

## Wpływ zagęszczenia podłoża w kontenerach szkółkarskich na parametry wzrostowe sadzonek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)

Influence of substrate compaction in nursery containers on the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings

Mariusz Kormanek<sup>1</sup>✉, Jacek Banach<sup>2</sup>, Michał Ryba<sup>1</sup>

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, <sup>1</sup>Katedra Mechanizacji Prac Leśnych, <sup>2</sup>Katedra Genetyki, Nasiennictwa i Szkółkarstwa Leśnego, Al. 29 Listopada 46, 31–425 Kraków

✉ Tel. +48 12 6625024, e-mail: rlkorma@cyf-kr.edu.pl

**Abstract.** The paper presents research on influence of nursery soil compaction, composed of peat (90%) and perlite (10%), on the growth of seedlings of *Pinus sylvestris* grown in containers. Polyethylene nursery are containers used for the seedling production. These containers were filled with three different densities of the peat and perlite substrate (0.3, 0.5 and 0.7 g·cm<sup>-3</sup>). During the experiment, nursery containers were initially placed in a plastic tent for a period of two months, and then for three months further months in an open nursery field. Growth measurements for individual plants were the length of shoots and the root system, root collar diameter, root and shoot dry weight and photosynthetic rate. There was a relationship between the extent of compaction of the soil substrate and all analyzed growth parameters of seedlings. A more compact substrate adversely affected on the number of grown seedlings and their length but positively influenced the dry mass of pine seedlings.

**Key words:** *Pinus sylvestris*, bulk density, container nursery, growth, root system

### 1. Wstęp

Rozwój szkółkarstwa specjalistycznego w Polsce, a szczególnie szkółkarstwa kontenerowego, powinien być impulsem do zwiększenia liczby badań w zakresie określenia optymalnych warunków do hodowli sadzonek. W literaturze fachowej nie ma jednak zbyt wielu publikacji na ten temat. Zatem rozwiązywanie problemów pojawiających się przy hodowli sadzonek w szkółkach kontenerowych często ma charakter intuicyjny, niepoparty rezultatami badań, które opierałyby się na analizie eksperymentów polowych. Jednym z istotnych elementów w tej produkcji jest podłoże szkółkarskie, które stanowi środowisko dla kiełkowania nasion i rozwoju systemu korzeniowego sadzonek. Magazynuje ono wodę i związki mineralne dostarczane z nawozami, z których korzysta wzrastająca roślina. Może być także sztucznie wzbogacane o grzyby mikoryzowe,

co poprawia wzrost sadzonek w kontenerach szkółkarskich oraz ułatwia ich adaptację na uprawie, szczególnie na terenach zdegradowanych (Szabla 2009; Buraczyk et al. 2012). Ważnym zagadnieniem w tym zakresie jest określenie optymalnego zagęszczenia podłoża szkółkarskiego, które wpływa na pojemność powietrzną i wodną.

Większość badań i analiz związanych z wpływem zagęszczenia gleby na wzrost roślin dotyczy określenia negatywnych skutków stosowania maszyn leśnych pracujących na zrębach (Porter 1994; 1998; Więsik 1996; Ulrich et al. 2003) lub w tradycyjnych szkółkach gruntowych, m.in. związanych z określeniem głębokości oddziaływania nacisku wywoływanego przez ich koła (Etana, Hakansoon 1994; Ehlers et al. 2000; Arvidsson 2001; Boja N., Boja F. 2011), zmianami właściwości oraz parametrów sadzonek wzrastających na zagęszczonej glebie (Ozimek 1993; Kozłowski 1999; Kormanek, Banach 2012; Lipiec et al. 2013), a także

dotyczących zmian pojemności wodnej gleby i pobierania składników mineralnych dostarczanych z nawozami (Onweremadu et al. 2008; Lipiec, Rejman 2010).

Krajowych badań dotyczących zagęszczenia podłoża szkółkarskiego i jego wpływu na wzrost sadzonek leśnych gatunków drzewiastych jest niewiele i jak dotychczas dotyczą tylko dębu szypułkowego (Kormanek, Banach 2011). Z kolei badania zagraniczne koncentrują się głównie na gatunkach rolniczych (np. zboża, trawy) (Bartholomew, Williams 2010; Alameda et al. 2012) i ogrodniczych (Ferree et al. 2004; Onweremadu et al. 2008), ewentualnie drzewiastych, ale bez większego znaczenia w gospodarce leśnej (Pan, Bassuk 1985; Gilman et al. 1987).

Badania wpływu zagęszczenia podłoża szkółkarskiego, ale dotyczące wyłącznie gatunków drzew leśnych, przeprowadzili Maupin i Struve (1997), którzy stwierdzili, że wzrost sadzonek *Quercus rubra* zmniejszał się dopiero przy zagęszczeniu podłoża powyżej  $1,75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Podobnie kontenerowe sadzonki *Pinus contorta* ograniczały swój wzrost i suchą masę przy gęstości objętościowej powyżej  $1,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (Conlin, van den Driessche 1996). W niektórych przypadkach konieczne jest zwiększanie gęstości podłoża szkółkarskiego, na co wskazuje większa masa systemu korzeniowego i pędu sadzonek *Pinus nigra* rosnących na podłożu złożonym z wermikulitu, torfu i perlitu (w proporcji 1:1:1), zagęszczanym w zakresie od  $0,71$  do  $1,01 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , w porównaniu do substratu niezagęszczonego (Zahreddine et al. 2004). Powyższe rezultaty otrzymane dla kilku gatunków drzew leśnych wskazują, że poziom zagęszczenia podłoża szkółkarskiego ma istotne znaczenie dla prawidłowego wzrostu sadzonek i powinien być kształtowany w zależności od gatunku i rodzaju podłoża.

W przedstawianych badaniach celem było określenie wpływu trzech różnych poziomów zagęszczenia podłoża torfowego w kontenerach polietylenowych na wzrost sadzonek sosny zwyczajnej. Wpływ zagęszczenia na wzrost roślin scharakteryzowano poprzez analizę zmienności parametrów wzrostowych i suchej masy wyhodowanego materiału sadzeniowego, w powiązaniu z parametrami fizycznymi podłoża.

## 2. Materiał i metody

### Podłoże szkółkarskie

Podłoża stosowane w produkcji sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym, zgodnie z zaleceniami dla Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe (PGLLP), powinny mieć pojemność powietrzną na poziomie 20–25% objętości, pojemność wodną w zakresie

800–1000% wagi, porowatość ogólną co najmniej 70% i stałe pH w przedziale 4,5–5,5 (Szabla, Pabian 2003).

Do badań użyto podłoża mieszanego, składającego się z torfu wysokiego (90%) oraz perlitu (10%) o pH=5,3, które zostało przygotowane w mieszalniku Javo. Podłoże po wymieszaniu charakteryzowało się wilgotnością wagową  $67,5\pm 2,5\%$ , która była zgodna z tą, jaką stosuje się w trakcie napełniania kontenerów przy produkcji sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym. Następnie przygotowane podłoże wsypano do pojemników, stosując trzy warianty zagęszczenia. Pierwszy wariant, czyli bez zagęszczenia (Z-1), otrzymano po zasypaniu podłożem poszczególnych cel w kasecie szkółkarskiej, natomiast trzeci – mocne zagęszczenie (Z-3) uzyskano poprzez stopniowe dosypywanie substratu i oddzielne jego ubijanie drewnianym stemplem we wszystkich komórkach kontenerów. Po napełnieniu komórek próbnych (bez zagęszczenia i z mocnym zagęszczeniem) substrat wysypano, zważono i kolejne dawki substratu dla obydwu wariantów przypadające na pojedynczy kontener były odmierzane wagowo. Drugi wariant – średnie zagęszczenie (Z-2) określono również metodą wagową, jako średnią wartość masy substratu potrzebną do napełnienia kontenerów bez zagęszczenia oraz masy podłoża dla wariantu z mocnym zagęszczeniem. Charakterystykę podłoża oraz jego parametry po zagęszczeniu w poszczególnych wariantach przedstawiono w tabeli 1.

### Kontenery szkółkarskie

Do badań użyto kontenera polietylenowego Hiko HV50 o wymiarach  $35\times 21$  cm, składającego się z 67 cel. Pojedyncza cela o kształcie ściętego stożka ma pełną ściankę i otwór w dolnej części oraz pionowe żebra zapobiegające zawijaniu się systemu korzeniowego sosny. W przypadku hodowli tego gatunku użyto 9 kontenerów szkółkarskich, po trzy kontenery z różnym zagęszczeniem substratu torfowego w trzech powtórzeniach. Na grządce w tunelu foliowym z kontenerów uformowano czworokąt ( $3\times 3$  m), w ramach którego rozmieszczono losowo poszczególne warianty zagęszczenia.

### Wysiew nasion

Nasiona sosny użyte w doświadczeniu pochodziły ze zbioru w 2011 r. z wyłączonego drzewostanu nasiennego w Nadleśnictwie Niepołomice (pododdział 159c). Nasiona charakteryzowały się czystością 99% oraz zdolnością kiełkowania 96%, a masa tysiąca nasion wynosiła 5,4 g. Kontenery szkółkarskie po napełnieniu podłożem obsiano 8 maja 2012 r., wysiewając po jednym nasionku do każdej celi, a następnie przykryto je cienką warstwą

**Tabela 1. Charakterystyka podłoża w poszczególnych wariantach zagęszczenia**

Table 1. Characteristics of substratum in the individual compaction variants

Wariant zagęszczenia substratu Variant of substratum compaction	Oznaczenie wariantu Symbol of variant	Gęstość objętościowa chwilowa	Gęstość objętościowa suchej masy	Porowatość	Kapilarna pojemność wodna	Pojemność powietrzna
		Temporary bulk density	Dry mass bulk density	Prosity	Capillary water capacity	Air capacity
		$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	%	%	%
<b>Bez zagęszczenia</b> Without compaction	Z-1	0,3	0,11±0,00	90,6±0,3	453,7±13,2	41,0±1,0
<b>Średnie zagęszczenie</b> Medium compaction	Z-2	0,5	0,22±0,01	81,3±0,9	298,0±31,9	17,0±2,9
<b>Mocne zagęszczenie</b> Strong compaction	Z-3	0,7	0,35±0,01	69,6±0,9	167,7±2,3	10,3±1,8

piasku. Kontenery przeniesiono do tunelu foliowego, gdzie przebywały przez okres pięciu miesięcy do końca trwania doświadczenia, przy czym folię z namiotu zdjęto w połowie lipca, a więc po dziewięciu tygodniach. Podlewianie oraz nawożenie odbywało się z wykorzystaniem podwieszanego, stacjonarnego systemu mikrozaszającego.

### Prace laboratoryjne

Po okresie pięciu miesięcy od momentu założenia doświadczenia wyhodowane sadzonki przewieziono do laboratorium, gdzie wyjęto je z kontenerów, a z systemów korzeniowych usunięto podłoże. W tym celu najpierw zastosowano moczenie sadzonek w wodzie przez 24 godziny, a następnie usuwano substrat pod bieżącą wodą. Po osuszeniu powierzchniowym, oddzielnie dla każdej sadzonki pomierzono długość pędu sadzonki oraz długość korzenia szkieletowego (dokładność do 0,1 cm), a także średnicę w szyjce korzeniowej (do 0,1 mm). Następnie sadzonki wysuszono w temperaturze 70°C (48 godzin), po czym określono suchą masę, oddzielnie dla systemu korzeniowego, pędu oraz aparatu asymilacyjnego (do 0,001 g).

### Analiza statystyczna

W celu określenia wpływu stałego czynnika (wariant zagęszczenia podłoża) na parametry wzrostowe oraz wagowe sadzonek przeprowadzono dwuetapową analizę danych pomiarowych, używając programu Statistica® 9.0 (wersja polska, StatSoft Inc, Tulsa, USA). W pierwszym etapie zastosowano jednoczynnikowy model analizy wariancji dla danych z doświadczenia jednoczynnikowego, założonego w układzie całkowicie losowym z czynnikiem stałym w postaci  $y_{ik} = m + a_i + \varepsilon_{ik}$ , gdzie:  $y_{ik}$  jest obserwacją cechy ilościowej dla  $i$ -tego poziomu czynnika w  $k$ -tym powtórzeniu,  $a_i$  jest efektem  $i$ -tego po-

ziomu czynnika, natomiast  $\varepsilon_{ik}$  jest składnikiem losowym. W drugim etapie, po stwierdzeniu istotnego wpływu wariantu zagęszczania gleby na badaną cechę sadzonek, w pierwszej kolejności dokonano graficznej prezentacji wartości cechy obserwowanej dla poszczególnych poziomów badanego czynnika, a następnie dopasowano funkcję liniową zależności mierzonych parametrów od gęstości objętościowej chwilowej (Mądry et al. 2010). Analizy wykonano łącznie dla 557 sadzonek uzyskanych z trzech wariantów zagęszczenia podłoża szkółkarskiego.

### 3. Wyniki

Wydajność siewek była bardzo wysoka, ale uzależniona od wariantu zagęszczenia podłoża (tab. 3) i zdecydowanie wyższa od podawanej dla tego gatunku w „Zasadach Hodowli Lasu” (2003) (0,7–0,8). Najmniej sadzonek wyhodowano na substracie o najwyższym stopniu zagęszczenia, gdzie na 201 wysianych nasion uzyskano tylko 170 siewek, zaś najwyższą liczę sadzonek (194) uzyskano przy najmniejszym zagęszczeniu substratu.

Najwyższą wartość średniej długości całej sadzonki, czyli łącznej długości korzenia szkieletowego i pędu, uzyskano dla niezagęszczonego substratu torfowego (wariant Z-1). Mniejsze sadzonki zaobserwowano w wariantach, w którym substrat glebowy był mocno zagęszczony (Z-3). Średnie skrócenie długości sadzonki pomiędzy wariantem Z-3 i Z-1 wyniosło blisko 8,6%. Różnica ta wynikała przede wszystkim z wyraźniej krótszego systemu korzeniowego w wariantach Z-3 (o 14%). Jednakże rośliny próbowały skompensować skrócenie długości korzeni przy dużym zagęszczeniu substratu zwiększonym przyrostem długości części nadziemnej (o 9,5%) oraz grubością w szyjce korzeniowej

**Tabela 2. Wydajność siewek sosny zwyczajnej oraz średnie wartości cech wzrostowych wraz z odchyleniami standardowymi**

Table 2. Efficiency of Scots pine seedlings and average values of the growth characteristics with standard deviations

Wariant zagęszczenia substratu Variant of substratum compaction	Wydajność siewek Seedlings efficiency	Długość sadzonki Length of seedling	Długość pędu Length of sprout	Długość systemu korzeniowego Length of root system	Średnica w szyi korzeniowej Root collar diameter
	%	cm	cm	cm	mm
Z-1	96,5	18,5±3,1	4,2±0,9	14,3±2,8	0,83±0,12
Z-2	96,0	18,5±3,1	4,3±0,8	14,2±2,7	0,90±0,14
Z-3	84,6	16,9±3,5	4,6±1,1	12,3±2,9	0,96±0,18

**Tabela 3. Średnia sucha masa analizowanych części sadzonek sosny zwyczajnej wraz z odchyleniami standardowymi**

Table 3. Average dry mass of the analysed part of Scots pine seedlings with standard deviations

Wariant zagęszczenia substratu Variant of substratum compaction	Średnia sucha masa [mg] / Average dry mass [mg] of:			
	całej sadzonki total seedling	pędu bez igieł sprout without needles	systemu korzeniowego root system	aparatu asymilacyjnego assimilative apparatus
Z-1	124,5±49,2	58,7±22,8	25,1±11,7	40,7±17,4
Z-2	150,7±56,8	70,6±26,1	30,2±13,1	49,9±20,0
Z-3	165,3±79,6	78,2±37,1	31,2 ± 9,3	55,9 ± 28,1

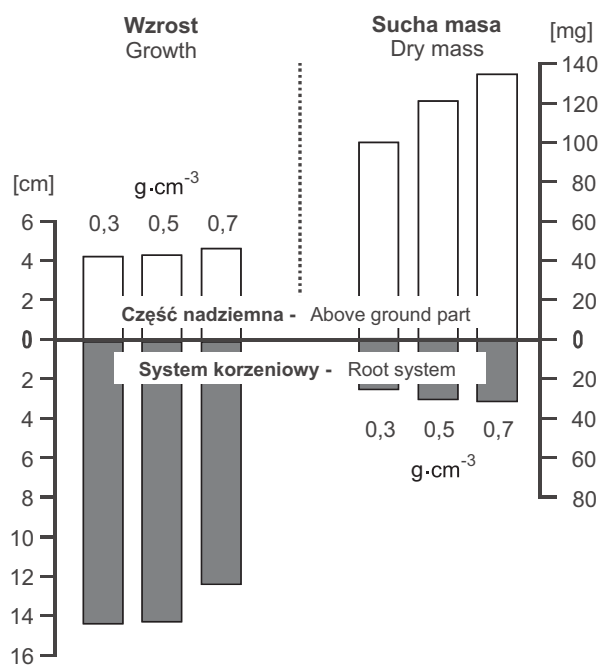
**Rycina 1. Proporcja długości oraz suchej masy między częścią nadziemną i systemem korzeniowym sadzonek sosny zwyczajnej w poszczególnych wariantach zagęszczenia podłoża**

Figure 1. Proportion of length and dry mass between above-ground part and root system of Scots pine seedlings in the individual variants of substratum compaction

(o 15,7%). Średnie wartości parametrów długości sadzonek w wariantach zagęszczenia Z-2 były bardzo zbliżone do wariantu bez zagęszczenia Z-1, zanotowano tylko niewielkie skrócenie systemu korzeniowego i niewielki przyrost części nadziemnej, zaś średnia długość sadzonek była równa długości sadzonek w wariantach Z-1 (tab. 2, ryc. 1).

Sucha masa całej sadzonki wzrosła o 26 mg (20,8%) przy wzroście zagęszczenia gleby do poziomu Z-2 oraz o 40,6 mg (32,6%) dla poziomu Z-3 w porównaniu do Z-1. Sucha masa każdej analizowanej części sadzonek również zwiększała się przy wzroście zagęszczenia substratu (tab. 3, ryc. 1).

Wraz ze wzrostem zagęszczenia substratu system korzeniowy ulegał skróceniu, zaś jego masa była nieznacznie większa, co świadczyłoby o jego mocniejszej rozbudowie. Z kolei długość części nadziemnej była znacznie mniejsza w porównaniu do systemu korzeniowego (ok. 3 razy), ale w przeciwieństwie do korzeni nieznacznie zwiększała się wraz z silniejszym zagęszczeniem podłoża. Wyraźnie odmiennie kształtował się natomiast rozkład masy części nadziemnej i podziemnej sadzonek sosny, które generalnie zwiększały się wraz ze stopniem zagęszczenia substratu. Proporcja między suchą masą pędu z igłami do masy systemu korzeniowego kształtowała się na poziomie 3:1 dla najsłabszego zagęszczenia (0,3 g·cm<sup>-3</sup>) do 4:1 dla najsilniejszego zagęszczenia (0,7 g·cm<sup>-3</sup>). Ogólnie sadzonki przy zwiększaniu za-

**Tabela 4. Wpływ zagęszczenia podłoża na analizowane parametry sadzonek sosny zwyczajnej (wartości istotne zostały pogrubione)**

Table 4 Effect of substratum compaction on the analysed parameters of Scots pine seedlings (bolded the significant)

Parametr Variable	Suma kwadratów Sum of square	Stopnie swobody Degrees of freedom	Średni kwadrat Mean square	<i>F</i> -test	Poziom istotności Significance level ( <i>p</i> )
<b>Długość sadzonki</b> Length of seedling	302,11	2	151,06	<b>14,74</b>	<b>&lt;0,001</b>
<b>Długość systemu korzeniowego</b> Length of root system	455,42	2	227,71	<b>28,80</b>	<b>&lt;0,001</b>
<b>Długość części nadziemnej</b> Length of above-ground part	16,05	2	8,03	<b>9,58</b>	<b>&lt;0,001</b>
<b>Średnica w szyi korzeniowej</b> Thickness in root neck	1,61	2	0,81	<b>36,70</b>	<b>&lt;0,001</b>
<b>Sucha masa całej sadzonki</b> Dry mass of whole seedlings	156565,89	2	78282,94	<b>20,10</b>	<b>&lt;0,001</b>
<b>Sucha masa części nadziemnej</b> Dry mass of above-ground part	35242,07	2	17621,04	<b>21,01</b>	<b>&lt;0,001</b>
<b>Sucha masa systemu korzeniowego</b> Dry mass of root system	4040,52	2	2020,26	<b>9,12</b>	<b>&lt;0,001</b>
<b>Sucha masa aparatu asymilacyjnego</b> Dry mass of assimilative apparatus	21342,40	2	10671,20	<b>22,02</b>	<b>&lt;0,001</b>

gęszczenia wprawdzie miały mniejszą długość, ale ich sucha masa była większa (ryc. 1).

Dla wszystkich analizowanych cech sadzonek sosny zwyczajnej stwierdzono istotny statystycznie wpływ stopnia zagęszczenia podłoża (tab. 4).

Generalnie prawie wszystkie analizowane cechy sadzonek sosny, z wyjątkiem całkowitej ich długości oraz długości systemu korzeniowego, zwiększały się wraz ze wzrostem zagęszczenia podłoża w kontenerach szkółkarskich (ryc. 2).

Współczynniki korelacji oraz determinacji między gęstością podłoża a parametrami mierzonymi dla pojedynczych sadzonek okazały się istotne na przyjętym poziomie istotności  $p=0,05$ . Najwyższy współczynnik korelacji zanotowano dla średnicy w szyi korzeniowej  $R=0,34$ , a dla pozostałych cech wartości były również dodatnie, ale nieco mniejsze. Wyjątek stanowiły długość części podziemnej oraz długość całej sadzonki, dla których zależność korelacyjna była ujemna (odpowiednio  $-0,23$  oraz  $-0,16$ ). Współczynniki determinacji  $R^2$  prostych trendu dla poszczególnych parametrów były bardzo niskie, co wynika z dużej zmienności parametrów mierzonych dla pojedynczych sadzonek (tab. 2, 3).

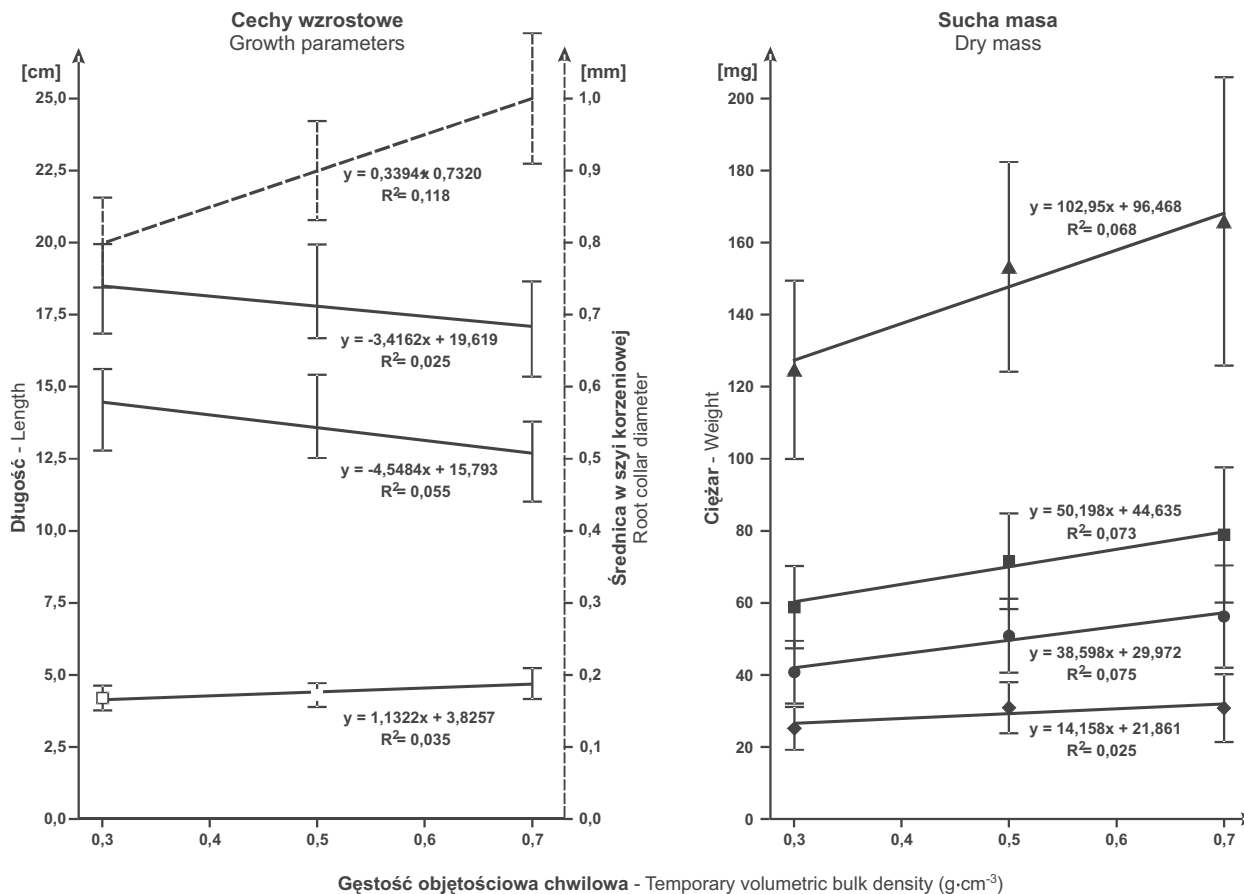
#### 4. Dyskusja

Zagęszczenie podłoża szkółkarskiego prowadzi do wzrostu jego gęstości objętościowej, co w konsekwencji może znacząco wpłynąć na pogorszenie warunków

wzrostu roślin. W większości przypadków doprowadza to do ograniczenia wzrostu systemu korzeniowego i zmniejszenia się wielkości całej sadzonki (Brais 2001; Ferree et al. 2004; Lipiec et al. 2013). Przy zwiększającej się produkcji szkółkarskiej z zakrytym systemem korzeniowym określenie optymalnych czynników związanych ze stosowanym podłożem jest zatem ważnym zagadnieniem.

Wyniki uzyskane w prezentowanym doświadczeniu wskazały na wyraźny związek między parametrami sadzonek a poziomem zagęszczenia podłoża szkółkarskiego, złożonego z torfu z dodatkiem perlitu, jako komponentu poprawiającego pojemność powietrzną. Generalnie wraz ze wzrostem zagęszczenia zmniejszały się wymiary sadzonek, ale wzrastała ich grubość oraz sucha masa. Zwiększanie się masy systemu korzeniowego i pędu wraz ze wzrostem zagęszczenia substratu uzyskane dla sosny zwyczajnej jest zbliżone z rezultatami badań wykonanych dla innego gatunku sosny. Sadzonki *Pinus nigra* hodowane na podłożu złożonym z wermikulitu, torfu i perlitu, zagęszczanym w zakresie od 0,71 do 1,01 g·cm<sup>-3</sup>, cechowały się również lepszymi parametrami w porównaniu do sadzonek z substratu niezagęszczonego (Zahreddine et al. 2004). Podobnie sadzonki *Pinus contorta* produkowane w kontenerach zmniejszały swój wzrost i suchą masę dopiero przy gęstości objętościowej powyżej 1,7 g·cm<sup>-3</sup> (Conlin, van den Driessche 1996). Przy porównywalnej wartości zagęszczenia podłoża szkółkarskiego (1,75 g·cm<sup>-3</sup>) zaczęło się również ograniczanie wzrostu sadzonek





Rycina 2. Zmiana średniej wartości cech wzrostowych oraz średniej wartości suchej masy poszczególnych części sadzonek sosny zwyczajnej w zależności od poziomu zagęszczenia substratu glebowego. Długość: całej sadzonki ( $\Delta$ ), części nadziemnej ( $\square$ ), systemu korzeniowego ( $\diamond$ ); średnica w szyi korzeniowej ( $\circ$ ); sucha masa: całej sadzonki ( $\blacktriangle$ ), części nadziemnej ( $\blacksquare$ ), systemu korzeniowego ( $\blacklozenge$ ), aparatu asymilacyjnego ( $\bullet$ ); pionowe linie wyznaczają  $\pm 1$  odchylenie standardowe

Figure 2. Change in mean value of growth parameters and mean value of dry mass of individual parts of Scots pine seedlings depending on the level of the soil substrate compaction. Length of: total seedling ( $\Delta$ ), above-ground-part ( $\square$ ), root system ( $\diamond$ ); root collar diameter ( $\circ$ ); dry mass of: total seedling ( $\blacktriangle$ ), above-ground part ( $\blacksquare$ ), root system ( $\blacklozenge$ ), assimilative apparatus ( $\bullet$ ); vertical lines defined values  $\pm 1$  standard deviation

*Quercus rubra* (Maupin, Struve 1997). Wskazuje to na potrzebę przeprowadzenia dodatkowych badań dla sosny zwyczajnej z zastosowaniem wyższej gęstości objętościowej, chociaż przy zastosowanym podłożu perlitowo-torfowym raczej nie będzie to możliwe, ze względu na jego silnie porowatą strukturę. Być może wskazane byłoby dodać do takiego podłoża dodatkowego komponentu umożliwiającego uzyskanie większego zagęszczenia lub zastosować kontenery o nieco większej pojemności, np.  $120 \text{ cm}^3$ , które są zalecane przez Szablę i Pabiana (2003) do hodowli sadzonek sosny.

Na istotne znaczenie poziomu zagęszczenia podłoża szkółkarskiego wskazali także Ferree i inni (2004), którzy analizując sadzonki *Malus domestica* wyhodowane

w kontenerach wypełnionych glebą składającą się z piasku (20%), iltu (62%) i gliny (18%), określili optymalną gęstość objętościową do ich wzrostu, wynoszącą  $1,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Zastosowane podłoże charakteryzujące się gęstością objętościową powyżej  $1,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  wpływało negatywnie na sadzonki, powodując zmniejszenie się ich wymiarów oraz suchej masy. Nieco inny rezultat otrzymał Heilman (1981), analizując sadzonki *Pseudotsuga menziesii* wzrastające na glinie piaszczystej oraz ile, który stwierdził brak istotnego efektu zagęszczania gleby na wzrost sadzonek. Penetracja podłoża przez korzenie zmniejszała się liniowo wraz ze wzrostem zagęszczenia i dopiero jego wartość w zakresie  $1,74\text{--}1,83 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  blokowała wzrost systemu korzeniowego. Istotny wpływ zagęszczenia gleby na wzrost sadzonek

bożodrzewu (*Ailanthus altissima*) wskazały również badania przeprowadzone przez Pan i Bassuk (1985). Autorki analizowały wzrost sadzonek w pojemnikach o średnicy 20 cm wypełnionych gliną piaszczystą oraz piaskiem drobnoziarnistym i wykazały gorsze parametry wzrostowe i suchą masę sadzonek tego gatunku na glebie zagęszczonej. Zbliżone rezultaty otrzymali Onweremadu i inni (2008), analizując sadzonki *Citrus sinensis* wzrastające w warunkach szklarniowych w pojemnikach wypełnionych glebą zagęszczoną do siedmiu poziomów. W badaniach tych długość korzeni zmniejszała się wraz ze wzrostem gęstości objętościowej i malejącej wilgotności gleby. Podobny wynik uzyskano w prezentowanych badaniach dla sosny zwyczajnej, której system korzeniowy ulegał skróceniu wraz ze wzrostem zagęszczenia podłoża perlitowo-torfowego, jednak zwiększała się jego sucha masa. Na słabszy wzrost systemu korzeniowego na glebie o większej gęstości objętościowej, który przejawiał się skracaniem korzeni głównych i bocznych, wskazały również analizy przeprowadzone dla *Eucalyptus nitens* (Misra, Gibbons 1996). Ujemny wpływ zagęszczenia gleby wykazano także w badaniach dotyczących architektury systemu korzeniowego sadzonek *Gleditsia triacanthos*. Wykazano w nich, że w glebie zagęszczonej o dodatkowo zredukowanej zawartości tlenu, korzenie sadzonek rosły głównie ku górze lub poziomo (Gilman et al. 1987).

Jednym z ważniejszych parametrów charakteryzujących podłoże szkółkarskie jest jego pojemność wodna i powietrzna. Dla zastosowanego substratu perlitowo-torfowego obydwie charakterystyki zależały od jego zagęszczenia. Największą pojemność powietrzną uzyskano w wariancie bez zagęszczenia gleby i jak wskazują wyniki badań nie były to warunki optymalne dla wzrostu sadzonek sosny. Przy wroście zagęszczenia gleby nastąpił spadek pojemności powietrznej oraz spadek kapilarnej pojemności wodnej, wskutek zmniejszania się liczby kapilar w glebie, wywołany przez zbliżanie się do siebie cząstek fazy stałej. Potwierdzają to badania przeprowadzone przez Onweremadu i innych (2008), którzy również stwierdzili ujemny związek między gęstością objętościową gleby a jej wilgotnością. Mimo tego sadzonki sosny wzrastające na najbardziej zagęszczonym substracie cechowały się największą masą, chociaż nieco mniejszymi wymiarami w porównaniu do substratu niezagęszczonego. Prawdopodobnie zbyt luźny substrat powodował szybszy odpływ wody w dolną część pojemnika, co stymulowało wykazane w badaniach wydłużanie się systemu korzeniowego. Dlatego też, większe zagęszczenie substratu, mimo mniejszej pojemności wodnej i powietrznej, stwarzało lepsze warunki dla wzrostu sadzonek sosny zwyczajnej.

## 5. Wnioski

1. Zmiana zagęszczenia substratu glebowego miała istotny wpływ na wszystkie parametry określone dla sadzonek sosny zwyczajnej, a obliczone współczynniki determinacji dla liniowych zależności trendu, mimo stosunkowo niskich wartości, były istotne statystycznie.

2. Wraz ze wzrostem zagęszczenia podłoża szkółkarskiego zmniejszała się liczba wschodów oraz długość sadzonek sosny zwyczajnej, przy czym wyraźnie skracał się system korzeniowy, natomiast nieznacznie wzrastała długość części nadziemnej. Trudniejsze warunki wzrostu sadzonki rekompensowały zwiększonym przyrostem pędu na grubość oraz zwiększaniem się masy aparatu asymilacyjnego.

3. Zaobserwowano zależność między całkowitą długością sadzonek a ich suchą masą. Wraz ze wzrostem zagęszczenia substratu sadzonki były mniejsze, natomiast rosła ich sucha masa.

## Podziękowania

Badania, zrealizowane w ramach tematów DS-3401/KMPL oraz DS-3405/KGNiSzL, zostały sfinansowane z dotacji na naukę przyznanej przez MNiSW.

## Literatura

- Alameda D., Anten N.P.R., Villar R. 2012. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. *Soil and Tillage Research*, 120: 121–129.
- Arvidsson J. 2001. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil and Tillage Research*, 60(1–2): 67–78.
- Bartholomew P.W., Williams R.D. 2010. Effects of soil bulk density and strength on seedling growth of annual ryegrass and tall fescue in controlled environment. *Grass and Forage Science*, 65: 348–357.
- Boja N., Boja F. 2011. Variation of soil compaction in forest nurseries. *Research Journal of Agricultural Science*, 43(3): 23–30.
- Brais S. 2001. Persistence of soil compaction and effects on seedling growth in northwestern Quebec. *Soil Science Society of American Journal*, 65(4): 1263–1271.
- Buraczyk W., Szeligowski H., Aleksandrowicz-Trzciska M., Drozdowski S., Jakubowski P., 2012. Wzrost mikoryzowanych i niemikoryzowanych sadzonek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w warunkach zróżnicowanych wilgotności i żyzności podłoża. *Sylvan*, 156 (2): 100–111.
- Conlin T.S.S., van den Driessche R. 1996. Short term effects of soil compaction on growth of *Pinus contorta* seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 26: 727–739.

- Ehlers W., Werner D., Mähner T. 2000. Wirkung mechanischer Belastung auf Geflüge und Ertragsleistung einer Löss-Parabraundere mit zwei Bearbeitungssystem. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(3): 321–333.
- Ferree, D.C., Streeter J.G., Yuncong Y. 2004. Response of container-grown apple trees to soil compaction. *Hort Science*, 39: 40–48.
- Gilman E.F., Leone I.A., Flower F.B. 1987. Effect of soil compaction and oxygen content on vertical and horizontal root distribution. *Journal of Environmental Horticulture*, 5(1): 33–36.
- Heilman P. 1981. Root penetration of Douglas-fir seedlings into compacted soil. *Forest Science*, 27(4): 660–666.
- Kormanek M., Banach J. 2011. Influence in soil compaction on the growth of pedunculate oak seedlings bred in laboratory condition, w: Utilization of agricultural and forest machinery. (red. J. Walczyk), Kraków, PAU, 109–118.
- Kormanek M., Banach J. 2012. Wpływ nacisku jednostkowego wywieranego na glebę, na jakość odnowienia wybranych gatunków drzew leśnych. *Acta Agrophysica*, 19(1): 51–63.
- Kozłowski T.T. 1999. Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14: 596–619.
- Lipiec J., Horn R., Pietrusiewicz J., Siczek A. 2013. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil and Tillage Research*, 121: 74–81.
- Lipiec J., Reyman J. 2010. Gleba pod kołami, w: Badania w toku – Agrofizyka. *Academia*, 3(11): 38–39.
- Maupin C., Struve D.K. 1997. Red oak transplanting to different bulk density soils have similar water use characteristics. *Journal of Arboriculture*, 23: 233–238.
- Misra R.K., Gibbons A.K. 1996. Growth and morphology of eucalypt seedling-roots, in relation to soil strength arising from compaction. *Plant and Soil*, 182: 1–11.
- Mądry W., Mańkowski D.R., Kaczmarek Z., Krajewski P., Studnicki M. 2010. Metody statystyczne oparte na modelach liniowych w zastosowaniach do doświadczalnictwa, genetyki i hodowali roślin. *Monografie i Rozprawy Naukowe IHAR*, 34: 1–162.
- Onweremadu E.U., Eshett E.T., Ofoh M.C., Nwufo M.I., Obiefuna J.C. 2008. Seedling performance as affected by bulk density and soil moisture on a typic tropaequept. *Journal of Plant Sciences*, 3(1): 43–51.
- Ozimek G. 1993. Przyrodnicze aspekty stosowania szerokich opon w maszynach leśnych. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*, 5/93: 20–22.
- Pan E., Bassuk N. 1985. Effects of soil type and compaction on the growth of *Ailanthus altissima* seedlings. *Journal of Environmental Horticulture*, 3(4): 158–162.
- Porter B. 1994. Wpływ sposobów zrywki na uszkodzenia gleb i drzew pozostających. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*, 11: 20–22.
- Porter B. 1998. Ekologiczne aspekty prac zrywkowych. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*, 7: 17–19.
- Szabla K. 2009. Hodowlane i ekonomiczne aspekty produkcji materiału sadzeniowego z zakrytym systemem korzeniowym poddanego zabiegowi sterowanej mikoryzacji. *Sylwan*, 153(4): 253–259.
- Szabla K., Pabian R., 2003. Szkółkarstwo kontenerowe. Warszawa, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, 213 s.
- Ulrich R., Neruda J., Valenta J. 2003. The impact of selected machines carriageable system on forest soil. *Inżynieria Rolnicza*, 11(53): 229–235.
- Więsik J. 1996. Możliwości doboru maszyn przyjaznych dla środowiska leśnego. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*, 1: 13–15.
- Zahreddine, H.G., D.K Struve, and M. Quigley. 2004. Growing *Pinus nigra* seedlings in Spinout-treated containers reduces root malformation and increases regrowth potential. *Journal of Environmental Horticulture*, 22:176–182.