

Jakość sosny zwyczajnej, buka zwyczajnego i dębu szypułkowego wyhodowanych z siewu na glebie leśnej o różnym stopniu zagęszczenia

Quality of Scots pine, European beech and pedunculate oak grown from sowing on soil with different compaction levels

Jacek Banach^{1*} , Mariusz Kormanek² , Jakub Jaźwiński³ 

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, al. 29-Listopada 46, 31-425 Kraków; ¹Katedra Ekologii i Hodowli Lasu; ²Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej; ³Katedra Zarządzania Zasobami Leśnymi

*Tel. +48 12 6625125, e-mail: rlbanach@cyf-kr.edu.pl

Abstract. In this study, we explore the effect of soil compaction on the growth of seedlings of Scots pine *Pinus sylvestris* L., European beech *Fagus sylvatica* L. and pedunculate oak *Quercus robur* L. On the experimental plots, ground contact pressures ranging from 0 to 250 kPa was applied on the soil. The applied pressure resulted in an increase in soil compaction between 1.02 to 1.19 g cm⁻³, which reflected pressures exerted by the undercarriage of vehicles used in logging. We then measured the seedlings as well as the dry weight of the roots and the above-ground parts. Using this data, we calculated the following quality indicators for each seedling: *SQ* – sturdiness quotient, *S/R* – shoot to root dry mass, *DQI* – Dickson quality index. For pedunculate oak, the *SQ* value significantly improved with increasing soil compaction, whereas no differences in the other two indicators were observed. In case of the European beech, the best value of *SQ* and *DQI* were observed at a soil density of 1.11 g cm⁻³, whilst no significant difference for the *S/R* coefficient could be found. Completely different results were obtained for Scots pine. The most favorable growth was observed when no pressure was applied. However, the *SQ* and *S/R* ratios even exceeded the values commonly considered acceptable. Our results therefore indicate that the values of seedling quality indicators are indeed influenced by soil compaction. At a soil compaction of 1.11 g cm⁻³, the share of seedlings with the *SQ* value below the critical level was the highest, but a similar relationship could not be confirmed for the other indicators. The response of the seedlings to compaction is likely to be species specific.

Keywords: ground contact pressure, seedling quality, sturdiness quotient, *S/R*, *DQI*

Słowa kluczowe: nacisk jednostkowy, jakość sadzonek, wskaźnik wytrzymałości, *S/R*, *DQI*

1. Wstęp

Nadmierny wzrost zagęszczenia gleby, na skutek wykonywania prac pozyskaniowych, uznawany jest za istotny czynnik, mogący wpłynąć negatywnie na naturalną regenerację lasu (Ulrich et al. 2003). Badania Alexandra (2012) wykazały, że nawet po 40 latach od wykonania prac pozyskaniowych zagęszczenie gleby w miejscach poruszania się maszyn było istotnie większe w porównaniu do miejsc, po których maszyny nie przejeżdżały. Według Basset i in. (2005) nadmierne zagęszczenie gleby może powodować słabszy rozwój korzeni siewek poprzez ograniczenie dostępności tlenu, będące skutkiem zmniejszającej się porowatości oraz braku połączeń między porami, co utrudnia proces wymiany gazowej, wodnej i cieplnej, a także hamuje rozrastanie się korzeni hory-

zontalnych. Takie zmiany obserwowano zarówno w obrębie szlaku zrywkowego, jak i w bezpośrednim jego sąsiedztwie (Whalley et al. 1996; von Wilpert, Schäffer 2006). Naturalna regeneracja lasu w takich warunkach może być ograniczona, a dodatkowym negatywnym aspektem jest pojawianie się zjawisk erozyjnych i spływu najbardziej żyznej warstwy gleby (Cambi et al. 2015). Z kolei badania przeprowadzone przez Sohrabi i in. (2019) wykazały, że negatywne skutki zagęszczenia gleby są widoczne jeszcze po 20 latach od wykonania prac zrywkowych, na co wskazuje jej niższa porowatość i większa gęstość, które utrudniają penetrację korzeni w głąb profilu glebowego.

Informacji dotyczących tolerancji odnowienia naturalnego drzew leśnych na zagęszczanie gleby lub podłoża jest niewiele. Krajowe badania dowiodły, że wzrost nacisku jednost-

Wpłynęło: 24.08.2020 r., zrecenzowano: 14.10.2020 r., zaakceptowano: 23.10.2020 r.

kowego wywieranego na glebę w zakresie od 50 do 250 kPa wpływa negatywnie na wartość parametrów wzrostowych sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L., buka zwyczajnego *Fagus sylvatica* L. i dębu szypułkowego *Quercus robur* L. (Kormanek, Banach 2012; Kormanek et al. 2015a). Podobną zależność wykazano w badaniach innych gatunków leśnych (Brais 2001; Fleming et al. 2006). Zaobserwowano również mniejszą liczebność pojawiającego się odnowienia na obszarze szlaków zrywkowych w porównaniu do obszaru poza tymi szlakami (DeArmond et al. 2019; Sohrabi et al. 2019).

W realizowanych pracach badawczych zwraca się uwagę głównie na zmianę parametrów wzrostowych odnowienia naturalnego lub sadzonek produkowanych w szkółkach gruntowych ze względu na zmianę poziomu zagęszczenia gleby (Jordan et al. 2003; Alameda, Villar 2009; Kormanek et al. 2015a,b; Jourgholami et al. 2016), natomiast brak jest informacji dotyczących jakości odnowienia. W pracy do oceny jakości odnowienia sosny, buka i dębu rosnącego na glebie o różnym poziomie zagęszczenia wykorzystano trzy współczynniki, zazwyczaj stosowane do oceny sadzonek hodowanych w szkółkach leśnych (Thompson 1985; Olivo Buduba 2006; Hasse 2007; Ivetić et al. 2016; Skrzyszewska et al. 2019). W przeprowadzonych analizach sprawdzono hipotezę o braku wpływu zagęszczenia na wielkość współczynników jakościowych wyhodowanego materiału doświadczalnego.

2. Materiał i metody

Doświadczenie zlokalizowano w obrębie kulisy otaczającej obiekt szkółkarski Kłaj w Nadleśnictwie Niepołomice w pododdziale 296a (49°59'41"N, 20°20'16"E). Powierzchnię badawczą założono pod okapem drzewostanu składającego się z dębu szypułkowego w wieku 80–100 lat, rosnącego na siedlisku lasu mieszanego świeżego (LMśw) i glebie rdzawej właściwej (RDw). Dla trzech analizowanych gatunków przygotowano poletka doświadczalne, na które wywarto nacisk jednostkowy o wartościach: 50 (wariant ZG₅₀), 100 (ZG₁₀₀), 150 (ZG₁₅₀), 200 (ZG₂₀₀) i 250 kPa (ZG₂₅₀) przy pomocy urządzenia CUWKN-1 do statycznego zagęszczania gleby (Kormanek 2011, 2015). Dla każdego wariantu nacisku przygotowano po 6 poletek doświadczalnych o wymiarach 25×25 cm oraz 6 poletek kontrolnych, tj. bez zastosowania nacisku – wariant ZG₀ (0 kPa). Łącznie badania przeprowadzono na 36 poletkach. W zależności od poziomu nacisku jednostkowego zmieniało się zagęszczenie gleby w warstwie przypowierzchniowej do 10 cm głębokości (gęstość wyznaczona za pomocą cylinderków miarowych o objętości 250 cm³), które wyniosło 1,03 g·cm⁻³ dla wariantu ZG₅₀, dla ZG₁₀₀ – 1,11, ZG₁₅₀ – 1,14, ZG₂₀₀ – 1,15, ZG₂₅₀ – 1,19 oraz 1,02 g·cm⁻³ dla wariantu bez zastosowania nacisku, czyli ZG₀. Na każdym poletku doświadczalnym wysiano jednakową liczbę nasion danego gatunku, tj. po 150 nasion sosny, 100 buka i 50 dębu, co na 1 m² dało 2400 nasion sosny, 1600 buka i 800 dębu. Zastosowana norma wysiewu uwzględniała niską wartość siewną wykorzystanych nasion. Liczba wysianych nasion na poletkach doświadczalnych, niewystępująca wprawdzie w warunkach odnowienia

naturalnego, stosowana jest przy siewie pełnym (sosna) lub częściowym (buk, dąb) w hodowli sadzonek w szkółce. Nasiona po wysiewie przykryto ziemią i w trakcie całego cyklu wegetacyjnego kontrolowano kiełkowanie i wzrost sadzonek, a przy dłuższych okresach bez naturalnego opadu dokonywano sztucznego deszczowania. Po sześciu miesiącach pozyskano wyrosłe sadzonki poprzez wykopanie całego poletka doświadczalnego, rozmiękczenie bryły gleby i oddzielenie poszczególnych sadzonek. Wykonano pomiar ich cech wzrostowych: wysokości, grubości w szyjce korzeniowej, długości systemu korzeniowego oraz określono suchą masę. Szerszy opis metodyki założenia i prowadzenia doświadczenia przedstawiono w pracy Kormanek i Banacha (2012), a metodykę określania zagęszczenia w pracy Kormanek i in. (2015a). Wyniki analizy cech wzrostowych jednorocznego odnowienia sosny, buka i dębu szypułkowego w zależności od zastosowanego nacisku jednostkowego przedstawiono w pracy Kormanek i Banacha (2012). Wykorzystując wyniki pomiarów z tych badań, w niniejszej pracy przeprowadzono dodatkowe analizy jakości odnowienia wyhodowanego w warunkach zmiennej zagęszczenia gleby, obliczając i analizując 3 wskaźniki wykorzystywane do oceny przydatności hodowlanej sadzonek hodowanych w szkółkach. Dla każdego wyhodowanego osobnika obliczono: współczynnik wytrzymałości (*SQ*), współczynnik pędowo-korzeniowy (*S/R*) oraz współczynnik jakości Dicksona (*DQI*).

Współczynnik wytrzymałości sadzonki (*SQ*) obliczany jest analogicznie do współczynnika smukłości drzew, z tą różnicą, że zamiast pierśnicy używa się grubości w szyjce korzeniowej (1). Wysoka wartość współczynnika *SQ* wskazuje, że sadzonki są wiotkie, a niska – krępe. Przy niskim *SQ* sadzonki charakteryzują się wyższą odpornością na niekorzystne czynniki abiotyczne, a w efekcie lepszą przeżywalnością. Jako maksymalną wartość graniczną przyjęto wartość *SQ* wynoszącą 70 dla sosny i 65 dla buka i dębu, które wynikają z przeliczenia granicznych parametrów sadzonek I i II klasy jakości zawartych w normie PN-R-67025 (1999).

$$SQ = \frac{SH}{RCD} \times 10 \quad (1)$$

gdzie:

SH – wysokość sadzonki [cm],

RCD – średnica w szyjce korzeniowej [mm].

Wykorzystując suchą masę (s.m.), obliczono wskaźnik pędowo-korzeniowy (*S/R*) jako proporcję s.m. części nadziemnej do s.m. systemu korzeniowego (2). Ta proporcja określa równowagę między obszarem transpiracyjnym (pęd + igły) a obszarem pochłaniania wody (korzenie), zaś jej wielkość dla sadzonek rosnących w gruncie nie powinna przekraczać wartości 3:1 (Iverson 1984; Thompson 1985; Haase 2007).

$$S/R = \frac{SNDM}{RDM} \quad (2)$$

gdzie:

SNDM – sucha masa pędu z aparatem asymilacyjnym [g],

RDM – sucha masa systemu korzeniowego [g].

Ostatni z zastosowanych indeksów, tj. wskaźnik jakości Dicksona (DQI), określa potencjał rośliny do przeżycia i wzrostu (3). Wyższe wartości wskaźnika DQI wskazują na potencjalnie lepszą adaptację sadzonek po ich posadzeniu na uprawie (Dickson et al. 1960; Olivo, Buduba 2006).

$$DQI = \frac{TDM}{\frac{SH}{RCD} + \frac{SNDM}{RDM}} \quad (3)$$

gdzie:

TDM – całkowita sucha masa sadzonki [g],

SH – wysokość sadzonki [cm],

RCD – średnica w szyjce korzeniowej [mm],

$SNDM$ – sucha masa pędu z aparatem asymilacyjnym [g],

RDM – sucha masa systemu korzeniowego [g].

Statystyczną istotność różnic między średnimi wartościami współczynników jakości określono jednoczynnikową analizą wariancji (model stały) przy użyciu programu Statistica 13.3 (TIBCO Software Inc. 2017). Dla współczynnika SQ i współczynnika S/R obliczono liczbę sadzonek poniżej i powyżej dopuszczalnej wartości maksymalnej, a uzyskane wyniki przedstawiono na rycinach.

3. Wyniki

Dla wszystkich analizowanych gatunków zróżnicowanie między średnimi wartościami współczynnika wytrzymałości dla poszczególnych wariantów nacisku jednostkowego było statystycznie istotne na poziomie $p < 0,05$. Przeciętny wskaźnik wytrzymałości osobników sosny był bardzo wysoki, znacząco przekraczał wartość przyjętą za maksymalną ($SQ=70$) i kształtował się od ok. 141,8 dla wariantu ZG_{150} do 197,8 dla ZG_{50} . Ta cecha przedstawiała się odmiennie dla obydwu analizowanych gatunków liściastych. Dla buka i dębu przeciętny wskaźnik SQ był poniżej wartości maksymalnej ($SQ=65$) w każdym z wariantów nacisku jednostkowego. Dla buka SQ osiągnął wartość od 50,2 dla wariantu ZG_{100} do 60,9 dla ZG_{250} , natomiast w przypadku dębu zaobserwowano stopniowe zmniejszanie się tego indeksu od wartości 42,4 dla wariantu ZG_0 , czyli bez zastosowania nacisku, do 28,4 dla wariantu ZG_{250} (tab. 1).

Udział sadzonek spełniających kryterium wytrzymałościowe, tj. o SQ poniżej wartości maksymalnej dla gatunku, był najwyższy przy nacisku jednostkowym ZG_{100} i wynosił 13% dla sosny, 84% dla buka i 100% dla dębu. Niezależnie od wariantu nacisku najwięcej osobników o $SQ < \text{maks.}$ wystąpiło w przypadku dębu – razem 96%, a najmniej sosny – 4% (ryc. 1).

Analiza współczynnika pędowo-korzeniowego (S/R) podkreśliła duże różnice między sosną a oboma gatunkami liściastymi. We wszystkich wariantach doświadczalnych przeciętny wskaźnik S/R sosny znacząco przekraczał poziom krytyczny 3:1, a szczególnie wysokie wartości uzyskały osobniki przy zastosowaniu nacisku jednostkowego ZG_{100} (12,2:1) i ZG_{50} (10,6:1). W przypadku buka i dębu

średnie wartości S/R w każdym wariantcie doświadczalnym nie przekraczały wartości granicznej, a różnice między wariantami okazały się statystycznie nieistotne. Dla buka wartość wskaźnika wahała się od 1,8:1 (ZG_0 , ZG_{100} i ZG_{200}) do 2,3:1 dla ZG_{50} . Proporcja S/R dla dębu w prawie wszystkich wariantach wynosiła 0,6:1, z wyjątkiem wariantu nacisku ZG_{200} – 0,7:1 (tab. 1).

Udział sadzonek spełniających kryterium pędowo-korzeniowe, tj. o S/R poniżej wartości maksymalnej 3:1, wynosił 100% dla dębu i 88% dla buka, natomiast w przypadku sosny wyniósł przeciętnie 16% i wahał się od 4% dla wariantu ZG_{250} do 30% dla wariantu nacisku jednostkowego ZG_{150} (ryc. 2).

Wartość indeksu jakości Dicksona (DQI) była zróżnicowana i zależała od analizowanego gatunku. Przeciętnie najniższe wartości DQI uzyskano dla sosny, w zakresie od 0,002 do 0,004 dla wariantu ZG_0 . W przypadku buka zakres zmienności tego indeksu wahał się od 0,068 (wariant ZG_{50}) do 0,99 (ZG_{100}). Najwyższym DQI charakteryzował się dąb szypułkowy w zakresie od 0,115 (ZG_{250}) do 0,141 (ZG_{100}). Tylko dla sosny zwyczajnej i buka zwyczajnego uzyskane zróżnicowanie między średnimi wartościami indeksu DQI dla poszczególnych wariantów nacisku jednostkowego było statystycznie istotne na poziomie $p < 0,05$ (tab. 1).

4. Dyskusja

W wielu pracach naukowych wykazano związek między zagęszczeniem gleby lub podłoża szkółkarskiego a parametrami sadzonek różnych gatunków drzew leśnych (Jordan et al. 2003; Alameda, Villar 2009; Kormanek et al. 2015b; Jourgholami et al. 2016). Zwiększone zagęszczenie wpływa na właściwości gleby (podłoża szkółkarskiego), zmniejszając porowatość (Kormanek et al. 2015b; Sohrabi et al. 2019), utrudniając wzrost systemu korzeniowego (Kozlovsky 1999; von Wilpert, Schäffer 2006; Cambi et al. 2017) i pobieranie związków mineralnych (Jordan et al. 2003; Cambi et al. 2017), co w efekcie skutkuje gorszym wzrostem roślin. Parametry wzrostowe (wysokość, grubość w szyjce korzeniowej, sucha masa, itp.) rozpatrywane odrębnie nie zawsze odzwierciedlają faktyczną wartość i przydatność adaptacyjną sadzonek – lepszym rozwiązaniem jest ich połączenie w jeden wskaźnik (Thompson 1985; Haase 2007). Innymi słowy, wysoka sadzonka posadzona na uprawie lub wyrosła z odnowienia naturalnego nie będzie zawsze dobrze wzrastała lub nawet przeżywała, jeżeli pozostałe parametry będą charakteryzowały się niskimi wartościami.

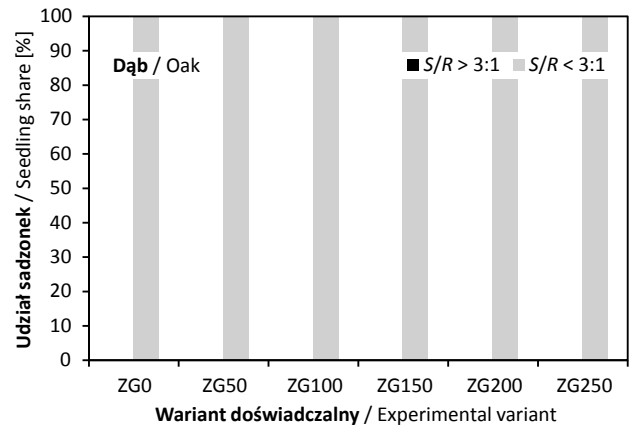
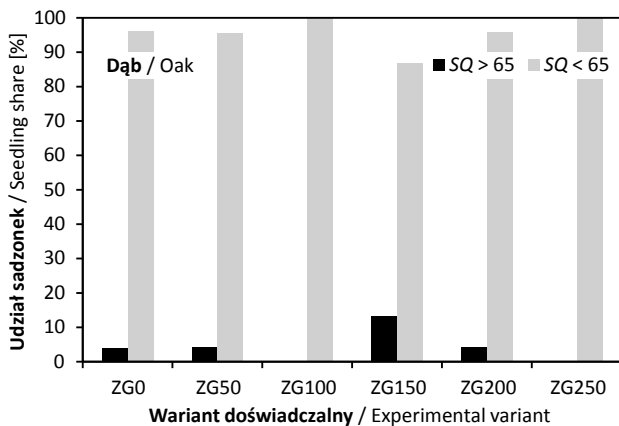
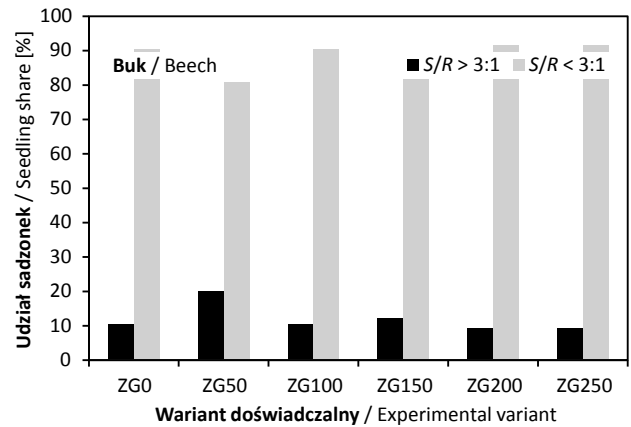
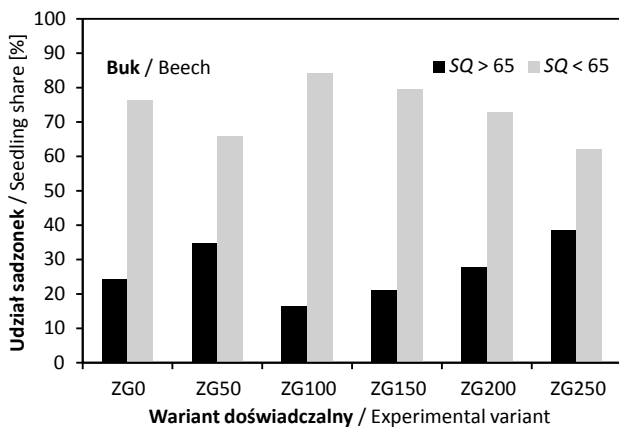
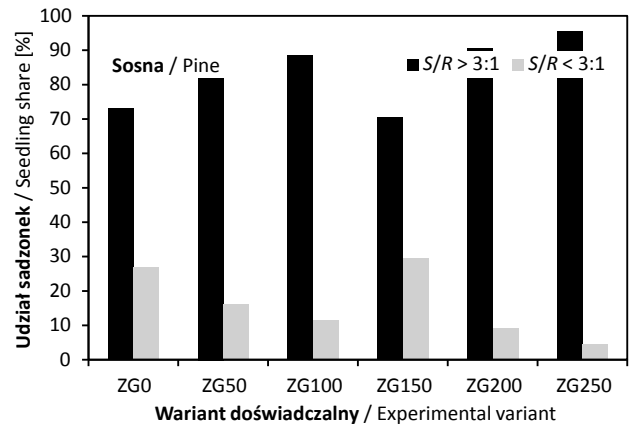
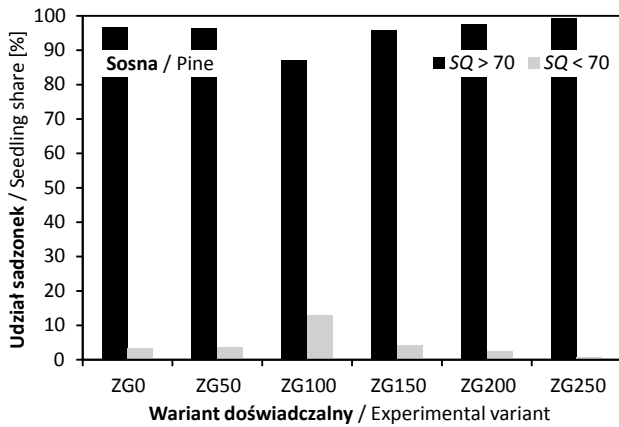
W prezentowanych wynikach badań wartość zastosowanych nacisków jednostkowych w zakresie od 50 do 250 kPa miała na celu odwzorowanie rzeczywistej wartości nacisku wywieranego przez układ jezdny maszyn stosowanych przy pracach pozyskaniowych i jego związek z kiełkowaniem nasion i wzrostem roślin. Wcześniejsza analiza wzrostu i suchej masy (Kormanek, Banach 2012) wykazała najwyższe wartości tych parametrów dla sadzonek wyrosłych na niezagęszczonej glebie, które gwałtownie się pogarszały

Tabela 1. Przeciętne wartości wskaźników jakości sadzonek poszczególnych gatunków w różnych wariantach nacisku jednostkowego (grupy jednorodnie określone testem Tukeya, $p=0,05$)Table 1. Average values of quality indicators of seedlings of analyzed species in different variants of ground contact pressure (homogeneous groups determined by Tukey's test, $p=0.05$)

Gatunek Species	Wariant nacisku jednostkowego Variant of ground contact pressure	Zagęszczenie gleby Soil compaction [g·cm ⁻³]	Średnia wartość wskaźnika jakości (± SE) Mean value of quality index (± SE)		
			<i>SQ</i>	<i>S/R</i>	<i>DQI</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	ZG ₀	1,02	170,2 ± 6,8 ^{ab}	6,2 : 1 ^a	0,004 ± 0,000 ^a
	ZG ₅₀	1,03	197,8 ± 11,5 ^b	10,6 : 1 ^{bc}	0,002 ± 0,000 ^b
	ZG ₁₀₀	1,11	173,6 ± 11,4 ^{ab}	12,2 : 1 ^c	0,002 ± 0,000 ^b
	ZG ₁₅₀	1,14	141,8 ± 6,1 ^a	6,9 : 1 ^{ab}	0,003 ± 0,000 ^b
	ZG ₂₀₀	1,15	277,9 ± 21,7 ^c	7,0 : 1 ^{abc}	0,002 ± 0,000 ^b
	ZG ₂₅₀	1,19	197,5 ± 6,3 ^b	6,8 : 1 ^{ab}	0,002 ± 0,000 ^b
Test <i>F</i> (poziom istotności <i>p</i>)			17,25	5,06	10,91
<i>F</i> -test (<i>p</i> – significance level)			(<i>p</i><0,001)	(<i>p</i><0,001)	(<i>p</i><0,001)
<i>Fagus sylvatica</i>	ZG ₀	1,02	53,5 ± 2,4 ^{ab}	1,8 : 1 ^a	0,078 ± 0,011 ^{ab}
	ZG ₅₀	1,03	60,0 ± 1,8 ^{ab}	2,3 : 1 ^a	0,068 ± 0,011 ^b
	ZG ₁₀₀	1,11	50,2 ± 2,5 ^a	1,8 : 1 ^a	0,099 ± 0,010 ^a
	ZG ₁₅₀	1,14	54,8 ± 2,7 ^{ab}	2,0 : 1 ^a	0,098 ± 0,009 ^a
	ZG ₂₀₀	1,15	55,9 ± 1,9 ^{ab}	1,8 : 1 ^a	0,093 ± 0,006 ^a
	ZG ₂₅₀	1,19	60,9 ± 2,7 ^b	1,9 : 1 ^a	0,086 ± 0,007 ^{ab}
Test <i>F</i> (poziom istotności <i>p</i>)			2,53	2,01	2,97
<i>F</i> -test (<i>p</i> – significance level)			(<i>p</i>=0,029)	(<i>p</i>=0,076)	(<i>p</i>=0,012)
<i>Quercus robur</i>	ZG ₀	1,02	42,4 ± 2,6 ^b	0,6 : 1 ^a	0,134 ± 0,011 ^a
	ZG ₅₀	1,03	38,6 ± 2,4 ^{ab}	0,6 : 1 ^a	0,121 ± 0,020 ^a
	ZG ₁₀₀	1,11	40,2 ± 3,4 ^{ab}	0,6 : 1 ^a	0,141 ± 0,030 ^a
	ZG ₁₅₀	1,14	37,4 ± 5,0 ^{ab}	0,6 : 1 ^a	0,137 ± 0,016 ^a
	ZG ₂₀₀	1,15	39,3 ± 2,9 ^{ab}	0,7 : 1 ^a	0,116 ± 0,014 ^a
	ZG ₂₅₀	1,19	28,4 ± 2,5 ^a	0,6 : 1 ^a	0,115 ± 0,023 ^a
Test <i>F</i> (poziom istotności <i>p</i>)			2,59	0,75	0,31
<i>F</i> -test (<i>p</i> – significance level)			(<i>p</i>=0,030)	(<i>p</i>=0,585)	(<i>p</i>=0,904)

już od najniższego poziomu zastosowanego nacisku (50 kPa). Dla sadzonek dębu wszystkie analizowane parametry zmniejszały swoje wartości, z wyjątkiem grubości w szyjce korzeniowej. Najwyższą wartość grubości przy maksymalnym zastosowanym nacisku można interpretować jako rekompensowanie słabszego wzrostu na wysokość (Kormanek, Banach 2012). Skutkowało to wyraźnym polepszeniem się współczynnika wytrzymałości (*SQ*) wraz ze wzrostem zagęszczenia gleby, a więc zwiększaniem się odporności na niekorzystne warunki abiotyczne, które mogą wystąpić w trakcie początkowych lat wzrostu odnowienia. Czynnikiem, którego wpływu nie określono w przedstawionym

doświadczeniu, a który przypuszczalnie mógł mieć znaczenie w kontekście uzyskanych parametrów sadzonek było ich zagęszczenie na poletkach doświadczalnych. Jednakże mimo dużej liczby wysianych nasion liczba uzyskanych siewek była zdecydowanie niższa, a wydajność wahała się od 7% dla dębu do 20% dla sosny (Kormanek, Banach 2012), nie odbiegając od wydajności charakteryzującej produkcję sadzonek z odkrytym systemem korzeniowym w szkółkach gruntowych. Dla pozostałych dwóch wskaźników (*S/R* i *DQI*) nie uzyskano jednak istotnych różnic między zastosowanymi wariantami nacisku jednostkowego. Potwierdziło to podobny brak związku między wskaźnikiem pędowo-



Rycina 1. Udział sadzonek analizowanych gatunków powyżej i poniżej granicznej wartości współczynnika wytrzymałości (SQ)
 Figure 1. The share of seedlings of the analyzed species below and above the limit value of the sturdiness quotient (SQ)

Rycina 2. Udział sadzonek analizowanych gatunków powyżej i poniżej granicznej wartości wskaźnika pędowo-korzeniowego (S/R)
 Figure 2. The share of seedlings of the analyzed species below and above the limit value shoot-root index (S/R)

-korzeniowym a zagęszczeniem gleby, który został wykazany dla innych gatunków dębów, tj. *Quercus castaneifolia* C.A.Mey. (Jourgholami et al. 2016) oraz *Q. ilex* L., *Q. canariensis* Willd. i *Q. pyrenaica* Willd., natomiast w przypadku *Q. coccifera* L. i *Q. faginea* Lam. ten wskaźnik zmieniał się wraz ze zmianą zagęszczenia (Alameda, Villar 2009). Wartość SQ prawie wszystkich analizowanych sadzonek dębu szypułkowego kształtowała się poniżej poziomu maksymalnego, z wyjątkiem nieco niższej wartości dla wariantu

z naciskiem 150 kPa. Dla buka uzyskano nieco odmienny obraz zmienności. Najlepszą przeciętną wartość wskaźnika SQ uzyskano w wariantcie z naciskiem 100 kPa, podobnie jak dla indeksu jakości Dicksona. Podobny wynik, tj. istotny wpływ zagęszczenia na cechy wzrostowe buka zwyczajnego, otrzymał Kormanek (2013), który analizował wzrost tego gatunku w warunkach laboratoryjnych. Dla indeksu pędowo-korzeniowego u analizowanych buków nie obserwowano istotnych różnic między wariantami zagęszcze-

nia, co jest zbieżne z wynikami dla *Fagus orientalis* Lipsky wyrosłego z naturalnego odnowienia na zrębach po zastosowaniu maszyn zrywkowych wywierających różny nacisk na glebę. Współczynnik wytrzymałości SQ obliczony dla tego gatunku w wariantach z różnym zagęszczeniem istotnie różnił się względem wariantu kontrolnego gleby (Picchio et al. 2019). Przy nacisku 100 kPa uzyskano najwyższy udział buków (>80%) poniżej dopuszczalnej wartości współczynnika SQ , co sugeruje, że zagęszczenie ok. $1,11 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ jest optymalne przy naturalnym odnawianiu się tego gatunku.

Zdecydowanie odmienne wyniki uzyskano dla sosny zwyczajnej. Wprawdzie różnice między średnimi wskaźników w poszczególnych wariantach okazały się statystycznie istotne, to jednak wartości współczynników SQ i S/R znacząco przekraczały wartości dopuszczalne. Podobnie index DQI osiągał bardzo niskie wartości, dużo niższe niż zazwyczaj uzyskują sadzonki wyhodowane w szkółce (Memisoglu, Tilki 2014; Ivetic et al. 2017; Kolevska et al. 2020). Najlepsze wartości wskaźników uzyskano dla wariantu bez zastosowania nacisku jednostkowego, co jest zgodne z wcześniejszymi badaniami Wästerlunda (1985), w których długość korzeni szkieletowych sosny zwyczajnej była odwrotnie proporcjonalna do zagęszczenia gleby. Ten czynnik również wpływał na zdecydowanie słabszy wzrost korzeni drobnych. Zbieżny wynik dla tego gatunku otrzymał Mickovski (2018), który zauważył, że tempo rozwoju systemu korzeniowego zmniejszało się wraz ze wzrostem zagęszczenia gleby. Dodatkowo okazało się, że największy wzrost długości osiowej korzeni wystąpił w temperaturze 15°C . W tym przypadku na niskie wartości współczynników jakości siewek sosny mogło mieć wpływ duże jej zagęszczenie na jednostce powierzchni. Przeczą temu jednak najlepsze wartości współczynników uzyskane w wariantcie kontrolnym, czyli bez zastosowania zagęszczenia oraz podawana przez Kornanka i Banacha (2012) duża liczba skielkowanych nasion i uzyskanego odnowienia, na którą wpływ mogło mieć również siedlisko lasu mieszanego świeżego, które nie było optymalne dla sosny. Na siedliskach uboższych (borowych) prawdopodobnie uzyskano by mniejszą wydajność oraz siewki o gorszych parametrach wzrostowych, na co wskazują wyniki badań Dobrowolskiej (2010). Znaczną liczbę pojawiającego się odnowienia na nienaruszonej glebie w porównaniu do obszaru silnie naruszonego przez zastosowane maszyny zrywkowe wykazali Lucas-Borja i in. (2020) dla sosny czarnej, co jednak nie wpływało negatywnie na jej wzrost. Taka sama tendencja została zauważona przez Sohrabiego i in. (2019), którzy analizowali odnowienie w drzewostanach nienaruszonych oraz po wykonaniu cięć i prac zrywkowych. Różnica w liczebności odnowienia była widoczna po 20 latach od wykonania prac pozyskaniowych.

Uogólniając, zagęszczenie gleby wpływa na wartość wskaźników jakościowych, jednak nie można jednoznacznie odpowiedzieć, w którym kierunku przebiega zmiana. Reakcja jest specyficzna dla gatunku, co może wynikać z wpływu różnych czynników środowiskowych (Blouin et al. 2008; Bejarano et al. 2010), nieanalizowanych w tym doświadczeniu.

5. Wnioski

1. Zastosowanie różnego nacisku jednostkowego na glebę wpłynęło na wielkość wszystkich współczynników charakteryzujących jakość sadzonek sosny zwyczajnej. Dla buka zwyczajnego istotny wpływ nacisku uzyskano dla współczynnika wytrzymałości sadzonki (SQ) i indeksu DQI , natomiast dla dębu szypułkowego tylko dla współczynnika SQ .

2. Dla każdego z analizowanych gatunków wariant nacisku jednostkowego ZG_{100} , odpowiadający zagęszczeniu gleby $1,11 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, okazał się wariantem, przy którym udział sadzonek o wartości współczynników SQ i S/R poniżej poziomu krytycznego był najwyższy, a wartość indeksu DQI maksymalna. Świadczyć to może o lepszym wzroście odnowienia analizowanych gatunków na glebie o gęstości objętościowej zbliżonej do tego poziomu.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania badań

Autorzy dziękują Nadleśnictwu Niepołomice za udostępnienie obiektu szkółkarskiego Klaj do założenia doświadczenia. Prace sfinansowano z subwencji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie na rok 2020 (SUB/040012/D019).

Literatura

- Alameda D., Villar R. 2009. Moderate soil compaction: Implications on growth and architecture in seedlings of 17 woody plant species. *Soil and Tillage Research* 103: 325–331. DOI 10.1016/j.still.2008.10.029.
- Alexander A.B. 2012. Soil compaction on skid trails after selective logging in moist evergreen forest of Ghana. *Agriculture And Biology Journal of North America* 3(6): 262–264. DOI 10.5251/abjna.2012.3.6.262.264.
- Bassett I., Simcock R., Mitchell N. 2005. Consequences of soil compaction for seedling establishment: Implications for natural regeneration and restoration. *Austral Ecology* 30: 827–833. DOI 10.1111/j.1442-9993.2005.01525.x.
- Bejarano M.D., Villar R., Murillo A.M., Quero J.L. 2010. Effects of soil compaction and light on growth of *Quercus pyrenaica* Willd. (Fagaceae) seedlings. *Soil and Tillage Research* 110: 108–114. DOI 10.1016/j.still.2010.07.008.
- Blouin V.M., Schmidt M.G., Bulmer C.E., Krzic M. 2008. Effects of compaction and water content on lodgepole pine seedling growth. *Forest Ecology and Management* 255: 2444–2452. DOI 10.1016/j.foreco.2008.01.008.
- Brais S. 2001. Persistence of soil compaction and effects on seedling growth in northwestern Quebec. *Soil Science Society American Journal* 65(4): 1263–1271. DOI 10.2136/sssaj2001.6541263x.
- Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E. 2015. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management* 338: 124–138. DOI 10.1016/j.foreco.2014.11.022.

- Cambi M., Hoshika Y., Mariotti B., Paoletti E., Picchio R., Venanzi R., Marchi E. 2017. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. *Forest Ecology and Management* 384: 406–414. DOI 10.1016/j.foreco.2016.10.045.
- DeArmond D., Emmert F., Lima A.J.N., Higuchi N. 2019. Impacts of soil compaction persist 30 years after logging operations in the Amazon Basin. *Soil and Tillage Research* 189: 207–216. DOI 10.1016/j.still.2019.01.010.
- Długosiewicz J., Zajac S., Wysocka-Fijorek E. 2019. Ocena naturalnego i sztucznego odnowienia drzewostanów sosnowych *Pinus sylvestris* L. w Nadleśnictwie Nowa Dęba. *Leśne Prace Badawcze* 80(2): 105–116. DOI 10.2478/frp-2019-0009.
- Dobrowolska D. 2010. Warunki powstawania odnowień naturalnych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na terenie Nadleśnictwa Tuszyn. *Leśne Prace Badawcze* 71(3): 217–224. DOI 10.2478/v10111-010-0017-y.
- Fleming R.L., Powers R.F., Foster N.W., Kranabetter J.M., Scott D.A., Ponder F. Jr., Berch S., Chapman W.K., Kabzems R.D., Ludovici K.H., Morris D.M., Page-Dumroese D.S., Sanborn P.T., Sanchez F.G., Stone D.M., Tiarks A.E. 2006. Effects of organic matter removal, soil compaction, and vegetation control on 5-year seedling performance: a regional comparison of long-term soil productivity sites. *Canadian Journal of Forest Research* 36(3): 529–550. DOI 10.1139/x05-271.
- Haase D.L. 2007. Morphological and physiological evaluations of seedling quality. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-50, 3–8.
- Iverson R.D. 1984. Planting stock selection: Meeting biological needs and operational realities, w: Duryea M.L., Landis T.D. (red.) Forest nursery manual. Oregon State University. Corvallis, USA, 261–266.
- Ivetić V., Grossnickle S., Škorić M. 2016. Forecasting the field performance of Austrian pine seedlings using morphological attributes. *iForest* 10: 99–107. DOI 10.3832/ifor1722-009.
- Ivetić V., Maksimović Z., Kerkez I., Devetaković J. 2017. Seedling quality in Serbia – Results from a three-year survey. *Reforestia* 4: 27–53. DOI 0.21750/REFOR.4.04.43.
- Johnson J.D., Cline M.L. 1991. Seedling quality of southern pines, w: Duryea M.L., Dougherty P.M. (red.) Forest Regeneration Manual. Kluwer Academic Publishers, 143–159. DOI 10.1007/978-94-011-3800-0.
- Jordan D., Ponder F. Jr., Hubbard V.C. 2003. Effects of soil compaction, forest leaf litter and nitrogen fertilizer on two oak species and microbial activity. *Applied Soil Ecology* 23: 33–41. DOI 10.1016/S0929-1393(03)00003-9.
- Jourgholami M., Khoramizadeh A., Zenner E.K. 2016. Effects of soil compaction on seedling morphology, growth, and architecture of chestnut-leaved oak (*Quercus castaneifolia*). *iForest* 10: 145–153. DOI 10.3832/ifor1724-009.
- Kolevska D.D., Dimitrova A., Cokoski K., Basova M. 2020. Growth and quality of *Pinus nigra* (Arn.), *Pinus sylvestris* (L.) and *Pinus pinaster* (Aiton) seedlings in two container types. *Reforestia* 9: 21–36. DOI 10.21750/REFOR.9.04.78.
- Kormanek M. 2011. Urządzenie ciągnikowe do wywierania kontrolowanego nacisku na grunt. Prawo ochronne na wzór użytkowy W – 120048.
- Kormanek M. 2013. Determination of the impact of soil compaction on germination and seedling growth parameters of common beech in the laboratory conditions. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 12(1): 15–27.
- Kormanek M. 2015. Relacja między mechanicznie zagęszczoną glebą a cechami biometrycznymi i jakością hodowlaną jednorocznych siewek sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. oraz buka zwyczajnego *Fagus sylvatica* L. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kollątaja w Krakowie* 530(407): 1–165.
- Kormanek M., Banach J. 2012. Wpływ nacisku jednostkowego wywieranego na glebę na jakość odnowienia wybranych gatunków drzew leśnych. *Acta Agrophysica* 19(1): 51–63.
- Kormanek M., Banach J., Sowa P. 2015a. Effect of soil bulk density on forest tree seedlings. *International Agrophysics* 29: 67–74. DOI 10.1515/intag-2015-0003.
- Kormanek M., Głab T., Banach J., Szewczyk G. 2015b. Effects of soil bulk density on pedunculate oak *Quercus petraea* Liebl. seedlings. *European Journal of Forest Research* 134: 969–979. DOI 10.1007/s10342-015-0902-2.
- Kozłowski T.T. 1999. Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14(6): 596–619. DOI 10.1080/02827589908540825.
- Lucas-Borja M.E., Heydari M., Miralles I., Zema D.A., Manso R. 2020. Effects of skidding operations after tree harvesting and soil scarification by felled trees on initial seedling emergence of Spanish black pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*). *Forests* 11(7): 767. DOI 10.3390/f11070767.
- Memisoglu T., Tilki F. 2014. Growth of Scots pine and silver birch seedlings on different nursery container media. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici* 42(2): 565–572. DOI 10.15835/nbha4229551.
- Mickovski S.B. 2018. The effect of environmental factors on the development of pine root systems, w: Kallel A., Ksibi M., Ben Dhia H., Khélifi N. (red.) Recent advances in environmental science from the eEuro-Mediterranean and surrounding regions. EMCEI 2017. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development). Springer, Cham. DOI 10.1007/978-3-319-70548-4_346.
- Olivo V.B., Buduba C.G. 2006. Influence of six substrates in *Pinus ponderosa* grown in containers under greenhouse conditions. *Bosque* 27(3): 267–271. DOI 10.4067/S0717-92002006000300007.
- Picchio R., Tavankar F., Nikooy M., Pignatti G., Venanzi R., Lo Monaco A. 2019. Morphology, growth and architecture response of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and maple tree (*Acer velutinum* Boiss.) seedlings to soil compaction stress caused by mechanized logging operations. *Forests* 10: 771. DOI 10.3390/f10090771.
- Skrzyszevska K., Banach J., Bownik G. 2019. Wpływ sposobu przedsięwzięcia przygotowania żołądki i terminu siewu na kiełkowanie nasion i wzrost sadzonek dębu szypułkowego. *Sylwan* 163(9): 716–725. DOI 10.26202/sylwan.2019043.
- Sohrabi H., Jourgholami M., Tavankar F., Venanzi R., Picchio R. 2019. Post-harvest evaluation of soil physical properties and natural regeneration growth in steep-slope terrains. *Forests* 10: 1034. DOI 10.3390/f10111034.
- Thompson B.E. 1985. Seedling morphological evaluation – what you can tell by looking, w: Duryea M.L. (red.). Proceedings: Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests. Workshop held October 16–18, 1984. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, 59–71.

- TIBCO Software Inc. 2017. Statistica (data analysis software system), version 13. <http://statistica.io>.
- Ulrich R., Neruda J., Valenta J., 2003. Wpływ układów jezdnych wybranych maszyn na glebę. *Inżynieria Rolnicza* 11(53): 229–235.
- von Wilpert K, Schäffer J. 2006. Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *European Journal of Forest Research* 125(2): 129–138. DOI 10.1007/s10342-005-0108-0.
- Wästerlund I. 1985. Compaction of till soils and growth tests with Norway spruce and Scots pine. *Forest Ecology and Management* 11(3): 171–189. DOI 10.1016/0378-1127(85)90025-8.

- Whalley W., Dumitru E., Dexter A.R. 1995. Biological effects of soil compaction. *Soil and Tillage Research* 35: 53–68. DOI 10.1016/0167-1987(95)00473-6.

Wkład autorów

J.B. – koncepcja badań, prace terenowe, obliczenia współczynników i analiza statystyczna, przygotowanie grafiki, przegląd literatury, napisanie pracy; M.K. – koncepcja badań, prace terenowe, przegląd literatury, napisanie pracy; J.J. – prace terenowe, napisanie pracy.