

## ARTYKUŁ ORYGINALNY

## Wpływ *Rhizophagus irregularis* na mechanizm zwiększania odporności życicy trwałej (*Lolium perenne* L.) na porażenie przez *Drechslera teres*

### Influence of *Rhizophagus irregularis* on the mechanism of increasing the resistance of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) to infection by *Drechslera teres*

Małgorzata Jeske\*, Anna Baturo-Cieśniewska, Karol Lisiecki, Dariusz Pańka, Rafał Jabłoński

#### Streszczenie

Życica trwała pomimo swoich zalet, takich jak wysoka odporność na udeptywanie czy też silne krzewienie, jest rośliną podatną na stresy abiotyczne i biotyczne. Celem przeprowadzonych prac było sprawdzenie wpływu *Rhizophagus irregularis* na indukowanie mechanizmów zwiększających odporność życicy trwałej porażonej przez *Drechslera teres*. Trawę zasiedloną *R. irregularis* oraz niezasiedloną poddano inokulacji badanym patogenem. Przeprowadzono ocenę stopnia porażenia roślin. Dodatkowo materiał roślinny został poddany analizie na obecność związków fenolowych oraz na zawartość i aktywność białek enzymatycznych. Objawy porażenia na roślinach zasiedlonych grzybem endomycoryzowym były mniejsze aniżeli u tych bez badanego symbionta. Zawartość związków fenolowych i białka ogólnego w roślinach nie różniła się znacząco. Wystąpiły natomiast różnice w zawartości chitynaz oraz  $\beta$ -1,3-glukanaz. Wyniki uzyskane z przeprowadzonego eksperymentu potwierdzają korzystny wpływ *R. irregularis* na rozwój życicy trwałej i jej wzrost odporności na porażenie przez *D. teres*.

**Słowa kluczowe:** życica trwała, grzyby patogeniczne, grzyby mykoryzowe, *Rhizophagus irregularis*, odporność roślin

#### Abstract

Perennial ryegrass, despite its advantages such as high resistance to trampling or strong tillering, is a plant susceptible to abiotic and biotic stresses. The aim of the conducted work was to check the effect of *Rhizophagus irregularis* on increasing the perennial ryegrass resistance to infection by *Drechslera teres*. Grass infested with *R. irregularis* and uninfested were inoculated with the tested pathogen. Measurement of plant infection assessment was carried out. Additionally, the plant material was analyzed for the presence of phenolic compounds and the content and activity of enzymatic proteins. Symptoms of infection on plants infested with the endomycorrhizal fungus were smaller than those without the tested symbiont. The content of phenolic compounds and total protein in plants did not differ significantly. However, there were differences in the content of chitinases and  $\beta$ -1,3-glucanases. The results obtained from the conducted experiment confirm the beneficial effect of *R. irregularis* on perennial ryegrass in the fight against *D. teres*.

**Key words:** perennial ryegrass, phytopathogenic fungi, mycorrhizal fungi, *Rhizophagus irregularis*, plant resistance

Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich  
Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz  
\*corresponding author: malgorzata.jeske@pbs.edu.pl

## Wstęp / Introduction

Życica trwała (*Lolium perenne* L.) jest jedną z najważniejszych gospodarczo traw w Polsce. Jej głównym sposobem użytkowania jest uprawa paszowa, jako pokarm dla zwierząt. Jest też jednym z podstawowych gatunków wchodzących w skład mieszanek traw gazonowych, wykorzystywanych przy zakładaniu trawników miejskich, rekreacyjnych oraz w parkach. Mimo wielu zalet, posiada niską odporność na stres biotyczny i abiotyczny. W okresie wegetacji ulega często porażeniu przez liczne grzyby patogeniczne mogące ograniczać jej wzrost i rozwój, przyczyniając się do obniżenia plonowania. Do ważniejszych chorób roślin trawiastych można zaliczyć między innymi: antraknozę traw, fuzaryjną zgorzel, mączniaka prawdziwego, pleśń śniegową, rdze, rizoktoniozę traw, a także plamistości liści, powodowane m.in. przez gatunki rodzaju *Drechslera* (Li i wsp. 2020; Wiewióra i Żurek 2023). Jednym ze sposobów ochrony życicy trwałej przed grzybami patogenicznymi jest wykorzystanie naturalnych układów symbiotycznych z arbuskularnymi grzybami mykoryzowymi (AGM). Szacuje się, iż blisko 90% roślin nawiązuje relacje z grzybami (Henkes i wsp. 2018; Pons i wsp. 2020; Wilkes 2021; Zubek i wsp. 2022; Li i wsp. 2023). Ciągły rozwój badań nad mykoryzami umożliwia szersze wykorzystanie omawianego zjawiska w gospodarce człowieka. Stosowanie biopreparatów staje się nowym trendem w uprawie roślin. Dobór odpowiednich rodzajów grzybów w stosunku do siedliska i roślin przyczynia się do ograniczenia stosowania nawozów. Arbuskularne grzyby mykoryzowe wspomagają rośliny dostarczając substancje odżywcze oraz chronią je przed uszkodzeniami mechanicznymi aktywując specyficzne mechanizmy ochrony przed patogenami (Linderman 1991; Li i wsp. 2014; Lo Presti i wsp. 2015; Mullath i wsp. 2019; Ramírez-Flores i wsp. 2019; Singh i wsp. 2019).

Celem przeprowadzonych prac było sprawdzenie wpływu *Rhizophagus irregularis* na indukowanie mechanizmów zwiększających odporność życicy trwałej porażonej przez *Drechslera teres*.

## Materiały i metody / Materials and methods

W przeprowadzonym doświadczeniu wykorzystano życicę trwałą odmiany Nira. Rośliny zostały umieszczone w wazonach, w których jako podłoże zastosowano odkażony chemicznie substrat torfowy. Zastosowano dwie kombinacje doświadczalne. Pierwszą stanowiły rośliny niezasiedlone przez grzyba endomykoryzowego rodzaju *Rhizophagus* AGM<sup>-</sup>, a drugą kombinację rośliny zasiedlone badanym symbiontem AGM<sup>+</sup>. Rośliny zostały umieszczone w komorze klimatycznej o temperaturze 20°C z wilgotnością względną powietrza na poziomie 80–90%, w cyklu 12/12 dzień i noc przez okres 10 tygodni. Po tym okresie przy-

stąpiono do inokulacji roślin wcześniej przygotowanym materiałem infekcyjnym. Stanowiła go zawiesina sporządzona z zarodników konidialnych i strzępek grzybni badanego patogenu o stężeniu (2 mln cfu/1 ml). Do jej przygotowania wykorzystano 2-tygodniowe kultury hodowane na podłożu PDA (potato dextrose agar, Difco). Inokulację przeprowadzono za pomocą aplikatora ciśnieniowego. Kombinację kontrolną stanowiły rośliny potraktowane wodą destylowaną. Następnie wazon z roślinami umieszczono w izolatorze foliowym, zapewniając optymalne warunki potrzebne do prawidłowego przebiegu infekcji. Po 2, 4 i 6 dniach od inokulacji, na podstawie objawów zewnętrznych, oceniono procent porażenia roślin. W dalszej kolejności został pobrany materiał badawczy do wykonania analiz zawartości związków fenolowych oraz zawartości i aktywności enzymów białkowych z  $\beta$ -1,3-glukanaz i chitynaz.

## Ocena stopnia porażenia roślin / Assessment of the degree of plant infection

Ocena porażenia roślin w podanych terminach została przeprowadzona na 25 liściach z każdego powtórzenia. Eksperyment założono w 4 powtórzeniach, gdzie jedno powtórzenie stanowiły 3 wazon. Przeprowadzając ocenę stopnia porażenia wykorzystano pięciostopniową skalę (0–4), w której: 0 – liście zdrowe, natomiast 4 – od 61 do 100% powierzchni z objawami porażenia. Uzyskane dane liczbowe z oceny porażenia wyrażone w stopniach przekształcono na indeks porażenia (IP).

## Przeprowadzone analizy biochemiczne / Biochemical analyses performed

Analiza zawartości związków fenolowych wykonana została za pomocą metody Folin-Ciocalteu (Waterhouse 2001). Do oznaczenia aktywności białka ogólnego w poszczególnych próbach wykorzystano metodę Bradforda (Bradford 1976). Do oceny aktywności glukanaz oraz chitynaz wykorzystana została zmodyfikowana metoda Abelesa (Abelès i wsp. 1970). Uzyskane wyniki zostały poddane analizie wariancji dla doświadczeń dwuczynnikowych. Dla porównania wartości średnich wykorzystano test Tukeya (tab. 1).

## Wyniki i dyskusja / Results and discussion

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu zaobserwowano widoczne różnice pomiędzy próbą kontrolną a roślinami z endosymbiontem. Średni poziom porażenia z wszystkich powtórzeń u roślin AGM<sup>-</sup> kształtował się na poziomie IP = 10,21%, natomiast u roślin AGM<sup>+</sup> wynosił IP = 4,79% (rys. 1). Najwyższe średnie porażenie roślin we wszystkich kombinacjach doświadczalnych zaobserwowano w szóstym dniu od inokulacji, i wynosiło ono odpowiednio IP = 15% dla roślin AGM<sup>-</sup> i IP = 9,38% dla roślin kombinacji AGM<sup>+</sup>.

**Tabela 1.** Analiza wariancji dla układu badawczego (wartości NIR)  
**Table 1.** Analysis of variance for research design (Tukey's LSD)

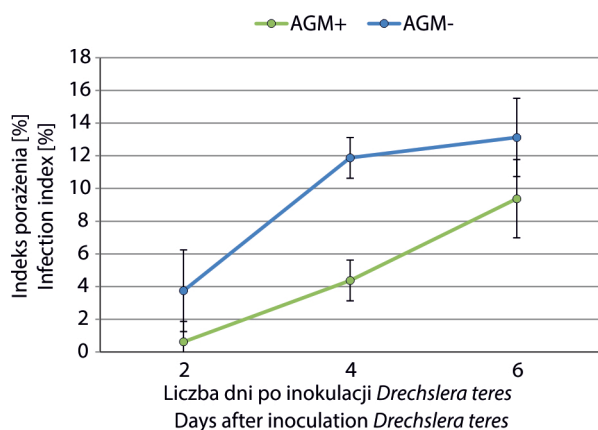
NIR – LSD	Czynnik A Factor A	Czynnik B Factor B	Interakcja A × B Interaction A × B	Interakcja B × A Interaction B × A
Indeks porażenia [%] Infection index [%]	2,465	1,657	n.i.	n.i.
Związki fenolowe [mg/g świeżej masy] Phenolic compounds [mg/g fresh mass]	0,159	n.i.	n.i.	n.i.
Białko [mg/g świeżej masy] Protein [mg/g fresh mass]	n.i.	n.i.	5,376	4,023
Glukanazy [nM/h/g świeżej masy] Glucanases [nM/h/g fresh mass]	210,756	n.i.	n.i.	n.i.
Chitynazy [nM/h/g świeżej masy] Chitinases [nM/h/g fresh mass]	379,137	200,604	536,181	401,208

NIR na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  – Tukey's tests at a significance level of  $\alpha = 0.05$

Czynnik A = dni po inokulacji – Factor A = days after inoculation

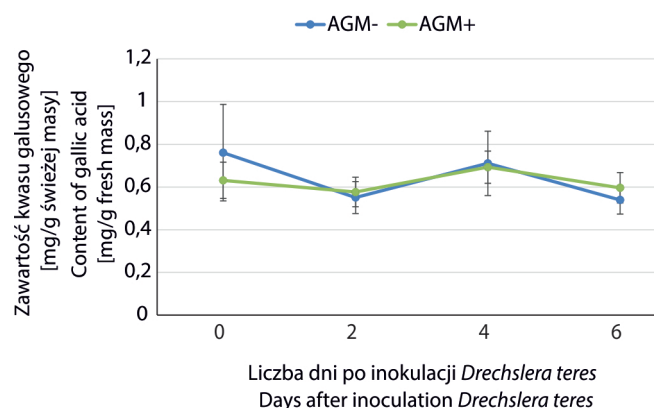
Czynnik B = wariant symbiotyczny – Factor B = symbiotic variant

n.i. – nieistotny – non significant



**Rys. 1.** Porażenie zasiedlonej (AGM+) oraz niezasiedlonej grzybem endomykoryzowym (AGM-) życicy trwałej porażonej przez *Drechslera teres* 2, 4, 6 dni po inokulacji (słupki prezentują odchylenie standardowe)

**Fig. 1.** Infection index of colonized by mycorrhizal fungus (AGM+) and decolonized (AGM-) of perennial ryegrass infected by *Drechslera teres* 2, 4, 6 days after inoculation (the bars present the standard deviation)



**Rys. 2.** Zawartość związków fenolowych zasiedlonej (AGM+) oraz niezasiedlonej grzybem endomykoryzowym (AGM-) życicy trwałej porażonej przez *Drechslera teres* przed inokulacją oraz 2, 4, 6 dni po inokulacji (słupki prezentują odchylenie standardowe)

**Fig. 2.** Content of phenolic compounds of colonized by mycorrhizal fungus (AGM+) and decolonized (AGM-) of perennial ryegrass infected by *Drechslera teres* before inoculation and 2, 4, 6 days after inoculation (the bars present the standard deviation)

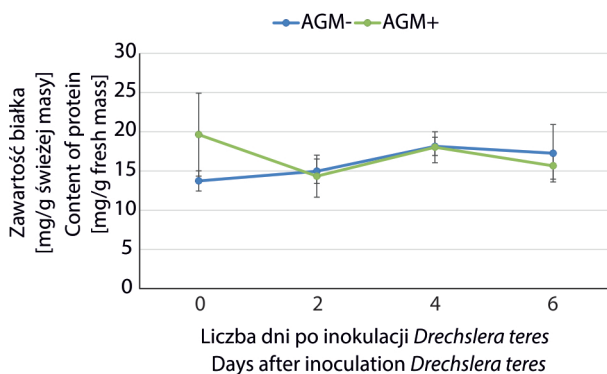
Obecność endosymbionta w roślinach życicy trwałej wpłynęła korzystnie na zdrowotność roślin. Li i wsp. (2020) zaobserwowali podobnie w swoich badaniach większą odporność roślin życicy trwałej zasiedlonej grzybem endofitycznym na porażenie przez *Bipolaris sorokiniana*.

Zauważono, iż występowanie endosymbiozy w korzeniach życicy trwałej nie przyczyniło do wystąpienia różnic w zawartości związków fenolowych w roślinie. Odnotowany został ich wzrost drugiego i szóstego dnia (rys. 2). Średnia zawartość w przypadku roślin AGM+ wynosiła 0,641 mg/g świeżej masy, a dla roślin AGM- wynosiła ona 0,624 mg/g świeżej masy. Najwyższy poziom związków

fenolowych dla roślin zasiedlonych badanym endosymbiontem zanotowano czwartego dnia, zaś najniższy drugiego dnia. W przypadku roślin AGM- najwyższa aktywność została odnotowana w kombinacji kontrolnej, a najniższa szóstego dnia od infekcji roślin. Powszechnie wiadomo, iż związki fenolowe wykazują zdolność do hamowania rozwoju grzybów. Podczas badań prowadzonych przez Pańkę i wsp. (2011) badano emisję związków fenolowych w roślinie. Wykazano wpływ *Neotyphodium lolii* na zwiększenie produkcji związków fenolowych. W przeprowadzonych

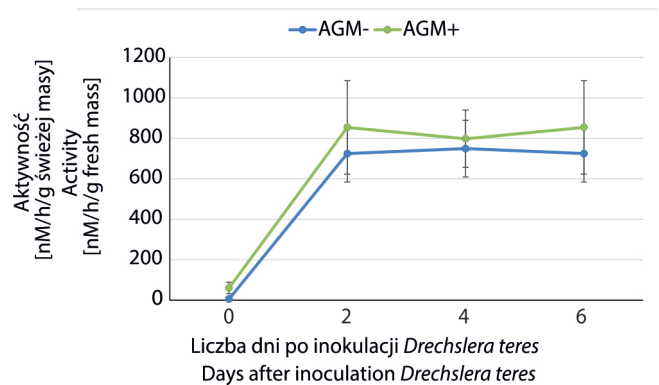
badaniach nie stwierdzono widocznego wpływu grzyba endomykoryzowego na wzrost zawartości związków fenolowych w roślinach. Nie zostało też stwierdzone jednoznacznie, by skorelowane było to z obniżeniem porażenia roślin.

W wyniku infekcji roślin przez patogeny syntetyzowane są białka odpornościowe. Ścisłe związane z reakcjami obronnymi są białka PR (pathogenesis related) wywierające bezpośredni wpływ na patogena w czasie infekcji (Talarczyk i Hennig 2001). Przeprowadzone badania nie wykazały istotnych różnic w zawartości białka ogólnego w roślinach pochodzących z poszczególnych kombinacji prowadzonego eksperymentu (rys. 3). Najwyższa jego wartość w roślinach AGM- i AGM+ po inokulacji wystąpiła czwartego dnia, gdy nie zaobserwowano różnicy między kombinacjami. W wyniku przeprowadzonych analiz ogólnej aktywności  $\beta$ -1,3-glukanaz odnotowano, iż u roślin AGM+ we wszystkich terminach obserwacji była ona wyższa niż u tych pozbawionych symbionta (rys. 4). Największą aktywność tego enzymu zaobserwowano u roślin zasiedlonych grzybem drugiego oraz szóstego dnia po inokulacji, a najniższą w kontrolnej kombinacji AGM-. Średnia zawartość  $\beta$ -1,3-glukanaz wynosiła 551 nM/h/g świeżej masy dla AGM- i 642 nM/h/g świeżej masy dla AGM+. Analiza statystyczna aktywności enzymu wykazała różnice między roślinami zasiedlonymi i niezasiedlonymi grzybem endomykoryzowym. W przeprowadzonym doświadczeniu zaobserwowano wpływ badanego symbionta na aktywność chitynaz. Odnotowano wzrost aktywności enzymu w roślinach AGM+. Średnia zawartość w przypadku roślin AGM+ wynosiła 1200 nM/h/g świeżej masy, a dla AGM- 794 nM/h/g świeżej masy. Najwyższy poziom aktywności chitynaz w roślinach AGM+ i AGM- odnotowano czwartego dnia od



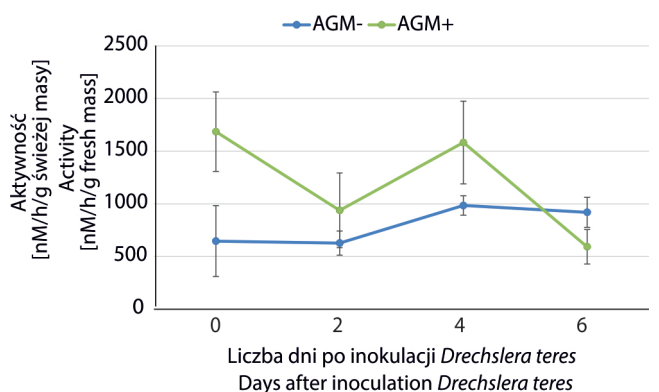
**Rys. 3.** Ogólna zawartość białka zasiedlonej (AGM+) oraz niezasiedlonej grzybem endomykoryzowym (AGM-) życiocy trwałej porażonej przez *Drechslera teres* przed inokulacją oraz 2, 4, 6 dni po inokulacji (słupki prezentują odchylenie standardowe)

**Fig. 3.** Total protein content of colonized by mycorrhizal fungus (AGM+) and decolonized (AGM-) of perennial ryegrass infected by *Drechslera teres* before inoculation and 2, 4, 6 days after inoculation (the bars present the standard deviation)



**Rys. 4.** Ogólna aktywność glukanazy zasiedlonej (AGM+) oraz niezasiedlonej grzybem endomykoryzowym (AGM-) życiocy trwałej porażonej przez *Drechslera teres* przed inokulacją oraz 2, 4, 6 dni po inokulacji (słupki prezentują odchylenie standardowe)

**Fig. 4.** Total content of glucanases of colonized by mycorrhizal fungus (AGM+) and decolonized (AGM-) of perennial ryegrass infected by *Drechslera teres* before inoculation and 2, 4, 6 days after inoculation (the bars present the standard deviation)



**Rys. 5.** Ogólna aktywność chitynaz zasiedlonej (AGM+) oraz niezasiedlonej grzybem endomykoryzowym (AGM-) życiocy trwałej porażonej przez *Drechslera teres* przed inokulacją oraz 2, 4, 6 dni po inokulacji (słupki prezentują odchylenie standardowe)

**Fig. 5.** Total content of chitinases of colonized by mycorrhizal fungus (AGM+) and decolonized (AGM-) of perennial ryegrass infected by *Drechslera teres* before inoculation and 2, 4, 6 days after inoculation (the bars present the standard deviation)

inokulacji odpowiednio 1582 i 985 nM/h/g świeżej masy (rys. 5). Badane enzymy charakteryzują się umiejętnością rozpoznawania grzybów chorobotwórczych dla roślin. Ograniczają ich namnażanie i rozprzestrzenianie (Van Loon i Van Strien 1999). Chitynazy dzięki zdolności hydrolizy chityny do oligosacharydów ograniczają rozwój patogenów (El-Hadary i Tayel 2013). Potwierdzenie tego znaleźć można w pracy Klinsukona i wsp. (2021), którzy wykazali duży



wpływ AGM na indukowanie enzymów chitynazy roślinnej i  $\beta$ -1,3-glukanazy w roślinach eukaliptusa. Zanotowali oni także wyraźną poprawę odporności roślin na porażanie przez *Cylindrocladium quinqueseptatum*.

W przeprowadzonym eksperymencie potwierdzono, iż *R. irregularis* ma korzystny wpływ na życie trwałą, ponieważ ogranicza występowanie objawów chorobowych. Podobnie Sheteiwy i wsp. (2022) w swoich badaniach wykazali możliwość wykorzystania *R. irregularis* do szczepienia roślin życicy i ciecierzycy, ponieważ wykazuje on wysoki potencjał ochronny przed stresem biotycznym i abiotycznym. Inni badacze stwierdzili znaczny wpływ tego grzyba na zahamowanie objawów chorobowych na pomidorze powodowanych przez *Fusarium oxysporum*. Zwrócili uwagę na fakt, że zastosowanie szczepionki grzybów mykoryzowych może być obiecującym podejściem uzupełniającym lub alternatywnym do fungicydów stosowanych w ochronie roślin przed groźnymi patogenami (Wang i wsp. 2022). Również Pérez-de-Luque i wsp. (2017) w swojej pracy podkreślili, iż interakcje podziemne zachodzące między korzeniami roślin pszenicy a *R. irregularis* sprzyjają wzrostowi roślin, zwiększając przyswajanie składników odżywczych i pobudzając ich układ odpornościowy. Także inny zespół w swoich badaniach udowodnił, że kolonizacja korzeni winorośli przez *R. irregularis* wzmacnia jej barierę ochronną przed *Plasmopara viticola* i *Botrytis cinerea*, powodującymi odpowiednio mączniaka rzekomego i szarą pleśń. Podkreślili oni, że mykoryzacja może być obiecującym sposobem na ochronę winorośli przed niektórymi chorobami, a tym samym na ograniczenie stosowania pestycydów w winnicach (Bruissson i wsp. 2016).

Białka PR reagują na obecność patogenu poprzez różne mechanizmy obronne, które pomagają roślinom w walce z różnymi infekcjami i stresem wywołanym przez czynniki biotyczne. Wyróżnia się 17 grup białek PR (Żyłowska i wsp. 2011). Jednym z mechanizmów obronnych jest zwiększenie aktywności chitynaz i glukanaz, które hamują wzrost oraz rozprzestrzenianie się chorobotwórczych grzybów (Van Loon i Van Strien 1999). Badania przeprowadzone przez wielu autorów wykazały, że w roślinach zasiedlonych przez grzyby endomykoryzowe następuje indukcja genów i białek związanych ze stymulacją mechanizmów obronnych po ataku patogenu. Reakcja obronna rośliny wywołana mykoryzą nie ogranicza się do korzenia, jest również indukowana systemicznie w częściach nadziemnych rośliny (Campos-Soriano i wsp. 2012; Fiorilli i wsp. 2018; Sanmartín i wsp. 2020; Dey i Ghosh 2022).

## Literatura / References

- Abeles F.B., Bosshart R.P., Forrence L.E., Habig W.H. 1970. Preparation and purification of glucanase and chitinase from bean leaves. *Plant Physiology* 47 (1): 129–134. DOI: 10.1104/pp.47.1.129
- Bradford M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72 (1–2): 248–254. DOI: 10.1006/abio.1976.9999

Wyniki badań własnych wykazały, że stężenie chitynazy i  $\beta$ -1,3-glukanaz w roślinach, które zostały zasiedlone przez grzyby endomykoryzowe rodzaju *Rhizophagus* było wyższe niż w roślinach kontrolnych. Rozkład chityny przez chitynazy może prowadzić do powstawania oligosacharydów, które są szkodliwe dla grzybów patogenicznych (El-Hadary i Tayel 2013).

Uzyskane wyniki własne oraz innych autorów świadczą o pozytywnym wpływie symbiontów zasiedlających rośliny trawiaste. Szereg ich oddziaływań wpływa na zwiększoną ochronę przed patogenami lub innymi czynnikami biotycznymi i abiotycznymi. Występowanie grzybów endomykoryzowych wspomaga syntezę enzymów białkowych, przyczyniając się do wzrostu aktywności chitynaz i  $\beta$ -1,3-glukanaz. Prowadzone badania mogą przyczynić się do znacznego ograniczenia środków ochrony roślin w produkcji rolnej. Także Dowarah i wsp. (2021) w swojej pracy podkreślili, iż rolnictwo XXI wieku powinno w dużej mierze opierać się na zrównoważonych praktykach rolniczych, aby sprostać coraz większemu zapotrzebowaniu na żywność. W tym preparaty AGM mogą odgrywać znaczącą rolę jako środki ochrony roślin wykorzystywane w uprawach. Zapewne przyczynią się w przyszłości do ograniczenia stosowania środków chemicznych i ochrony środowiska naturalnego.

Obecnie rynek bioproduktów, również w Polsce, stale wzbogaca się o nowe efektywne środki do zwalczania agrofagów, które są proekologiczną alternatywą dla preparatów chemicznych. Przyczynia się do tego rozwój biotechnologii i technik molekularnych oraz świadomość producentów, konsumentów i decydentów o zagrożeniach, jakie stwarza nieracjonalne stosowanie pestycydów w rolnictwie.

## Wnioski / Conclusions

1. *Rhizophagus irregularis* ograniczył porażenie życicy trwałej przez *Drechslera teres*. Mniej objawów chorobowych zanotowano u roślin zasiedlonych badanym grzybem w stosunku do tych pozbawionych symbionta.
2. Grzyb *R. irregularis* znacznie wpływa na wzrost aktywności ogólnej glukanaz.
3. Zanotowano istotny wpływ *R. irregularis* na wzrost aktywności ogólnej chitynaz w porównaniu z roślinami niezasiedlonymi.
4. Obecność grzyba endomykoryzowego w korzeniach nie wpływała na zawartość związków fenolowych oraz białka ogólnego w życicy trwałej.

- Bruissson S., Maillot P., Schellenbaum P., Walter B., Gindro K., Deglène-Benbrahim L. 2016. Arbuscular mycorrhizal symbiosis stimulates key genes of the phenylpropanoid biosynthesis and stilbenoid production in grapevine leaves in response to downy mildew and grey mould infection. *Phytochemistry* 131: 92–99. DOI: 10.1016/j.phytochem.2016.09.002
- Campos-Soriano L., García-Martínez J., San Segundo B. 2012. The arbuscular mycorrhizal symbiosis promotes the systemic induction of regulatory defence-related genes in rice leaves and confers resistance to pathogen infection. *Molecular Plant Pathology* 13 (6): 579–592. DOI: 10.1111/j.1364-3703.2011.00773.x
- Dey M., Ghosh S. 2022. Arbuscular mycorrhizae in plant immunity and crop pathogen control. *Rhizosphere* 22: 100524. DOI: 10.1016/j.rhisph.2022.100524
- Dowarah B., Singh Gill S., Agarwala N. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi in conferring tolerance to biotic stresses in plants. *Journal of Plant Growth Regulation* 41 (2): 1429–1444. DOI: 10.1007/s00344-021-10392-5
- El-Hadary M.H., Tayel A.A. 2013. Differential expression of tomato chitinases upon *Alternaria solani* inoculation with special reference to a modified purification zymogram. *Egyptian Journal of Experimental Biology (Bot.)* 9 (1): 9–17.
- Fiorilli V., Vannini C., Ortolani F., Garcia-Seco D., Chiapello M., Novero M., Domingo G., Terzi V., Morcia C., Bagnaresi P., Moulin L., Bracale M., Bonfante P. 2018. Omics approaches revealed how arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances yield and resistance to leaf pathogen in wheat. *Scientific Reports* 8 (1): 9625. DOI: 10.1038/s41598-018-27622-8
- Henkes G.J., 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 within-root system nitrogen allocation. *Frontiers in Environmental Science* 6: 117. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00117
- Klinsukon C., Ekprasert J., Boonlue S. 2021. Using arbuscular mycorrhizal fungi (*Gigaspora margarita*) as a growth promoter and biocontrol of leaf blight disease in eucalyptus seedlings caused by *Cylindrocladium quinqueseptatum*. *Rhizosphere* 20 (4): 100450. DOI: 10.1016/j.rhisph.2021.100450
- Li F., Duan T., Li Y. 2020. Effects of the fungal endophyte *Epichloë festucae* var. *lolii* on growth and physiological responses of perennial ryegrass cv. Fairway to combined drought and pathogen stresses. *Microorganisms* 8 (12): 1917. DOI: 10.3390/microorganisms8121917
- Li T., Lin G., Zhang X., Chen Y., Zhang S., Chen B. 2014. Relative importance of an arbuscular mycorrhizal fungus (*Rhizophagus intraradices*) and root hairs in plant drought tolerance. *Mycorrhiza* 24 (8): 595–602. DOI: 10.1007/s00572-014-0578-3
- Li W., Zhai Y.-L., Hu X.-Y., Guo S.-X. 2023. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and metabolism of perennial ryegrass (*Lolium perenne*) under salt stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 51 (1): 12649. DOI: 10.15835/nbha51112649
- Linderman R.G. 1991. Mycorrhizal interactions in the rhizosphere. s. 343–348. W: *The Rhizosphere and Plant Growth* (D.L. Keister, P.B. Cregan, red.). Beltsville Symposia in Agricultural Research, vol. 14. Springer, Dordrecht. ISBN 978-94-010-5473-7. DOI: 10.1007/978-94-011-3336-4\_73
- Lo Presti L., Lanver D., Schweizer G., Tanaka S., Liang L., Tollot M., Zuccaro A., Reissmann S., Kahmann R. 2015. Fungal effectors and plant susceptibility. *Annual Review of Plant Biology* 66: 513–545. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043014-114623
- Mullath S.K., Błaszczowski J., Govindan B.N., Dhaheri L.A., Symanczik S., Al-Yahya’ei M.N. 2019. Organic farming practices in a desert habitat increased the abundance, richness, and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 31 (12): 969–979. DOI: 10.9755/ejfa.2019.v31.i12.2057
- Pańska D., Piesik D., Jeske M. 2011. Wpływ endofity *Neotyphodium lolii* na produkcję związków fenolowych i uwalnianie lotnych związków organicznych przez życię trwałą (*Lolium perenne* L.) zainfekowaną przez *Fusarium poae*. s. 57–60. W: *Fitopatologia: zdrowe rośliny – zdrowi ludzie. Phytopathology: healthy plants – healthy people. Polskie Towarzystwo Fitopatologiczne (PTFit.), Oddział Bydgoski Polskiego Towarzystwa Fitopatologicznego, Uniwersytet Techniczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, 20–22 września 2011. Bydgoskie Towarzystwo Naukowe, Bydgoszcz, 448 ss.*
- Pérez-de-Luque A., Tille S., Johnson I., Pascual-Pardo D., Ton J., Cameron D.D. 2017. The interactive effects of arbuscular mycorrhiza and plant growth-promoting rhizobacteria synergistically enhance host plant defences against pathogens. *Scientific Reports* 7: 16409. DOI: 10.1038/s41598-017-16697-4
- Pons S., Fournier S., Chervin C., Bécard G., Rochange S., Frei Dit Frey N., Puech Pagès V. 2020. Phytohormone production by the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis*. *PLOS ONE* 15 (10): e0240886. DOI: 10.1371/journal.pone.0240886
- Ramírez-Flores M.R., Bello-Bello E., Rellán-Álvarez R., Sawers R.J.H., Olalde-Portugal V. 2019. Inoculation with the mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* modulates the relationship between root growth and nutrient content in maize (*Zea mays* ssp. *mays* L.). *Plant Direct* 3 (12): e00192. DOI: 10.1002/pld3.192
- Sanmartín N., Pastor V., Pastor-Fernández J., Flors V., Pozo M.J., Sánchez-Bel P. 2020. Role and mechanisms of callose priming in mycorrhiza-induced resistance. *Journal of Experimental Botany* 71 (9): 2769–2781. DOI: 10.1093/jxb/eraa030
- Sheteiwiy M.S., El-Sawah A.M., Korany S.M., Alsharif E.A., Mowafy A.M., Chen J., Joško I., Selim S., AbdElgawad H. 2022. Arbuscular mycorrhizal fungus “*Rhizophagus irregularis*” impacts on physiological and biochemical responses of ryegrass and chickpea plants under beryllium stress. *Environmental Pollution* 315: 120356. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120356
- Singh V., Naveenkumar R., Muthukumar A. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi and their effectiveness against soil borne diseases. *Management* 183: 199.
- Talarczyk A., Hennig J. 2001. Early defence responses in plants infected with pathogenic organisms. *Cellular and Molecular Biology Letters* 6 (4): 955–970.
- Van Loon L.C., Van Strien E.A. 1999. The families of pathogenesis-related proteins, their activities, and comparative analysis of PR-1 type proteins. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 55 (2): 85–97. DOI: 10.1006/pmpp.1999.0213
- Wang H., Hao Z., Zhang X., Xie W., Chen B. 2022. Arbuscular mycorrhizal fungi induced plant resistance against *Fusarium* wilt in jasmonate biosynthesis defective mutant and wild type of tomato. *Journal of Fungi* 8 (5): 422. DOI: 10.3390/jof8050422
- Waterhouse A.L. 2001. Determination of total phenolics. W: *Current Protocols in Food Analytical Chemistry* (11.1.1-11.1.8) (R.E. Wrolstad, red.). John Wiley & Sons Inc., New York.
- Wiewióra B., Żurek G. 2023. Amenity grasses – a short insight into species, their applications and functions. *Agronomy* 13 (4): 1164. DOI: 10.3390/agronomy13041164

- Wilkes T.I. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture. Encyclopedia 1 (4): 1132–1154. DOI: 10.3390/encyclopedia1040085
- Zubek S., Kapusta P., Rożek K., Błaszowski J., Gielas I., Nobis M., Świerszcz S., Nowak A. 2022. Fungal root colonization and arbuscular mycorrhizal fungi diversity in soils of grasslands with different mowing intensities. Applied Soil Ecology 172: 104358. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.104358
- Żyłowska M., Wyszyńska A., Jagusztyn-Krynicka E.K. 2011. Defensyny – peptydy o aktywności przeciwbakteryjnej. Postępy Mikrobiologii 50 (3): 223–234.