

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^{1✉}, Jacek Banach², Michał Ryba¹

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, ¹Katedra Mechanizacji Prac Leśnych, ²Katedra 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⁻³). 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 grunto- wych, m.in. związanych z określeniem głębokości oddziaływania nacisku wywołanego 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 zagęszczania 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 wysypano 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 $35 \times 21 \text{ cm}$, 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 ($3 \times 3 \text{ m}$), 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 Temporary bulk density	Gęstość objętościowa suchej masy Dry mass bulk density	Porowatość Porosity	Kapilarna pojemność wodna Capillary water capacity	Pojemność powietrzna Air capacity
		g·cm ⁻³	g·cm ⁻³	%	%	%
Bez zagęszczenia Without compaction	Z-1	0,3	0,11±0,00	90,6±0,3	453,7±13,2	41,0±1,0
Średnie zagęszczenie Medium compaction	Z-2	0,5	0,22±0,01	81,3±0,9	298,0±31,9	17,0±2,9
Mocne zagęszczenie 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. Podlewanie 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 ε_{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 wariacie, 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 wyraźnie krótszego systemu korzeniowego w wariacie 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

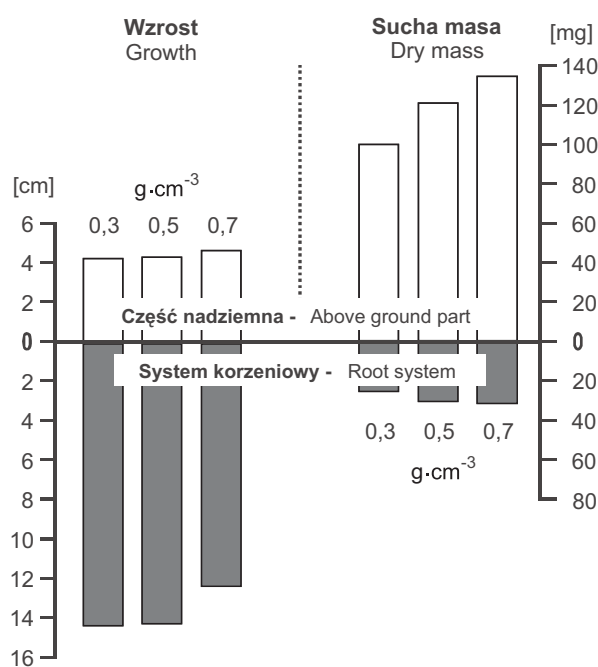
**Rycina 1. Proporcja długości oraz suchej masy między częścią nadziemną i systemem korzeniowym sadzonek sosny zwyczajnej w poszczególnych wariantach zagęszczenia podłoża**

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 zagęszczania Z-2 były bardzo zbliżone do wariantu bez zagęszczania Z-1, zanotowano tylko niewielkie skrócenie systemu korzeniowego i niewielki przyrost części nadziemnej, zaś średnia długość sadzonki 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⁻³) do 4:1 dla najsilniejszego (0,7 g·cm⁻³). Ogólnie sadzonki przy zwiększaniu za-

Tabela 4. Wpływ zagęszczania 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	F-test	Poziom istotności Significance level (p)
Długość sadzonki Length of seedling	302,11	2	151,06	14,74	<0,001
Długość systemu korzeniowego Length of root system	455,42	2	227,71	28,80	<0,001
Długość części nadziemnej Length of above-ground part	16,05	2	8,03	9,58	<0,001
Średnica w szyi korzeniowej Thickness in root neck	1,61	2	0,81	36,70	<0,001
Sucha masa całej sadzonki Dry mass of whole seedlings	156565,89	2	78282,94	20,10	<0,001
Sucha masa części nadziemnej Dry mass of above-ground part	35242,07	2	17621,04	21,01	<0,001
Sucha masa systemu korzeniowego Dry mass of root system	4040,52	2	2020,26	9,12	<0,001
Sucha masa aparatu asymilacyjnego Dry mass of assimilative apparatus	21342,40	2	10671,20	22,02	<0,001

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).

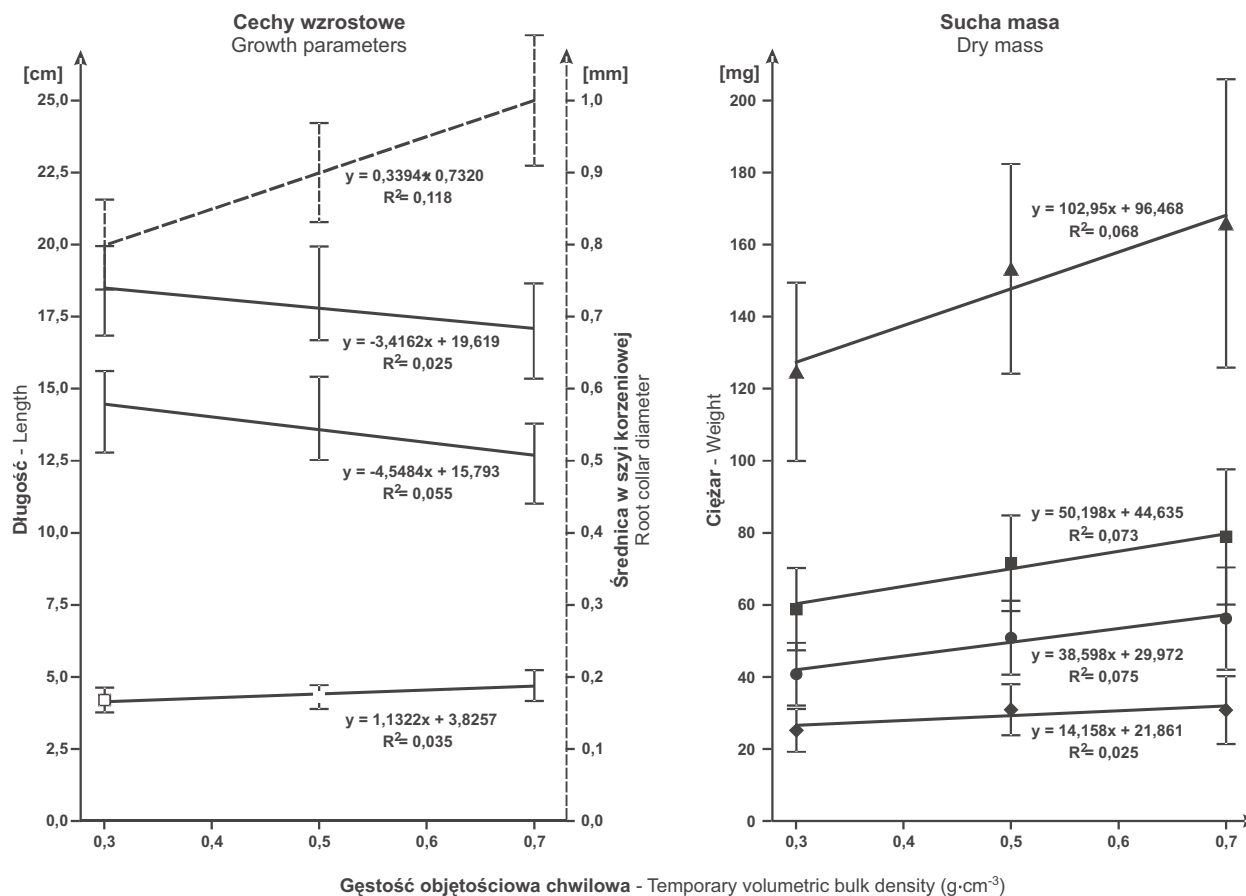
Współczynniki korelacji oraz determinacji między gęstością podłoża a parametrami mierzonymi dla pojedynczych sadzonek okazały się istotne na przyjętym poziomie istotności $p=0,05$. Najwyższy współczynnik korelacji zanotowano dla średnicy w szyi korzeniowej $R=0,34$, a dla pozostałych cech wartości były 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

Zagęszczanie 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 zbieżne 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 $1,01 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, cechowały się również lepszymi parametrami w porównaniu do sadzonek z substratu niezagęszczanego (Zahreddine et al. 2004). Podobnie sadzonki *Pinus contorta* produkowane w kontenerach zmniejszały swój wzrost i suchą masę dopiero przy gęstości objętościowej powyżej $1,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Conlin, van den Driessche 1996). Przy porównywalnej wartości zagęszczenia podłoża szkółkarskiego ($1,75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 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 (Δ), 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 ± 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 (Δ), 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 ± 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 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%), ilu (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.
- Buraczuk W., Szeligowski H., Aleksandrowicz-Trzcńska 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., Nwifo 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.

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

Mariusz Kormanek¹✉, Jacek Banach², Michał Ryba¹

University of Agriculture in Kraków, Faculty of Forestry, ¹ Department of Forest Work Mechanization,

² Department of Genetics and Forest Tree Breeding, Al. 29 Listopada 46, 31–425 Kraków, Poland.

✉ Tel. +48 12 6625024, e-mail: rkorma@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 containers are 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⁻³). During the experiment, nursery containers were initially placed in a plastic tent for a period of two months, and then for three 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 analysed 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. Introduction

The development of special nursery in Poland and particularly container nursery should be an impulse for more research for determining the optimal conditions for seedlings production. In specialised literature, however, there are very few publications on this subject. Therefore, resolving problems occurring during seedlings breeding in container nurseries has often an intuitive character, unsupported by research results based on field experiment analysis. One of the essential elements in this production is nursery substratum, which constitutes a habitat for seed germination and development of seedling's root system. It stores water and mineral substances which are being supplied with fertilisers that a growing plant uses. It may be also artificially enriched by mycorrhizal fungi, which improves the increase of seedlings in nursery containers and simplifies their adaption on the crop, especially on degraded areas (Szabla 2009; Buraczyk et al. 2012).

An important issue in this context is defining optimal nursery substratum compaction, which influences air and water capacitance.

The majority of research and analysis associated with soil compaction influence on plant growth concern defining negative results of using forest machines working on cutting areas (Porter 1994; 1998; Więsik 1996, Ulrich et al. 2003) or on traditional filed nurseries inter alia connected with defining depth of pressure effect caused by their wheels (Etana, Håkanson 1994; Ehlers et al. 2000; Arvidsson 2001; Boja N., Boja F. 2011), changes of characteristics and parameters of seedlings growing on compacted soil (Ozimek 1993; Kozłowski 1999; Kormanek, Banach 2012; Lipiec et al. 2013), and also changes of soil's water capacitance and absorption of mineral components supplied with fertilisers (Onweremadu et al. 2008; Lipiec, Rejman 2010).

There are few national research works concerning nursery substratum compaction and its influence on

growth of forest tree species seedlings and so far they concern on pedunculate oak (Kormanek, Banach 2011). By contrast, foreign studies concentrate mainly on agricultural species (e.g. wheat, grass) (Bartholomew, Williams 2010; Alameda et al. 2012) and garden (Ferree et al. 2004; Onweremadu et al. 2008) or woods, but with no great importance to forest economy (Pan, Bassuk 1985; Gilman et al. 1987).

The research of nursery compaction influence, but concerning only forest trees species, was conducted by Maupin and Struve (1997) who stated that *Quercus rubra* seedling growth decreased only at substratum compaction over $1.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Similarly, container *Pinus contorta* seedlings limited their growth and dry mass at volume density over $1.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Conlin, van den Driessche 1996). In some cases, it was necessary to increase nursery substratum compaction, as indicated by greater mass of root system and *Pinus nigra* seedling sprouts growing on substratum composed of vermiculate, peat and perlite (in proportion 1:1:1), compacted in the range from 0.71 to $1.01 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, in comparison with non-compacted substratum (Zahreddine et al. 2004). The results mentioned obtained for some forest trees species indicate that the level of nursery substratum compaction has a significant meaning for regular seedlings growth and should be shaped depending on species and substratum type.

In this research, the aim was to define the influence of three different levels of peat substratum compaction in polyethylene container on the growth of Scots pine seedlings. The influence of compaction on plants growth was characterised by analysis of growth parameter variability and dry mass of bred planting material, combined with physical parameters of substratum.

2. Material and methods

Nursery substratum

Substratum used in production of seeds with covered root system according to the recommendation for the State Forests National Forest Holding should have air capacitance on the level of 20%–25% of volume, water capacitance in the range 800%–1000% of weight, general porosity at least of 70% and permanent pH in the range of 4.5–5.5 (Szabla, Pabian 2003).

A mixed substratum was used for research consisting of peat (90%) and perlite (10%) of pH 5.3, which was prepared in Javo mixer. Substratum after mixing was characterised by weight moisture $67.5 \pm 2.5\%$, which

was consistent with the one used during filling the containers with seedlings production with covered root system. Then, prepared substratum was poured into containers, using three variants of compaction. First variant, without compaction (Z-1), was received after filling with substratum individual cells in nursery cassette, while the third, strong compaction (Z-3), was obtained by gradual adding substratum and its separate tamping with wooden stamp in all container's cells. After filling trial cells (without compaction and with strong compaction), the substratum was poured out, weighed and other following doses of substratum for both variants belonging to individual container was measured. Second variant, medium compaction (Z-2), was also defined with weight method as the average value of substratum mass needed for filling containers without compaction and substratum mass for variant with strong compaction. Substratum characteristics and its parameters after compaction in individual variants are shown in Table 1.

Nursery containers

For the research, a polyethylene container Hiko HV50 of $35 \times 21 \text{ cm}$, consisting of 67 cells, was used. A single cell shaped like truncated cone has a full partition and a hole in lower part and vertical ribs preventing the curling up of the root system. In the case of this species breeding, nine nursery containers and three containers with different compaction of peat substratum in three repetitions were used. On roost situated on nursery bed in nursery tunnel from containers formed was tetragon ($3 \times 3 \text{ m}$), within which randomly individual variants of compaction were placed.

Seed sowing

Pine seeds used in the experiment originated from the collection in 2011 from selected seed stand in Niepołomice Forest District (subdivision 159c). Seeds were characterised with purity 99% and germination capacity 96%, and the mass of thousand seeds equalled 5.4 g. Nursery containers after filling with substratum were sown on 8th of May 2012, sowing one seed to each cell, and then were covered with thin layer of sand. Containers were transferred to plastic tunnel where they stayed for a 5-month period until the end of the experiment, wherein foil from tent was removed in mid-July, which is after nine weeks. Watering and fertilisation took place with the use of suspended, stationary micro-spraying system.

Table 1. Characteristics of substratum in the individual compaction variants

Variant of substratum compaction	Symbol of variant	Temporary bulk density	Dry mass bulk density	Porosity	Capillary water capacity	Air capacity
		$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	%	%	%
Without compaction	Z-1	0.3	0.11 ± 0.00	90.6 ± 0.3	453.7 ± 13.2	41.0 ± 1.0
Medium compaction	Z-2	0.5	0.22 ± 0.01	81.3 ± 0.9	298.0 ± 31.9	17.0 ± 2.9
Strong compaction	Z-3	0.7	0.35 ± 0.01	69.6 ± 0.9	167.7 ± 2.3	10.3 ± 1.8

Laboratory work

After a 5-month period from the experiment beginning, grown seedlings were transferred to laboratory, where they were taken out from containers, and the substratum was removed from the root system. For this purpose, the seedlings were first soaked in water for 24 hours, and then the substratum was removed under running water. After surface drainage, separately for each seedling, the length of seedling's sprout and length of backbone root (accuracy up to 0.1 cm), and also diameter in root collar (to 0.1 mm), were measured. Then seedlings were dried in a temperature of 70°C (48 hours), and the dry mass was defined separately for root system, sprout and assimilation apparatus (up to 0.001 g).

Statistical analysis

In order to determine the influence of constant factor (variant of substratum compaction) on growth and weight parameters of seedlings, two-stage analysis of measurement data, with the use of program Statistica® 9.0 (polish version, StatSoft Inc, Tulsa, USA), were conducted. In the first stage, one-factor analysis model of variance for data from one-factor experiment was used, set up in totally random system with constant factor in the formula $y_{ik} = m + a_i + \varepsilon_{ik}$, where: y_{ik} is an observation of quantitative feature for i -th factor level in k -th repetition, m is an overall mean, a_i is an effect of i -th factor level, while ε_{ik} is a random component. In the second stage, after stating the relevant influence of soil compaction variant on examined seedlings feature, a graphic presentation of observed feature value for individual levels of examined factor was first performed, and then linear dependence function of measured parameters on instantaneous volume density

(Mądry et al. 2010) was matched. These analyses were performed jointly for 557 seedlings obtained from three variants of nursery substratum compaction.

3. Results

The efficiency of the seedlings was very high, but depended on substratum compaction variant (Table 2) and was definitely higher from that given for this species in "Rules of silviculture" (2003) (0.7–0.8). Fewest seedlings were bred on substratum with highest compaction degree where for 201 sown seeds only 170 seedlings were obtained, whereas the highest number of seedlings (194) were obtained with the smallest substratum compaction.

The highest value of whole seedlings average length, which is a total length of backbone root and sprout, was obtained for uncondensed peat substratum (variant Z-1). Smaller seedlings observed were in the variant in which soil substratum was highly condensed (Z-3). The average reduction of seedling's length between variant Z-3 and Z-1 was close to 8.6%. This difference resulted from visibly shorter root system in variant Z-3 (by 14%). However, plants tried to compensate reduction of root length at high substratum compaction with increased growth of above-ground part (by 9.5%) and thickness in root collar (by 15.7%). Average parameters value of seedling's length in compaction variant Z-2 were very close to variant Z-1 without compaction, and only a small reduction of root system and small increase of over-ground part was noted, whereas average seedling length was equal to seedling length in variant Z-1 (Table 2, Fig. 1).

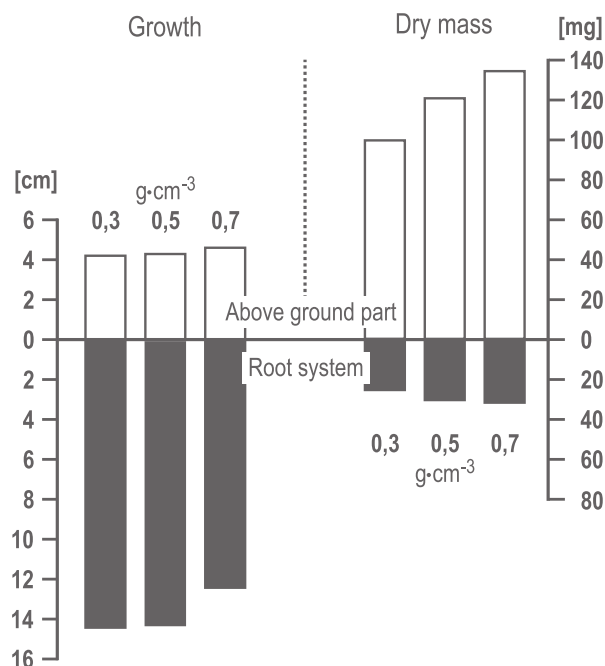
The dry mass of whole seedling increased by 26 mg (20.8%) with soil compaction increase to level Z-2 and by 40.6 mg (32.6%) for level Z-3 in comparison with

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

Variant of substratum compaction	Seedlings efficiency %	Length of seedling	Length of sprout	Length of root system	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

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

Variant of substratum compaction	Average dry mass of:			
	total seedling	sprout without needles	root system	assimilative apparatus
	mg	mg	mg	mg
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

**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

Z-1. The dry mass of each analysed part of seedling also increased with increase of substratum compaction (Table 3, Fig. 1).

With increase of substratum compaction the root system was reduced, whereas its mass was slightly bigger, which would indicate its stronger development. Meanwhile, the length of over-ground part was much smaller in comparison with root system (about three times), but in contrast to roots, slightly increased with stronger substratum compaction. Clearly, mass distribution of over- and under-ground part of pine seedling was differently developed, which generally increased with substratum compaction degree. Proportion between dry sprout mass with needles to mass of root system shaped was on level 3:1 for weakest compaction ($0.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) to 4:1 for strongest ($0.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). Generally, seedlings with compaction increase did have smaller length, but their dry mass was bigger (Fig. 1).

For all analysed Scots pine seedlings, the features stated a relevant statistical influence of substratum compaction degree (Table 4).

Generally, almost all analysed pine seedlings features, except for their total length and root system

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

Variable	Sum of square	Degrees of freedom	Mean square	<i>F</i> -test	Significance level (<i>p</i>)
Length of seedling	302.11	2	151.06	14.74	<0.001
Length of root system	455.42	2	227.71	28.80	<0.001
Length of above-ground part	16.05	2	8.03	9.58	<0.001
Root collar diameter	1.61	2	0.81	36.70	<0.001
Dry mass of whole seedlings	156565.89	2	78282.94	20.10	<0.001
Dry mass of above-ground part	35242.07	2	17621.04	21.01	<0.001
Dry mass of root system	4040.52	2	2020.26	9.12	<0.001
Dry mass of assimilative apparatus	21342.40	2	10671.20	22.02	<0.001

length, increased with the increase of substratum compaction in nursery containers (Fig. 2).

Correlation and determination factors between substratum compaction and parameters measured for single seedlings turned out to be relevant on established significance level at $p=0.05$. The highest correlation factor noted for root collar diameter was $R=0.34$ and for remaining value features was also positive, but slightly smaller. The exception was the length of underground part and length of whole seedling for which correlation dependence was negative (-0.23 and -0.16 , respectively). The determination factor R^2 of direct trends for individual parameters was very low, which results from a high variability of parameters measured for single seedlings (Tables 2 and 3).

4. Discussion

Nursery substratum compaction leads to growth of its volume density, which consequently can significantly influence the deterioration of a plant's growth. In the majority of cases, it leads to limiting the growth of root system and reduction of whole seedling's size (Brais 2001; Ferree et al. 2004; Lipiec et al. 2013). With increment of covered root system nursery production, defining optimal factors related to used substratum is therefore an important issue.

The results obtained in the presented research indicate a visible relation between seedlings parameters and the level of nursery substratum compaction, composed of peat with perlite as an addition, as a component improving air capacitance. Generally with

compaction, the seedling's dimensions decreased, but increased its thickness and dry mass. The increment of root system mass and sprout with increment of substratum compaction obtained for Scots pine is convergent with research results performed for other pine species. Seedlings of *Pinus nigra* grown on substratum composed of vermiculite, peat and perlite, condensed in the range from 0.71 to $1.01 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, were characterised by better parameters in comparison with seedlings from non-composed substratum (Zahreddine et al. 2004). Similarly, *Pinus contorta* seedlings produced in containers decreased in growth and dry mass with capacitance density over $1.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Conlin, van den Driessche 1996). With comparable value of nursery substratum compaction ($1.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) also began the limiting of *Quercus rubra* seedling growth (Maupin, Struve 1997). It indicates a need of conducting additional research for Scots pine with the use of higher volume condensation, although with used perlite–peat substratum, it is not possible due to its strongly porous structure. Perhaps such a substratum additional component should be recommended to be added to obtain higher compaction or to use containers of slightly bigger capacitance e.g. 120 cm^3 , which are recommended by Szabla and Pabian (2003) for pine seedling breeding.

A significant meaning of nursery substratum compaction level indicators was also provided by Ferree et al. (2004) who by analysing *Malus domestica* seedlings grown in containers filled with soil composed of sand (20%), loam (62%) and clay (18%) stated an optimal capacitance density for their growth amounting

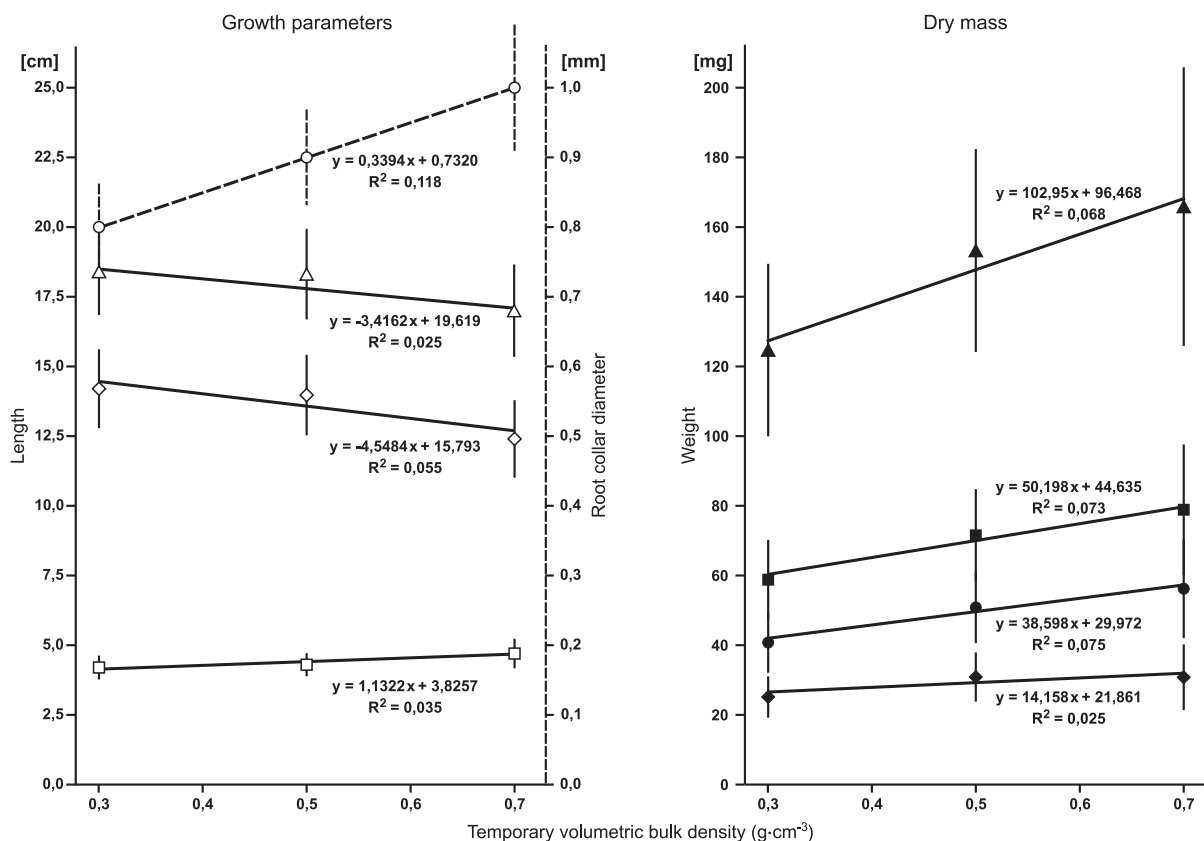


Figure 2. Change in mean value of growth parameters and mean value of dry mass of individual parts of Scots pine seedlings depending on the level of the soil substrate compaction. Length of: total seedling (Δ), above-ground part ($\square$), root system ($\diamond$); root collar diameter ($\circ$); dry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

to $1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Used substratum characterised with capacitance density over $1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ influenced negatively on seedlings, causing the decrease of their dimensions and dry mass. Slightly different results were obtained by Heilman (1981) analysing *Pseudotsuga menziesii* seedlings growing up on sandy clay and loam who stated a lack of relevant soil compaction effect on seedlings growth. Substratum penetration by roots decreased linearly with the increase of compaction and, then, its value in the range $1.74\text{--}1.83 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ blocked the increment of root system. A significant influence of soil compaction on *Ailanthus altissima* seedlings was also pointed out in the research conducted by Pan and Bassuk (1985). The authors analysed the growth of seedlings in containers of diameter 20 cm filled with sandy clay and fine-grained sand and showed worse growth parameters and seedlings dry mass of this species on condensed soil. Similar results were obtained by Onweremadu et

al. (2008) analysing *Citrus sinensis* seedlings growing in green-house conditions in containers filled with soil condensed to seven levels. In their research, the length of roots decreased with the increase of volume density and decreasing soil humidity. Similar result was obtained in the presented research for Scots pine, whose root system was shortened with increase of perlite–peat substratum compaction; however, its dry mass increased. Weaker increase of root system in soil of higher volume density, which is characterised by shortening of main and lateral roots, was also indicated in the analysis conducted for *Eucalyptus nitens* (Misra, Gibbons 1996). Negative influence of soil compaction was shown also in research concerning the architecture of *Gleditsia triacanthos* seedlings root system. It was shown that in soil condensed by additionally reduced oxygen content, the seedlings roots grew up mainly to the top or horizontally (Gilman et al. 1987).

One of the most important parameters characterising nursery substratum is its water and air capacitance. For perlite-peat substratum, both characteristics depended on its compaction. The highest air capacitance was obtained in variants without soil compaction and research results indicate how those conditions were not optimal for pine seedlings growth. With soil compaction increase, there is decreased air capacitance and capillary water capacity, due to reduction of capillaries in soil, caused by approaching particles of permanent phase. This is confirmed by research conducted by Onweremadu et al. (2008) who stated a negative relation between soil volume compaction and its humidity. In spite of this, pine's seedlings growing up on the most condensed substratum were characterised with the highest mass, although they were slightly smaller dimensions in comparison with uncondensed substratum. Probably too loose a substratum caused quicker water float in the lower part of container, which stimulated elongation of root system. That is why stronger substratum compaction, despite lesser water and air capacitance, created better conditions for the growth of Scots pine seedlings.

5. Conclusions

1. Change of soil substratum compaction had a significant influence on all parameters established for Scots pine seedlings and the calculated determination factors for linear trend relation, despite relatively low values, were statistically significant.

2. With increase of nursery substratum compaction, the number and length of Scots pine seedlings decreased, while root system clearly shortened, whereas the length of seedlings over-ground part slightly increased. The seedlings compensated with increased root collar diameter and with increased assimilative apparatus mass for the harder growth conditions.

3. A relation between total seedling's length and their dry mass was observed. With increase of substratum compaction, the seedlings were smaller, whereas their dry mass increased.

Acknowledgements

The research, realised within grants DS-3401/KMPL and DS-3405/KGNiSzL, was funded with grants for science awarded by the Ministry of Science and Higher Education.

References

- 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-Trzcńska M., Drozdowski S., Jakubowski P., 2012. Wzrost mikoryzowanych i niemikoryzowanych sadzonek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w warunkach zróżnicowanych wilgotności i żyzności podłoża [Growth of mycorrhized and non-mycorrhized Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings on substrates varying in moisture content and fertility]. *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.
- Etana A., Håkansson I. 1994. Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load. *Soil and Tillage Research*, 29 (2–3): 167–172.
- Ferree, D. C., Streeter J. G., Yuncong Y. 2004. Response of container-grown apple trees to soil compaction. *HortScience*, 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, in: Utilization of agricultural

- and forest machinery. (ed. J. Walczyk), Kraków, PAU, 109–118.
- Kormanek M., Banach J. 2012. Wpływ nacisku jednostkowego wywieranego na glebę, na jakość odnowienia wybranych gatunków drzew leśnych [Influence of unit pressure exerted on soil on quality of renewal of chosen species of trees]. *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., Rejman J. 2010. Gleba pod kołami, in: 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 [Statistical methods based on linear models in applications for experimentation, genetics and plant breeding]. *Monografie i rozprawy naukowe IHAR*, 34: 1–162.
- Onweremadu E. U., Eshett E. T., Ofoh M. C., Nwifo M. I., Obiefuna J. C. 2008. Seedling performance as affected by bulk density and soil moisture on a typic tropaquept. *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 [Silvicultural and economic aspects of container-grown seedling production subjected to controlled mycorrhization]. *Sylwan*, 153 (4): 253–259.
- Szabla K., Pabian R., 2003. Szkółkarstwo kontenerowe. Warszawa, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, 213 p.
- 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 [Selection possibilities of machines environmentally friendly for forest]. *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.

Translated by: Anna Wyszynska