

DANIEL J. CHMURA, MARZENNA GUZICKA, ROMAN ROŻKOWSKI, DAMIAN MICHAŁOWICZ, WOJCIECH GRODZICKI, WŁADYSŁAW CHAŁUPKA

## Produktywność biomasy nadziemnej i podziemnej w doświadczeniu proveniencyjno-rodowym z dębem szypułkowym\*

Productivity of aboveground and belowground biomass in an experiment with provenances and half-sib families of pedunculate oak

### ABSTRACT

Chmura D. J., Guzicka M., Rożkowski R., Michałowicz D., Grodzicki W., Chałupka W. 2014. Produktywność biomasy nadziemnej i podziemnej w doświadczeniu proveniencyjno-rodowym z dębem szypułkowym. Sylwan 158 (11): 829-839.

The biomass productivity of individual trees at age 14 years was investigated in the experiment with 8 provenances and 186 half-sib families of pedunculate oak (*Quercus robur* L.). The aim of the study was to develop allometric equations and estimate heritability of tree biomass. We sampled 28 model trees and measured dry mass of their components, including roots (on 14 trees). A decreasing share of aboveground biomass was allocated to stems, and an increasing share to branches and foliage with increasing tree size. Also a decreasing share of total tree biomass was found in roots with increasing tree dimensions. Allometric equations involving diameter at breast height in combination with tree height were developed to model biomass of all components and whole tree. We used those equations to estimate tree biomass on the subset of research area, involving all provenances and 180 half-sib families. Heritability coefficients for tree biomass were the greatest for provenances (0.84), average for families (0.58) and the lowest for individual trees (0.18). However, estimates of family heritability varied by provenance (from 0.18 to 0.74). These findings suggest that the most efficient strategy for improvement of productivity in pedunculate oak would be selection of provenances and families within provenances.

### KEY WORDS

allometry, biomass allocation, heritability, *Quercus robur*

### ADDRESSES

Daniel J. Chmura <sup>(1)</sup> – e-mail: djchmura@man.poznan.pl

Marzenna Guzicka <sup>(1)</sup>, Roman Rożkowski <sup>(1)</sup>, Damian Michałowicz <sup>(1)</sup>, Wojciech Grodzicki <sup>(2)</sup>, Władysław Chałupka <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Instytut Dendrologii; Polska Akademia Nauk; ul. Parkowa 5; 62-035 Kórnik

<sup>(2)</sup> Wydział Leśny; Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu; ul. Wojska Polskiego 28; 60-637 Poznań

### Wstęp

Dla celów gospodarczych najczęściej wyznaczana jest miąższość drzew, jednak to akumulacja biomasy jest wyrazem rzeczywistej produktywności drzewostanów. Produkcja biomasy jest jednym z elementów alokacji węgla, obok tempa przepływu węgla między poszczególnymi komponentami oraz dystrybucji węgla, czyli udziału poszczególnych komponentów w produkcji pierwotnej brutto [Litton i in. 2007]. Poznanie akumulacji biomasy jest więc ważnym krokiem w badaniach alokacji węgla w ekosystemach leśnych.

\*Praca powstała dzięki finansowaniu przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych (grant nr OR/2717/3/11).

Ponieważ bezpośredni pomiar biomasy drzew jest destrukcyjny i bardzo pracochłonny, do modelowania biomasy w ekosystemach leśnych stosuje się różnorodne narzędzia. Jednym z nich są równania allometryczne, wykorzystujące statystyczny związek między masą a łatwo mierzalnymi cechami, takimi jak pierśnica i wysokość drzew. Mimo że empiryczne równania allometryczne nie opierają się na podstawowych procesach związanych z alokacją węgla [Franklin i in. 2012], są użyteczne do badania akumulacji biomasy i jej dystrybucji do organów roślinnych w określonych warunkach środowiskowych. Najczęściej wykorzystywane są do modelowania biomasy części nadziemnych, a rzadko w odniesieniu do biomasy korzeni [Zianis i in. 2005; Zasada i in. 2008], dlatego też badania akumulacji biomasy podziemnej mają szczególną wartość [Bijak i in. 2013].

Przy rosnącym udziale gatunków liściastych w składzie drzewostanów wzrasta również znaczenie dębów w gospodarce leśnej. Wewnątrzgatunkowa zmienność obu naszych gatunków dębów nie jest jeszcze dostatecznie poznana. Istniejące doświadczenia proveniencyjne i rodowe dostarczają informacji na temat genetycznych podstaw zróżnicowania badanych cech [Fober 1994; Giertych 2006]. Polskie powierzchnie doświadczalne z dębami są jednak jeszcze stosunkowo młode, a jednocześnie brakuje doświadczeń, które reprezentowałyby zmienność w obrębie całego krajowego zasięgu gatunków. Przeważają doświadczenia testujące niewiele proveniencji w pojedynczych lub nielicznych lokalizacjach [Fober 1998; Barzdajn 2000; Giertych 2006]. Obok obserwowanej zmienności populacyjnej, w wielu cechach zaznacza się również zmienność rodowa między potomstwem poszczególnych drzew [Barzdajn 2008; Banach 2011]. W planowaniu gospodarczym należy uwzględnić osiągnięcia hodowli selekcyjnej w celu poprawy produktywności i jakości przyszłych drzewostanów. Wyniki doświadczeń proveniencyjno-rodowych pomagają lepiej poznać skalę zmienności między- i wewnątrzpopulacyjnej w ramach gatunku oraz wykorzystać w toku selekcji najlepsze populacje i rody.

Celem pracy było opracowanie równań allometrycznych dla określenia akumulacji biomasy poszczególnych komponentów drzew w drzewostanie dębowym oraz oszacowanie odziedziczalności proveniencyjnej, rodowej i indywidualnej dla całkowitej biomasy drzew na badanej powierzchni doświadczalnej w Nadleśnictwie Choszczno.

## Materiał i metody

**POWIERZCHNIA BADAWCZA.** W niniejszej pracy wykorzystano dane uzyskane na jednej z pięciu powierzchni porównawczych doświadczenia proveniencyjno-rodowego dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) zlokalizowanej w Nadleśnictwie Choszczno. Powierzchnia doświadczalna została założona wiosną 2000 roku na terenie Leśnictwa Mogilica, na gruncie porolnym z glebami brunatnymi, miejscami płowymi, wytworzonymi z glin zwałowych, piasków i głązów plejstocenijskiej akumulacji lodowcowej. Dwuletnie sadzonki wyhodowano w szkółce Rębisz Nadleśnictwa Bierzwnik i posadzono w regularnej więźbie 1,5×1,5 m.

Sadzonki pochodziły ze 186 rodów z wolnego zapylenia, z 8 wyłączonych drzewostanów nasiennych (proveniencji). Powierzchnię w Mogilicy założono w układzie 12 bloków, w których rody były rozmieszczone losowo w układzie poletek jednodrzewowych. Do szczegółowej analizy użyto danych z ośmiu bloków, w których wykonano pomiar pierśnicy i wysokości drzew. Na analizowanej części powierzchni doświadczalnej reprezentowanych było 180 rodów – od 19 do 25 rodów w ośmiu proveniencjach. Średnia przeżywalność dla tej części wynosiła 88% i wahała się między proveniencjami od 84 do 91%.

**ANALIZA AKUMULACJI BIOMASY.** W 2012 roku (drzewa osiągnęły wiek 14 lat) zmierzono pierśnicę wszystkich żyjących 7745 drzew. Wysokość drzew zmierzono w pierwszych ośmiu blokach doświadczenia na 5083 drzewach ze 180 rodów. Drzewa pogrupowano w 23 klasy grubości, każda

o zakresie 6 mm, a następnie wybrano 28 drzew próbnych reprezentatywnych dla rozkładu pierśnic w drzewostanie. W sześciu najliczniejszych klasach grubości wybrano po dwa drzewa próbne, natomiast pominięto ostatnią klasę grubości, w której odnotowano tylko jedno drzewo. Każda z ośmiu badanych populacji była reprezentowana przez co najmniej dwa drzewa próbne.

Wszystkie drzewa próbne zostały ścięte, a ich część nadziemna została podzielona na komponenty: pień, gałęzie żywe, gałęzie martwe, liście oraz żołądzie. Świeża masa gałęzi żywych i martwych oraz liści została określona w terenie z dokładnością do 0,01 kg. Z każdej frakcji pobrano próbę stanowiącą około 10% świeżej masy, natomiast żołądzie zebrano w całości. Pnie podzielono na sekcje o długości 1 m i zważono ich świeżą masę z dokładnością do 0,01 kg. Ze środka każdej sekcji wycięto fragment o długości około 10 cm, którego średnicę zmierzono w dwóch prostopadłych kierunkach, a świeżą masę zważono z dokładnością do 1 g.

Do analizy części podziemnej wybrano połowę drzew próbnych (14 sztuk) reprezentujących rozkład klas grubości. W przypadku tych drzew zebrano karpę oraz wszystkie korzenie z wykopu o powierzchni 1,5×1,5 m i o głębokości 0,8 m, poniżej której nie obserwowano już korzeni. Świeża masa karpki została określona w terenie z dokładnością do 0,01 kg, a pozostałych korzeni do 1 g, po czym całość części podziemnej została przetransportowana do laboratorium wraz z próbami części nadziemnej.

Próby biomasy pobrane w terenie zostały wysuszone w temperaturze 65°C do osiągnięcia stałej masy i zważone z dokładnością do 0,1 g. Suchą masę poszczególnych komponentów określono indywidualnie dla każdego drzewa, mnożąc świeżą masę danego komponentu przez stosunek suchej do świeżej masy próby. Suchą masę gałęzi żywych i martwych zsumowano jako biomasę gałęzi. Dla drzew modelowych wyliczono procentowy udział poszczególnych komponentów w biomacie nadziemnej, a dla drzew, z których pobrano korzenie, określono udział ich biomasy w całkowitej biomacie drzewa. Ponieważ żołądzie występowały tylko na ośmiu z 28 drzew modelowych, a ich udział w biomacie części nadziemnej nie przekroczył 0,14%, komponent ten został wyłączony z analiz.

Na podstawie danych z drzew modelowych opracowano równania allometryczne. Siedem z 28 drzew modelowych zostało wybranych losowo do weryfikacji równań allometrycznych. Pomiarzy z tych drzew nie były użyte do tworzenia modeli.

Przed opracowaniem równań dane zostały przekształcone logarytmicznie (logarytm naturalny). Do tak przekształconych danych pomiarowych dopasowano następujące modele liniowe:

$$\ln Y = a + b \cdot \ln D \quad [1]$$

$$\ln Y = a + b \cdot \ln D + c \cdot \ln H \quad [2]$$

$$\ln Y = a + b \cdot \ln D + c \cdot \ln H + d \cdot (\ln D \cdot \ln H) \quad [3]$$

gdzie:

$Y$  – biomasa wybranego komponentu,

$D$  – pierśnica [cm],

$H$  – wysokość [m],

$\ln$  – logarytm naturalny,

$a, b, c, d$  – dopasowane parametry modelu.

Do modeli nr 2 i 3 zastosowano regresję krokową z najniższą wartością kryterium informacyjnego Akaikego (AIC) jako kryterium selekcyjnym.

Dodatkowo do danych nieprzekształconych dopasowano model liniowy w postaci:

$$Y = a + b \cdot D^2 \cdot H \quad [4]$$

Zgodność dopasowania każdego z modeli oceniano przez porównanie wartości współczynnika determinacji ( $R^2$ ), średniego błędu kwadratowego (RMSE), kryterium informacyjnego Akaikego (najniższa wartość AIC) oraz poprzez analizę rozkładu reszt (odchyleń od regresji). Weryfikację (walidację) poszczególnych modeli dla każdego komponentu biomasy przeprowadzono, porównując wartości średniego błędu kwadratowego (RMSE) dla zestawu drzew weryfikujących, co jest miarą wielkości odchyleń wartości obserwowanych od modelowanych.

Uzyskane równania allometryczne o najlepszym dopasowaniu do danych pomiarowych zostały użyte do modelowania biomasy poszczególnych komponentów dla pozostałych drzew, u których zmierzono pierśnicę i wysokość. Przekształcenie oszacowanej biomasy z postaci logarytmicznej do nielogarytmicznej wymagało zastosowania poprawki [Baskerville 1972; Sprugel 1983]. Ponieważ doświadczenie założono w układzie poletek jednodrzewowych, produktywność w przeliczeniu na hektar dla każdej proveniencji uzyskano z sumarycznej biomasy dla drzew danej proveniencji i sumy powierzchni stoisk zajmowanych przez drzewa tej proveniencji, wliczając stoiska drzew martwych.

ANALIZA ODZIEDZICZALNOŚCI. Dzięki losowemu rozmieszczeniu rodów można ten układ traktować jako układ kompletnej randomizacji, przy czym rody są zagnieżdżone w proveniencjach (układ hierarchiczny) o następującym modelu analizy wariancji:

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + R_{j(i)} + e_{k(ij)} \quad [5]$$

gdzie:

- $Y_{ijk}$  – indywidualna obserwacja (drzewo),
- $\mu$  – średnia ogólna,
- $P_i$  – efekt proveniencji  $i$ ,
- $R_{j(i)}$  – efekt rodu  $j$  zagnieżdżonego w proveniencji  $i$ ,
- $e_{k(ij)}$  – efekt drzewa  $k$  w rodzie  $j$  w proveniencji  $i$ .

Model ten zastosowano do analizy wariancji pierśnicy, wysokości i biomasy drzew, natomiast średnie proveniencyjne pogrupowano za pomocą testu Tukeya-Kramera.

Ponieważ zarówno proveniencje, jak i rody są traktowane losowo, możliwe jest obliczenie komponentów wariancji oraz odziedziczalności proveniencyjnej ( $h_p^2$ ), rodowej ( $h_R^2$ ) i indywidualnej ( $h_e^2$ ) [Barzdajn 2008]. Komponenty wariancji oraz ich współczynniki, które są zależne od liczby drzew w rodach i rodów w proveniencjach, wyliczone zostały metodą spodziewanych średnich kwadratów (EMS) w pakiecie statystycznym JMP 9.0.0 (SAS Institute, Inc. Cary). Oddzielną analizę przeprowadzono również dla rodów w każdej proveniencji i na tej podstawie obliczono współczynniki odziedziczalności rodowej wewnątrz proveniencji. Współczynniki odziedziczalności obliczono dla pierśnicy, wysokości i całkowitej biomasy indywidualnych drzew. Dane dla biomasy analizowano w postaci logarytmicznej, ponieważ po przekształceniu rozkład tej cechy odbiegał od rozkładu normalnego.

## Wyniki

Sucha biomasa części nadziemnej drzew modelowych wynosiła średnio 18 kg i wahała się od 0,12 do 73,35 kg. Większość biomasy nadziemnej stanowiła masa pnia (od 46 do 78%), następnie masa gałęzi (od 15 do 44%) i masa liści (od 4 do 11%). Wraz ze zwiększaniem rozmiarów drzew malał udział biomasy pnia w biomase nadziemnej (współczynniki korelacji  $r=-0,53$  i  $-0,46$ , odpowiednio dla pierśnicy i wysokości,  $P \leq 0,0129$ ), a rósł udział biomasy gałęzi ( $r=0,49$  dla D i  $0,41$  dla H,  $P \leq 0,0297$ ) oraz biomasy liści ( $r=0,40$  dla D i  $0,43$  dla H,  $P=0,0342$ ). U drzew,

z których pobrano część podziemną, korzenie stanowiły od 10 do 46% całkowitej biomasy drzewa, przy czym udział ten malał ze wzrostem rozmiarów drzew ( $r=-0,81$  dla D i  $-0,77$  dla H,  $P\leq 0,0011$ ). Dane dotyczące biomasy drzew modelowych dostępne są u autorów.

Wśród testowanych modeli allometrycznych najlepszym dopasowaniem charakteryzował się model nr 3, w którym zmiennymi niezależnymi są pierśnica oraz kombinacja pierśnicy i wysokości (tab. 1). Wysokość drzew jako zmienna niezależna została włączona do modelu tylko dla biomasy gałęzi. Dla wszystkich komponentów biomasy dopasowanie z użyciem tego modelu było bardzo dobre (tab. 1, ryc.). Równania dla biomasy gałęzi i części podziemnej w modelu nr 3 wykazały nieco słabsze dopasowanie w porównaniu z równaniami dla innych komponentów biomasy, jednak wciąż były lepsze od tych z użyciem modelu nr 1 lub 4. Przy użyciu tego ostatniego modelu uzyskano najslabsze dopasowanie (tab. 1). Z dwóch zmiennych niezależnych użytych w modelu nr 2 wysokość drzew nie weszła do równania dla żadnego komponentu biomasy, redukując to równanie do postaci równania nr 1 (w tab. 1 pominięto więc model nr 2).

Dopasowanie oraz weryfikację modelu nr 3 dla poszczególnych komponentów biomasy przedstawiono na rycinie. Model ten charakteryzował się najmniejszym błędem, dlatego został użyty do wyliczenia biomasy pozostałych drzew pomierzonych na powierzchni.

Wykazano istotne różnice między badanymi proveniencjami oraz rodami w proveniencjach pod względem wysokości i pierśnicy ( $P=0,0001$ , tab. 2). Średnia wysokość i pierśnica najlepszej populacji (Krotoszyn Borowina) były o odpowiednio 9 i 16% wyższe niż w populacji rosnącej najslabiej (Płock Brwilno; tab. 2).

Na dębowej powierzchni doświadczalnej w wieku 14 lat wyliczona średnia sucha biomasa całkowita (nadziemna i podziemna) wynosiła 53 t/ha. Największą produktywnością biomasy charakteryzowała się populacja Krotoszyn Borowina, a istotnie mniejszą od niej populacje Płock Brwilno, Durowo Dębina i Chojnów (tab. 2). Ponieważ równania były dopasowywane oddzielnie dla poszczególnych komponentów biomasy, wyniki nie są addytywne. Oznacza to, że nie można bezpośrednio sumować biomasy poszczególnych komponentów wyliczonej z równań allometrycznych dla uzyskania masy sumarycznej, a sumaryczną biomasę uzyskuje się, stosując oddzielne równanie. Dla poszczególnych komponentów produktywność biomasy na 1 ha w populacji najbardziej produktywnej była większa w granicach od 43 do 57% od populacji najslabszej.

Najwyższą wartość współczynnika odziedziczalności uzyskano dla proveniencji, a najniższą dla indywidualnych drzew, przy czym wartości współczynników dla trzech badanych cech były bardzo zbliżone (tab. 3). Wartości komponentu wariancji rodowej różniły się znacznie między poszczególnymi populacjami, a wartość współczynnika odziedziczalności rodowej dla biomasy drzewa wahała się od 0,18 do 0,74 (tab. 3). Dla proveniencji Krotoszyn Jelonek różnice między rodami nie były istotne statystycznie ( $P=0,2990$ ).

## Dyskusja

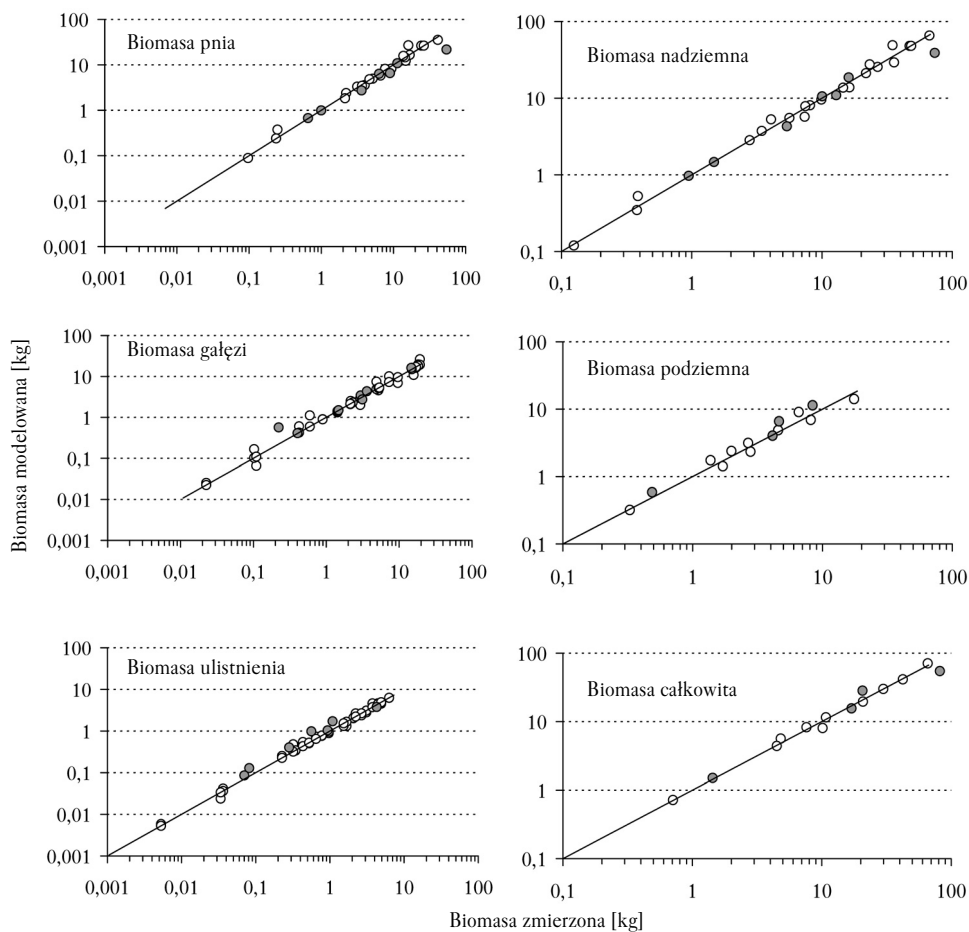
W niniejszym opracowaniu wykorzystano pierśnicę i wysokość drzew jako zmienne niezależne do modelowania biomasy. Okazało się jednak, że dla wszystkich komponentów, poza biomasą gałęzi, wysokość została włączona do modelu tylko w połączeniu z pierśnicą. W wielu przypadkach równania allometryczne służące do oceny biomasy oparte są jedynie na średnicy drzew bez udziału wysokości [Ter-Mikaelian, Korzukhin 1997; Jenkins i in. 2004; Zianis i in. 2005]. W niniejszym doświadczeniu różnice w dopasowaniu do danych pomiarowych między modelem opartym wyłącznie na pierśnicy drzew a modelem łączącym pierśnicę z wysokością wskazują jednak, że obie cechy powinny być włączone do równań allometrycznych w drzewostanach dębowych.

Tabela 1.

Wartości parametrów (i ich błędów standardowych – s.e.) równań allometrycznych dla poszczególnych komponentów biomasy oraz miary dopasowania modelu i wartość średniego błędu kwadratowego dla zestawu weryfikującego (RMSEwer.)  
 Parameters (and their standard errors – s.e.) of allometric equations for individual biomass components, the goodness-of-fit statistics for the equations and values of the RMSE for the validation set (RMSEwer.)

Komponent	a	s.e.	b	s.e.	c	s.e.	d	s.e.	R <sup>2</sup>	RMSE	AIC	RMSEwer.
Model 1: $\ln Y = a + b \ln D$												
Pień w korze	-1,2390	0,16	1,6739	0,09					0,95	0,3588	21,85	0,5182
Gałęzie	-2,4379	0,24	1,9339	0,12					0,93	0,5238	37,75	0,3714
Liście	-3,5719	0,15	1,9185	0,08					0,97	0,9683	17,93	0,5724
Biomasa nadziemna	-0,8946	0,17	1,7658	0,09					0,95	0,3729	23,48	0,4493
Biomasa podziemna	-1,4288	0,27	1,4865	0,15					0,92	0,3228	13,54	0,2209
Biomasa całkowita	-0,6864	0,21	1,8183	0,12					0,97	0,2504	8,46	0,3003
Model 3: $\ln Y = a + b \ln D + c \ln H + d(\ln D \times \ln H)$												
Pień w korze	-1,4441	0,09	0,6098	0,15	-	-	0,6052	0,08	0,99	0,1846	-4,11	0,3190
Gałęzie	-0,2700	1,09	1,8412	0,61	-2,5820	1,14	0,7387	0,15	0,97	0,3251	21,97	0,3083
Liście	-3,7544	0,09	0,9717	0,15	-	-	0,5385	0,08	0,99	0,1791	-5,36	0,2841
Biomasa nadziemna	-1,1173	0,08	0,6101	0,13	-	-	0,6573	0,07	0,99	0,1633	-9,24	0,2442
Biomasa podziemna	-1,1638	0,16	-	-	-	-	0,7203	0,05	0,97	0,2115	5,08	0,1508
Biomasa całkowita	-0,3351	0,08	-	-	-	-	0,8724	0,02	0,99	0,1113	-7,76	0,1807
Model 4: $Y = a + b D^2 H$												
Pień w korze	0,4035	0,90	0,0207	0,0013					0,93	2,9107	109,78	12,3338
Gałęzie	-0,1896	0,55	0,0134	0,0008					0,93	1,7726	88,95	1,1347
Liście	-0,0133	0,08	0,0037	0,0001					0,98	0,2724	10,29	0,3575
Biomasa nadziemna	0,2006	1,09	0,0378	0,0016					0,97	3,5158	117,71	12,8966
Biomasa podziemna	0,1876	0,68	0,0127	0,0013					0,92	1,5217	44,54	1,9797
Biomasa całkowita	0,3428	0,43	0,0539	0,0008					1,00	0,9729	35,60	9,9157

liczebność: biomasa nadziemna – 21, biomasa podziemna i biomasa całkowita – 10, zbiór weryfikacyjny – 7 drzew  
 number of trees: aboveground biomass – 21, belowground and total biomass – 10, verification set – 7



**Ryc.**

Biomasa poszczególnych komponentów wyliczona według modelu nr 3 a biomasa zmierzona dla zestawu drzew modelowych

Regression of biomass of all components predicted with the model no 3 on the measured biomass of sample trees

Białe punkty N=21 oprócz biomasy korzeni i całkowitej, gdzie N=10. Wartości dla zestawu drzew weryfikujących oznaczone są szarymi punktami – nie były one użyte do budowy modelu. Linie wskazują dopasowanie 1:1. Dane przedstawione są w skali logarytmicznej.

White points N=21, except for belowground and total biomass where N=10. Values for validation sample are shown as gray points – these were not used for fitting model. Lines show 1:1 fit. Note the logarithmic scale of the axes.

Na badanej powierzchni doświadczalnej pozyskano i zmierzono całkowitą biomasę drzew modelowych, łącznie z częścią podziemną. Większość prac dotyczących biomasy drzew skupia się na organach nadziemnych bez uwzględnienia korzeni [Zianis i in. 2005; Orzeł i in. 2006] lub wykorzystuje dostępne modele allometryczne do szacowania biomasy korzeni [Bijak, Zasada 2007]. Wynika to głównie z pracochłonności i trudności pomiarów biomasy systemów korzeniowych drzew. Biorąc pod uwagę produktywność całego drzewostanu, szczególnie w odniesieniu do akumulacji węgla, nie można jednak pomijać komponentów podziemnych.

Obok oszacowania całkowitej biomasy drzew w opisanym doświadczeniu możliwa była analiza dystrybucji (alokacji) biomasy. Zaobserwowano zmniejszający się udział pnia, a wzrastający udział gałęzi i liści w biomacie nadziemnej wraz ze zwiększaniem się rozmiarów drzew.

Tabela 2.

Średnia wysokość i pierśnica oraz biomasa poszczególnych komponentów i biomasa całkowita [t/ha] dla proveniencji dębu szypułkowego rosnących na powierzchni doświadczalnej w Nadleśnictwie Choszczno  
 Mean tree height, breast height diameter, components (stem in bark, branches, leaves, aboveground and belowground biomass) and total biomass [t/ha] for oak provenances examined at the research site in Choszczno

Proweniencja	H [m]	D [cm]	Pień w korze	Gałęzie	Liście	Biomasa nadziemna	Biomasa podziemna	Biomasa całkowita
Chojnów	6,07 <sup>b</sup>	5,20 <sup>bc</sup>	18,88	7,20	2,87	31,39	12,41	47,76
Durowo Dębina	6,08 <sup>b</sup>	5,21 <sup>bc</sup>	18,81	7,15	2,86	31,27	12,40	47,52
Krotoszyn Borowina	6,58 <sup>a</sup>	5,90 <sup>a</sup>	25,49	9,89	3,94	42,99	16,34	65,56
Krotoszyn Jelonek	6,33 <sup>ab</sup>	5,81 <sup>a</sup>	22,30	9,11	3,45	37,51	14,23	56,56
Piaski Dobra Pomoc	6,34 <sup>ab</sup>	5,55 <sup>ab</sup>	22,33	8,69	3,43	37,43	14,48	56,79
Piaski Siedlec	6,23 <sup>b</sup>	5,43 <sup>abc</sup>	21,24	8,28	3,25	35,51	13,80	53,92
Płock Brwilno	6,00 <sup>b</sup>	4,97 <sup>c</sup>	17,09	6,28	2,57	28,16	11,39	42,79
Syców Wioska	6,26 <sup>ab</sup>	5,47 <sup>abc</sup>	21,36	8,19	3,25	35,65	13,72	54,12
Średnia	6,24	5,45	20,94	8,10	3,20	34,99	13,60	53,13

ta sama litera oznacza brak istotnych różnic przy  $\alpha=0,05$ ;

the same letter indicates lack of significant differences at the  $\alpha=0.05$  level

Tabela 3.

Komponenty wariancji i współczynniki odziedziczalności proveniencyjnej, rodowej i indywidualnej dla pierśnicy, wysokości i biomasy całkowitej dębów w Nadleśnictwie Choszczno oraz komponenty wariancji i współczynniki odziedziczalności rodowej dla biomasy drzew w poszczególnych proveniencjach

Variance components and heritability for provenances, families and individual trees for tree diameter, height and total biomass for oak at the experimental area in Choszczno as well as variance components and family heritability estimates for total tree biomass within analysed provenances

	$\sigma^2_P$	$\sigma^2_R$	$\sigma^2_e$	$h^2_P$	$h^2_R$	$h^2_e$
Pierśnica	7,6061	16,5476	335,8680	0,8570	0,5817	0,1839
Wysokość	0,0254	0,0827	1,5560	0,8053	0,5999	0,1987
Biomasa całkowita	0,0141	0,0336	0,6892	0,8437	0,5794	0,1826
Chojnów		0,0518	0,7017		0,6740	
Durowo Dębina		0,0274	0,7445		0,5063	
Krotoszyn Borowina		0,0566	0,5768		0,7408	
Krotoszyn Jelonek		0,0056	0,6819		0,1821	
Piaski Dobra Pomoc		0,0193	0,6663		0,4579	
Piaski Siedlec		0,0208	0,7426		0,4446	
Płock Brwilno		0,0200	0,6764		0,4532	
Syców Wioska		0,0618	0,7239		0,7048	

Zjawisko to można prawdopodobnie przypisać różnicującej się pozycji biosocjalnej drzew w zwierającym się drzewostanie, ponieważ drzewa o mniejszych rozmiarach są przeważnie drzewami opanowanymi, których korona uwstecznia się. Podobne zależności obserwowano w drzewostanach sosnowych, zarówno młodszych, jak i starszych klas wieku [Nilsson, Albrektson 1993; Naidu i in. 1998; Chmura i in. 2013; Ochał i in. 2013]. W naszych badaniach zaobserwowaliśmy również zmniejszający się udział korzeni w całkowitej biomacie wraz ze wzrostem rozmiarów drzew modelowych, co zgadza się z trendem podawanym w literaturze dla drzewiastych roślin okrytonasiennych [Poorter i in. 2012; Bijak i in. 2013].

W badanym zestawie populacji i rodów dębu szypułkowego wykazano istotne różnice pod względem cech przyrostowych. Ranking populacji pod względem produktywności biomasy na hektar był zgodny ze zmiennością pierśnicy i wysokości, co wynika z zastosowania tych dwóch



cech w modelu allometrycznym. Nie ma tu jednak bezpośredniego przełożenia, ponieważ produktywność jest również funkcją liczby drzew. Poprzez powiązanie z przeżywalnością, produktywność lepiej niż sama pierśnica i wysokość odzwierciedla zdolność adaptacyjną badanych obiektów.

Wartości współczynników odziedziczalności uzyskane dla wysokości i pierśnicy na badanej powierzchni były wyższe od podawanych przez Barzdajna [2008] i Banacha [2011], chociaż schemat zmienności był podobny: najwyższe wartości miała odziedziczalność proveniencyjna, średnie – rodowa, a najmniejsze indywidualna. W zestawie trzech proveniencji dębu szypułkowego Fober [1999] wykazał natomiast wyższą odziedziczalność rodową niż proveniencyjną. Wartości współczynników odziedziczalności zależą zarówno od zmienności badanego zestawu obiektów, jak i zmienności środowiskowej. Wyniki niniejszego doświadczenia, podobnie jak wyniki innych badań, wskazują na istotny element zmienności zarówno pochodzeniowej, jak i rodowej.

Ponieważ zestaw proveniencji dębu w naszym doświadczeniu jest ograniczony, niemożliwe jest określenie geograficznych trendów zmienności badanych cech. Na podstawie danych przyrostowych z większego zestawu populacji w podobnym wieku Barzdajn [2009] podaje, że populacje dębu szypułkowego z Polski południowo-zachodniej rosną najlepiej, chociaż na ten wynik mogło mieć wpływ nierównomierne rozmieszczenie populacji matecznych. W naszym doświadczeniu najbardziej produktywne były dęby z Krotoszyna, a najmniej z Polski centralnej (Płock, Chojnów), co wpisuje się w powyższy trend. Słabą produktywność miała jednak również inna proveniencja z Wielkopolski (Durowo). Ponadto zaznacza się zmienność rodów, a skala tej zmienności zależna jest od proveniencji. Okazuje się, że na niewielkim obszarze można znaleźć populacje o dużej (Krotoszyn Borowina), jak i małej (Krotoszyn Jelonek) zmienności rodowej. Wyniki te wskazują na możliwość poprawy produktywności poprzez dobór odpowiednich proveniencji i rodów w proveniencjach, chociaż efektywność selekcji rodowej będzie różna w zależności od populacji.

## Wnioski

- ✦ W 14-letnim doświadczeniu proveniencyjno-rodowym dębu szypułkowego wykazano istotną zmienność cech przyrostowych i całkowitej biomasy drzew, łącznie z biomasą korzeni.
- ✦ Równania allometryczne do modelowania biomasy młodych drzewostanów dębowych powinny być oparte nie tylko na pierśnicy, ale również na wysokości drzew.
- ✦ Wraz ze zwiększaniem rozmiarów drzew malał w biomasie nadziemnej udział pnia, a rósł udział gałęzi i liści oraz malał udział korzeni w całkowitej biomasie drzewa.
- ✦ Dla biomasy drzew wartość współczynnika odziedziczalności była wysoka dla proveniencji, średnia dla rodów oraz niska dla indywidualnych drzew. Wielkość współczynnika odziedziczalności rodowej różniła się w zależności od populacji, co wskazuje na możliwość poprawy produktywności przez dobór odpowiednich proveniencji oraz rodów w proveniencjach.

## Literatura

- Banach J. 2011. Przeżywalność i wysokość dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) testowanego na powierzchni doświadczalnej „Chrostowa I” w Nadleśnictwie Brzesko. *Leśne Prace Badawcze* 72 (1): 5-15.
- Barzdajn W. 2000. Proveniencyjne doświadczenie z dębami (*Quercus robur* L. i *Q. petraea* [Matt.] Liebl.) z 1993 roku w nadleśnictwach Milicz i Oborniki Śląskie. *Sylwan* 144 (12): 57-67.
- Barzdajn W. 2008. Porównanie odziedziczalności proveniencyjnej, rodowej i indywidualnej cech wzrostowych dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) w doświadczeniu rodowo-proveniencyjnym w Nadleśnictwie Milicz. *Sylwan* 152 (5): 52-59.
- Barzdajn W. 2009. Wzrost dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) i dębu bezszypułkowego (*Q. petraea* [Matt.] Liebl.) w doświadczeniu proveniencyjnym z 1994 r. w Nadleśnictwie Milicz. *Leśne Prace Badawcze* 70 (3): 241-252.

- Baskerville G. L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 2 (1): 49-53.
- Bijak S., Zasada M. 2007. Oszacowanie biomasy korzeni w drzewostanach sosnowych Borów Lubuskich. *Sylwan* 151 (12): 21-29.
- Bijak S., Zasada M., Bronisz A., Bronisz K., Czajkowski M., Ludwisiak L., Tomusiak R., Wojtan R. 2013. Estimating coarse roots biomass in young silver birch stands on post-agricultural lands in central Poland. *Silva Fennica* 47 (2): article id 963.
- Chmura D. J., Guzicka M., Rożkowski R., Chałupka W. 2013. Variation in aboveground and belowground biomass in progeny of selected stands of *Pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28 (8): 724-734.
- Fober H. 1994. Przegląd doświadczeń proveniencyjnych dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) i bezszypułkowego (*Q. petraea* Liebl.). *Sylwan* 138 (1): 89-97.
- Fober H. 1998. Provenance experiment with pedunculate (*Quercus robur* L.) and sessile (*Q. petraea* [Matt.] Liebl.) oaks established in 1968. *Arboretum Kórnickie* 43: 67-78.
- Fober H. 1999. Wewnątrzgatunkowa zmienność dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) w doświadczeniu proveniencyjno-rodowym. *Arboretum Kórnickie* 44: 59-72.
- Franklin O., Johansson J., Dewar R. C., Dieckmann U., McMurtrie R. E., Brännström Å., Dybzinski R. 2012. Modeling carbon allocation in trees: a search for principles. *Tree Physiology* 32 (6): 648-666.
- Giertych M. 2006. Genetyka populacyjna. W: S. Bugała [red.]. *Dęby*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań – Kórnik. 591-639.
- Jenkins J. C., Chojnacki D. C., Heath L. S., Birdsey R. A. 2004. Comprehensive database of diameter-based biomass regressions for North American tree species. USDA Forest Service Northeastern Research Station.
- Litton C. M., Raich J. W., Ryan M. G. 2007. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology* 13 (10): 2089-2109.
- Naidu S. L., DeLucia E. H., Thomas R. B. 1998. Contrasting patterns of biomass allocation in dominant and suppressed loblolly pine. *Canadian Journal of Forest Research* 28 (8): 1116-1124.
- Nilsson U., Albrektson A. 1993. Productivity of needles and allocation of growth in young Scots pine trees of different competitive status. *Forest Ecology and Management* 62 (1-4): 173-187.
- Ochał W., Grabczyński S., Orzeł S., Wertz B., Socha J. 2013. Alokacja nadziemnej biomasy u sosen zajmujących różne pozycje biosocjalne w drzewostanie. *Sylwan* 157 (10): 737-746.
- Orzeł S., Ochał W., Forgiel M., Socha J. 2006. Biomasa i roczna produkcja drzewostanów dębowych Puszczy Niepołomickiej. *Sylwan* 157 (5): 30-43.
- Poorter H., Niklas K. J., Reich P. B., Oleksyn J., Poot P., Mommer L. 2012. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist* 193 (1): 30-50.
- Sprugel D. G. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology* 64 (1): 209-210.
- Ter-Mikaelian M. T., Korzukhin M. D. 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97 (1): 1-24.
- Zasada M., Bronisz K., Bijak S., Wojtan R., Tomusiak R., Dudek A., Michalak K., Wróblewski L. 2008. Wzory empiryczne do określania suchej biomasy nadziemnej części drzew i ich komponentów. *Sylwan* 152 (3): 27-39.
- Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silvae Fennica Monographs* 4.

## SUMMARY

### Productivity of aboveground and belowground biomass in an experiment with provenances and half-sib families of pedunculate oak

In the experiment with 8 provenances and 186 half-sib families of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) we investigated biomass productivity of individual trees at age 14 years. The aim of the study was to develop allometric equations for predicting biomass, and estimate heritability of tree biomass.

We sampled 28 model trees representing diameter distribution in the stand and measured dry mass of their components. Belowground biomass was sampled from 14 trees. Most of the aboveground biomass in model trees was allocated to stems (46 to 78%), then to branches (15 to 44%) and foliage (4 to 11%). The relative allocation of aboveground biomass to stems decreased

and to branches and foliage increased with increasing tree size. Also a decreasing share of total tree biomass resided in roots with increasing tree dimensions. We tested four types of equations to predict biomass of tree components. In the model no. 2 with diameter and tree height as independent variables, the height did not enter the equation for any biomass component, thus this model was not shown in the table 1. For all components the best fit was obtained with equations involving diameter at breast height in combination with tree height (Model 3, tab. 1). Those equations were used to estimate tree biomass on the subset of research area, involving all provenances and 180 half-sib families (remaining 5062 trees).

We found significant variation among provenances and among families within provenances in tree diameter, height and individual tree biomass. Heritability estimates for those traits were high for provenances (0.81-0.86), average for families (0.58-0.60) and the lowest for individual trees (0.18-0.20). Estimates of family heritability for biomass varied by provenance from 0.18 to 0.74 (tab. 3). Average productivity per hectare was 53 t/ha, and varied significantly among examined provenances. These findings highlight the possibility of improvement of productivity in pedunculate oak. The most efficient strategy would be to select provenances and families within provenances.