

dr Marcin Zadworny
Instytut Dendrologii
Polskiej Akademii Nauk

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

1. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

Przebieg pracy naukowej: nazwa szkoły wyższej, instytutu lub innej jednostki organizacyjnej, specjalność, data uzyskania tytułu zawodowego, stopnia naukowego lub tytułu naukowego:

Tytuł magistra – 2001, Wydział Biologii Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu, kierunek biologia, specjalność biologia eksperymentalna.

Praca magisterska pt. „Wpływ grzybów glebowych na zdolność adaptowania się grzybów mikoryzowych do środowisk gleb uprawianych rolniczo i odłogowanych *in vitro*” wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. Antoniego Wenera.

Stopień doktora – 2006, Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk w Kórniku, dyscyplina biologia

Praca doktorska pt. „Morfologiczne i cytologiczne aspekty mikopasożytniczych właściwości grzyba mikoryzowego *Laccaria laccata*” wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. Antoniego Wenera.

2. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2002 – 2006; Studium doktoranckie na Wydziale Biologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, stypendysta Instytutu Dendrologii Polskiej Akademii Nauk

07.09.2006 – 01.05.2009; Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk; stanowisko biolog

od 02.05.2009; Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk; stanowisko adiunkt

2009 – 2014; kierownik Pracowni Patologii Systemu Korzeniowego Instytutu Dendrologii Polskiej Akademii Nauk

3. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

A) Tytuł osiągnięcia naukowego:

Zróżnicowanie i znaczenie funkcjonalne drobnych korzeni drzew leśnych

B) Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

IF zgodny z rokiem opublikowania

IF_(5-letni) – aktualny pięcioletni IF

Punkty MNiSW według listy z dnia 9 grudnia 2016

1. **Zadworny M.**, Eissenstat D.M. 2011. Contrasting the morphology, anatomy and fungal colonization of new pioneer and fibrous roots. *New Phytologist* 190: 213-221. **IF₂₀₁₁ = 6.645; IF_{5-letni} = 7.554; P_{MNiSW} = 45**

2. **Zadworny M.**, McCormack M.L., Rawlik K., Jagodziński A.M. 2015. Seasonal variation in chemistry, but not morphology, in roots of *Quercus robur* growing in different soil types. *Tree Physiology* 35: 644-652. **IF₂₀₁₅ = 3.587; IF_{5-letni} = 3.891; P_{MNiSW} = 50**

3. **Zadworny M.**, McCormack M.L., Mucha J., Reich P.B., Oleksyn J. 2016a. Scots pine fine roots adjust along a 2000-km latitudinal climatic gradient. *New Phytologist* 212: 389–399. **IF₂₀₁₅ = 7.210; IF_{5-letni} = 7.554; P_{MNiSW} = 45**

4. **Zadworny M.**, McCormack M.L., Żytkowiak R., Karolewski P., Mucha J., Oleksyn J. 2016b. Patterns of structural and defense investments in fine roots of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) across a strong temperature and latitudinal gradient in Europe. *Global Change Biology* doi: 10.1111/gcb.13514. **IF₂₀₁₅ = 8.444; IF_{5-letni} = 9.028; P_{MNiSW} = 45**

C) Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem osiągnięć naukowo-badawczych

Osiągnięcie naukowe, zatytułowane *Zróżnicowanie i znaczenie funkcjonalne drobnych korzeni drzew leśnych*, będące podstawą do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego, stanowi cykl czterech oryginalnych artykułów naukowych, opublikowanych w latach 2011-2016 w czasopiśmie znajdujących się w bazie Journal Citation Reports. Łączny impact factor tych pozycji (zgodny z rokiem opublikowania) wynosi 25.886, a sumaryczna liczba punktów MNiSW to 185. We wszystkich publikacjach stanowiących osiągnięcie naukowe jestem autorem pierwszym i korespondencyjnym.

Prace prezentują wyniki badań nad zróżnicowaniem strukturalnym i funkcjonalnym drobnych korzeni drzew leśnych. Zróżnicowanie korzeni na odpowiedzialne za eksplorację gleby w poszukiwaniu składników mineralnych i wody oraz związane z pobieraniem jest jednym ze źródeł sukcesu rozwojowego roślin. Ten podział funkcji okazuje się szczególnie istotny w trakcie działania czynników stresowych, takich jak niedobór substancji mineralnych lub susza, wówczas bowiem kluczowe jest zapewnienie możliwie szybkiego dostępu do wody i składników mineralnych. Między innymi dlatego w pełni uprawnionym wydaje się stwierdzenie, że poznanie zależności pomiędzy funkcją korzeni a ich budową ma podstawowe znaczenie dla zrozumienia funkcjonowania drzew a nawet całych ekosystemów leśnych. W pracach badawczych skupiałem się na poszukiwaniu przystosowań morfologicznych i anatomicznych w obrębie korzeni drobnych ($\phi < 2$ mm) do pełnienia przez nie różnych funkcji. Podczas klasyfikowania korzeni zastosowałem model hierarchiczny, tzn. korzenie zakończone wierzchołkiem oznaczone zostały jako korzenie I rzędu, korzenie II rzędu występowały w miejscu połączenia korzeni I rzędu *etc.* Pozwoliło to na precyzyjne określenie, które z korzeni w obrębie grupy korzeni drobnych o $\phi < 2$ mm pełnią funkcje absorpcyjne, a które transportowe. Prezentowane badania koncentrowały się wokół kilku głównych zagadnień dotyczących: i) zależności strukturalno-funkcjonalnych w obrębie korzeni I rzędu; ii) anatomicznego oraz funkcjonalnego zróżnicowania korzeni drobnych wzrastających na glebach różniących się żyznością; iii) adaptacji korzeni drobnych do zmieniającego się środowiska, analizowanych w gradiencie temperaturowym. Wyjaśnianie tych problemów badawczych pozwoliło na wypełnienie kilku luk dotyczących zróżnicowania korzeni w obrębie systemu korzeniowego. Jednocześnie, dzięki tym studiom, w szerokim kontekście ukazane zostało funkcjonowanie korzeni w różnych stadiach wiekowych, w trakcie sezonu wegetacyjnego oraz w gradiencie środowiskowym.

Analiza funkcjonalna zróżnicowania korzeni I rzędu w odniesieniu do ich budowy anatomicznej i intensywności zasiedlenia przez grzyby symbiotyczne była przedmiotem pierwszej pracy pt. *Contrasting the morphology, anatomy and fungal colonization of new pioneer and fibrous roots* (Zadworny i Eisenstat 2011). W obrębie korzeni I rzędu roślin drzewiastych można wyróżnić krótkie korzenie absorpcyjne, których rolą jest pobieranie wody i składników mineralnych oraz długie korzenie pionierskie, przerastające szybko glebę i stanowiące swoiste punkty wyjścia dla dalszego rozwoju systemu korzeniowego, z nich bowiem rozwijają się odgałęzienia systemu absorpcyjnego. Znaczenie obserwowanego zróżnicowania skłoniło mnie do postawienia pytania na jakim etapie rozwoju ta odrębność korzeni, pełniących różne funkcje, jest możliwa do zaobserwowania. Pytanie wydało mi się na tyle interesujące, że podjąłem próbę znalezienia na nie odpowiedzi. Do prac wybrałem kilka gatunków drzew: *Acer negundo*, *Acer saccharum*, *Juglans nigra*, *Liriodendron tulipifera* oraz *Populus tremuloides*. Badania rozpocząłem od prześledzenia rozwoju korzeni I rzędu w pierwszych dniach ich wzrostu, koncentrując się na różnicach w budowie morfologicznej i anatomicznej. Opis struktury stał się punktem wyjścia do poszukiwania czynników definiujących funkcje korzenia, określenia kiedy zostaje ona zdeterminowana i jakie mechanizmy to warunkują. Stosując metody histologiczne potwierdzono występowanie istotnego zróżnicowania w budowie anatomicznej, tempie wzrostu i mykoryzacji pomiędzy korzeniami absorpcyjnymi i pionierskimi wybranych gatunków drzew. Zastosowany układ doświadczalny, z wykorzystaniem okien ryzotronowych, pozwalających na obserwację wzrostu korzeni w czasie rzeczywistym, stworzył szansę uzyskania odpowiedzi na pytania i) czy czynnikiem kontrolującym zasiedlanie korzeni jest, niezależne od gatunku drzewa, tempo ich wzrostu, czy też ii) korzenie różnych gatunków drzew cechują się własną dynamiką zasiedlania przez organizmy symbiotyczne. W ramach prac nad oszacowaniem wpływu zróżnicowanego tempa wzrostu korzeni na intensywność ich zasiedlania przez grzyby symbiotyczne, wykazano odmienne wzory kolonizacji dla korzeni absorpcyjnych i pionierskich w początkowych fazach wzrostu. Szybko rosnące korzenie pionierskie były sporadycznie zasiedlane zarówno przez grzyby mykoryzowe, jak i niemykoryzowe. Również czas i poziom kolonizacji korzeni przez grzyby symbiotyczne był ściśle zależny od tempa wzrostu. W porównaniu z gatunkami drzew cechujących się wolniejszym tempem wzrostu korzeni absorpcyjnych (*Juglans nigra*, *Liriodendron tulipifera*), te których korzenie

absorpcyjne charakteryzuje szybkie tempo wzrostu były zasiedlane w niższym stopniu. Niejednorodne zasiedlanie korzeni przez grzyby mykoryzowe wynikało z ich zróżnicowanej budowy. Korzenie pionierskie w przeciwieństwie do absorpcyjnych miały większą średnicę, większą liczbą biegunów protoksylemu, jak również więcej warstw hypodermy z rzadziej występującymi komórkami przepustowymi. Taka budowa oprócz wyższej odporności korzeni na biotyczne i abiotyczne czynniki stresowe (kosztem zmniejszenia kolonizacji przez grzyby mykoryzowe i tym samym ograniczenia absorpcyjnych właściwości), umożliwia szybko przerastającym glebę korzeniom pionierskim późniejsze usytuowanie korzeni absorpcyjnych w obszarach zasobnych w wodę oraz składniki mineralne. Wykazanie strukturalnego zróżnicowania w obrębie nowo powstających korzeni I rzędu, i tym samym ich dookreślonych funkcji, może istotnie wpłynąć na rozwój poglądów na temat aktywności systemów korzeniowych drzew leśnych.

Występowanie zróżnicowania w obrębie korzeni I rzędu stało się bodźcem do podjęcia prac nad określeniem zależności pomiędzy zmiennością sezonową a budową anatomiczną, cechami morfologicznymi oraz poziomem azotu i węgla w obrębie różnych rzędów korzeni drobnych (Zadworny i in. 2015). Do badań wybrano 40-letnie dęby (*Quercus robur*) rosnące na dwóch rodzajach gleb różniących się zasobnością. Wiedza o budowie poszczególnych rzędów korzeni ma fundamentalne znaczenie w określaniu ich sezonowej zmienności oraz roli w obiegu pierwiastków w ekosystemach leśnych. Odmienne funkcje pełnione przez poszczególne rzędy korzeni są bezpośrednio związane z ich strukturą i tym samym z odmiennym składem chemicznym tkanek. Przyjęto założenie, że pewne cechy korzeni będą wykazywać zmienność sezonową, co oczywiście miałyby konsekwencje dla pozyskiwania i dystrybucji składników pokarmowych, zarówno w czasie aktywności, jak i przejścia w stan spoczynku. Przeprowadzone badania wykazały, że budowa anatomiczna korzeni drobnych dębu nie jest uwarunkowana rodzajem gleby i żyznością siedliska. Również takie cechy jak średnica korzenia i stosunek długości korzenia do jego masy nie zależały od rodzaju gleby. Zaobserwowano jednakże zwiększenie (pod koniec sezonu wegetacyjnego) zawartości azotu w obrębie czwartego i wyższych rzędów korzeni (transportowych) i jednocześnie spadek zawartości azotu w korzeniach niższych rzędów (absorpcyjnych). Jak się wydaje, ów wyższy poziom azotu w okresie jesiennym, zaobserwowany u trwalszych korzeni transportowych (cechujących się budową wtórną), wskazuje na strategię alokowania tego

pierwiastka, i uniknięcia jego strat podczas potencjalnej degradacji czy uszkodzeń korzeni absorpcyjnych (silnie narażonych na niekorzystne czynniki środowiskowe w okresie zimowym). Wynik ten redefiniuje postrzeganie poziomu azotu jako wyznacznika aktywności metabolicznej. Zwiększenie jego puli pod koniec sezonu wegetacyjnego w korzeniach wyższych rzędów o budowie wtórnej (transportowych), a obniżenie w korzeniach niższych rzędów (absorpcyjnych), wskazuje na występowanie mechanizmów umożliwiających szybkie uwalnianie azotu z tych rezerwuarów i wykorzystywanie do budowy korzeni drobnych i szybkiego ich wzrostu wiosną (Zadworny i in. 2015). Jest prawdopodobne, że mechanizm oparty na alokacji azotu, zapewniający szybki rozwój korzeni drobnych wiosną, ma charakter uniwersalny. Nie mniej jednak może on również zależeć od gatunku, formy życiowej, światłoządności bądź rodzaju sukcesji, co wymaga dalszych, intensywnych badań.

W obszarze moich zainteresowań znalazła się również analiza zależności pomiędzy biogeograficznymi czynnikami środowiskowymi a funkcjonowaniem sosny zwyczajnej. Badania w tym zakresie prowadzę w ramach projektu Maestro pt. *Geograficzne trendy zmienności cech funkcjonalnych sosny zwyczajnej w Europie w kontekście zmian klimatycznych i procesów ekologicznych*, kierowanego przez prof. Jacka Oleksyna. Prawidłowa ocena wpływu czynników biogeograficznych jest, w moim przekonaniu, niemożliwa bez uwzględnienia możliwości adaptacji organu odpowiedzialnego za absorpcję wody i składników mineralnych, a więc systemu korzeniowego. Dotychczasowy opis adaptacji sosny zwyczajnej do warunków środowiskowych, biorący pod uwagę rozległy obszar jej występowania, tylko w niewielkim stopniu uwzględniał system korzeniowy. Podjęto więc badania (Zadworny i in. 2016a,b), których głównym celem było określenie czynników mogących mieć wpływ na procesy zachodzące w korzeniach sosen wzrastających w gradiencie temperaturowym. Korzenie sosen zebrano zarówno z transektu, jak i stanowiących punkt odniesienia sosen pochodzących z Litwy oraz Rosji, wzrastających w doświadczeniu proveniencyjnym (a więc na tej samej powierzchni, w tych samych warunkach środowiskowych). Taki materiał porównawczy pozwolił na rozważenie czy korzenie są zdolne do plastycznego przystosowania się do zmian środowiskowych, czy też, pozostając na jakiejś „wewnętrznej uwięzi”, ich zdolność adaptacyjna jest ograniczona. Innymi słowy czy korzenie są aktywnym „graczem”, w znacznym stopniu warunkującym plastyczność sosny zwyczajnej. Subtelna równowaga ekosystemów leśnych, ustalona m.in.

przez sieć wzajemnych zależności pomiędzy zasiedlającymi glebę mikroorganizmami, grzybami mykoryzowymi, pozostającymi w związku symbiotycznym z drzewem, a czynnikami klimatycznymi/edaficznymi, wpływa na przebieg procesów fizjologicznych korzeni. Mikroorganizmy glebowe mają bowiem szczególne znaczenie dla procesów uwalniania składników pokarmowych z ulegającej rozkładowi materii organicznej, tworzonej przez opadające igły, resztki kory itp. Składniki pokarmowe, uwolnione przez mikroorganizmy glebowe, są pobierane przez pozostające w symbiozie z grzybami mykoryzowymi korzenie i następnie wykorzystywane w wielu zachodzących w roślinie procesach. Jednakże w warunkach dalekiej północy, w wyniku długotrwałego utrzymywania kseromorficznych, mocno zliżnifikowanych igieł, powstająca z nich materia organiczna jest trudna do rozłożenia. Niska temperatura gleby, ograniczająca aktywność mikroorganizmów glebowych i mobilność pierwiastków, czyni pozyskiwanie składników pokarmowych procesem bardzo utrudnionym. Oprócz niskiej temperatury, niższej zasobności siedliska i krótkiego sezonu wegetacyjnego, czynnikiem znacząco modulującym funkcjonowanie roślin jest fotoperiod. Wpływa on bowiem na zahamowanie wzrostu części nadziemnej na długo przed nadejściem mrozów i czyni korzenie, wzrastające tak długo jak długo występują sprzyjające warunki termiczne, głównym odbiorcą węglowodanów. Mechanizm ten powoduje, że korzeń nie podlegający ograniczeniom wynikającym z działania fotoperiodu, stanowi głównego beneficjenta zwiększonego napływu węglowodanów, będących materiałem koniecznym do wytworzenia nowych tkanek. Dłuższy czas wzrostu korzeni może być jednym z zasadniczych czynników odpowiedzialnych za zwiększający się, wraz ze spadkiem średniej rocznej temperatury, udział korzeni w całkowitej biomase roślin. Jednakże, jak do tej pory nie było wiadomym, na ile w warunkach ograniczonej dostępności i mobilności składników pokarmowych, zwiększona biomasa korzeni przedkłada się na wzrost zdolności pozyskiwania składników mineralnych. W prowadzonych badaniach postanowiono zatem sprawdzić czy obserwowany wzrost biomasy jest prostą zmianą ilościową, czy też ma charakter zmiany jakościowej, potencjalnie zwiększającej absorpcję wody i składników mineralnych (Zadworny i in. 2016a). Zastosowanie modelu hierarchicznego podczas klasyfikowania korzeni, umożliwiło weryfikację założenia o zwiększeniu udziału korzeni absorpcyjnych w ogólnej puli korzeni drobnych, wraz ze wzrastającą szerokością geograficzną. Byłoby to kluczowe dla utrzymania zdolności pozyskiwania wody i składników mineralnych w północnych

warunkach. Uzyskane wyniki wskazały na zwiększenie frakcji korzeni absorpcyjnych, w obrębie II, III oraz IV rzędu spośród wszystkich analizowanych rzędów korzeni, wraz ze spadkiem średniej rocznej temperatury powietrza. Zwiększenie roli korzeni absorpcyjnych w warunkach północnych wyrażało się również wyższym, w stosunku do populacji południowych, ich udziałem w biomacie korzeni. W warunkach doświadczenia proveniencyjnego, obejmującego uzyskane z nasion populacje sosny pochodzące z północnej i centralnej Europy, uzyskano podobne wyniki. Powtarzający się, zarówno w transekcie jak i w doświadczeniu proveniencyjnym, wzrost udziału korzeni absorpcyjnych i ich masy, sugeruje genetyczne utrwalenie schematu budowy korzeni i alokacji biomasy. Wyniki uzyskane w doświadczeniu proveniencyjnym, cechującym się wyrównanymi warunkami wzrostu dla wszystkich analizowanych populacji (żyzność gleby, opady, temperatura) stanowią potwierdzenie, zapisanego na poziomie genetycznym, wzoru budowy korzeni. Badania wykazały bowiem wyższy udział korzeni absorpcyjnych u sosen proveniencji północnych. Budowa systemu korzeniowego sugeruje zatem ścisły związek pomiędzy typem budowy korzeni i ich masą, a charakterystyczną dla północnych warunków, słabą dostępnością składników pokarmowych, będącą pochodną występowania niskich temperatur. Warunki wzrostu północnych populacji sosny zwyczajnej, cechujące się niską temperaturą i małą zasobnością siedliska, mogą wpływać nie tylko na zwiększenie potencjału pozyskiwania składników pokarmowych (rozbudowy korzeni absorpcyjnych), ale również przyczyniać się do wytworzenia bardziej trwałych korzeni. Wydłużenie czasu życia korzeni, lepiej chronionych przed niekorzystnymi czynnikami środowiskowymi, wiąże się jednak zwykle ze zmniejszeniem ich zdolności absorpcyjnych. Szczęólnego znaczenia nabierają zatem pytania: na ile struktura korzeni sosny zwyczajnej jest modyfikowana wraz z obniżającą się temperaturą środowiska oraz czy ta modyfikacja może być traktowana jako swoistego rodzaju kompromis pomiędzy trwałością/długością życia a pełnioną funkcją. W celu określenia tych zależności przeanalizowano cechy morfologiczne, biochemiczne oraz związane z pełnieniem funkcji obronnych w obrębie 10 rzędów korzeni, pobranych z sosen rosnących wzdłuż transektu liczącego 2000 km (Zadworny i in. 2016b). Podjęto próbę określenia zróżnicowania w obrębie grup funkcjonalnych korzeni drobnych (absorpcyjne i transportowe). Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazały na silną zależność niektórych cech korzeni od średniej rocznej temperatury powietrza. Cechy takie jak wzrost średnicy korzeni,

spadek długości korzeni w stosunku do masy oraz obniżenie gęstości korzeni szły w parze z malejącą, wraz przesuwaniem się na północ, temperaturą. Na szczególną uwagę zasługuje zmniejszenie, potencjału obronnego korzeni absorpcyjnych, wynikające z obniżenia poziomu związków fenolowych. Z drugiej strony należy jednak podkreślić, że czynnikiem odpowiadającym za ochronę korzeni absorpcyjnych mogą również być, pozostające z nimi w związku symbiotycznym, grzyby mykoryzowe. Wskazywałoby na to zwiększanie szerokości mufki, wraz ze spadkiem średniej rocznej temperatury powietrza. Wpływa to z pewnością nie tylko na zwiększenie zdolności pozyskiwania składników pokarmowych, ale także na wzmocnienie ochrony korzenia przez osłonięcie go grubszą otuliną (Zadworny i in. 2016a). Zupełnie odmienny trend można zauważyć w obrębie korzeni transportowych, dzięki swej budowie, lepiej chronionych przed niekorzystnymi warunkami środowiskowymi. Korzenie absorpcyjne (cechujące się zdolnością pozyskiwania składników mineralnych i wody) oraz korzenie transportowe (które utraciły zdolności chłonne) charakteryzują inne strategie trwania. Ograniczenie inwestycji w strukturę i chemiczną ochronę korzeni absorpcyjnych zwiększa potencjał pozyskiwania wody i składników mineralnych w gradiencie południe – północ. Korzenie transportowe, odgrywające zasadniczą rolę w transporcie wody i składników mineralnych, charakteryzowały się lepszą strukturalną ochroną (większa liczba warstw korka). Zatem sama budowa korzeni transportowych i bezpieczeństwo termiczne uzyskane poprzez izolację tkanek głębiej położonych za pomocą korka, wydłuża czas ich funkcjonowania i przyczynia się tym samym do redukcji kosztów wynikających z konieczności wytworzenia nowych tkanek i zastępowania obumarłych korzeni.

Analizy ścisłego związku strukturalno-funkcjonalnego w obrębie korzeni drobnych, odpowiedzialnych za absorpcję składników pokarmowych i wody oraz korzeni transportowych, gwarantujących rozbudowę systemu korzeniowego, w gradiencie temperaturowym, wzdłuż transektu Polska, Szwecja i Finlandia, umożliwiło lepsze poznanie przystosowań korzeni do pełnienia zróżnicowanych funkcji w różnych warunkach glebowych i klimatycznych. Odmienne strategie adaptacyjne różnych typów korzeni pozwalają na plastyczne dostosowanie systemu korzeniowego do miejsca i czasu, a tym samym są jednym z podstawowych elementów zapewniających wzrost i rozwój drzewa w ramach całego zasięgu.

Do najważniejszych wyników moich badań należą:

- Funkcjonalna charakterystyka korzeni I rzędu (absorpcyjnych i pionierskich) na przykładzie wybranych gatunków drzew leśnych;
- Opisanie wpływu typu i zasobności siedliska na morfo-anatomiczne zróżnicowanie korzeni drobnych dębu szypułkowego;
- Wykazanie zmniejszenia poziomu azotu w obrębie korzeni absorpcyjnych a zwiększenia w korzeniach transportowych dębu szypułkowego pod koniec sezonu wegetacyjnego;
- Określenie zmienności cech anatomicznych korzeni drobnych sosny zwyczajnej w gradiencie temperaturowym
- Wykazanie, utrwalanego w procesie adaptacyjnym do trudnych warunków północy, wzoru budowy anatomicznej korzeni drobnych sosny zwyczajnej;
- Wykazanie, zachodzącej wzdłuż transektu południe-północ, zmiany jakościowej w biomase korzeni drobnych sosny zwyczajnej;
- Wykazanie istotnej zależności pomiędzy strukturą i czasem trwania a funkcją pełnioną przez korzenie absorpcyjne i transportowe sosny zwyczajnej.

Znajomość budowy anatomicznej pozwala wskazać uwarunkowania strukturalne, umożliwiające poszczególnym typom korzeni pełnienie właściwych im funkcji. Uzyskane wyniki wykazują istnienie zasadniczych różnic jakościowych i ilościowych w obrębie korzeni drobnych. Znajduje to swoje przełożenie na przetrwanie roślin, zarówno na glebach centralnej jak i północnej Europy, różniących się dostępnością i mobilnością składników pokarmowych. Wiedza na temat przystosowania grup funkcjonalnych korzeni drobnych do zmieniającego się środowiska, nabiera szczególnego znaczenia w przypadku szacowania obiegu pierwiastków w przyrodzie, ale też w pewnym stopniu pozwala prognozować przebieg procesów adaptacyjnych drzew do zmieniających się warunków klimatycznych. Uzyskane wyniki wskazują, że utrwalenie cech determinujących przystosowanie sosny do skrajnych warunków środowiskowych może decydować o przetrwaniu w zmieniających się warunkach klimatycznych. Istnieje zatem potrzeba ustalenia cech, których zakres zmienności znacząco wpływając na wytrzymałość roślin w różnych warunkach środowiskowych, może

najlepiej tłumaczyć adaptację zachodzącą na skutek zmian klimatycznych również w obrębie innych gatunków.

4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

A) Dorobek naukowy

W obszarze moich zainteresowań naukowych szczególne miejsce zajmuje problematyka związana z szeroko pojętymi oddziaływaniami na styku środowisko – system korzeniowy roślin drzewiastych. Oprócz czterech prac składających się na osiągnięcie naukowe, w swoim dorobku posiadam 25 oryginalnych prac indeksowanych przez Journal Citation Reports, 8 publikacji nieindeksowanych (6 anglojęzycznych i 2 w języku polskim). Jestem również współautorem 28 doniesień prezentowanych na konferencjach krajowych i międzynarodowych. Łączny impact factor (zgodny z rokiem opublikowania) tych pozycji wynosi 66.153 (bez prac wydzielonych jako osiągnięcie naukowe), a sumaryczna liczba punktów MNiSW to 844 (z wyłączeniem prac stanowiących osiągnięcie naukowe).

Pierwsze artykuły, których jestem współautorem, obejmują wyniki pracy magisterskiej, wykonanej w Instytucie Dendrologii pod kierunkiem prof. Antoniego Wenera. Badania, prowadzone w kulturach *in vitro*, dotyczyły wpływu grzybów glebowych na zdolność adaptowania się grzybów mykoryzowych do środowisk gleb uprawianych rolniczo i odłogowanych (Werner i Zadworny 2002ab, 2003). Kolejny projekt, realizowany wspólnie z kolegami z ID PAN, koncentrował się na wpływie czynników abiotycznych na stopień porażenia *Quercus robur* przez *Microsphaera alphitoides* (Grzebyta i in. 2005). Ważnym punktem, który silnie wpłynął na rozwój moich badawczych zainteresowań, były prace nad wczesnymi etapami oddziaływań pomiędzy sosną zwyczajną, a różnymi grupami intersterylnymi korzeniowca wieloletniego (*Heterobasidion annosum*), jednego z najgroźniejszych gospodarczo grzybów pasożytniczych, rozwijających się na korzeniach drzew (Werner i in. 2005, 2006).

Realizacja pracy magisterskiej, dzięki znakomitemu podejściu profesora Antoniego Wenera, była pasjonującą przygodą naukową. To pozytywne, inspirujące i twórcze spotkanie z nauką stało się dla mnie bodźcem do podjęcia studiów doktoranckich i dalszego rozwoju naukowego pod kierunkiem prof. Wenera, który został promotorem mojej pracy

doktorskiej. Zająłem się w niej zagadnieniami związanymi z antagonistycznymi właściwościami grzybów mykoryzowych, a w szczególności określeniem wpływu tych właściwości na przeżywalność siewek sosny zwyczajnej introdukowanych do gleb wyłączonych z działalności rolniczej. Wstępne prace o charakterze selekcyjnym miały na celu przeprowadzenie oceny znaczenia symbiozy mykoryzowej w procesie adaptowania sadzonek sosny do gleb porolnych. Polegały one na obserwacji oddziaływań pomiędzy grzybami mykoryzowymi, a grzybami saprotroficznymi w warunkach *in vitro*. Przekształciły się wkrótce w badania nad wzajemnymi zależnościami pomiędzy rośliną a grzybami ektomykoryzowymi i grzybami saprotroficznymi w okresie poprzedzającym nawiązanie związku mutualistycznego. Określenie wzajemnych relacji i odpowiedni wybór grzyba mykoryzowego, wzmacniającego kondycję roślin wzrastających na gruntach porolnych, może mieć bowiem bardzo praktyczne zastosowanie. Głównym celem omawianych badań było jednak poszukiwanie czynników i mechanizmów umożliwiających grzybom mykoryzowym przełamanie oporu mikrobiologicznego środowiska ekspansywnych grzybów saprotroficznych. W zależności od gatunku grzyba saprotroficznego, były nimi czynne reakcje odpornościowe bądź zmiany chemizmu struktur powierzchniowych oddziałujących grzybów - stymulujące lub hamujące kiełkowanie zarodników grzybów. Stosując metody cytochemiczne i immunocytochemiczne ujawniono istnienie mechanizmów ograniczających rozwój ekspansywnych grzybów saprotroficznych. Przeprowadzone obserwacje wykazały zdolność ograniczania kiełkowania zarodników oraz penetracji strzępek grzybów saprotroficznych z rodzaju *Trichoderma* przez izolat grzyba mykoryzowego *Laccaria laccata*. Obserwacje interakcji pomiędzy grzybami mykoryzowymi a grzybami saprotroficznymi gleb porolnych, zrodziły kolejne pytania o to jakie zmiany poprzedzają/wywołują efekt tych interakcji. Analizując modyfikacje na poziomie komórkowym wykazano kluczową rolę cytoszkieletu i mitochondriów w procesie przełamania oporów środowiska zbiorowisk mikroorganizmów gleb wyłączonych z działalności rolniczej. Znajomość na poziomie komórkowym efektów oddziaływań w obrębie układu mikroorganizmy pozaryzosferowe - grzyb mykoryzowy może w przyszłości zostać wykorzystana w praktyce leśnej. Uzyskane wyniki, sugerujące istnienie antagonistycznych oddziaływań pomiędzy badanymi organizmami, zostały potwierdzone podczas analizy możliwości pozyskiwania przez grzyby mykoryzowe składników pokarmowych ze struktur grzybów saprotroficznych. W eksperymencie z wykorzystaniem promieniotwórczego izotopu

fosforu (fosfor-32, ^{32}P), wykazałem przemieszczanie ^{32}P , wbudowanego w zarodniki grzyba saprotroficznego, do mykoryzowych siewek sosny. Doświadczenia te sugerują, iż w strefie lasów borealnych i w lasach chłodnej strefy umiarkowanej, podstaw szybkiej translokacji składników pokarmowych należy upatrywać w bezpośrednich oddziaływaniach pomiędzy mikroorganizmami. Wyniki uzyskane w ramach realizacji pracy doktorskiej przedstawiono w czterech publikacjach naukowych (Zadworny i in. 2004, Zadworny i in. 2007ab, Zadworny i in. 2008).

W latach 2001-2006, zaangażowałem się w kolejny projekt kierowany przez profesora Wernera. W ramach tego grantu analizowałem uwarunkowania zróżnicowanej odporności sosny zwyczajnej porażonej korzeniowcem wieloletnim (*Heterobasidion annosum* s.l.). Badaniami objęto trzy grupy intersterylne korzeniowca (obecnie w randze trzech odrębnych gatunków *Heterobasidion annosum* s.s., *H. parviporum* i *H. abietinum*). Cechuje je odmienna agresywność i patogeniczność w stosunku do sosny, świerka i jodły, wyrażająca się różną zdolnością przerastania i degradacji drewna bielastego. Badania, z zastosowaniem technik mikroskopii skaningowej, nad kiełkowaniem zarodników konidialnych izolatów *Heterobasidion annosum* s.s., *H. parviporum* i *H. abietinum* na korzeniach siewek sosny i jodły wykonane w warunkach *in vitro*, wskazują na istnienie różnych preferencji patogenów wobec właściwych drzew gospodarzy ujawniających się już w pierwszych etapach interakcji.

Prace, dotyczące analizy mechanizmów warunkujących odporność lub podatność roślin na infekcję patogenami grzybowymi, wykazującymi zróżnicowany stopień preferencji w stosunku do rośliny-gospodarza, kontynuowałem po uzyskaniu stopnia doktora, w ramach własnego projektu badawczego zatytułowanego „Rola cytoszkieletu komórkowego w reakcji obronnej siewek sosny zwyczajnej po zakażeniu szczepami reprezentującymi różne grupy intersterylne korzeniowca wieloletniego” (projekt finansowany przez MNiSW nr N309377733). Badania dotyczyły określenia roli cytoszkieletu komórkowego w reakcji obronnej komórek korzeni sosny zwyczajnej porażonych różnymi izolatami należącymi do kompleksu *Heterobasidion annosum* s.l. W ramach obserwacji układu cytoszkieletu komórkowego siewek *Pinus sylvestris* zainfekowanych różnymi izolatami grzybów patogenicznych *Heterobasidion annosum* s.s., *H. parviporum* i *H. abietinum*, wykazano znaczące zróżnicowanie reakcji cytoszkieletu w obrębie komórek kory pierwotnej korzeni. Ponadto, zastosowanie związków zaburzających układ cytoszkieletu komórkowego korzenia

rośliny – gospodarza, istotnie zwiększało stopień jego skolonizowania przez izolaty gatunków o niższej preferencji (mniej inwazyjnych). Uzyskane wyniki wskazały także na występowanie związku pomiędzy zmianami układu cytoszkieletu a wyzwalaniem odporności roślin, obejmującym uruchamianie ekspresji syntazy kalozy. Zaobserwowano bowiem zróżnicowaną syntezę mRNA syntazy kalozy w korzeniach, pod wpływem infekcji strzępkami izolatów różnych gatunków *H. annosum* s.l. Najsilniejszy sygnał transkryptu syntazy kalozy, zarówno w jądrze komórkowym jak i w cytoplazmie, obserwowano w komórkach w ścisłym sąsiedztwie strzępek grzyba, przy czym czas reakcji był zależny od gatunku. Wykazujące większą specyficzność w stosunku do korzeni sosny szczepy *H. annosum* s.s., wyzwały również sygnał w oddalonych od zainfekowanych komórek, głębszych warstwach kory pierwotnej korzenia. Zastosowanie związków wpływających na układ cytoszkieletu obraz ten zmieniało. Wyniki doświadczeń jednoznacznie wykazały, że układ cytoszkieletu, zarówno aktynowego, jak i tubulinowego, komórek kory pierwotnej korzeni *P. sylvestris*, jest jednym z najistotniejszych czynników odgrywających rolę w procesie infekcji, mogących, w sposób bezpośredni, wpływać na wielkość szkód wyrządzanych przez różne gatunki *H. annosum* s.l. (Zadworny i in. 2012, 2013).

Badania dotyczące interakcji grzybów i korzeni drzew leśnych prowadziłem także w ramach projektu pt. „Rola żelaza w reakcji obronnej siewek sosny zwyczajnej na porażenie izolatami *Heterobasidion annosum* należącymi do różnych grup intersterylnych oraz udział związków niskocząsteczkowych patogena w zakażaniu gospodarza”, nr N309136935 kierowanego przez dr Joannę Muchę. Dotyczył on roli związków niskocząsteczkowych w początkowych etapach nawiązywania oddziaływań pomiędzy grzybami o różnych strategiach troficznych, a korzeniami drzew lasotwórczych w Polsce. Badania pozwoliły m.in. wykazać gatunkowo specyficzne zaangażowanie nadtlenu wodoru i żelaza w wywoływaniu reakcji nadwrażliwości i śmierci komórek korzeni sosny zwyczajnej. Stwierdzono ponadto, że izolaty *H. annosum* s.s. charakteryzowały się ścisłą zależnością pomiędzy poziomem związków katecholowych, a intensywnością zamierania komórek gospodarza. Efektem tych wieloletnich badań jest obszerne studium nad przebiegiem infekcji korzeni siewek sosny, wywołanej izolatami grzyba *H. annosum* s.l., wykazującymi odmienne preferencje w stosunku do drzew-żywicieli przedstawione jako cykl publikacji (Mucha i in. 2012, 2013, 2015ab).

Potrzeba poszukiwania odpowiedzi na pojawiające się kolejne pytania badawcze była motorem dla przygotowania wniosków grantowych i pozwoliła zdobywać niezbędne doświadczenie w samodzielnym pozyskiwaniu środków finansowych. Zarówno realizacja własnych projektów, jak i zaangażowanie w grantach kolegów było dla mnie lekcją pracy zespołowej, wyważonej dyskusji, prezentacji wyników i przygotowywania wspólnych publikacji, a także (a może przede wszystkim) pokory.

W mojej zawodowej drodze bardzo ważnym doświadczeniem, rozwijającym i formującym, był pobyt na stażu naukowym w laboratorium prof. Davida Eissenstata na Uniwersytecie Stanowym w Pensylwanii. Roczna praca w tej grupie badawczej pozwoliła poznać inny model pracy, nawiązać owocne kontakty naukowe, ale także ukierunkowała moje zainteresowania badawcze wokół analizy zależności pomiędzy strukturą poszczególnych rzędów korzeni, a pełnioną przez nie funkcją.

W efekcie odbytego stażu nadrzędnym celem prowadzenia licznych doświadczeń dotyczących biologii korzeni drzew, było określenie wpływu poszczególnych rzędów korzeni na zdolność proliferacji i nawiązywania układów symbiotycznych w warunkach zróżnicowanej dostępności składników pokarmowych. Uzyskane wyniki badań, prowadzonych w środowisku zasobnym w składniki pokarmowe, wskazują na wyższą zdolność proliferacji cienkich, stosunkowo krótkotrwałych, korzeni absorpcyjnych gatunków mniej zależnych od symbionta mykoryzowego, w porównaniu do długo żyjących korzeni gatunków drzew silniej uzależnionych od związku mykoryzowego. Gatunki cechujące się drobnymi korzeniami o wysokiej wartości stosunku długości do masy (SRL), wykazywały wyższą zdolność formowania rozgałęzień, większy rozrost korzeni w obecności łatwo przyswajalnych substancji pokarmowych i niższy stopień kolonizacji. Ich intensywnie rozrastający się system korzeniowy kompensuje zmniejszony stopień mykoryzacji, zwłaszcza w miejscach zasobnych w składniki pokarmowe. Gatunki o niskim współczynniku SRL wydają się z kolei w wyższym stopniu uzależnione od nawiązania i utrzymania związku mykoryzowego. Wyniki przeprowadzonych badań, dowodzące istnienia różnych strategii pozyskiwania składników pokarmowych w obrębie gatunków o zróżnicowanej morfologii korzeni, zostały zaprezentowane w formie publikacji (Eissenstat i in. 2015).

Istotnym wynikiem było również wykazanie funkcjonalnego zróżnicowania cech, mających niebagatelny wpływ na zdolność korzeni do pobierania i transportu składników

pokarmowych oraz wody, pomiędzy gatunkami drzew nawiązujących dwa odmienne typy symbiozy mutualistycznej. Zaobserwowano, że średnica przekroju korzeni pierwszych rzędów była sprzężona z rodzajem symbiozy mykoryzowej, determinującej relacje pomiędzy efektywnością transportu wody a długością życia korzeni (Zadworny i in. przesłano do czasopisma). Poszukiwanie funkcji pełnionej przez poszczególne komponenty systemu korzeniowego, zaowocowało zaproszeniem do udziału w przygotowaniu pracy przeglądowej zestawiającej dotychczasową wiedzę na temat grup funkcjonalnych w ramach korzeni drobnych (McCormack i in. 2015).

Ważnym zagadnieniem badawczym jest poznanie zależności pomiędzy strukturą systemu korzeniowego, a zamieraniem drzewostanów dębowych. Czynnikiem ekologicznym, w istotny sposób wpływającym na wzrost dębu szypułkowego (*Quercus robur*) są warunki hydrologiczne, a to właśnie architektura systemu korzeniowego dębów sprzyja przewyciężaniu długotrwałych niedoborów wody. Niestety, powszechnie stosowany w większości krajów na świecie system prowadzenia upraw sadzonek dębów w szkółkach, związany jest z podcinaniem korzenia głównego na głębokości 10-15 cm. Zaburza to naturalny proces rozwoju systemu korzeniowego, przyczyniając się tym samym do obniżenia przeżywalności upraw dębowych w okresie długotrwałego występowania suszy glebowej. Straty spowodowane zamieraniem upraw tego gatunku są bardzo poważnym problemem gospodarczym w lasach. W ramach realizowanych projektów „Struktura systemu korzeniowego a zamieranie drzewostanów dębowych” nr IP2010048570 oraz „Biologia korzeni jako czynnik kształtujący podatność dębów na okresowe zamieranie” nr 2011/01/D/NZ9/02871 przyjęto hipotezę, że istnieje silna zależność pomiędzy podatnością dębów na zamieranie, będące skutkiem ich osłabienia w warunkach stresu środowiskowego, a zaburzeniem funkcji systemu korzeniowego, wynikającej z odcięcia korzenia głównego. Scharakteryzowanie związku pomiędzy strukturą systemu korzeniowego a zamieraniem drzewostanów dębowych, może się przyczynić do wypracowania technologii zakładania upraw mniej podatnych na zamieranie, w okresach suszy powtarzających się w kilku kolejnych latach (Zadworny i in. 2014). Umożliwi tym samym zwiększenie efektywności zrównoważonego gospodarowania w tych drzewostanach.

Moje zaangażowanie i doświadczenie naukowe zostało zauważone przez redaktorów czasopism, dla których wykonałem recenzje prac naukowych. Były to *Acta Physiologiae*

Plantarum, Biocontrol Science and Technology, Dendrobiology, Global Change Biology, Journal of Ecology, Journal of Forest Research, Journal of Mountain Science, Mycorrhiza, Planta, Plant and Soil, The Journal of Horticultural Science & Biotechnology, Tree Physiology, Turkish Journal of Forestry and Agronomy.

Wykaz wszystkich moich publikacji oraz pozostałe działania składające się na moją aktywność naukową przedstawiłem w załączonym wykazie opublikowanych prac naukowych (załącznik nr 6) wraz z informacją o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki (załącznik nr 7).

Podsumowanie aktywności naukowej:

Zestawienie liczbowe wszystkich osiągnięć naukowych

Typ publikacji	I. Przed doktoratem	II. Po doktoracie	Razem I + II		
PRACE ORYGINALNE			Liczba	IF	MNiSW
w czasopismach z bazy JCR	3	26	29	92.039	1029
w recenzowanych czasopismach anglojęzycznych spoza bazy JCR	4	1	5	-	-
Rozdziały w książkach, monografiach, innych czasopismach	2	1	3	-	-
RAZEM	9	28	37	92.039*	1029
DONIESIENIA KONFERENCYJNE KRAJOWE I MIĘDZYNARODOWE					
	I. Przed doktoratem	II. Po doktoracie	Razem I + II		
RAZEM	6	22	28		

*Łączny impact factor wg listy Journal Citation Reports (JCR), bez prac stanowiących osiągnięcie habilitacyjne, wynosi **66.153**

*Łączny impact factor wg listy Journal Citation Reports (JCR), dla prac stanowiących osiągnięcie habilitacyjne) wynosi **25.886**

IF podano zgodnie z rokiem publikacji, MNiSW – lista z dnia 9 grudnia 2016

Liczba cytowań wg Web of Science: **276**

Liczba cytowań (bez autocytowań): **236**

Indeks Hirscha wg Web of Science: **9**

B) Dorobek dydaktyczny i organizacyjny

Pracując w jednostce Polskiej Akademii Nauk koncentrowałem się przede wszystkim na działalności badawczej. Starłem się jednak znajdować także czas na działalność edukacyjną. Brałem udział w organizowanych przez jednostki naukowe, zlokalizowane na terenie gminy Kórnik i jej władze, Kórnickich Dniach Nauki. W ich ramach współprowadziłem zajęcia dla dzieci i młodzieży z okolicznych szkół. Zapoznawałem ich między innymi z badaniami korzeni, starając się uświadamiać znaczenie prowadzenia podstawowych badań naukowych. Prowadziłem także ćwiczenia z zakresu budowy i funkcji korzenia oraz jego relacji z organizmami symbiotycznymi w ramach przedmiotu Histologia Szczegółowa Roślin, wykładanego na kierunku biologia UAM w Poznaniu. Bardzo ważna jest dla mnie edukacja studentów. Zarówno inżynierantów i magistrantów realizującym prace dyplomowe pod moją opieką, jak i tych, będących pod opieką kolegów z ID lub ośrodków poznańskich, uczyłem metod pracy badawczej. Organizowałem i prowadziłem dla nich zajęcia dydaktyczne zarówno w laboratorium jak i w terenie. Kierowałem dwiema pracami inżynierskimi i jedną magisterską. Jestem także promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim wszczętym na Wydziale Leśnym Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.

Angażuję się także w pracę na rzecz Instytutu Dendrologii, z którym jestem związany od początku swojej zawodowej drogi. Jestem członkiem dwóch stałych komisji powołanych przez dyrektora ID PAN. Od roku 2009 komisji ds. oceny wartości utworów oraz opiniowania składanego przez pracownika Instytutu Dendrologii PAN wykazu godzin pracy poświęconych na powstanie utworu w ramach stosunku pracy. Od roku 2014 pracuję także w komisji oceniającej wnioski o dotację na badania naukowe dla doktorantów i młodych naukowców w ramach dotacji celowej na prowadzenie badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców i uczestników studiów doktoranckich, przygotowujących pracę doktorską w Instytucie Dendrologii PAN. Od 2009 roku aż do roku 2014 (w którym na wniosek Rady Kuratorów Wydziału II PAN

przeprowadzono zmiany organizacyjne w Instytucie Dendrologii PAN) kierowałem Pracownią Patologii Systemu Korzeniowego. Cały czas staram się działać na rzecz poprawy warunków pracy i podnoszenia jakości zaplecza aparaturowego. W ramach grantów zakupione zostały liczne sprzęty, wiele starych wymieniono. Dużym sukcesem było przygotowanie wniosku (wspólnie z dr hab. M. Guzicką) i zakup przez ID PAN mikroskopu konfokalnego i mikrotomu, wraz z dodatkowym wyposażeniem, sfinansowany ze środków Funduszu na Rzecz Nauki i Technologii Polskiej. Sprzęt, który posiadamy staramy się udostępniać w ramach współpracy naukowej także badaczom z ośrodków poznańskich. Ważnym doświadczeniem był dla mnie udział w komitetach organizacyjnych trzech konferencji naukowych.

W pracy niezwykle ważne jest dla mnie realizowanie badawczych pomysłów i zdobywanie na ten cel odpowiednich funduszy. Staram się ciągle doskonalić warsztat badawczy, rozwijać współpracę naukową, zarówno z kolegami z Polski jak i z zagranicy, i dokumentować ją wspólnymi publikacjami. Duże znaczenie ma dla mnie zarówno mój osobisty rozwój jak i rozwój moich współpracowników i studentów, których mam nadzieję jeszcze wielu spotkać na swojej zawodowej drodze.

