2006. The Genome of Black Cottonwood, *Populus trichocarpa* (Torr. & Gray). *Science* 313, 1596-1604.
- Tylkowski T. 2010. Przekształcenia w składzie dendroflory w dolinie środkowej Warty. *Acta Scientiarum Polonorum. Administratio Locorum* 9/3, 117-124.

- Urbaniak L, **Karliński L**, Kubis A, Grzebyta J. 2000a. Zróżnicowanie sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w Wielkopolskim Parku Narodowym na podstawie cech morfologicznych igieł. *Morena* 7, 41-52.
- Urbaniak L, **Karliński L**, Myczko Ł. 2000b. Cechy morfologiczne i izoenzymatyczne w badaniach nad zróżnicowaniem sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na terenie Wielkopolskiego Parku Narodowego. Pomorska Akademia Pedagogiczna w Słupsku, Materiały IV Przeglądu Działalności Kół Naukowych Przyrodników, 35-39.
- Urbaniak L, **Karliński L**. 2001. Populations of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under different abiotic environments: similarities and differences in the expression of phenotypic needle characters. *Proceedings of Third Balkan Scientific Conference*, Sofia, Bułgaria, 199-207.
- Urbaniak L, Ślósarz M, **Karliński L**. 2001. Description of the relict Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) populations in the Tatra and Pieniny mountains by needle characters. *Proceedings of Third Balkan Scientific Conference*, Sofia, Bułgaria, 191-198.
- Urbaniak L, **Karliński L**, Popielarz R. 2003. Variation of morphological needle characters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) populations in different habitats. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 72, 37-44.
- van der Heijden MGA, Bardgett RD, van Straalen NM. 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters* 11, 296-310.
- Vázquez-García JA, Muñiz-Castro MA, Martínez-González RE, Nieves-Hernández G, Pulido-Ávila MG, Hernández-Vera G, Zuno Delgadillo O. 2019. *Populus primaveralepensis* sp. nov. (Salicaceae, Malpighiales), a new species of white poplar from the Bosque La Primavera Biosphere Reserve in western Mexico. *European Journal of Taxonomy* 498, 1–16.
- Wallander H, Nillson LO, Hagerberg D, Bååth E. 2001. Estimation of the biomass and seasonal growth of external mycelium of ectomycorrhizal fungi in the field. *New Phytologist* 151, 753–760.
- Wallander H, Johansson U, Sterkenburg E, Brandstrom Durling, M, Lindahl BD. 2010. Production of ectomycorrhizal mycelium peaks during canopy closure in Norway spruce forests. *New Phytologist* 187, 1124–1134.
- Watson G, von der Heide-Spravka K, Howe V. 1990. Ecological significance of endoectomycorrhizae in the oak subgenus *Erythrobalanus*. *Arboricultural Journal* 14, 107–116.
- Wilgan R, Leski T, Kujawska M, **Karliński L**, Janowski D, Rudawska M. 2020. Ectomycorrhizal fungi of exotic *Carya ovata* (Mill.) K. Koch in the context of surrounding native forests on Central European sites. *Fungal Ecology* 44, #100908.
- Wright DP, Scholes JD, Read DJ, Rolfe SA, 2000. Changes in carbon allocation and expression of carbon transporter genes in *Betula pendula* Roth. colonized by the ectomycorrhizal fungus *Paxillus involutus* (Batsch) Fr. *Plant Cell and Environment* 23, 39–49.
- Yin Ch, Wang X, Duan B, Luo J, Li Ch. 2005. Early growth, dry matter allocation and water use efficiency of two sympatric *Populus* species as affected by water stress. *Environmental and Experimental Botany* 53, 315–322.
- Zhang Q, Wu J, Yang F, Lei Y, Zhang Q, Cheng X. 2016. Alternations in soil microbial community composition and biomass following agricultural land use change. *Scientific Reports* 6, #36587.
- Zheng J, Chen J, Pan G, Wang G, Liu X, Zhang X, Li L, Bian R, Cheng K, Zheng J. 2017. A long-term hybrid poplar plantation on cropland reduces soil organic carbon mineralization and shifts microbial community abundance and composition. *Applied Soil Ecology* 111, 94-104.
- Zogg GP, Zak DR, Ringelberg DB, Macdonald NW, Pregitzer KS, White DC. 1997. Compositional and functional shifts in microbial communities due to soil warming. *Soil Science Society of America Journal* 61, 475-481.

- Zsuffa L, Giordano E, Pryor LD, Stettler RF. 1996. Trends in poplar culture: some global and regional perspectives. W: Stettler RF, Bradshaw Jr. HD, Heilman PE, Hinckley TM. (red.) Biology of Populus. NRC Research Press, Ottawa, 515-539.



.....
(podpis wnioskodawcy)