

## Wpływ wilgotności i gatunku gleby na wzrost mikoryzowanych sadzonek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)

Effect of soil moisture and soil type on the growth of mycorrhizal seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)

Włodzimierz Buraczyk<sup>✉</sup>, Henryk Szeligowski, Stanisław Drozdowski,  
Marta Aleksandrowicz-Trzczińska

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Leśny,  
02-776 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159/34

✉ e-mail: wburaczyk@wp.pl

**Abstract.** The paper presents results of research on the growth of 1-year old Scots pine seedlings inoculated with the mycorrhizal fungus *Hebeloma crustuliniforme*, grown on substrates of differing moisture content; 40%; 55% and 70%. The experiment was carried out under controlled conditions on seedlings growing under a foil tent, in loose sand and saw dust. After five months, the aboveground growth of the seedlings was measured and root growth was analyzed using the software WinRhizo 2002c. The chemical and physical properties of the substrate had no significant effect on the growth of the seedlings. The root collar diameter, needle length and dry mass were larger in the more fertile growing medium, containing more saw dust, than in the sandy one, but there was no clear effect of humidity on these traits. The use of different substrates had the greatest impact on the development of the root systems. In sand with increasing humidity, from 40%, through 55% to 70%, the seedlings produced larger root systems, whereas in the saw dust substrate the highest humidity (70%) significantly reduced growth.

**Key words:** Scots pine, mycorrhized seedlings, *Hebeloma crustuliniforme*, covered root system

### 1. Wstęp

Rozwój technologiczny szkółkarstwa kontenerowego w Lasach Państwowych zapoczątkowany w latach 90. XX wieku stworzył warunki do intensywnego rozwoju sterowanej mikoryzacji sadzonek drzew leśnych (Fonder, Berft 2009). Sterowaną mikoryzację grzybem *Hebeloma crustuliniforme* na skalę gospodarczą rozpoczęto w 1999 roku, zaś w 2007 roku w Polsce produkcja takich sadzonek w szkółkach kontenerowych wyniosła ponad 10 milionów (Grzywacz 2009).

Krótki okres produkcji mikoryzowanych sadzonek (około 10 lat) oraz stosunkowo wysoki koszt produkcji wymuszają potrzebę precyzyjnego określenia zakresu ich praktycznego wykorzystania. Obecnie mikoryzowane sadzonki drzew leśnych najczęściej są wykorzystywane na gruntach zdegradowanych przez przemysł (marginalnych) oraz porolnych (Rudawska 2000; Hilszczańska 2005; Szabla 2009; Mauer, Mauerová 2009).

W Katedrze Hodowli Lasu SGGW w Warszawie od 2002 roku były prowadzone badania nad wzrostem w

zróżnicowanych warunkach glebowych sadzonek wyprodukowanych w szkółce kontenerowej.

W pierwszej serii doświadczenia przeprowadzonej w 2002 roku zbadano wpływ podłoży różniących się żyznością i spoistością (piasek luźny i pył zwykły) oraz wilgotnością w zakresie 40–70% na wzrost sadzonek sosny z produkcji kontenerowej niepoddanych sterowanej mikoryzacji. Wyniki tych badań opublikowano w Leśnych Pracach Badawczych (Buraczyk, Szeligowski 2008).

### 2. Cel i metodyka

Celem prezentowanych badań było porównanie wzrostu sadzonek mikoryzowanych grzybem *Hebeloma crustuliniforme*, rosnących na podłożach różniących się żyznością, spoistością i wilgotnością. Otrzymanych w pracy wyników nie można bezpośrednio odnieść do opublikowanych wcześniej, ponieważ oba doświadczenia nie były przeprowadzone jednocześnie.

Obiektem badań były jednoroczne sadzonki sosny wyprodukowane w szkółce kontenerowej Nadleśnictwa Jabłonna, poddane zabiegowi sterowanej mikoryzacji grzybem *H. crustuliniforme*. Inokulum wykorzystane do mikoryzacji testowanych sadzonek sosny zostało wyprodukowane w laboratorium szkółki kontenerowej w Rudach Raciborskich na podstawie technologii opracowanej przez profesora Stefana Kowalskiego. Analiza systemów korzeniowych sadzonek wykorzystanych w doświadczeniu wykazała, że są one w około 80% zmikoryzowane, głównie białą grzybnią o różnych morfotypach charakterystycznych dla *H. crustuliniforme*.

Badania w drugiej serii przeprowadzono także w 10-litrowych wazonach z wykorzystaniem jako podłoża tych samych gleb (piasek luźny i pył zwykły) co w serii pierwszej. Analiza składu chemicznego tych gleb wykonana w Stacji Chemiczno-Rolniczej w Wesolej k. Warszawy wykazała, że pH piasku wynosiło 5,4, zaś pyłu – 5,78, zawartość próchnicy w piasku wynosiła 0,63%, natomiast w pyle 2,58. Największe różnice odnotowano w zawartości składników pokarmowych. Azotu mineralnego w piasku było 1,92 mg/100g gleby, natomiast w glebie spoistej 17,56 mg/100g gleby. Podobne proporcje odnotowano w zawartości fosforu, potasu oraz magnezu. Szczegółowe wyniki analiz chemicznych oraz składu mechanicznego zostały przedstawione w pracy prezentującej wyniki badań z pierwszej serii doświadczenia (Buraczyk, Szeligowski 2008).

Piasek i pył wykorzystano jako podłoża w wazonach, w których posadzono po 3 jednoroczne mikoryzowane sadzonki z bryłką. W ramach każdego podłoża wyróżniono 3 warianty wilgotnościowe: 40%, 55% oraz 70% pełnej pojemności wodnej. Każdy wariant wilgotnościowy liczył po 6 wazonów. Odpowiednią wilgotność w poszczególnych wazonach utrzymywano metodą wagową, codziennie dopełniając wodą do określonej dla każdego wazonu wagi. Doświadczenie zostało założone w połowie maja i było prowadzone przez 5 miesięcy.

Przed założeniem doświadczenia pomierzono wysokość jednorocznych sadzonek, natomiast po zakończeniu wykonano szczegółowe pomiary części nadziemnej, z których do analizy wariancji wykorzystano wysokość, przyrost wysokości, grubości w szyi korzeniowej, długość oraz suchą masę igieł. W analizie regresji dodatkowo uwzględniono liczbę i łączną długość pędów bocznych oraz suchą masę pędu. Następnie korzenie wykształcone podczas trwania doświadczenia oddzielono (odcięto) od bryłki, w której były zamknięte przed doświadczeniem, wypłukano i poddano skanowaniu oraz analizom przy pomocy programu komputerowego WinRhizo 2002c. Do oceny wpływu badanych czynników na wzrost sadzonek wykorzystano tylko najważniejsze cechy morfologiczne systemów korzeniowych takie, jak: łączna długość

korzeni, grubość, objętość oraz liczba wierzchołków i rozgałęzień.

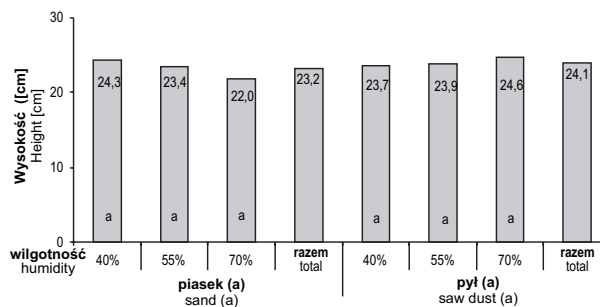
Analizy statystyczne poprzedzono sprawdzeniem zgodności z rozkładem normalnym spostrzeżeń w poszczególnych wariantach doświadczenia testem Shapiro-Wilka oraz jednorodności wariancji testem Barletta. W wyniku przeprowadzonych testów nie uzyskano istotnych odstępstw analizowanych spostrzeżeń od rozkładu normalnego. Ortogonalny układ doświadczenia pozwolił przetestować efekty każdego czynnika. Warianty doświadczenia porównano, wykorzystując analizę wariancji oraz test rozstępu Duncana (dla  $\alpha = 0,05$ ). Na wykresach przedstawiających wyniki badań tą samą literą oznaczono warianty jednorodnie statystycznie. Wartości literowe podane na słupkach określają grupy jednorodnie wariantów wilgotnościowych, zaś podane w nawiasie, przy nazwie podłoża, określają istotność różnic między badanymi podłożami.

Analizy statystyczne wykonano przy pomocy programu komputerowego Statgraphics Plus 4.1. Przeprowadzono także analizę regresji prostoliniowej określającej wpływ wysokości sadzonek przed założeniem doświadczenia na cechy, które uzyskały one po zakończeniu doświadczenia. Poza cechami wykorzystanymi w analizie wariancji, w regresji uwzględniono także liczbę i łączną długość pędów bocznych, suchą masę pędu, suchą masę korzeni oraz grubość i objętość korzeni. W analizie wykorzystano tylko jedną zmienną niezależną w postaci wysokości początkowej ze względu na praktyczne zalety tej cechy, czyli możliwość łatwego i precyzyjnego jej pomiaru.

### 3. Wyniki

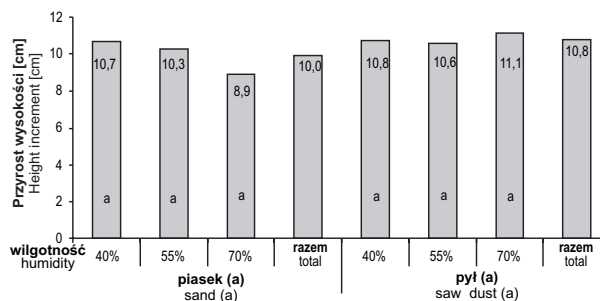
Po pięciu miesiącach wzrostu w warunkach kontrolowanych wysokość mikoryzowanych sadzonek sosny zwyczajnej kształtowała się od 22 cm na podłożu piaszczystym o wilgotności 70% do 24,6 cm na podłożu pylastym o wilgotności też 70% (ryc. 1). Analiza wariancji wykazała, że średnia wysokość we wszystkich wariantach nie różni się istotnie. Również średni przyrost wysokości obliczony dla poszczególnych wariantów nie różnił się istotnie (ryc. 2). Natomiast największym względnym przyrostem wysokości (procentowym przyrostem wysokości w stosunku do wysokości jednorocznych sadzonek użytych do badań) charakteryzowały się sosny rosnące na podłożu pylastym o wilgotności 40% (ryc. 3). W tym wariantcie sosny odłożyły przyrost o wartości 84,9%, zaś najmniejszy przyrost, wynoszący 68,4%, został stwierdzony na podłożu piaszczystym o wilgotności 70%.

Grubość sosen rosnących na podłożu pylastym była o 1,3 mm większa od grubości sadzonek rosnących na



**Rycina 1. Wysokość dwuletnich sadzonek sosny mikoryzowanych grzybem *H. crustuliniforme* w zależności od rodzaju i wilgotności podłoża (tą samą literą, podaną na słupku i w nawiasie przy nazwie podłoża, oznaczono warianty jednorodnie statystycznie)**

Figure 1. The height of two-year old pine seedlings mycorrhized by *H. crustuliniforme* fungus depending on the type and moisture growing medium (the same letter as specified in the bar chart and in brackets after the name of the substrate determined statistically homogeneous variants)

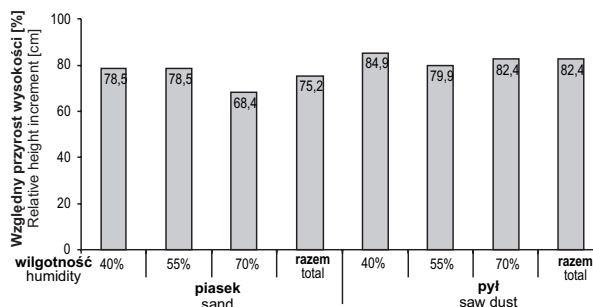


**Rycina 2. Bezwzględny przyrost wysokości odłożony w drugim roku przez sadzonki sosny mikoryzowane grzybem *H. crustuliniforme* w zależności od rodzaju i wilgotności podłoża (tą samą literą, podaną na słupku i w nawiasie przy nazwie podłoża, oznaczono warianty jednorodnie statystycznie)**

Figure 2. The absolute height increment in the second year of pine seedlings mycorrhized by fungus *H. crustuliniforme* depending on the type and moisture content (the same letter as specified in the bar chart and in brackets after the name of the substrate, determined statistically homogeneous variants)

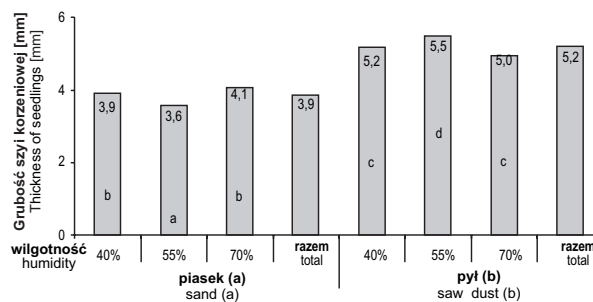
podłożu piaszczystym (ryc. 4). Najmniejszą średnią grubość, istotnie różniącą się od grubości sosen z pozostałych wariantów, stwierdzono na podłożu piaszczystym o wilgotności 55%. Najgrubsze w szyi korzeniowej były sosny rosnące na podłożu pylastym o wilgotności 55%. Test rozstępu Duncana wyróżnił aż 4 grupy jednorodnie, co wskazuje na bardzo silne zróżnicowanie tej cechy w obrębie wariantów.

Na podłożu piaszczystym długość igieł była mało zróżnicowana i kształtowała się od 5,1 cm (wilgotność 55%) do 5,3 cm (wilgotność 70%), zaś na podłożu pylastym przy wilgotności 40 i 55% igły miały długość



**Rycina 3. Procentowy przyrost wysokości odłożony w drugim roku przez sadzonki sosny mikoryzowane grzybem *H. crustuliniforme* w zależności od rodzaju i wilgotności podłoża**

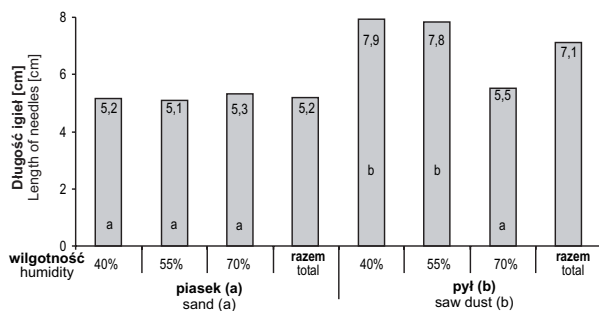
Figure 3. Percentage increase in the height increment in the second year of pine seedlings mycorrhized by fungus *H. crustuliniforme* depending on the type and moisture content



**Rycina 4. Grubość dwuletnich sadzonek sosny mikoryzowanych grzybem *H. crustuliniforme* w zależności od rodzaju i wilgotności podłoża (tą samą literą, podaną na słupku i w nawiasie przy nazwie podłoża, oznaczono warianty jednorodnie statystycznie)**

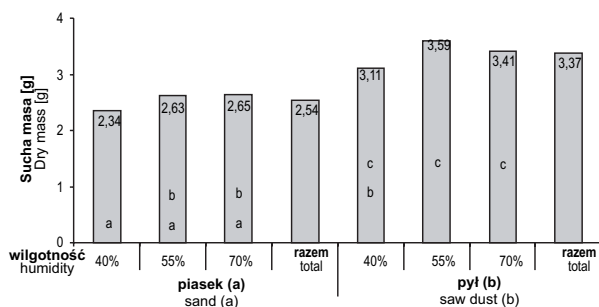
Figure 4. The thickness of two-year old pine seedlings mycorrhized by *H. crustuliniforme* depending on the type and moisture content (the same letter as specified in the bar chart and in brackets after the name of the substrate determined statistically homogeneous variants)

odpowiednio 7,9 i 7,8 cm, zaś przy wilgotności 70% były o około 2 cm krótsze (ryc. 5). Test rozstępu Duncana wykazał istotne różnice między długością igieł sosen z podłoża pylastego o wilgotności 40 i 55% a długością igieł sosen z pozostałych wariantów doświadczania. Średnia długość igieł u sosen rosnących na podłożu piaszczystym obliczona dla wszystkich wilgotności była istotnie mniejsza (o około 2 cm) niż u sosen z podłoża pylastego. Sucha masa igieł na jednej sadzonce kształtowała się od 2,34 g w wariantcie podłoża piaszczystego o wilgotności 40% do 3,59 g na podłożu pylastym o wilgotności 55% (ryc. 6). Średnia masa igieł z sosen wyhodowanych na podłożu piaszczystym wyniosła 2,54 g, zaś na pylastym masa igieł była większa o prawie 1 g, co okazało się różnicą istotną statystycznie. Test Duncana wyróżnił 3 grupy jednorodnie, przy czym



**Rycina 5. Długość igieł dwuletnich sadzonek sosny mikoryzowanych grzybem *H. crustuliniforme* w zależności od rodzaju i wilgotności podłoża (tą samą literą, podaną na słupku i w nawiasie przy nazwie podłoża, oznaczono warianty jednorodnie statystycznie)**

Figure 5. The length of needles of two-year old pine seedlings mycorrhized by *H. crustuliniforme* fungus depending on the type and moisture content (the same letter as specified in the bar chart and in brackets after the name of the substrate determined statistically homogeneous variants)

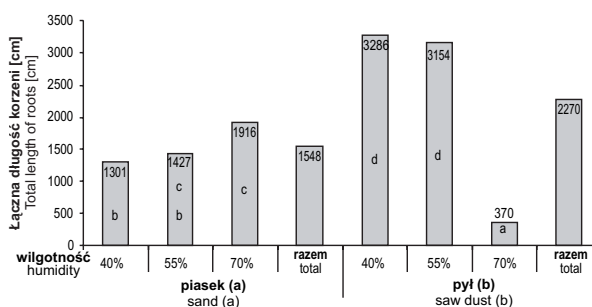


**Rycina 6. Sucha masa igieł dwuletnich sadzonek sosny mikoryzowanych grzybem *H. crustuliniforme* w zależności od rodzaju i wilgotności podłoża (tą samą literą, podaną na słupku i w nawiasie przy nazwie podłoża, oznaczono warianty jednorodnie statystycznie)**

Figure 6. Dry mass of needles of two-year old pine seedlings mycorrhized by *H. crustuliniforme* fungus depending on the type and moisture content (the same letter as specified in the bar chart and in brackets after the name of the substrate determined statistically homogeneous variants)

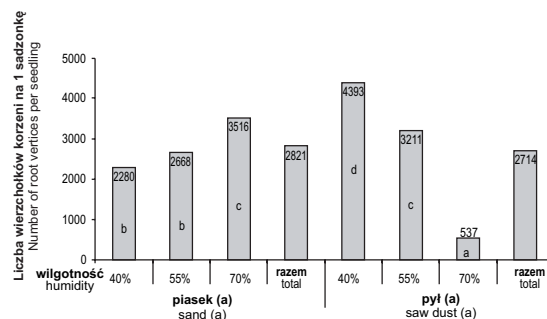
średnie masy igieł pochodzące z sosen rosnących na tym samym podłożu, ale przy różnych wilgotnościach nie różniły się między sobą.

Na rycinach 7, 8 i 9 przedstawiono trzy cechy morfologiczne korzeni, które przyrosły w trakcie trwania doświadczenia wazonowego. Na podłożu piaszczystym zarówno łączna długość korzeni, jak i liczba wierzchołków oraz rozgałęzień zwiększała się wraz ze wzrostem wilgotności, natomiast na podłożu pylastym zmniejszała się. Na podłożu piaszczystym o wilgotności 40% sadzonki mikoryzowane wykształciły nowe



**Rycina 7. Długość korzeni dwuletnich sadzonek sosny mikoryzowanych grzybem *H. crustuliniforme* w zależności od rodzaju i wilgotności podłoża (tą samą literą, podaną na słupku i w nawiasie przy nazwie podłoża, oznaczono warianty jednorodnie statystycznie)**

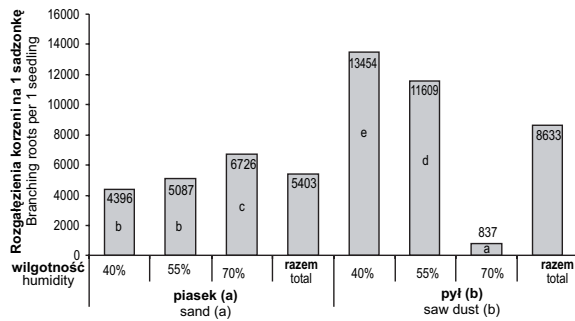
Figure 7. The length of the roots of two-year old pine seedlings mycorrhized by *H. crustuliniforme* fungus depending on the type and moisture content (the same letter as specified in the bar chart and in brackets after the name of the substrate determined statistically homogeneous variants)



**Rycina 8. Liczba wierzchołków korzeni dwuletnich sadzonek sosny mikoryzowanych grzybem *H. crustuliniforme* w zależności od rodzaju i wilgotności podłoża (tą samą literą, podaną na słupku i w nawiasie przy nazwie podłoża, oznaczono warianty jednorodnie statystycznie)**

Figure 8. The number of vertices of two-year old seedlings of pine root mycorrhized by *H. crustuliniforme* fungus depending on the type and moisture content (the same letter as specified in the bar chart and in brackets after the name of the substrate determined statistically homogeneous variants)

systemy korzeniowe o łącznej długości 1301 cm, przy wilgotności 55% – 1427 cm, a przy największej wilgotności (70%) łączna długość korzeni wyniosła 1916 cm. Na podłożu pylastym o wilgotności 40% mikoryzowane sosny rozbudowały największe systemy korzeniowe, których łączna długość wyniosła 3286 cm. Na tym samym podłożu o wilgotności 55% długość korzeni wyniosła 3154 cm, zaś przy wilgotności 70% była 10-krotnie mniejsza i wyniosła tylko 370 cm. Podobne proporcje stwierdzono także w zakresie liczby wierzchołków i rozgałęzień w systemach korzeniowych.



**Rycina 9. Liczba rozgałęzień korzeni dwuletnich sadzonek sosny mikoryzowanych grzybem *H. crustuliniforme* w zależności od rodzaju i wilgotności podłoża (tą samą literą, podaną na słupku i w nawiasie przy nazwie podłoża, oznaczono warianty jednorodnie statystycznie)**

Figure 9. The number of branching roots of two-year old pine seedlings mycorrhized by fungus *H. crustuliniforme* depending on the type and moisture content (the same letter as specified in the bar chart and in brackets after the name of the substrate determined statistically homogeneous variants)

**Tabela 1. Wartości współczynników określających korelację liniową między wysokością sadzonek użytych do badań (1/0) a ich cechami po zakończeniu doświadczenia wazonowego**

Table 1. The values of the coefficients determining the linear correlation between the height of the seedlings used in the study (one-year-old) and their characteristics after the pot experiment

Zmienne Variables	Współczynnik korelacji <i>r</i> obliczony dla: The correlation coefficient <i>r</i> calculated for:					
	piasek sand			pył saw dust		
	40%	55%	70%	40%	55%	70%
<b>Wysokość 1/1</b> Height 1/1	0,088	0,713**	0,789**	0,953**	0,686**	0,021
<b>Przyrost wysokości 1/1</b> Height increment 1/1	-0,238	0,633**	0,419	0,856**	0,512	-0,223
<b>Grubość 1/1</b> Thickness 1/1	-0,463	0,582**	-0,076	0,892**	0,658	0,187
<b>Liczba pędów bocznych</b> Number of lateral shoots	0,803**	0,058	-0,120	0,780**	0,240	-0,336
<b>Długość pędów bocznych</b> Length of lateral shoots	0,851**	0,564*	0,207	0,661*	0,306	-0,269
<b>Długość igieł</b> Length of needles	-0,469	0,247	0,303	0,416	0,706**	-0,252
<b>Sucha masa pędu</b> Dry mass of shoot	0,283	0,931**	0,542	0,843**	0,721**	0,133
<b>Sucha masa igieł</b> Dry mass of needles	0,032	0,796**	0,126	0,863**	0,385	-0,448
<b>Sucha masa korzeni 1/1</b> Dry mass of roots 1/1	-0,046	0,655**	0,463	0,769**	0,305	0,569*
<b>Długość korzeni 1/1</b> Root length 1/1	-0,021	0,731**	0,418	0,643	0,655**	-0,281
<b>Grubość korzeni 1/1</b> Thickness of roots 1/1	-0,604**	0,138	0,497	0,436	0,387	-0,023
<b>Objętość korzeni 1/1</b> Volume of the roots of 1/1	-0,209	0,765**	0,511*	0,760**	0,595*	-0,184
<b>Liczba wierzchołków korzeni</b> The number of root apices	0,290	0,632**	0,409	0,722**	0,587**	0,034
<b>Liczba rozgałęzień korzeni</b> The number of branching roots	0,305	0,591**	0,463	0,687*	0,644**	0,013

\*\* zależność istotna statystycznie na poziomie  $\alpha = 0,01$  / correlation statistically significant at  $\alpha = 0.01$

\* zależność istotna statystycznie na poziomie  $\alpha = 0,05$  / - statistically significant correlation at  $\alpha = 0.05$

1/1 – sadzonka po zakończeniu doświadczenia / seedling after the study

Liczba wierzchołków kształtowała się od 537 na sadzonkę do 4393 na sadzonkę, natomiast liczba rozgałęzień od 837 do 13 454 na sadzonkę. W przypadku obu tych cech największe zróżnicowanie stwierdzono na podłożu pylastym, gdzie przy wilgotności 40% było 8 razy więcej wierzchołków i 16 razy – rozgałęzień niż przy wilgotności 70% (ryc. 8, 9).

W tabeli 1 przedstawiono współczynniki korelacji określające zależności między wysokościami mikoryzowanych sadzonek użytych w doświadczeniu a cechami sosen po 5 miesiącach ich wzrostu w wazonach. Z danych tych wynika, że wysokość startowa sadzonek istotnie, dodatkowo wpływa głównie na wysokość, suchą masę pędu oraz liczbę wierzchołków oraz rozgałęzień korzeni. Na podłożu piaszczystym tylko przy wilgotności 55% wszystkie badane zależności miały charakter dodatni, zaś na pylastym przy wilgotności 40 i 50%. Przy wilgotności podłoża pylastego na poziomie 70% wysokość sadzonek użytych w doświadczeniu była istotnie, dodatkowo skorelowana tylko z suchą masą korzeni.

#### 4. Dyskusja

Obie serie badawcze, dotyczące sosen niemikoryzowanych (Buraczyk, Szeligowski 2008) i mikoryzowanych grzybem *H. crustuliniforme*, wykazały dużą zależność wzrostu sadzonek sosny z zakrytym systemem korzeniowym od właściwości gleb wykorzystanych w doświadczeniu jako podłoża, a w znacznie mniejszym stopniu od zastosowanej w szkółce sterowanej mikoryzacji. Reakcje wzrostowe dotyczą zarówno części nadziemnej, jak i systemu korzeniowego.

W praktyce hodowlanej najłatwiej można określić wysokości sadzonek, dlatego ta cecha była poddana szczegółowym analizom. Jednak wysokość sadzonek, przyrost bezwzględny i procentowy okazały się cechami, które w porównaniu z pozostałymi badanymi parametrami biometrycznymi najslabiej zareagowały na zmiany zarówno rodzaju, jak i wilgotności podłoża. W przypadku każdej z tych cech nie stwierdzono różnic istotnych statystycznie między wariantami na obu podłożach.

Drugą, najczęściej uwzględnianą cechą przy ocenie jakości sadzonek jest grubość w szyi korzeniowej. Cecha ta wykazała bardzo silne zróżnicowanie pod wpływem gatunku gleby i jej wilgotności. Na podłożu piaszczystym o optymalnej wilgotności sosny uzyskały mniejszą grubość w porównaniu z podłożami o wilgotności skrajnej, natomiast na podłożu pylastym – większą. Trudno jednoznacznie wyjaśnić wykazane zależności, natomiast odnosząc uzyskane wyniki do danych z literatury można wskazać badania, w których autorzy wykazali podobne zależności. Hilszczańska

(2001) badała poziom zmikoryzowania i wzrost siewek sosny w warunkach szklarniowych (na podłożu torfowo-wermikulitowym) i w szkółce otwartej (na piasku słabogliniastym) w trzech wariantach uwilgotnienia podłoża, określanymi jako „niedobór”, „norma” i „nadmiar”. W obu doświadczeniach siewki rosnące w skrajnych warunkach wilgotnościowych charakteryzowały się istotnie większą objętością pędu.

W prezentowanych badaniach przeprowadzono także analizę wpływu gatunku i wilgotności gleby na wielkość aparatu asymilacyjnego, który wykształciły sosny w trakcie trwania doświadczenia. Można przyjąć, że aparat asymilacyjny jest cechą, która może mieć istotny wpływ na wzrost młodych drzewek, szczególnie w trudnych warunkach upraw leśnych. Badania wykazały, że na wielkość aparatu asymilacyjnego, wyrażoną długością i suchą masą igieł, większy wpływ wywiera skład chemiczny i granulometryczny gleby niż jej wilgotność. Mikoryzowane sosny rosnące na podłożu pylastym wytworzyły aparat asymilacyjny o około 30% większy niż na podłożu piaszczystym. Wyniki uzyskane w pierwszej serii badań (Buraczyk, Szeligowski 2008) wykazały, że u sosen niemikoryzowanych różnice te są jeszcze większe i dochodzą do około 40%.

Wyniki badań jednoznacznie wskazują na zupełnie inną reakcję przyrostową systemów korzeniowych na zmienną wilgotność obu podłoży. Wzrost wilgotności piasku wyraźnie zwiększył przyrosty korzeni, wyrażony ich długością oraz strukturą określoną przez liczbę wierzchołków i rozgałęzień. Można to tłumaczyć tym, że większa wilgotność podłoża przepuszczalnego zwiększyła efektywność przyswajania składników pokarmowych. Zupełnie inna była reakcja przyrostowa korzeni na podłożu pylastym, gdzie przy wilgotności 40 i 55% nastąpił bardzo silny rozwój systemów korzeniowych, zaś wilgotność na poziomie 70% bardzo mocno zahamowała ich rozwój. Przyczyn tak odmiennych reakcji wzrostowych korzeni można dopatrywać się w właściwościach gleb wykorzystanych w doświadczeniu jako podłoża.

Pył zwykły w porównaniu z piaskiem luźnym zawierał wielokrotnie więcej frakcji drobnych oraz mniej grubych. To wskazuje na zdecydowanie inną strukturę obu podłoży i związanymi z tym właściwościami takimi jak np. porowatość. Piasek jest bardziej porowaty, co oznacza, że jest bardziej przepuszczalny i przewiewny, ale posiada mniejszą pojemność kapilarną. Pył ma zdecydowanie większą pojemność kapilarną, ale jest mniej przewiewny i przepuszczalny (H. Uggla, Z. Uggla 1979). Dlatego te właściwości mogły mieć decydujący wpływ na rozwój systemów korzeniowych badanych sadzonek sosny. Duża przepuszczalność na podłożu piaszczystym mogła spowodować intensywny rozwój korzeni przy wilgotności 70%, gdy tymczasem na

podłożu pylastym mała przepuszczalność i przewodność przy tej samej wilgotności ograniczyła dostęp tlenu, co zahamowało rozwój korzeni. Proces ten dotyczy zarówno sadzonek mikoryzowanych, jak i niepoddanych sterowanej mikoryzacji. Niska zawartość tlenu w glebie wpływa ograniczająco również na grzyby mikoryzowe i mikoryzy (Rudawska 2006).

Przy ocenie wpływu wilgotności na wzrost mikoryzowanych sadzonek należy uwzględnić także żyźność podłoża. Na podłożu pylastym, szczególnie przy wilgotności 40% i 55%, sadzonki rozbudowały zdecydowanie większe systemy korzeniowe niż na podłożu piaszczystym. Wynikać to może z kilkakrotnie większej zawartości składników pokarmowych w pyle niż w piasku, co sugeruje, że żyźność może mieć duży wpływ na rozwój systemów korzeniowych, ale tylko w glebach o korzystnych warunkach wilgotnościowych.

Hung i Trappe (1983) wykazali, że *H. crustuliniforme* zwiększa swój wzrost wraz ze wzrostem odczynu gleby w zakresie pH od 2 do 7. W prezentowanych badaniach lepszy wzrost sadzonek na podłożu pylastym (wyrażony wszystkimi badanymi parametrami oprócz wysokości) mógł być spowodowany nie tylko lepszą dostępnością substancji pokarmowych, lecz również nieco wyższym odczynem gleby.

*H. crustuliniforme* uznawana jest za gatunek hydrofilny (Unestam, Sun 1995), chociaż badania Hilszczańskiej (2001) nie potwierdziły tej cechy. Wyższą frekwencję mikoryzową obserwowano u siewek deszczowanych jeden raz w tygodniu w porównaniu z deszczowanymi codziennie. Możliwe jest jednak, że poszczególne izolaty *H. crustuliniforme* różnią się preferencjami odnośnie do wilgotności podłoża (Coleman et al. 1989). Tak więc wilgotność podłoża nie musiała być czynnikiem różnicującym wzrost sadzonek mikoryzowanych i niemikoryzowanych.

Zdarza się, że sadzonki poddane zabiegowi sterowanej mikoryzacji charakteryzują się w pierwszych latach uprawy mniejszymi parametrami biometrycznymi w porównaniu z drzewkami niemikoryzowanymi (Stenström, Ek 1990). Zjawisko to traktowane jest jako naturalny proces fizjologiczny. Może ono mieć miejsce szczególnie wtedy, gdy wprowadzony gatunek grzyba posiada rozbudowaną sieć grzybni ekstrapatrykalnej i dużą efektywność kolonizacji mikoryzowej. Do takich gatunków należy między innymi *H. crustuliniforme* (Aleksandrowicz-Trzczińska 2004). Opisane zjawisko wynika z konieczności przekazywania nawet do ok. 25% zasymilowanego przez roślinę węgla do partnera grzybowego (M. Högberg, P. Högberg 2002; Högberg et al. 2007). Analizując parametry wzrostowe sadzonek niemikoryzowanych z pierwszej serii doświadczenia (Buraczyk, Szeligowski 2008) i mikoryzowanych, nie stwierdzono opisanego zjawiska.

W badaniach podjęto też próbę określenia wpływu wysokości sadzonek wykorzystanych w doświadczeniu na cechy przyrostowe stwierdzone po zakończeniu badań wazonowych. Analiza wykazała, że związki między wysokością i innymi cechami w dużym stopniu zależą od wilgotności podłoża. Na podłożu piaszczystym najwięcej istotnych zależności stwierdzono przy wilgotności 55%, zaś na pylastym był to poziom 40 i 55%. Na luźnym podłożu większe zaburzenia zależności między badanymi cechami wystąpiły przy wilgotności niższej i wyższej od przyjętej za optymalną (55%), zaś na podłożu spoistym czynnikiem takim okazała się tylko wilgotność wysoka (70%).

Wyniki z pierwszej i drugiej serii badań przeprowadzonych w warunkach kontrolowanych wskazują, że nie ma przeciwwskazań do sadzenia jednorocznych mikoryzowanych oraz niemikoryzowanych sadzonek sosny zwyczajnej z bryłką na glebach piaszczystych o wilgotności 40, 55 i 70%, zaś na glebie spoistej o wilgotności 70% takie same sadzonki sosny miały ograniczony rozwój systemów korzeniowych. Informacje te wskazują na to, że na glebach spoistych i wilgotnych nie powinno się zalecać stosowania jednorocznych sadzonek sosny z bryłką. Uzyskane wyniki wskazują na potrzebę zbadania reakcji wzrostowych sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym na niedobór wilgoci w glebie.

## 5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Zastosowane w doświadczeniu podłoże piaszczyste i pylaste o wilgotności 40, 55 i 70% nie miało istotnego wpływu na przyrost wysokości mikoryzowanych sadzonek sosny z bryłką.

2. Na podłożu pylastym mikoryzowane sadzonki były istotnie grubsze w szyi korzeniowej oraz miały większą suchą masę i długość igieł niż na podłożu piaszczystym.

3. Wilgotność podłoża nie miała wpływu na grubość w szyi korzeniowej oraz na suchą masę igieł. Na podłożu pylastym przy wilgotności 70% mikoryzowane sosny wykształciły istotnie krótsze igły niż przy pozostałych wilgotnościach.

4. Największy wpływ badane podłoża miały na rozwój systemów korzeniowych. Na podłożu piaszczystym wzrost wilgotności w przedziałach 40, 55 i 70% istotnie zwiększył łączną długość korzeni oraz liczbę wierzchołków i rozgałęzień u sadzonek mikoryzowanych. Na podłożu pylastym o wilgotności 40 i 55% sadzonki mikoryzowane wykształciły systemy korzeniowe wielokrotnie dłuższe i o większej liczbie wierzchołków i rozgałęzień niż przy wilgotności 70%.

5. Wyniki uzyskane w pierwszej i drugiej serii badań wazonowych wykazały, że mikoryzowane i niemikoryzowane jednoroczne sadzonki sosny można sadzić na glebach piaszczystych o wilgotności od 40% do 70%, natomiast na glebach spoistych wilgotność na poziomie 70% powoduje istotne zahamowanie rozwoju systemów korzeniowych.

## Literatura

- Aleksandrowicz-Trzczińska M. 2004. Kolonizacja mikoryzowa i wzrost sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w uprawie założonej z sadzonek w różnym stopniu zmikoryzowanych. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 3 (1): 5–15.
- Buraczyk W., Szeligowski H. 2008. Wpływ wilgotności i gatunku gleby na wzrost sadzonek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z zakrytym systemem korzeniowym. *Leśne Prace Badawcze*, 69 (4): 291–297.
- Coleman M. D., Bledsoe C. S., Lopushinsky W. 1989. Pure culture response of ectomycorrhizal fungi to imposed water stress. *Canadian Journal of Botany*, 67: 29–39.
- Fonder W., Berft M. 2009. Wdrożenie programu polskiej technologii sterowanej mikoryzacji sadzonek drzew i krzewów leśnych w Lasach Państwowych jako przykład wykorzystania wyniku pracy badawczej w zagospodarowaniu lasu. *Sylwan*, 1: 3–7.
- Grzywacz A. 2009. Nowe możliwości i potrzeby w zakresie kontrolowanej mikoryzacji drzew i krzewów. *Sylwan*, 1: 8–15.
- Hilszczańska D. 2001. Wpływ wilgotności podłoża na rozwój mikoryz siewek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Rozprawa doktorska, Instytut Badawczy Leśnictwa.
- Hilszczańska D. 2005. Struktura ektomikoryzy u sadzonek sosny zwyczajnej inokulowanych wybranymi grzybami mikoryzowymi, wysadzonych na gruncie porolnym i marginalnym. *Leśne Prace Badawcze*, 1: 43–52.
- Högberg M. N., Högberg P. 2002. Extramatrical ectomycorrhizal mycelium contributes one-third of microbial biomass and produces, together with associated root, half the dissolved organic carbon in a forest soil. *New Phytologist*, 154: 791–795.
- Högberg P., Högberg M. N., Göttlicher S. G., Betson N. R., Keel S. G., Metcalfe D. B. et al. 2008. High temporal resolution tracing of photosynthate carbon from the tree canopy to forest soil microorganisms. *New Phytologist*, 177: 220–228.
- Hung L. L., Trappe J. M. 1983. Growth variation between and within species of ectomycorrhizal fungi in response to pH *in vitro*. *Mycologia*, 75: 234–241.
- Mauer O., Maueroová P. 2009. Wpływ technologii uprawy sadzonek drzew na rozwój mikoryzy. *Sylwan*, 153 (2): 117–124.
- Rudawska M. 2000. Ektomikoryza, jej znaczenie i zastosowanie w leśnictwie. Kórnik, Instytut Dendrologii PAN.
- Rudawska M. 2006. Mikoryza, w: Dęby. Władysław Bugała (red.) PAN Instytut Dendrologii, Poznań – Kórnik. ISBN 83-60247-22-6.
- Stenström E., Ek M., 1990. Field growth of *Pinus sylvestris* following nursery inoculation with mycorrhizal fungi. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 914–918.
- Szabla K. 2009. Hodowlane i ekonomiczne aspekty produkcji materiału sadzeniowego z zakrytym systemem korzeniowym poddanego zabiegowi sterowanej mikoryzacji. *Sylwan*, 153 (4): 253–259.
- Uggla H., Uggla Z. 1979. Gleboznawstwo leśne. Warszawa. PWRiL. ISBN 83-7160-331-2.
- Unestam T., Sun Y. P. 1995. Extramatrical structures of hydrophobic and hydrophilic ectomycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 5: 301–311.