

Wpływ zagęszczenia sadzonek buka zwyczajnego w pojemnikach na jego cechy morfologiczne

The influence of seedling density in containers on morphological characteristics of European beech

Piotr Wrzeński

Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Hodowli Lasu i Genetyki Drzew Leśnych, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

Tel. +48 227150687, e-mail: P.Wrzesinski@ibles.waw.pl

Abstract. This study examines the influence on growth parameters, in particular the morphological features of the root system, of 1-year-old European beech seedlings cultivated in containers with two different densities. The experiment was conducted in the container nursery in Skierdy (Forest District of Jabłonna) in spring 2011. After 10 months of cultivation in Hiko polyethylene containers, above- and below-ground parts of the seedlings were measured. The measurements of the root system were conducted with a scanner and the WinRHIZO software. No influence due to the seedling density on either shoot height or thickness was observed, but instead the research showed that different seedling densities affected the development of root systems. The mean root thickness and dry mass of the European beech seedlings were significantly higher at the lower density. The influence of seedling density on the development of root mass deserves special attention as it is the most important factor affecting future growth of the seedlings during cultivation. This tendency also suggests that the amount of nutrients allocated to shoot development may be higher in order to improve the efficiency of photosynthesis. At both densities, differences in biomass accumulation affected the root-to-shoot ratio. In seedlings cultivated at the lower density, the increased dry root matter of the seedlings resulted in a significant increase in the root-to-shoot ratio. This may cause a potential growth advantage of these seedlings after they are planted and may thus result in a more productive cultivation.

Keywords: seedling density, seedling size, shoot height, seedling root system, container type, container nursery

1. Wstęp

Celem produkcji szkółkarskiej jest hodowla materiału sadzeniowego o odpowiedniej jakości, który zapewni uzyskanie wysokiej udatności zakładanych upraw leśnych. W tym aspekcie szkółki odgrywają ważną rolę w procesie kształtowania przyszłych drzewostanów. Tu bowiem kształtowana jest jakość i odporność sadzonek na czynniki stresowe po posadzeniu.

Podstawę szkółkarstwa leśnego w Polsce stanowi hodowla sadzonek z odkrytym systemem korzeniowym w tradycyjnych szkółkach polowych. Jednakże produkcja sadzonek pojemnikowych w szkółkach kontenerowych stanowi z roku na rok coraz większy udział w sumarycznej hodowli pomimo, że stwarza dla praktyki leśnej wiele nowych problemów technicznych i organizacyjnych. Istotne znaczenie ma właściwy dobór parametrów oraz kształtu pojemników, ponieważ mają one zasadniczy wpływ na morfologię i fizjologię sadzonek, głównie ze względu na systemy korzeniowe (Gilman 2001), ich jakość, potencjał wzrostu (Davis, Jacobs 2005) oraz ich masę (Haase 2011). Przedstawione parametry często decy-

dują o udatności upraw. Liczba i objętość cel w pojemniku to dwa istotne determinanty kształtujące jakość sadzonek (Kinghorn 1974), ściśle ze sobą powiązane i zależne przede wszystkim od potrzeb fizjologicznych hodowanego gatunku, cyklu hodowli, warunków wzrostu oraz stopnia mechanizacji i automatyzacji (Szabla, Pabian 2009). Są one również jednymi z najważniejszych czynników wpływających na koszty produkcji (Chirino et al. 2008).

Wielu naukowców badało, które zmienne pojemnika (tj.: średnica, głębokość, objętość i liczba cel) mają największy wpływ na wzrost i jakość materiału sadzeniowego w szkółce oraz po posadzeniu. Sprawdzano również, które sadzonki wykazują najwyższą przeżywalność w określonych warunkach siedliskowych (troficznych, wilgotnościowych) (Rose et al. 1997; Dominguez-Lerena et al. 2006; Pinto et al. 2011; Aghai et al. 2013), konkurencji (Newton et al. 1993; Hunt 2002), i innych czynników ograniczających występujących w uprawie (Lamhamedi et al. 1997; South et al. 2005). W związku z tym, badanie wpływu tych zmiennych jest ważne dla optymalizacji przestrzeni użytkowej w produkcji kontenerowej przy

Wpłynęło: 7.01.2015 r., zrecenzowano: 31.03.2015 r., zaakceptowano: 14.04.2015 r.

jednoczesnej maksymalizacji jakości sadzonek. Analizowano również wpływ zagęszczenia sadzonek w pojemnikach na ich cechy morfologiczne, w odniesieniu do wybranych gatunków i rodzajów pojemnika (Barnett, Brissette 1986; Simpson 1991).

Celem przedstawionych badań było porównanie wpływu dwóch różnych zagęszczeń sadzonek buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.) w pojemniku typu Hiko, na ich parametry wzrostowe, a w szczególności cechy morfologiczne systemu korzeniowego.

2. Metodyka i materiał badań

Doświadczenie przeprowadzono w warunkach gospodarczych szkółki kontenerowej Skierdy, Nadleśnictwa Jabłonna. Obiektem badań były jednoroczne sadzonki buka zwyczajnego z zakrytym systemem korzeniowym. Do hodowli kontenerowej sadzonek zastosowano pojemniki polietylenowe typu Hiko produkowane przez Szwedzką firmę BCC AB, w dwóch wariantach zagęszczenia cel, determinującego więźbę sadzonek. Pierwszy wariant Hiko V-250 o wymiarach 352 x 216 x 160 mm, składał się z 18 cel w więźbie 72 x 59 mm, każda o pojemności 250 cm³. Drugi wariant Hiko V-265 o wymiarach 352 x 216 x 150 mm, składał się z 28 cel w więźbie 54 x 50 mm, każda o pojemności 265 cm³. Pojedyncze cele w pojemniku miały kwadratowy górny przekrój, zwężający się ku dołowi z ażurowym dnem oraz 4 żeberka przebiegające pionowo po wewnętrznych ściankach. Oba typy pojemników zastosowane w badaniach były dobrane zgodnie z potrzebami hodowanego gatunku. Sadzonki z obu wariantów poddane były sterowanej mikoryzacji grzybem *Hebeloma crustuliniforme* (Bull.) Quél.

Pojemniki po napełnieniu substratem obsiano 11 maja 2011 roku, wysiewając po jednym skielkowanym nasieniu buka do każdej celi. Przez trzy tygodnie pojemniki znajdowały się w bloku cieplarnianym, który zapewnia optymalne warunki mikroklimatyczne do rozwoju siewek. Następnie sadzonki przeniesiono na otwarte pole produkcyjne, gdzie przebywały przez okres 10 miesięcy do końca trwania doświadczenia. Pojemniki zawierające 18 i 28 cel ustawione były na oddzielnych paletach. Po okresie 10 miesięcy z każdego wariantu, pobrano losowo po 30 sadzonek.

Każdą sadzonkę traktowano, jako jednostkę eksperymentalną (powtórzenie) tj. reprezentującą pojedynczy pojemnik. Wylosowane sadzonki do badań stanowiły część materiału sadzeniowego produkowanego na potrzeby gospodarcze Nadleśnictwa. Sadzonki przewieziono do laboratorium, gdzie wyjęto je z pojemników, a z systemów korzeniowych usunięto substrat i poddano skanowaniu oraz kompleksowym analizom przy pomocy programu komputerowego WinRHIZO firmy Regent Instruments (2008). Wykonane analizy pozwoliły na określenie następujących cech morfologicznych badanych systemów korzeniowych: łącznej długości wszystkich korzeni w systemie korzeniowym [cm], średniej grubości korzeni [mm] i objętości systemu korzeniowego [cm³]. Określono również suchą masę systemu korzeniowego [g]. Deformacje systemów korzeniowych oceniono wzrokowo, wyróżniając

dwie klasy: (1) właściwie ukształtowane i (2) ze zmienionym kierunkiem wzrostu. Charakterystykę części nadziemnej przeprowadzono na podstawie pomiaru następujących cech: wysokości [cm] i grubości w szyi korzeniowej pędu [mm] oraz całkowitej suchej masy pędu [g]. Części nadziemne i korzenie sadzonek suszono w temperaturze 104°C przez 24 godziny, a następnie ważono na wadze laboratoryjnej z dokładnością do 0,001 g. W doświadczeniu obliczono stosunek wysokości do grubości pędu (smukłość H/D) oraz suchej masy korzeni do suchej masy pędu, ponieważ są to jedne z parametrów wykorzystywanych do oceny jakości sadzonek, pozwalające prognozować ich przeżywalność i wzrost w uprawie.

Analizy statystyczne wykonano stosując program komputerowy Statistica 10 (StatSoft 2011). Przystępując do nich sprawdzono rozkład normalny spostrzeżeń w poszczególnych wariantach doświadczenia testem W Shapiro–Wilka i jednorodność wariancji testem Browna–Forsytha. Do oceny wpływu gęstości rozmieszczenia cel w pojemniku na cechy morfologiczne badanych sadzonek zastosowano jednoczynnikowy model analizy wariancji (ANOVA). Istotność różnic na poziomie $\alpha = 0,05$ określono przez zastosowanie testu t-Studenta. Przeprowadzono również analizę korelacji prostoliniowej określającej wpływ wysokości i grubości w szyi korzeniowej sadzonek na inne cechy po 10 miesiącach wzrostu sadzonek. Siłę związku oceniono istotnością współczynnika korelacji prostoliniowej przy poziomie $\alpha = 0,01$ oraz $\alpha = 0,05$. Poza cechami wykorzystanymi w analizie wariancji, w korelacji dodatkowo uwzględniono liczbę pędów bocznych oraz liczbę wierzchołków i rozgałęzień korzeni.

3. Wyniki

Średnia wysokość sadzonek buka zwyczajnego z pojemników o 18 celach wyniosła 36,6 cm, natomiast z pojemników o 28 celach 39,7 cm. Sadzonki rosnące w większym zagęszczeniu miały, zatem wyższy pęd niż sadzonki z drugiego wariantu doświadczenia, ale różnica nie była istotna statystycznie. Średnia grubość w szyi korzeniowej wyhodowanych sadzonek wyniosła 6,11 mm w pojemnikach o 18 celach, zaś w pojemnikach o 28 celach 5,73 mm. Pod względem analizowanej cechy również nie udowodniono istotnych różnic statystycznych między wariantami zagęszczenia. Całkowita sucha masa pędu jednej sadzonki kształtowała się od 0,41 g w wariantcie pojemników o 18 celach do 5,56 g. Średnia masa pędu sadzonek buka zwyczajnego wyhodowanych w pojemnikach z 28 sadzonymi wyniosła 2,78 g, zaś w pojemnikach z 18 sadzonymi była nieistotnie niższa o 0,07 g. Obliczona smukłość sadzonek wyniosła dla wariantu o mniejszym zagęszczeniu 1:6, zaś o większym zagęszczeniu 1:7. Smukłość sadzonek (H/D) pomiędzy wariantami różniła się istotnie statystycznie (tab. 1).

Przy mniejszym zagęszczeniu sadzonki rozwinęły największe systemy korzeniowe, których łączna długość wyniosła 11410,6 cm. W tym samym wariantcie pojemnika średnia łączna długość korzeni sadzonki osiągnęła wartość 5702,3 cm, zaś w pojemnikach o większym zagęszczeniu 5581,2 cm. Naj-

krótsza łączna długość korzeni wśród analizowanych sadzonek wyniosła 716,2 cm. Analiza wariacji wykazała, że cecha ta między wariantami nie różni się istotnie (tab. 1).

Średnia grubość korzeni sadzonek wyhodowanych w pojemnikach o 18 celach wyniosła 0,30 mm, natomiast w kasetach o 28 celach 0,28 mm. Różnice między tymi wartościami były istotne statystycznie. Jednoroczne sadzonki buka zwyczajnego wyhodowane w szkółce kontenerowej w pojemnikach o mniejszym zagęszczeniu miały średnią objętość systemu korzeniowego 4,1 cm³, zaś sadzonki z drugiego wariantu zagęszczenia cel w pojemniku miały nieznacznie mniejszą średnią objętość systemu korzeniowego wynoszącą 3,4 cm³. Różnica ta nie była istotnie statystycznie (tab. 1).

Sadzonki pochodzące z pojemników o mniejszym zagęszczeniu cel cechowały się istotnie wyższymi wartościami całkowitej suchej masy korzeni w porównaniu z sadzonkami z drugiego wariantu doświadczenia. Na podstawie przeprowadzonej analizy proporcji suchej masy korzeni do suchej masy pędu stwierdzono istotny wpływ zagęszczenia sadzonek w pojemniku na tę cechę. Stosunek masy systemu korzeniowego do masy części nadziemnej wynosił średnio 1:1,4 dla sadzonek z pojemników o 18 celach oraz 1:1,0 dla sadzonek z pojemników o 28 celach (tab. 1).

Ważnym elementem oceny sadzonek pojemnikowych jest budowa systemu korzeniowego, a zwłaszcza występowanie

jego deformacji. W niniejszej pracy wśród wszystkich badanych sadzonek buka zwyczajnego, aż 65% miało zdeformowany system korzeniowy. Zaobserwowano, że zwiększona deformacja korzeni występuje, gdy sadzonki hodowane są przy większym zagęszczeniu.

W celu określenia związków pomiędzy wysokością i grubością w szyi korzeniowej sadzonek a pozostałymi cechami morfologicznymi, obliczono współczynniki korelacji liniowej. Z przeprowadzonych analiz wynika, że wysokość sadzonek bez względu na wariant zagęszczenia ma dodatni związek z grubością w szyi korzeniowej, suchą masę pędu, suchą masę korzeni oraz łączną długość korzeni. Stwierdzono dodatnie korelacje pomiędzy wysokością a objętością systemu korzeniowego i liczbą wierzchołków korzeni tylko w pojemnikach o 18 celach.

Wysokość sadzonek nie ma związku ze średnią grubością korzeni oraz liczbą rozgałęzień w obu wariantach doświadczenia. Liczba pędów bocznych była skorelowana z wysokością sadzonek tylko w wariantcie o większym zagęszczeniu. Analiza prostoliniowej zależności korelacyjnej wykazała, że z wyjątkiem grubości korzenia, istnieje istotna zależność pomiędzy grubością w szyi korzeniowej a pozostałymi wartościami cech sadzonek. Najsilniejsza korelacja spośród wszystkich analizowanych dotyczyła całkowitej suchej masy korzeni bez względu na wariant zagęszczenia.

Tabela 1. Wpływ zagęszczenia sadzonek na analizowane parametry buka zwyczajnego

Table 1. Effect of density of seedlings on the analysed parameters of European beech

(P – significance level)

Parametr Variable	Średnia wartość przy zagęszczeniu: Average calculated for density:		Współczynnik zmienności przy zagęszczeniu: Coefficient of variation calculated for density:		Poziom istotności Significance level (P)
	18 sadzonek 18 seedlings	28 sadzonek 28 seedlings	18 sadzonek 18 seedlings	28 sadzonek 28 seedlings	
	Wysokość sadzonek Height of the seedlings (H)	36,6	39,7	19,1	
Grubość w szyi korzeniowej Thickness of the neck root (D)	6,11	5,73	16,3	15,1	0,124
Sucha masa pędu Dry mass of the shoot (SMP)	2,71	2,78	36,0	38,3	0,797
Sucha masa korzeni Root dry mass (SMK)	3,75	2,93	40,4	42,8	0,027
Łączna długość korzeni Total root length	5702,3	5581,2	41,9	39,5	0,839
Grubość korzeni Thickness of the roots	0,30	0,28	12,3	16,6	0,021
Objętość systemu korzeniowego Root system of volume	4,10	3,40	38,6	47,0	0,092
H/D The ratio of height to thickness of the neck root	1:6	1:7	17,5	12,3	0,001
SMK/SMP The ratio of dry mass of the shoot to root dry mass	1:1,4	1:1,0	8,6	23,4	0,001
Procent deformacji korzeni Percentage of root deformation	68,0	62,0	24,9	24,0	0,599

Nieco słabiej grubość pędu była skorelowana z jego suchą masą (tab. 2).

4. Dyskusja

Gęstość rozmieszczenia sadzonek może mieć wpływ na ich rozwój zarówno w szkółkach otwartych, jaki i w warunkach kontrolowanych. Barnett i Brissette (1986) doszli do wniosku, że głównym czynnikiem wpływającym na fenotyp sadzonek pojemnikowych było zagęszczenie cel pojemnika, a nie ich kształt czy objętość. Timmis i Tanaka (1976) oraz Simpson (1991) stwierdzili, że hodowla sadzonek w pojemnikach o większym zagęszczeniu skutkuje wysokimi i cienkimi sadzonkami gatunków iglastych, podczas gdy hodowla w pojemnikach o mniejszym zagęszczeniu cel skutkuje niższymi i grubszyimi sadzonkami. Wyniki niniejszej pracy z bukiem zwyczajnym potwierdzają te ogólne stwierdzenia. Należy jednak pamiętać o braku istotnych statystycznie różnic wysokości i grubości pędu sadzonek pomiędzy badanymi wariantami zagęszczenia. Podobną prawidłowość zaobserwowano również u sadzonek *Pinus nigra* i *Pinus sylvestris* (Jinks, Mason 1997), *Picea mariana* (Salonius et al. 2000). Odmienne rezultaty otrzymał Paterson (1996), który zaobserwował zmniejszanie się wysokości sadzonek *Picea mariana* wraz ze zwiększaniem się ich zagęszczenia w pojemniku.

Rozmiar pędu jest bardzo ważny, ponieważ w miejscach z dostępem do wody i składników pokarmowych w glebie, zasoby związane z przestrzenią, a tym samym konkurencja o światło pomiędzy sadzonkami a roślinnością runa leśnego, wydają się być głównym czynnikiem ograniczającym ich wzrost i rozwój. Według licznych badań, w przypadku silnej konkurencji, lepszą przeżywalnością i wzrostem cechują się wyższe sadzonki, które hodowane były w wyższych gęstościach (Mason et al. 1996; Mohammed et al. 1998; South, Mitchell 1999; Puértolas et al. 2003). Stosunek wysokości do grubości pędu sadzonek (H/D) jest również dobrym wskaźnikiem mówiącym o ich jakości. Niski stosunek H/D wskazuje, że sadzonki są bardziej odporne na wiatr i suszę, a także wpływa na wyższy wzrost i przeżywalność w suchych miejscach (Johnson, Cline 1991). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono istotny statystycznie wpływ zastosowanego zagęszczenia sadzonek w pojemniku na stosunek wysokości do grubości pędu. Sadzonki rosące w mniejszym zagęszczeniu charakteryzowały się niższym stosunkiem H/D, co może sugerować ich lepszą jakość hodowlaną. Istotne jest stwierdzenie, że grubość pędu wykazuje większy stopień korelacji z ciężarem korzeni, niż z masą części nadziemnej. Większy rozmiar systemu korzeniowego występuje w miarę wzrostu grubości w szyi korzeniowej sadzonek z odkrytym systemem korzeniowym (Janson 1969; Ritchie 1984) oraz

Tabela 2. Współczynniki korelacji r między wysokością i grubością w szyi korzeniowej sadzonek a pozostałymi cechami morfologicznymi
Table 3. Coefficients of correlation (r) between height of the seedlings and thickness of the neck root and other characteristics morphologic

X	Zmienne Variables	Y	Współczynnik r przy zagęszczeniu: r coefficient calculated for density:	
			18 sadzonek 18 seedlings	28 sadzonek 28 seedlings
Wysokość sadzonek Height of the seedlings	Grubość w szyi korzeniowej / Thickness of the neck root		0,609**	0,688**
	Liczba pędów bocznych / Number of the offshoots		0,259	0,624**
	Sucha masa pędu / Dry mass of the shoot		0,712**	0,856**
	Sucha masa korzeni / Root dry mass		0,578**	0,702**
	Łączna długość korzeni / Total root length		0,492**	0,356**
	Grubość korzeni / Thickness of the roots		0,277	0,062
	Objętość systemu korzeniowego / Root system of volume		0,681**	0,272
	Liczba wierzchołków korzeni / The number of roots' tops		0,578**	0,270
	Liczba rozgałęzień korzeni / Number of roots' branching		0,239	0,316
Grubość w szyi korzeniowej Thickness of the neck root	Liczba pędów bocznych / Number of the offshoots		0,492**	0,652**
	Sucha masa pędu / Dry mass of the shoot		0,893**	0,863**
	Sucha masa korzeni / Root dry mass		0,931**	0,926**
	Łączna długość korzeni / Total root length		0,599**	0,521**
	Grubość korzeni / Thickness of the roots		0,263	0,141
	Objętość systemu korzeniowego / Root system of volume		0,771**	0,562**
	Liczba wierzchołków korzeni / The number of roots' tops		0,576**	0,412*
Liczba rozgałęzień korzeni / Number of roots' branching		0,385*	0,391*	

** – zależność istotna statystycznie na poziomie $P = 0,01$ / relationship significant at $P = 0.01$

* – zależność istotna statystycznie na poziomie $P = 0,05$ / relationship significant at $P = 0.05$

pojemnikowych (Grossnickle 2000). Zależność tą zanotowano również u sadzonek buka zwyczajnego w prezentowanym doświadczeniu.

Przy większym zagęszczeniu sadzonek buka zwyczajnego w pojemniku, wartości średniej grubości i suchej masy korzenia były istotnie niższe niż przy mniejszym zagęszczeniu. Potwierdzają to liczne rezultaty badań, m.in. na przykładzie *Picea glauca* (Scarratt 1972), *Pseudotsuga menziesii* i *Pinus contorta* (Simpson 1994), *Betula pendula* (Aphalo, Rikala 2002), *Pinus palustris* (South et al. 2005), *Pinus pinea* (Dominguez-Lerena et al. 2006). Zaobserwowano również, że wartości objętości systemu korzeniowego pozostawały niezmiennie pomiędzy dwoma poziomami zagęszczenia, pomimo znaczących różnic w suchej masie korzeni. Podobną zależność wykazali Aghai i inni (2013) przy hodowli *Larix occidentalis*.

Do cech najlepiej charakteryzujących jakość sadzonek należy zaliczyć parametry systemu korzeniowego. Do parametrycznej charakterystyki korzeni najlepiej nadaje się masa systemu korzeniowego. Dotychczasowe doświadczenia pokazują, że sadzonki z większą masą korzeni w czasie sadzenia, miały większy wzrost i udatność w porównaniu z tymi o mniejszej masie, nawet, jeśli miały mniejsze średnice pędu (Jacobs et al. 2005; Grossnickle 2012). Większa masa korzeni jest wskaźnikiem ich zdolności chłonnej oraz zwiększa możliwość pokonania stresu sadzenia. Skutki początkowej wielkości systemu korzeniowego mogą mieć trwały wpływ na dalszy wzrost sadzonek. Sundström i Keane (1999) w wykopanych 10-letnich dąglęzjach zauważyli, że początkowy rozmiar systemu korzeniowego był skorelowany z przyrostem pierśnicy oraz biomasy korzeni.

Morfologia sadzonek jest wyraźnie zależna od ich zagęszczenia w pojemniku, która znacząco wpływa na dostępność oraz jakość światła. Powszechnie wiadomo, że gęstość listowia wpływa na rozwój całej sadzonki poprzez zacienienie, a dokładniej, że zmiana promieniowania fotosyntetycznego i jakości światła ma wpływ na fenotyp pędu oraz tempo wzrostu korzenia (Aphalo, Ballare 1995). Wcześniejsze badania (Vance, Running 1985) analizowane z punktu widzenia zacienienia wskazują, że niższe poziomy oświetlenia przy większym zagęszczeniu powinny wzmacniać wzrost wysokości, nie ograniczając zarazem średnicy korzenia i suchej masy korzenia. Mitchell i Arnott (1995) stwierdzili, że zacienianie sadzonek iglastych powoduje przesunięcie na rzecz wzrostu wysokości i zmniejszenia wzrostu gałęzi i korzeni. Tendencja sadzonek do rekompensowania ograniczenia światła przez przeznaczenie większej części produktów fotosyntezy na wzrost pędu kosztem wzrostu korzenia (Drew 1983) może wyjaśniać, dlaczego sadzonki buka zwyczajnego w tym badaniu wykazują mniejszą akumulację masy w korzeniach wraz ze wzrostem zagęszczenia hodowli. Różnice w akumulacji biomasy odpowiednio znacząco zmieniły stosunek korzenia do pędu pomiędzy badanymi poziomami zagęszczenia.

Odpowiednia równowaga korzeni i pędów jest ważnym atrybutem morfologicznym, ponieważ jest ona miarą utraty wody i zdolności wychwytywania wody przez sadzonkę w okresie sadzenia (Burdett 1990; Grossnickle 2000). Pro-

porcja części nadziemnej do podziemnej, jest także predyktorem tolerancji sadzonki na stres przesadzania i odporności na suszę (Grossnickle 2005). Przesuszenie należy do najbardziej stresogennych czynników, które działają na młode sadzonki. Stres ten obniża przydatność sadzonek do odnowień i zalesień, dlatego potrzebna jest wcześniejsza informacja, charakteryzująca jakość materiału sadzeniowego oraz znane miejsce planowanego wysadzania. Uważa się, że wartość użytkowa sadzonek jest tym większa, im większy jest stosunek masy systemu korzeniowego do masy części nadziemnej (Gunia, Sobczak 1981). Tym samym wyższe wartości systemu korzeniowego wśród badanych sadzonek buka zwyczajnego mogą być łączone z większą wydajnością upraw. Przy mniejszym zagęszczeniu hodowli, większa sucha masa korzenia sadzonek oznaczała wzrost stosunku korzenia do pędu. Implikuje to potencjalną przewagę tych sadzonek po przesadzeniu w stosunku do sadzonek wyhodowanych przy wysokim zagęszczeniu. Potwierdzają to wyniki badań Aghai i in. (2013) w symulowanych próbach polowych, w których sadzonki *Larix occidentalis* z układu o mniejszej gęstości po przesadzeniu miały istotnie większy przyrost masy korzeni oraz wydajność. Również Aphalo i Rikala (2002) stwierdzili, że zmniejszenie zagęszczenia *Betula pendula* w szkółce ma wpływ na morfologię sadzonek po posadzeniu, ale niewielki wpływ na przeżywalność. Natomiast według Dominguez-Lerena i in. (2006) gęstość siewek wpływała na morfologię, odżywianie i wydajność tylko w szkółce.

Większość przytoczonych badań oraz wyniki uzyskane w prezentowanej pracy sugerują, że większe zagęszczenie prowadzi sadzonki do przeznaczenia nieproporcjonalnie dużej ilości produktów fotosyntezy na wzrost pędu, co skutkuje mniej rozwiniętymi korzeniami. Wzrost wysokości sadzonki kosztem systemu korzeniowego może być niekorzystną zmianą pod względem jakości produkcji. Natomiast wzrost suchej masy korzenia, średnicy korzenia i stosunku korzenia do pędu uzyskany poprzez hodowlę w mniejszym zagęszczeniu, może być opłacalną inwestycją, szczególnie, jeśli jej skutkiem jest bardziej wytrzymała sadzonka, która może wykazywać większy potencjał wzrostu, a tym samym przypuszczalnie większą przeżywalność po posadzeniu, której efektem jest mniejsza liczba poprawek. Generalnie korzyści płynące z lepiej rozbudowanego systemu korzeniowego w wyniku mniejszego zagęszczenia, wydają się przewyższać korzyści wynikające ze wzrostu tkanki fotosyntetyzującej. Hodowla sadzonek w pojemnikach o mniejszym zagęszczeniu cel będzie oczywiście uzasadniona tylko wtedy, jeśli tak produkowane sadzonki będą skutkowały wysoką udatnością upraw. Zagadnienie to stwarza nowe wyzwanie dla szkółkarstwa leśnego w Polsce i wymaga prowadzenia dalszych badań oceniających wpływ zastosowanych metod produkcji sadzonek na udatność i rozwój w różnych warunkach siedliskowych.

5. Wnioski

Na podstawie wyników badań można sformułować następujące wnioski:

1. Zastosowanie różnego zagęszczenia sadzonek buka zwyczajnego w pojemniku nie miało istotnego wpływu na ich wysokość oraz grubość pędu.

2. Stwierdzono istotny wpływ zagęszczenia na smukłość sadzonek (H/D).

3. Badania wykazały, że zmiana zagęszczenia sadzonek w pojemniku ma duży wpływ na rozwój systemów korzeniowych. Szczególnie należy podkreślić wpływ tego czynnika na rozwój masy korzeni, a więc elementu najbardziej istotnego dla ich późniejszego rozwoju na uprawie.

4. Zagęszczenie sadzonek w pojemniku jest ważnym czynnikiem wpływającym na wzrost i jakość wyhodowanego materiału sadzeniowego. Przy mniejszym z badanych zagęszczeń sadzonek, większa sucha masa korzenia sadzonek wpłynęła na istotny wzrost stosunku masy korzenia do pędu. Stwarza to potencjalną przewagę we wzroście tych sadzonek po posadzeniu i może skutkować większą udatnością upraw.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania

Niniejsze badania były wykonane w ramach pracy magisterskiej. Na wykonanie ich nie otrzymano żadnego dofinansowania.

Literatura

- Aghai M.M., Pinto J.R., Davis A.S. 2013. Container volume and growing density influence western larch (*Larix occidentalis* Nutt.) seedling development during nursery culture and establishment. *New Forests*, 45: 199–213. DOI: 10.1007/s11056-013-9402-8.
- Aphalo P., Rikala R. 2002. Field performance of silver-birch planting-stock grown at different spacing and in containers of different volume. *New Forests*, 25: 93–108.
- Aphalo P.J., Ballare C.L. 1995. On the importance of information-acquiring systems in plant-plant interactions. *Functional Ecology*, 9: 5–14.
- Barnett J.P., Brissette J.C. 1986. Producing southern pine seedlings in containers. Gen. Tech. Rep. SO-59. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, s. 71.
- Burdett A.N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Canadian Journal of Forest Research*, 20: 415–427. DOI: 10.1139/x90-059.
- Chirino E., Vilagrosa A., Hernandez E.L., Matos A., Vallejo V.R. 2008. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in *Quercus suber*. Seedlings for reforestation in Mediterranean climate. *Forest Ecology and Management*, 256: 779–785. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.05.035.
- Davis A.S., Jacobs D.F. 2005. Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. *New Forests*, 30: 295–311. DOI: 10.1007/s11056-005-7480-y.
- Dominguez-Lerena S., Herrero Sierra N., Carrasco Manzano I., Ocana Bueno L., Penuelas Rubira J.L., Mexal J.G. 2006. Container characteristics influence *Pinus pinea* seedling development in the nursery and field. *Forest Ecology and Management*, 221: 63–71. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.08.031.
- Drew A.P. 1983. Optimizing growth and development of 2-0 Douglas-fir seedlings by altering light intensity. *Canadian Journal of Forest Research*, 13: 425–428. DOI: 10.1139/x83-064.
- Gilman E.F. 2001. Effect of nursery production method, irrigation, and inoculation with mycorrhizae-forming fungi on establishment of *Quercus virginiana*. *Journal of Arboriculture*, 27: 30–39.
- Grossnickle S.C. 2012. Why seedlings survive: Influence of plant attributes. *New Forests*, 43: 711–738. DOI: 10.1007/s11056-012-9336-6.
- Grossnickle S.C. 2000. Ecophysiology of northern spruce species: The performance of planted spruce seedlings. Ottawa, Ontario, Canada. *NRC Research Press*, s.407. ISBN 978-0-660-17959-9.
- Grossnickle S.C. 2005. Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests*, 30: 273–294. DOI: 10.1007/s11056-004-8303-2.
- Gunia S., Sobczak R. 1981. Metody intensywnej produkcji sadzonek drzew leśnych. Biblioteczka Leśnika. Warszawa, PWRiL, s.167. ISBN 83-09-00453-2.
- Haase D.L. 2011. Seedling Root Targets. *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-65*: 80–82.
- Hunt J.A. 2002. Effects of stock type on seedling performance in the northern interior of British Columbia: twenty-year results. *British Columbia Ministry of Forests, Silviculture Note*, 29: 1–6.
- Jacobs D.F., Salifu K.F., Seifert J.R. 2005. Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings. *New Forests*, 30: 235–251. DOI: 10.1007/s11056-005-5419-y.
- Janson L. 1969. Korelacja między cechami biometrycznymi siewek sosny a ich zagęszczeniem. *Sylvan*, 2: 11–15.
- Jinks R., Mason B. 1997. Effects of seedling density on the growth of Corsican pine (*Pinus nigra* var. *maritima* Melv.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) in containers. *Annals of Forest Science*, 55: 407–423. DOI: 10.1051/forest:19980402.
- Johnson J.D., Cline M.L. 1991. Seedling quality of southern pines. In: Duryea M.L., Dougherty P.M. (Eds.). *Forest regeneration manual*. Kluwer Dordrecht Publishers, s. 143–162.
- Kinghorn J.M. 1974. Principles and concepts in container planting. In: Tinus R.W., Stein W.I., Balmer W.E. (Eds.). *Proceedings of the North American Containerized Forest Tree Seedling Symposium*. Under section: The containerized seedling: An important new development in forestry. Denver, Colorado, August 26-29, 1974. *Great Plains Agricultural Council Publications*, 68: 8–18.
- Lamhamedi M.S., Bernier P.Y., Hébert C. 1997. Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized *Picea mariana* seedlings under different watering regimes. *New Forests*, 13: 209–22.
- Mason E.G., South D.B., Weizhong Z. 1996. Performance of *Pinus radiata* in relation to seedling grade, weed control, and soil cultivation in the central North Island of New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 26: 173–183.
- Mitchell A.K., Arnott J.T. 1995. Effects of shade on the morphology and physiology of amabilis fir and western hemlock seedlings. *New Forests*, 10: 79–98.
- Mohammed G.H., Noland T.L., Wagner R.G. 1998. Physiological perturbation in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) in the presence of competing herbaceous vegetation. *Forest Ecology and Management*, 103: 77–85. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)00178-3.

- Newton M., Cole E.C., White D.E. 1993. Tall planting stock for enhanced growth and domination of brush in the Douglas-fir region. *New Forests*, 7: 107–121.
- Paterson J. 1996. Growing environment and container type influence field performance of black spruce container stock. *New Forests*, 13: 325–335.
- Pinto J.R., Dumroese R.K., Davis A.S., Landis T.D. 2011. Conducting seedling stocktype trials: a new approach to an old question. *Journal of Forestry*, 109: 293–299.
- Puértolas J., Gil L., Pardos J.A. 2003. Effects of nutritional status and seedling size on field performance of *Pinus halepensis* planted in former arable land in the Mediterranean basin. *Forestry*, 76: 159–168.
- Regent Instruments Inc. 2008. User Guide, WinRHIZO For Root Analysis. Reference, Regent Instruments. www.regentinstruments.com.
- Ritchie G.A. 1984. Assessing seedling quality. In: Duryea M.L., Landis T.D. (Eds.). *Forest nursery manual: production of bare-root seedlings*. Martinus Nijhoff / Dr W Junk Publishers. Oregon State University, *The Hague Forestry Research Laboratory*, s: 243–259.
- Rose R., Haase D.L., Kroihner F., Sabin T. 1997. Root volume and growth of ponderosa pine and Douglas-fir seedlings: a summary of eight growing seasons. *Western Journal of Applied Forestry*, 12: 69–73.
- Salonius P., Beaton K., Roze B. 2000. Effects of cell size and spacing on root density and field performance of container-reared black spruce. Canadian Forest Service, Atlantic Forestry Centre, Fredericton, New Brunswick. Information Report M-X-208E, s.21. ISBN 0-662-29222-7.
- Scarratt J.B. 1972. Effect of tube diameter and spacing on the size of tubed seedling planting stock. Report O-X-170. Ontario: Canadian Forestry Service, *Great Lakes Forest Research Centre*, s. 10.
- Simpson D.G. 1991. Growing density and container volume affect nursery and field growth of interior spruce seedlings. *Northern Journal of Applied Forestry*, 8: 160–165.
- Simpson D.G. 1994. Nursery growing density and container volume affect nursery and field growth of Douglas-fir and lodgepole pine seedlings. In National Proceedings, Forest and Conservation Nursery Associations. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service *General Technical Report*, 257: 105–115.
- South D.B., Harris S.W., Barnett J.P., Hains M.J., Gjerstad D.H. 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, U.S.A. *Forest Ecology and Management*, 204: 385–398. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.09.016.
- South D.B., Mitchell R.J. 1999. Determining the “optimum” slash pine seedling size for use with four levels of vegetative management on flatwoods site in Georgia, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 1039–1046. DOI: 10.1139/x99-048.
- StatSoft Inc. 2011. STATISTICA. Data analysis software system, version 10. www.statsoft.com [12.019.2013].
- Sundström E., Keane M. 1999. Root architecture, early development and basal sweep in containerized and bare-rooted Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Plant and Soil*, 217: 65–78.
- Szabla K., Pabian R. 2009. Szkółkarstwo kontenerowe. Nowe technologie i techniki w szkółkarstwie leśnym. Warszawa, *Centrum Informacyjne Lasów Państwowych*, s.251. ISBN 978-83-89744-80-7.
- Timmis R., Tanaka Y. 1976. Effects of container density and plant water stress on growth and cold hardiness of Douglas-fir seedlings. *Forest Science*, 22: 167–172.
- Vance N.C., Running S.W. 1985. Light reduction and moisture stress: effects on growth and water relations of western larch seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 15: 72–77. DOI: 10.1139/x85-013.

The influence of seedling density in containers on morphological characteristics of European beech

Piotr Wrześciński

Forest Research Institute, Department of Silviculture and Genetics of Forest Trees, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05–090 Raszyn, Poland

Tel. +48 227150687, e-mail: P.Wrzesinski@ibles.waw.pl

Abstract. This study examines the influence on growth parameters, in particular the morphological features of the root system, of 1-year-old European beech seedlings cultivated in containers with two different densities. The experiment was conducted in the container nursery in Skierdy (Forest District of Jabłonna) in spring 2011. After 10 months of cultivation in Hiko polyethylene containers, above- and below-ground parts of the seedlings were measured. The measurements of the root system were conducted with a scanner and the WinRHIZO software. No influence due to the seedling density on either shoot height or thickness was observed, but instead the research showed that different seedling densities affected the development of root systems. The mean root thickness and dry mass of the European beech seedlings were significantly higher at the lower density. The influence of seedling density on the development of root mass deserves special attention as it is the most important factor affecting future growth of the seedlings during cultivation. This tendency also suggests that the amount of nutrients allocated to shoot development may be higher in order to improve the efficiency of photosynthesis. At both densities, differences in biomass accumulation affected the root-to-shoot ratio. In seedlings cultivated at the lower density, the increased dry root matter of the seedlings resulted in a significant increase in the root-to-shoot ratio. This may cause a potential growth advantage of these seedlings after they are planted and may thus result in a more productive cultivation.

Keywords: seedling density, seedling size, shoot height, seedling root system, container type, container nursery

1. Introduction

The purpose of nursery production is to breed planting material of adequate quality to ensure high adroitness of the established forest plantations. In this aspect, nurseries play an important role in the process of shaping future forest stands. The influence of quality and immunity of seedlings on stress factors after planting assumes importance in this context.

The thrust of forest nursery in Poland is breeding of seedlings with open root system in traditional field nurseries. Production of container seedlings in container nurseries increases its share in general breeding, despite the fact that it causes many new technical and organisational problems for forest practices. Proper selection of parameters and shapes of containers assumes significance because of their essential influence on morphology and physiology of seedlings,

arising from their root system (Gilman 2001), their quality, growth potential (Davis, Jacobs 2005) and their mass (Haase 2011). These parameters often decide the adroitness of the seedlings. The number and volume of cells in containers are two relevant determinants shaping the quality of seedlings (Kinghorn 1974). Those determinants are strongly connected with each other and dependent on physiological needs of bred species, breeding cycle, growth conditions and mechanisation degree and automation (Szabla, Pabian 2009). They are also one of most important factors influencing production costs (Chirino et al. 2008).

Many scientists have studied which variables of container (i.e. diameter, depth, volume and number of cells) have the biggest influence on the growth and quality of planting material in nursery and after planting. Which seedlings show the highest survivability in defined habitat conditions (tro-

Received: 07.01.2014, reviewed: 31.03.2015, accepted after revision: 14.04.2015.

phic, moisture) (Rose et al. 1997; Dominguez-Lerena et al. 2006; Pinto et al. 2011; Aghai et al. 2013), competition (Newton et al. 1993; Hunt 2002) and other limiting factors occurring in cultivation (Lamhamedi et al. 1997; South et al. 2005) were also observed. Therefore, studying the influence of those variables is important in order to optimise the usable space in container production while maximising the quality of seedlings. The influence of seedlings density in containers on their morphological features in reference to chosen species and types of containers (Barnett, Brissette 1986; Simpson 1991) was also analysed.

The aim of the present research was to compare the influence of two different densities of European beech seedlings in Hiko-type container on their growth parameters, especially on morphological features of root system.

2. Methodology and research material

The experiment was conducted in economic conditions of Skierdy container nursery in Jabłonna Forest Inspectorate. One-year-old European beech seedlings with covered root system were chosen for research. The breed of seedlings used were Hiko type polyethylene containers, produced by Swedish company BCC AB, in two variants of cell density determining seedlings spacing. The first variant, Hiko V-250, sized $352 \times 216 \times 160$ mm, consists of 18-cell in spacing 72×59 mm, each of volume 250 cm^3 . The second variant, Hiko V-265, sized $352 \times 216 \times 150$ mm, consists of 28 cells in a spacing of 54×50 mm, each of volume 265 cm^3 . The single cells in container had square upper section, tapering downwardly with fishnet bottom and four ribs running vertically on the inner walls. Both types of containers used in research were selected according to breeding needs of the given species. Seedlings from both variants were subjected to controlled mycorrhisation with fungi *Hebeloma crustuliniforme* (Bull.) Quéf.

The containers were filled with substratum. On 11 May 2011, in each cell, one sprouted beech seed was sown. For three weeks, containers were kept in greenhouse block, which provides optimal microclimate conditions for seedling development. Then the seedlings were transferred to open production fields where they stayed for 10 months until the end of the experiment. Containers with 18 and 28 cells were placed on separate pallets. After 10 months, 30 seedlings were randomly collected from each variant.

Each seedling was treated as an experimental unit (repetition), i.e. representing a single container. Seedlings chosen for research were a part of the planting material produced for Forest Inspectorate's needs. The seedlings were transported to laboratory where they were removed from containers and substratum was removed from the root system.

Then, the seedlings were scanned and analysed comprehensively with the use of computer program WinRHIZO from Regent Instruments company (2008). The analysis allowed for defining following morphological features of examined root systems: joint length of all roots in root system [cm], average root thickness [mm] and volume of root system [cm^3]. The dry mass of root system [g] was also determined. Deformations of root systems were evaluated visually. Two classes of deformations were distinguished: (1) properly shaped and (2) with changed direction of growth. The characteristics of above-ground part was conducted on the basis of measurements of the following features: height [cm] and thickness in shoots' neck root [mm] and total dry mass of shoot [g]. Above-ground parts and roots of seedlings were dried in temperature 104°C for 24 hours, and then they were weighed on laboratory weight with accuracy up to 0,001 g. In the experiment, the relation of shoots height to thickness (slenderness H/D) and dry mass of roots to dry mass of shoots were calculated. These are one of the parameters used for evaluation of seedlings quality, allowing for predicting their survivability and growth in cultivation.

Statistical analysis was performed with the use of computer program Statistica 10 (StatSoft 2011). In the analysis the normal distribution of observations, in particular variants of experiment with the use of W Shapiro-Wilk test and the homogeneity of variance with the use Brown-Forsyth test, was checked. For the evaluation of influence of cell arrangement in the container on morphological features of the examined seedlings univariate analysis of variance (ANOVA) was used. The significance of differences at level $\alpha = 0,05$ was defined with the use of Student's t-test. A linear correlation analysis was also performed. It defined the influence of height and thickness in seedlings' neck root on other features after 10 months of growth of the seedlings. The strength of relation was evaluated by significance of linear correlation at level $\alpha = 0.01$ and $\alpha = 0.05$. Besides features used in variance analysis, the number of epicormic shoots and the number of tops and root branching were additionally included in the correlation.

3. Results

The average height of beech seedlings from 18-cell containers was 36.6 cm, whereas those from 28-cell containers was 39.7 cm. Seedlings growing in bigger density had therefore higher shoot than seedlings from second variant of the experiment. The difference was, however, not significant statistically. The average thickness in neck root of bred seedlings was 6.11 mm in 18-cell containers while in 28-cell containers it was 5.73 mm. In terms of analysed features, no significant statistical differences between density variants

was observed. Total dry mass of one seedling's shoot ranged from 0.41 g in 18-cell container variant to 5.56 g. The average mass of European beech shoot bred in containers with 28 seedlings was 2.78 g, while in containers with 18 seedlings, it was insignificantly smaller by 0.07 g. The Calculated slenderness of seedlings was for variant with smaller density 1:6, while in variant with higher density it was 1:7. Seedlings' slenderness (H/D) varied statistically significantly between variants (Table 1).

At smaller density, seedlings developed the biggest root systems of total length 11,410.60 cm. In the same variant of the container, the average length of roots reached 5702.3 cm, while in containers with bigger density they measured 5581.2 cm. The shortest total length of roots among analysed seedlings measured 716.2 cm. The variance analysis showed that this feature between variants did not differ significantly (Table 1).

The average thickness of roots of seedlings bred in 18-cell containers was 0.30 mm, whereas in 28-cell containers it measured 0.28 mm. Differences between those values are relevant statistically. One-year old seedlings of European beech bred in container nursery in containers with smaller density had average volume of root system at 4.1 cm³, while seedling from second density variant had slightly smaller average volume of root system at 3.4 cm³. This difference was not significant statistically (Table 1).

Seedlings from containers with smaller density were characterised by significantly higher values of total dry mass of roots in comparison to seedlings from second variant of the experiment. On the basis of our analysis of ratio of dry mass of roots to dry mass of shoots, the influence of density of seedlings in container on this ratio was significant. The ratio of

root system mass to over-ground part mass was on average was 1:1.4 for seedlings from 18-cell containers and 1:1.0 for seedlings from 28-cell containers (Table 1).

The important part of evaluation of seedlings from container is the construction of the root system, especially its deformation. In following study, among all examined European beech seedlings, as much as 65% had deformed root system. It was observed that increased deformation occurs when seedlings are being bred at higher density.

In order to define the relationship between height and thickness in seedlings' neck root and remaining morphological features, factors of linear correlation were calculated. The significance of relations was examined at level $\alpha = 0.01$ and $\alpha = 0.05$. From our analysis, it was found that height of seedlings, regardless of density variant, has a positive influence on thickness of the neck root, dry mass of shoot, dry mass of roots and total length of roots. Only in 18-cell containers, this positive correlation between height and volume of root system and number of root tops was observed.

Height had no influence on the average thickness of roots and number of branching in both variants of the experiment. The number of epicormic shoots was correlated with height of seedlings only in the higher density variant. The analysis of linear correlation dependence showed that, apart from root thickness, there is a significant relation between thickness in neck root and remaining values of seedlings' features. The strongest correlation from all of the analysed features applied to total dry mass of roots regardless of the density variant. A slightly weaker correlation between thickness of shoot and its dry mass was observed (Table 2).

Table 1. Effect of density of seedlings on the analysed parameters of European beech (P – significance level)

Variable	Average calculated for density:		Coefficient of variation calculated for density:		Significance level (P)
	18 seedlings	28 seedlings	18 seedlings	28 seedlings	
Height of the seedlings (H)	36.6	39.7	19.1	16.8	0.084
Thickness of the neck root (D)	6.11	5.73	16.3	15.1	0.124
Dry mass of the shoot (SMP)	2.71	2.78	36.0	38.3	0.797
Root dry mass (SMK)	3.75	2.93	40.4	42.8	0.027
Total root length	5702.3	5581.2	41.9	39.5	0.839
Thickness of the roots	0.30	0.28	12.3	16.6	0.021
Root system of volume	4.10	3.40	38.6	47.0	0.092
The ratio of height to thickness of the neck root	1:6	1:7	17.5	12.3	0.001
The ratio of dry mass of the shoot to root dry mass	1:1.4	1:1.0	8.6	23.4	0.001
Percentage of root deformation	68.0	62.0	24.9	24.0	0.599

4. Discussion

The density of seedling distribution may have influence on their development, both in open nurseries and in controlled conditions. Barnett and Brissette (1986) concluded that the main factor influencing the phenotype of container seedlings was the density of cells in the container and not their shape or volume. Timmis and Tanaka (1976) and Simpson (1991) stated that breeding of seedlings in containers with higher density results in high and thin seedlings of coniferous species, while breeding of seedlings in container with smaller density results in smaller and thicker seedlings. The results of this research with European beech confirm those findings. It should be noted, however, that the lack of statistically significant differences in height and thickness of seedlings' shoot between the examined density variants. Similar regularity was observed with *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* seedlings (Jinks, Mason 1997), *Picea mariana* (Salonius et al. 2000). But a different result was obtained by Peterson (1996). He observed reduction of *Picea mariana* seedlings' height with an increase of their density in the container.

The size of shoot is very important because in places with access to water and nutrients in soil, resources connected with space, the competition for light between seedlings and vegetation of forest litter seems to be the main factor limiting their growth and development. According to numerous studies, in case of strong competition, higher seedlings are characterised by better survivability and growth. Those seedlings grew in higher densities (Mason et al. 1996; Mohammed et al. 1998; South, Mitchell 1999; Puértolas et al. 2003). The ratio of height to thickness of seedlings' shoot (H/D) is also a good indicator of their quality. A lower H/D ratio indicates that seedlings are more resistant to wind and drought but it also has an influence on their increased growth and survivability in dry places (Johnson, Cline 1991). On the basis of conducted research a statistically significant influence of seedlings' density in container on ratio of height to shoot's thickness was observed. Seedlings growing in smaller density were characterised by lower H/D ratio, which may suggest their better breeding quality. It is important to emphasise that the thickness of shoot shows bigger degree of correlation with weight of the roots than with the mass of over-ground part. A bigger size of root system occu-

Table 2. Coefficients of correlation (r) between height of the seedlings and thickness of the neck root and other characteristics morphologic

X	Variables	r coefficient calculated for density:	
		18 seedlings	28 seedlings
Height of the seedlings	Thickness of the neck root	0.609**	0.688**
	Number of the offshoots	0.259	0.624**
	Dry mass of the shoot	0.712**	0.856**
	Root dry mass	0.578**	0.702**
	Total root length	0.492**	0.356**
	Thickness of the roots	0.277	0.062
	Root system of volume	0.681**	0.272
	The number of roots' tops	0.578**	0.270
	Number of roots' branching	0.239	0.316
	Thickness of the neck root	Number of the offshoots	0.492**
Dry mass of the shoot		0.893**	0.863**
Root dry mass		0.931**	0.926**
Total root length		0.599**	0.521**
Thickness of the roots		0.263	0.141
Root system of volume		0.771**	0.562**
The number of roots' tops		0.576**	0.412*
Number of roots' branching		0.385*	0.391*

** – relationship significant at P = 0.01

* – relationship significant at P = 0.05

rs as the thickness increases in neck root of seedlings with an open root system (Janson 1969; Ritchie 1984) and container seedlings (Grossnickle 2000). This dependence was also noted with European beech seedlings in present experiment.

The values of average thickness and dry mass of root were significantly lower for higher-density European beech seedlings in the container than for smaller-density seedlings. It is confirmed by numerous research results, for example *Picea glauca* (Scarratt 1972), *Pseudotsuga menziesii* and *Pinus contorta* (Simpson 1994), *Betula pendula* (Aphalo, Rikala 2002), *Pinus palustris* (South et al. 2005) and *Pinus pinea* (Dominguez-Lerena et al. 2006). It was also observed that values of the volume of root system were constant between two levels of density, despite significant differences in root dry mass. A similar finding was observed by Aghai and others (2013) while breeding *Larix occidentalis*.

One of the features best characterising quality of seedlings was parameters of the root system. The best feature for parametric characterisation is the mass of the root system. Previous research showed that seedlings with bigger mass of roots while planting had bigger growth and adroitness in comparison to those with smaller mass, even if they had a smaller diameter of the shoot (Jacobs et al. 2005; Grossnickle 2012). Bigger mass of roots is the indicator of their absorption capacity and it increases the possibility of overcoming the planting stress. The effects of initial size of root system may have a lasting impact on further growth of the seedlings. Sundström and Keane (1999) noticed that initial size of root system was correlated with the increase of diameter breast height and root biomass in 10-year-old Douglas firs, which they dug up.

The morphology of seedlings is visibly dependent on their density in the container, which significantly influences the availability and quality of light. It is well known that density of foliage influences the development of the whole seedling by shading. More specifically, the change of photosynthetically active radiation and quality of light has an influence on shoot phenotype and pace of root increase (Aphalo, Ballare 1995). Previous research (Vance, Running 1985), in terms of shading, indicate that lower levels of lighting at higher density should strengthen the increase in growth, not limiting at the same time the diameter of the root and dry mass of the root. Mitchell and Arnott (1995) stated that shading of coniferous seedlings causes the increase of height and decrease in branches and root growth. The seedlings' tendency to compensate light limit by allocating bigger part of photosynthesis products in the growth of shoot at the expense of root growth (Drew 1983) may explain why European beech seedlings in this research show smaller accumulation of mass in root with an increase of breeding density. The differences in accumulation of biomass considerably changed the ratio of root to shoot between examined levels of density.

An appropriate balance of roots and shoots is an important morphological attribute as it is the measure of water loss and the capacity of water capture by the plants during the planting time (Burdett 1990; Grossnickle 2000). The proportion of over-ground to underground part of the seedling is also a predictor of seedling's tolerance to transplanting stress and resistance to drought (Grossnickle 2005). Drying is the most stress-causing factor influencing the young seedlings. This stress lowers seedlings' usefulness for renewals and afforestation. That is why earlier information characterising the quality of planting material is needed and also it is important to know where the planting has been planned. It is believed that the functional value of seedlings is higher, higher the ratio of root system mass to over-ground part mass (Gunia, Sobczak 1981). Therefore, higher values of root system among examined European beech seedlings may be connected with higher adroitness of cultivation. At smaller density of cultivation, bigger dry mass of seedlings' root meant the increase of root to shoot ratio. This implies potential advantage for those seedlings after transplanting in relation to seedlings bred at high density. It was confirmed by Aghai and others (2013) in simulated field trials, in which *Larix occidentalis* seedlings from scheme with smaller density after transplanting had significantly bigger increase of root mass and efficiency. Aphalo and Rikala (2002) also stated that a reduction in density of *Betula pendula* nursery had an influence on seedlings' morphology after planting, but had little impact on survivability. However, according to Dominguez-Leren and others (2006), the density of seedlings influenced the morphology, nutrition and efficiency only in nursery.

A majority of the cited research and the results obtained in the present study suggest that higher density leads seedlings to allocate disproportionately large quantity of photosynthesis products into shoot growth, resulting in less developed roots. The increase of seedling's height at the cost of root system may be a disadvantageous change in terms of quality of production. On the other hand, the increase in dry mass of root, root diameter and ratio of root to shoot obtained by breeding in smaller density may turn out to be a profitable investment, especially if the result obtained is more durable seedling, which may show higher growth potential. Higher growth potential presumably means higher survivability after planting, which results in smaller number of corrections. Generally, benefits from better developed root system as a result of breeding at smaller density seem to surpass benefits resulting from increase of photosynthetic tissue. Breeding of seedlings in containers at smaller cell density will be justified only if planting material produced in such a method will result in high adroitness of cultivations. This issue creates new challenges for forest nursery in Poland and requires conducting further research evaluating the impact

of methods used in seedling production on adroitness and development in different habitat conditions.

5. Conclusions

On the basis of research results, it is possible to formulate following conclusions:

1. Use of different density of European beech seedlings in containers did not have significant influence on their height and thickness of the shoot.

2. A significant influence of density on seedlings' slenderness (H/D) was observed.

3. Our research showed that change of seedlings' density in the container has a large impact on development of root system. It should be emphasized that the influence of this feature on development of root mass is the most important element for their further development in cultivation.

4. Density of seedling in container is an important factor influencing the growth and quality of the bred planting material. At smaller density of examined seedlings, bigger dry mass of roots of seedlings led to a significant increase in root mass to shoot ratio. That creates potential advantage in the growth of those seedlings after planting and may result in greater adroitness of plantations.

Conflict of interest

The authors declare that there were no potential conflicts of interest.

Gratitude and sources of funding

This research were conducted within Master's dissertation. No funding was received for this research.

References

- Aghai M.M., Pinto J.R., Davis A.S. 2013. Container volume and growing density influence western larch (*Larix occidentalis* Nutt.) seedling development during nursery culture and establishment. *New Forests*, 45: 199–213. DOI: 10.1007/s11056-013-9402-8.
- Aphalo P., Rikala R. 2002. Field performance of silver-birch planting-stock grown at different spacing and in containers of different volume. *New Forests*, 25: 93–108.
- Aphalo P.J., Ballare C.L. 1995. On the importance of information-acquiring systems in plant-plant interactions. *Functional Ecology*, 9: 5–14.
- Barnett J.P., Brissette J.C. 1986. Producing southern pine seedlings in containers. Gen. Tech. Rep. SO-59. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, s. 71.
- Burdett A.N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Canadian Journal of Forest Research*, 20: 415–427. DOI: 10.1139/x90-059.
- Chirino E., Vilagrosa A., Hernandez E.L., Matos A., Vallejo V.R. 2008. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in *Quercus suber*. Seedlings for reforestation in Mediterranean climate. *Forest Ecology and Management*, 256: 779–785. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.05.035.
- Davis A.S., Jacobs D.F. 2005. Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. *New Forests*, 30: 295–311. DOI: 10.1007/s11056-005-7480-y.
- Dominguez-Lerena S., Herrero Sierra N., Carrasco Manzano I., Ocana Bueno L., Penuelas Rubira J.L., Mexal J.G. 2006. Container characteristics influence *Pinus pinea* seedling development in the nursery and field. *Forest Ecology and Management*, 221: 63–71. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.08.031.
- Drew A.P. 1983. Optimizing growth and development of 2-0 Douglas-fir seedlings by altering light intensity. *Canadian Journal of Forest Research*, 13: 425–428. DOI: 10.1139/x83-064.
- Gilman E.F. 2001. Effect of nursery production method, irrigation, and inoculation with mycorrhizae-forming fungi on establishment of *Quercus virginiana*. *Journal of Arboriculture*, 27: 30–39.
- Grossnickle S.C. 2012. Why seedlings survive: Influence of plant attributes. *New Forests*, 43: 711–738. DOI: 10.1007/s11056-012-9336-6.
- Grossnickle S.C. 2000. Ecophysiology of northern spruce species: The performance of planted spruce seedlings. Ottawa, Ontario, Canada. *NRC Research Press*, s.407. ISBN 978-0-660-17959-9.
- Grossnickle S.C. 2005. Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests*, 30: 273–294. DOI: 10.1007/s11056-004-8303-2.
- Gunia S., Sobczak R. 1981. Metody intensywnej produkcji sadzonek drzew leśnych. Biblioteczka Leśnika. Warszawa, PWRiL, s.167. ISBN 83-09-00453-2.
- Haase D.L. 2011. Seedling Root Targets. *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-65*: 80–82.
- Hunt J.A. 2002. Effects of stock type on seedling performance in the northern interior of British Columbia: twenty-year results. *British Columbia Ministry of Forests, Silviculture Note*, 29: 1–6.
- Jacobs D.F., Salifu K.F., Seifert J.R. 2005. Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings. *New Forests*, 30: 235–251. DOI: 10.1007/s11056-005-5419-y.
- Janson L. 1969. Korelacja między cechami biometrycznymi sievek sosny a ich zagęszczeniem. *Sylwan*, 2: 11–15.
- Jinks R., Mason B. 1997. Effects of seedling density on the growth of Corsican pine (*Pinus nigra* var. *maritima* Melv.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) in containers. *Annals of Forest Science*, 55: 407–423. DOI: 10.1051/forest:19980402.
- Johnson J.D., Cline M.L. 1991. Seedling quality of southern pines. In: Duryea M.L., Dougherty P.M. (Eds.). *Forest regeneration manual*. Kluwer Dordrecht Publishers, s. 143–162.
- Kinghorn J.M. 1974. Principles and concepts in container planting. In: Tinus R.W., Stein W.I., Balmer W.E. (Eds.). *Proceedings of*

- the North American Containerized Forest Tree Seedling Symposium. Under section: The containerized seedling: An important new development in forestry. Denver, Colorado, August 26-29, 1974. *Great Plains Agricultural Council Publications*, 68: 8–18.
- Lamhamedi M.S., Bernier P.Y., Hébert C. 1997. Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized *Picea mariana* seedlings under different watering regimes. *New Forests*, 13: 209–22.
- Mason E.G., South D.B., Weizhong Z. 1996. Performance of *Pinus radiata* in relation to seedling grade, weed control, and soil cultivation in the central North Island of New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 26: 173–183.
- Mitchell A.K., Arnott J.T. 1995. Effects of shade on the morphology and physiology of amabilis fir and western hemlock seedlings. *New Forests*, 10: 79–98.
- Mohammed G.H., Noland T.L., Wagner R.G. 1998. Physiological perturbation in jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) in the presence of competing herbaceous vegetation. *Forest Ecology and Management*, 103: 77–85. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)00178-3.
- Newton M., Cole E.C., White D.E. 1993. Tall planting stock for enhanced growth and domination of brush in the Douglas-fir region. *New Forests*, 7: 107–121.
- Paterson J. 1996. Growing environment and container type influence field performance of black spruce container stock. *New Forests*, 13: 325–335.
- Pinto J.R., Dumroese R.K., Davis A.S., Landis T.D. 2011. Conducting seedling stocktype trials: a new approach to an old question. *Journal of Forestry*, 109: 293–299.
- Puértolas J., Gil L., Pardos J.A. 2003. Effects of nutritional status and seedling size on field performance of *Pinus halepensis* planted in former arable land in the Mediterranean basin. *Forestry*, 76: 159–168.
- Regent Instruments Inc. 2008. User Guide, WinRHIZO For Root Analysis. Reference, Regent Instruments. www.regentinstruments.com.
- Ritchie G.A. 1984. Assessing seedling quality. In: Duryea M.L., Landis T.D. (Eds.). *Forest nursery manual: production of bare-root seedlings*. Martinus Nijhoff / Dr W Junk Publishers. Oregon State University, *The Hague Forestry Research Laboratory*, s: 243–259.
- Rose R., Haase D.L., Kroiher F., Sabin T. 1997. Root volume and growth of ponderosa pine and Douglas-fir seedlings: a summary of eight growing seasons. *Western Journal of Applied Forestry*, 12: 69–73.
- Salonius P., Beaton K., Roze B. 2000. Effects of cell size and spacing on root density and field performance of container-reared black spruce. Canadian Forest Service, Atlantic Forestry Centre, Fredericton, New Brunswick. Information Report M-X-208E, s.21. ISBN 0-662-29222-7
- Scarratt J.B. 1972. Effect of tube diameter and spacing on the size of tubed seedling planting stock. Report O-X-170. Ontario: Canadian Forestry Service, *Great Lakes Forest Research Centre*, s.10.
- Simpson D.G. 1991. Growing density and container volume affect nursery and field growth of interior spruce seedlings. *Northern Journal of Applied Forestry*, 8: 160–165.
- Simpson D.G. 1994. Nursery growing density and container volume affect nursery and field growth of Douglas-fir and lodgepole pine seedlings. In National Proceedings, Forest and Conservation Nursery Associations. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, *USDA Forest Service General Technical Report*, 257: 105–115.
- South D.B., Harris S.W., Barnett J.P., Hains M.J., Gjerstad D.H. 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, U.S.A. *Forest Ecology and Management*, 204: 385–398. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.09.016.
- South D.B., Mitchell R.J. 1999. Determining the “optimum” slash pine seedling size for use with four levels of vegetative management on flatwoods site in Georgia, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 1039–1046. DOI: 10.1139/x99-048.
- StatSoft Inc. 2011. STATISTICA. Data analysis software system, version 10. www.statsoft.com [12.019.2013].
- Sundström E., Keane M. 1999. Root architecture, early development and basal sweep in containerized and bare-rooted Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Plant and Soil*, 217: 65–78.
- Szabla K., Pabian R. 2009. Szkółkarstwo kontenerowe. Nowe technologie i techniki w szkółkarstwie leśnym. Warszawa, *Centrum Informacyjne Lasów Państwowych*, s.251. ISBN 978-83-89744-80-7.
- Timmis R., Tanaka Y. 1976. Effects of container density and plant water stress on growth and cold hardiness of Douglas-fir seedlings. *Forest Science*, 22: 167–172.
- Vance N.C., Running S.W. 1985. Light reduction and moisture stress: effects on growth and water relations of western larch seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 15: 72–77. DOI: 10.1139/x85-013.