

WOJCIECH OCHAŁ, JAROSŁAW SOCHA, STANISŁAW GRABCZYŃSKI

## Dokładność wzorów empirycznych służących do określania biomasy nadziemnych komponentów drzew olszy czarnej (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.)\*

Accuracy of empirical formulas for determining aboveground biomass of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.)

### ABSTRACT

Ochał W., Socha J., Grabczyński S. 2014. Dokładność wzorów empirycznych służących do określania biomasy nadziemnych komponentów drzew olszy czarnej (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). Sylwan 158 (6): 431-442.

The study investigated the accuracy of thirty equations formulated in England, Sweden, Turkey, Lithuania and Spain and which aim to determine the aboveground biomass of black alder. The reference constituted of bark, timber, stem, branches and leaves dry biomass of 168 sample trees aged 6-96 from 56 alder stands located in the western part of Kotlina Sandomierska (south-eastern Poland). The analysed formulas, considering local conditions, resulted in biased biomass calculations. The evaluation of such components as leaves, branches, trunk timber or trunk bark is subject to systematic errors larger than a dozen or so per cent, and in certain ranges of breast height diameters - up to even a couple of dozens or a few hundred per cent. Only three out of 30 formulas may be considered useful for estimating aboveground biomass of black alder in Poland.

### KEY WORDS

black alder, aboveground biomass, accuracy assessment, empirical formulas, Poland

### ADDRESSES

Wojciech Ochał – e-mail: rlochal@cyf-kr.edu.pl

Jarosław Socha – e-mail: rsocha@cyf-kr.edu.pl

Stanisław Grabczyński – e-mail: rlgrabcz@cyf-kr.edu.pl

Katedra Biometrii i Produkcji Lasu; Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie; al. 29-Listopada 46; 31-425 Kraków

### Wstęp

Od lat 60. ubiegłego wieku obserwuje się intensywny rozwój badań dotyczących sposobów szacowania wielkości i struktury biomasy ekosystemów leśnych. Zainteresowanie biomasą lasu wiązało się w tamtym okresie z rozpoczynającym się kryzysem paliwowym, a możliwość jego ograniczenia upatrywano w wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii, w tym również zasobów biomasy leśnej [Parde 1980]. Uruchomiony pod auspicjami UNESCO Międzynarodowy Program Biologiczny był potwierdzeniem tych oczekiwań i przyczynił się do powstania i rozwoju w latach 70. i 80. XX wieku wiodących ośrodków naukowych w USA, Japonii i Danii specjalizujących się w badaniach biomasy obszarów leśnych [Parde 1980].

Kolejnym impulsem stymulującym rozwój badań nad biomasą było dostrzeżenie roli ekosystemów leśnych w kształtowaniu klimatu poprzez ich oddziaływanie na ilość i tempo

\* Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy N N309 160638.

zmian stężenia dwutlenku węgla w atmosferze. Wiele państw, w tym również Polska, podpisując ustalenia Ramowej Konwencji o Zmianach Klimatycznych i „Protokół Kyoto”, zobowiązało się do oceny bilansu tego gazu [Protokół... 2005]. Obecnie sporządzanie bilansów ma nie tylko charakter monitoringowy, ale coraz częściej ekonomiczny, gdyż wiele państw uczestniczy w tzw. handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych [Directive... 2003]. W związku z tym wymagania w odniesieniu do dokładności zestawianych bilansów ciągle rosną i przekładają się na wymierne korzyści.

Podstawowym narzędziem oceny wielkości emitowanego i pochłanianego dwutlenku węgla przez ekosystemy leśne jest monitoring zmian zasobów biomasy oparty na okresowych inwentaryzacjach, w których sucha biomasa drzew szacowana jest za pomocą równań empirycznych na podstawie prostych w pomiarze cech drzew, takich jak pierśnica i wysokość [Parresol 1999].

W literaturze przedstawiono dotychczas wiele konstrukcji wzorów i opracowano szereg równań dla podstawowych gatunków lasotwórczych [Johansson 1999, 2000; Socha, Wężyk 2004, 2007; Zasada i in. 2008]. Duża część wyników takich prac została zgromadzona i przedstawiona w syntetycznych opracowaniach mających charakter baz danych. Dla obszarów Ameryki Północnej bazę równań zestawili Ter-Mikaelian i Korzukhin [1997] oraz Jenkins i in. [2004], dla ekosystemów Australii podobne opracowanie opublikowali Eamus i in. [2000] oraz Snowden i in. [2000]. Obszerne zestawienie funkcji dla biomasy i miąższości europejskich gatunków drzew przedstawili Zianis i in. [2005]. Zawiera ono 607 równań empirycznych przeznaczonych do określania biomasy nadziemnych komponentów 39 gatunków drzew.

W Polsce, poza wzorami dla sosny [Socha, Wężyk 2004, 2007; Turski i in. 2008; Zasada i in. 2008; Bronisz i in. 2009; Jelonek i in. 2012], nie opracowano dotychczas równań dla innych gatunków drzew. Bezkrzytyczne wykorzystywanie ogólnie dostępnych równań opracowanych poza granicami naszego kraju może wiązać się z możliwością wystąpienia błędów systematycznych [Muukkonen 2007; Somogyi i in. 2007].

Celem pracy jest przegląd dostępnych w literaturze wzorów empirycznych służących do określania biomasy nadziemnych komponentów drzew olszy czarnej i ocena ich przydatności do szacowania biomasy drzewostanów olszowych występujących w południowej części Polski.

## Material i metody

Ocenę dokładności wzorów empirycznych przeprowadzono na losowej próbie 168 drzew olszy czarnej w wieku od 6 do 96 lat pochodzących z 56 drzewostanów z zachodniej części Kotliny Sandomierskiej (nadleśnictwa: Niepołomice, Tuszyn, Mielec, Nowa Dęba i Leżajsk) (tab. 1). Drzewa ścięto w pełni okresu wegetacyjnego, w lipcu, w latach 2010 i 2011. Na ściętych drzewach bezpośrednio w terenie zważono świeżą masę pnia w korze, gałęzi (grube i cienkie gałęzie niepokryte liśćmi) i ulistnionych pędów. Świeżą wagę kory i drewna w pniu obliczono, mnożąc całkowitą masę pnia przez udział kory i drewna stwierdzony na pobranych krążkach (około 5 cm grubości) z połowy każdej sekcji, na które dzielono pnie w trakcie ważenia. Strzały o długości do 20 m dzielono na 10 sekcji o równej długości, dłuższe strzały dzielono na sekcje dwumetrowe. Świeżą masę liści i pędów każdego drzewa określono, mnożąc całkowitą świeżą masę ulistnionych pędów przez udział liści lub pędów stwierdzony w losowo pobranej próbce o wadze około 1,5-2,0 kg. Z wszystkich wyróżnionych komponentów (kora, drewno, gałęzie, pędy i liście) pobrano próbki, które następnie suszono w temperaturze 105°C do momentu ustabilizowania się wagi. Suchą masę drewna pnia, kory pnia, gałęzi i liści obliczono, mnożąc świeżą masę tych komponentów przez stosunek suchej i świeżej masy stwierdzony w próbkach.

Tabela 1.

Przeciętne wymiary i biomasa drzew próbnych w klasach wieku  
Average dimensions and biomass of sample trees in age classes

Klasa wieku	N		D [cm]	H [m]	SW [kg]	SB [kg]	BR [kg]	FL [kg]	AB [kg]
Ia	12	średnia	4,8	6,3	2,4	0,5	1,0	0,6	4,4
		min-maks	2,8-6,5	4,2-8,2	0,7-5,4	0,2-0,9	0,4-2,0	0,3-1,2	1,8-9,6
Ib	19	średnia	10,1	11,4	21,3	3,5	4,6	1,5	31,0
		min-maks	6,3-17,0	7,8-16,5	5,0-76,7	1,0-11,8	1,5-12,1	0,4-3,2	8,4-103,8
IIa	20	średnia	14,8	15,8	53,1	8,8	8,2	2,4	72,5
		min-maks	10,9-18,4	11,9-19,3	21,8-104,3	4,6-16,4	3,7-13,8	1,1-3,7	31,5-135,4
IIb	18	średnia	18,7	18,1	100,4	16,5	15,2	3,3	135,4
		min-maks	13,7-24,4	14,5-21,6	43,0-171,6	8,9-25,5	5,9-36,2	1,9-6,3	60,2-220,8
IIIa	22	średnia	24,4	22,8	211,7	30,1	23,4	4,1	269,3
		min-maks	17,4-31,5	20,0-25,2	95,5-379,4	17,2-50,4	6,6-55,0	1,5-7,2	121,6-475,2
IIIb	25	średnia	28,8	24,7	303,8	44,1	33,1	6,3	387,1
		min-maks	18,1-36,5	21,3-27,9	106,0-537,0	14,9-68,3	9,3-76,4	1,7-13,8	131,8-663,0
IVa	13	średnia	33,4	26,1	400,5	55,9	46,1	7,1	509,7
		min-maks	28,3-40,8	24,0-28,8	240,4-572,3	38,3-81,1	19,1-84,4	3,6-11,9	317,8-735,0
IVb	23	średnia	34,9	26,9	459,9	65,8	46,8	6,7	579,2
		min-maks	25,4-43,4	22,8-31,0	219,3-743,1	29,9-98,1	14,2-138,2	2,7-14,4	279,3-929,8
Va	16	średnia	36,4	27,8	552,4	70,8	58,6	8,0	689,8
		min-maks	24,9-46,6	23,3-33,5	226,3-1000,7	33,6-114,7	20,8-93,4	2,1-17,5	283,8-1200,6
Łącz- nie	168	średnia	23,6	20,6	239,2	33,8	26,8	4,6	304,3
		min-maks	2,8-46,6	4,2-33,5	0,7-1000,7	0,2-114,7	0,4-138,2	0,3-17,5	1,8-1200,6

N – liczba drzew próbnych; D – pierśnica; H – wysokość; SW – drewno pnia; SB – kora pnia; BR – gałęzie; FL – liście; AB – całkowita biomasa nadziemna

N – number of sample trees; D – diameter at breast height; H – height; SW – stem wood; SB – stem bark; BR – branches; FL – foliage; AB – total aboveground biomass

Całkowitą nadziemną suchą masę drzew obliczono, sumując biomasy wyróżnionych wcześniej komponentów.

Ocenię dokładności poddano wyselekcjonowane na podstawie przeglądu literatury wzory empiryczne służące do określania biomasy nadziemnych komponentów drzew olszy czarnej. Wybrane do analizy wzory (tab. 2) opracowane zostały na podstawie materiału zebranego w drzewostanach olszowych rosnących w Anglii [Hughes 1971], Szwecji [Johansson 1999, 2000], Turcji [Saraçoğlu 2000], na Litwie [Vares 2000] i w Hiszpanii [Montero i in. 2005; Ruiz-Peinado i in. 2012]. Większość wzorów przyjmowała formę funkcji potęgowej lub jej logarytmicznego przekształcenia do postaci liniowej. W konstrukcji tych wzorów wykorzystywano jedną zmienną wyjaśniającą – pierśnicę drzewa. Wzory autorstwa Saraçoğlu [2000] i Ruiz-Peinado i in. [2012] miały charakter zależności liniowych i oprócz pierśnicy drzewa zawierały w swojej konstrukcji wysokość jako drugą zmienną objaśniającą. Liczebność prób wykorzystanych do parametryzacji równań wynosiła od 5 do 89 drzew (tab. 2). Próby do opracowania wzorów pobierano z pojedynczych drzewostanów [Hughes 1971; Vares 2000] lub złożone były one z drzew pozyskanych w wielu drzewostanach [Johansson 1999, 2000; Montero i in. 2005; Ruiz-Peinado i in. 2012].

Na podstawie zestawionych wzorów obliczono suchą biomasę poszczególnych komponentów drzew próbnych. W przypadku wzorów o postaci logarytmicznej uzyskane wyniki transformowano do wartości oryginalnych wyrażonych w jednostkach wagowych. Przy konwersji stosowano poprawkę (*CF*) mającą na celu wyeliminowanie błędów systematycznych wynikających z transformacji zgodnie z wzorem [Baskerville 1972]:

$$B = e^{(\hat{B} + CF)} \quad [1]$$

$$CF = \frac{SEE^2}{2} \quad [2]$$

gdzie:

$B$  – sucha biomasa wyrażona w jednostkach wagowych,

$\hat{B}$  – biomasa w jednostkach logarytmicznych oszacowana na podstawie zlinearyzowanej postaci równania allometrycznego,

$SEE$  – błąd standardowy estymacji zaczerpnięty z publikacji źródłowych (tab. 2).

**Tabela 2.**

Wzory empiryczne do określania suchej biomasy nadziemnych komponentów drzew olszy czarnej  
Empirical formulas for the determination of dry biomass above-ground components alder trees

Me- toda	$D$ zakres lub średnia [cm]	$N$	Postać wzoru	Współczynniki równania			$SEE$	Źródło
				$a$	$b$	$c$		
Całkowita nadziemna biomasa drzewa (AB)								
AB-J1	12,2-28,3	32	$a \cdot D^b$	0,00309	2,022126	–	–	Johansson 1999
AB-J2	1,0-17,3	79	$a \cdot D^b$	0,00079	2,28546	–	–	Johansson 2000
AB-M	8,3-47,3	16	$a+b \cdot \ln(D)$	-0,824827	1,9009	–	0,2970	Montero i in. 2005
AB-S	8,0-30,0	89	$a+b \cdot D^2+c \cdot H$	-27,076	0,261	3,234	–	Saraçoğlu 2000
Biomasa pnia (ST)								
ST-H	–	12	$a \cdot D^b$	0,0841	2,4501	–	–	Hughes 1971
ST-J1	12,2-28,3	32	$a \cdot D^b$	0,005609	1,888345	–	–	Johansson 1999
ST-J2	1,0-17,3	79	$a \cdot D^b$	0,00119	2,17247	–	–	Johansson 2000
ST-M	8,3-47,3	16	$a+b \cdot \ln(D)$	-1,37963	1,98387	–	0,4072	Montero i in. 2005
ST-R	8,3-47,3	16	$a \cdot D^2 \cdot H$	0,0191	–	–	–	Ruiz-Peinado i in. 2012
Biomasa drewna pnia (SW)								
SW-S	8,0-30,0	89	$a+b \cdot D^2+c \cdot H$	-30,817	0,225	3,034	–	Saraçoğlu 2000
SW-V1	10,4	5	$a+b \cdot \ln(D)$	-3,094	1,325	–	0,20	Vares 2000
SW-V2	13,9	6	$a+b \cdot \ln(D)$	-2,313	1,590	–	0,05	Vares 2000
SW-V3	12,4	6	$a+b \cdot \ln(D)$	-2,031	1,101	–	0,14	Vares 2000
Biomasa kory pnia (SB)								
SB-S	8,0-30,0	89	$a+b \cdot D^2+c \cdot H$	1,429	0,020	0,119	–	Saraçoğlu 2000
SB-V1	10,4	5	$a+b \cdot \ln(D)$	-3,616	1,068	–	0,23	Vares 2000
SB-V2	13,9	6	$a+b \cdot \ln(D)$	-3,200	0,998	–	0,05	Vares 2000
SB-V3	12,4	6	$a+b \cdot \ln(D)$	-3,102	0,959	–	0,21	Vares 2000
Biomasa gałęzi (BR)								
BR-H	–	12	$a \cdot D^b$	0,01465	2,51919	–	–	Hughes 1971
BR-J1	12,2-28,3	32	$a \cdot D^b$	0,000003	2,880598	–	–	Johansson 1999
BR-J2	1,0-17,3	79	$a \cdot D^b$	0,0000006	3,28106	–	–	Johansson 2000
BR-S	8,0-30,0	89	$a+b \cdot D^2+c \cdot H$	0,0643	0,011	0,135	–	Saraçoğlu 2000
BR-V1	10,4	5	$a+b \cdot \ln(D)$	-5,579	1,400	–	0,49	Vares 2000
BR-V2	13,9	6	$a+b \cdot \ln(D)$	-5,915	1,461	–	0,14	Vares 2000
BR-V3	12,4	6	$a+b \cdot \ln(D)$	-6,786	1,549	–	0,30	Vares 2000
Biomasa liści (FL)								
FL-J1	12,2-28,3	32	$a \cdot D^b$	0,000003	2,547045	–	–	Johansson 1999
FL-J2	1,0-17,3	79	$a \cdot D^b$	0,00239	1,32535	–	–	Johansson 2000
FL-M	8,3-47,3	16	$a+b \cdot \ln(D)$	-3,00803	1,44689	–	0,5196	Montero i in. 2005
FL-V1	10,4	5	$a+b \cdot \ln(D)$	-4,855	1,114	–	0,20	Vares 2000
FL-V2	13,9	6	$a+b \cdot \ln(D)$	-7,389	1,582	–	0,39	Vares 2000
FL-V3	12,4	6	$a+b \cdot \ln(D)$	-6,090	1,246	–	0,35	Vares 2000

Oszacowane za pomocą wzorów wartości biomasy porównano z wartościami rzeczywistymi ( $B_{rz}$ ) określonymi na podstawie pomiarów terenowych i laboratoryjnych.

Dla każdego spostrzeżenia obliczono następnie wartość błędu procentowego ( $P$ ) według wzoru:

$$P = \frac{B - B_{rz}}{B_{rz}} \cdot 100 \quad [3]$$

Wielkość i zmienność błędów procentowych wtórnych scharakteryzowano, obliczając średnią arytmetyczną, wartości ekstremalne oraz odchylenie standardowe. Zweryfikowano również hipotezy zakładające zgodność rozkładu błędów z teoretycznym rozkładem normalnym. Do weryfikacji hipotez użyto testu Kołmogorowa-Smirnowa, przyjmując poziom istotności  $\alpha=0,05$ .

Ponadto dla każdej metody obliczono błąd standardowy ( $SE$ ) oraz współczynnik zmienności ( $CV$ ) [Parresol 1999]:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_{rz_i} - B_i)^2}{n - p}} \quad [4]$$

$$CV = \frac{SE}{\bar{B}} \cdot 100 \quad [5]$$

gdzie:

$B_{rz}$  – rzeczywista sucha masa komponentu,

$B$  – sucha masa komponentu określona za pomocą wzoru empirycznego,

$n$  – liczebność próby,

$p$  – liczba parametrów użytych w równaniu,

$\bar{B}$  – średnia arytmetyczna biomasa komponentu.

Przeanalizowano także zależność błędów procentowych od pierśnicy drzew. W tym celu obliczono wartości średnie oraz 95-procentowe przedziały ufności dla drzew zaklasyfikowanych do przedziałów pierśnic o szerokości 5 cm.

## Wyniki

**CAŁKOWITA NADZIEMNA BIOMASA DRZEW.** Wszystkie analizowane wzory zaniżały przeciętną nadziemną biomasę drzew. Trzy metody – AB-J1, AB-J2 i AB-M – charakteryzowały się stosunkowo niewielkim błędem systematycznym, wynoszącym odpowiednio  $-2,7\%$ ,  $-3,0\%$  i  $-2,6\%$ . Największy przeciętny błąd ( $-23,7\%$ ) stwierdzono dla wzoru AB-S (tab. 3). W przypadku pojedynczych drzew obserwowano błędy o wielkości od  $-731,5\%$  do  $165,9\%$ . Najmniejszą zmienność błędów stwierdzono dla metody AB-J1 (rozrzut od  $-28,7\%$  do  $57,8\%$ ,  $SE=68$  kg,  $CV=22,3\%$ ), największą zaś w przypadku metody AB-S (rozrzut od  $-731,5$  do  $74,7$ ,  $SE=146,1$  kg,  $CV=48\%$ ). Analizowane metody zaniżają całkowitą biomasę dla drzew o pierśnicy większej od 15 cm (ryc. 1). W przypadku drzew cieńszych metody AB-J1, AB-J2 i AB-M zawyżają całkowitą nadziemną biomasę, natomiast wzór AB-S zawyża biomasę w przedziale grubości od 10 cm do 15 cm, zaś dla drzew o pierśnicach poniżej 10 cm zaniża przeciętną biomasę o ponad 75%.

**BIOMASA PNIA.** W analizowanej próbie drzew obserwowano błędy o wielkości od  $-54,0\%$  do  $288,1\%$  (tab. 2). Najmniejszy rozrzut błędów stwierdzono w przypadku wzoru ST-R (od  $-27,9\%$  do  $53,2\%$ ), metoda ta jednak charakteryzowała się największym błędem systematycznym, wynoszącym  $13,5\%$ . Model ST-J2 o najmniejszym błędzie systematycznym ( $-2,6\%$ ) charakteryzował się z kolei dużym rozrzutem błędów (od  $-39,0\%$  do  $142,9\%$ ). Uwzględniając wielkość

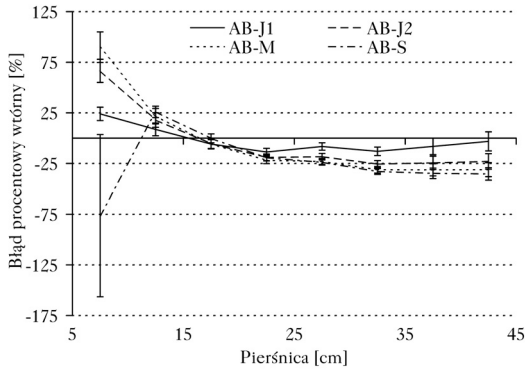
Tabela 3.

Statystyczna charakterystyka błędów oszacowania biomasy

Statistical characteristics of biomass estimation errors

Metoda	Błąd procentowy wtórny [%]			SE [kg]	CV [%]	
	Średnia	Ekstremalny (-)	Ekstremalny (+)			
Całkowita nadziemna biomasa drzewa (AB)						
AB-J1	-2,7	-28,7	57,8	17,1	68,0	22,3
AB-J2	-3,0	-41,5	126,5	33,3	113,7	37,4
AB-M	-2,6	-48,0	165,9	42,9	137,2	45,1
AB-S	-23,7	-731,5	74,7	70,5	146,1	48,0
Biomasa pnia (ST)						
ST-J1	9,4	-49,2	288,1	67,2	123,4	45,2
ST-J2	-2,6	-39,0	142,9	35,1	95,5	35,0
ST-H	3,2	-29,3	75,2	19,2	56,1	20,6
ST-M	-10,8	-54,0	182,5	46,6	149,0	54,6
ST-R	13,5	-27,9	53,2	12,1	84,5	31,0
Biomasa drewna pnia (SW)						
SW-S	-46,0	-2519,3	74,5	226,1	102,2	42,7
SW-V1	-28,8	-85,1	461,9	92,6	246,2	102,9
SW-V2	-28,6	-88,4	592,6	108,1	260,1	108,8
SW-V3	-26,5	-89,1	663,4	116,8	262,9	109,9
Biomasa kory pnia (SB)						
SB-S	10,3	-65,1	1042,7	150,6	23,8	70,3
SB-V1	-28,9	-83,1	432,8	92,8	33,9	100,3
SB-V2	-23,7	-83,6	523,8	106,0	34,1	100,8
SB-V3	-28,1	-85,5	516,8	103,3	35,1	103,7
Biomasa gałęzi (BR)						
BR-J1	3,8	-93,5	238,3	59,6	16,9	63,2
BR-J2	95,0	-95,0	651,0	135,5	66,0	246,7
BR-H	108,6	-71,0	514,9	96,3	47,1	176,2
BR-S	-42,9	-82,4	132,7	32,5	25,8	96,4
BR-V1	-47,1	-84,8	73,1	26,7	26,8	100,2
BR-V2	-53,8	-86,0	38,6	21,6	27,6	103,2
BR-V3	-68,5	-89,6	-16,9	13,2	30,1	112,5
Biomasa liści (FL)						
FL-J1	-12,9	-95,1	177,4	54,4	2,3	50,9
FL-J2	-13,9	-62,6	91,0	28,8	2,3	49,7
FL-M	39,0	-38,6	208,8	47,8	2,3	51,1
FL-V1	-6,2	-63,5	117,2	33,6	2,3	51,8
FL-V2	-5,1	-63,5	109,8	34,7	1,8	40,0
FL-V3	-43,1	-76,3	25,9	19,2	3,4	74,1

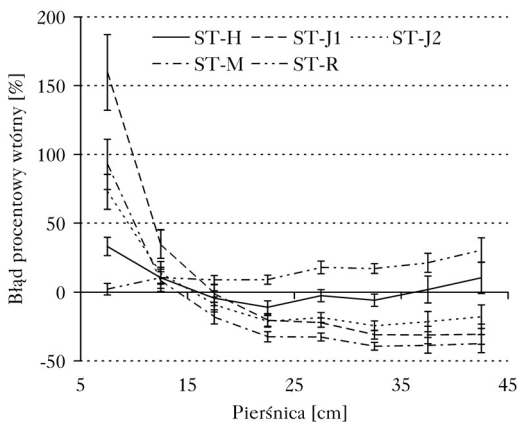
błędu systematycznego i zmienność błędów pojedynczych spostrzeżeń, za najdokładniejszy sposób określania biomasy pnia można uznać wzór ST-H ( $SE=56,1$  kg,  $CV=20,6\%$ ). Jego przewagę nad pozostałymi metodami podkreślają także: niewielka zależność błędów od pierśnicy drzew i zdecydowanie najmniejsze błędy systematyczne w stosunkowo szerokim zakresie pierśnic (ryc. 2). W przypadku pozostałych metod, a zwłaszcza wzorów ST-J1, ST-J2, ST-M, obserwuje się dużą zależność błędów od pierśnicy drzew. Z reguły biomasa pnia zawyżana jest dla drzew cieńszych od 15 cm, zaniżana zaś dla drzew grubszych (ryc. 2).



Ryc. 1.

Średnia oraz 95-procentowy przedział ufności błęd procentowego wtórnego określania całkowitej nadziemnej biomasy w zależności od grubości drzew

Average and 95% confidence interval of the percentage error of the total aboveground biomass determination depending on breast height diameter



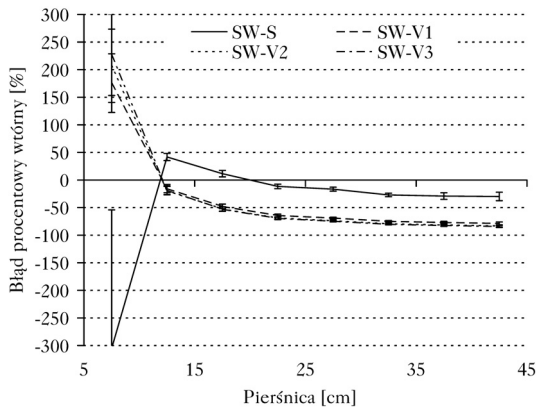
Ryc. 2.

Średnia oraz 95-procentowy przedział ufności błęd procentowego wtórnego określania biomasy pnia w zależności od grubości drzew

Average and 95% confidence interval of the percentage error of the stem biomass determination depending on breast height diameter

BIOMASA DREWNA I KORY PNIA. Oszacowania biomasy drewna pnia pojedynczych drzew obarczone były błędami o wartościach z przedziału od  $-2519,3\%$  do  $663,4\%$ , kory zaś od  $-85,5\%$  do  $1042,7\%$ . W zależności od zastosowanego wzoru biomasa drewna analizowanych drzew zaniżana była przeciętnie od  $-26,5\%$  do  $-46,0\%$ . W przypadku biomasy kory trzy zastosowane wzory (SB-V1, SB-V2, SB-V3) zaniżały przeciętną wartość tego komponentu w analizowanej grupie drzew, jeden zaś (SB-S) zawyżał (tab. 3). Przeciętne wielkości błędów oszacowania drewna i kory w grupach drzew zaklasyfikowanych do 5-cm przedziałów grubości przedstawiono na ryc. 3 i 4. Na ogół dla drzew najcieńszych ( $<10$  cm) biomasa drewna i kory pnia była zawyżana, zaś dla drzew grubszych zaniżana.

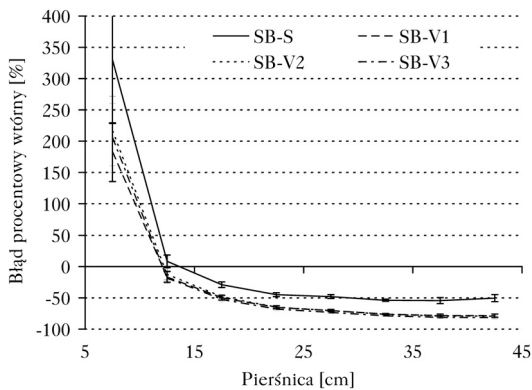
BIOMASA GAŁĘZI. Spośród siedmiu wzorów do szacowania biomasy gałęzi cztery zaniżały, a trzy zawyżały przeciętną wartość tego komponentu w analizowanej grupie drzew. Przeciętne błędy ujemne w zależności od zastosowanego wzoru przyjmowały wartości od  $-42,9\%$  do  $-68,5\%$ , dodatnie zaś od  $3,8\%$  do  $108,6\%$ . W przypadku pojedynczych drzew obserwowano błędy o wartościach od  $-93,5\%$  do  $238,3\%$  (tab. 3). Metody BR-S, BR-V1, BR-V2, BR-V3 praktycznie w całym zakresie pierśnic zaniżały oszacowania biomasy gałęzi, przy czym wielkość błędów systematycznych rosła ze wzrostem grubości drzew (ryc. 5). Wzory BR-J1 i BR-J2 zaniżały biomasę gałęzi drzew o pierśnicach mniejszych odpowiednio od 20 cm i 15 cm, zawyżały zaś w przypadku drzew grubszych (ryc. 5). Wzór BR-H zawyżał biomasę gałęzi drzew w całym analizowanym zakresie pierśnic.



Ryc. 3.

Średnia oraz 95-procentowy przedział ufności błędu procentowego wtórnego określania biomasy drewna pnia w zależności od grubości drzew

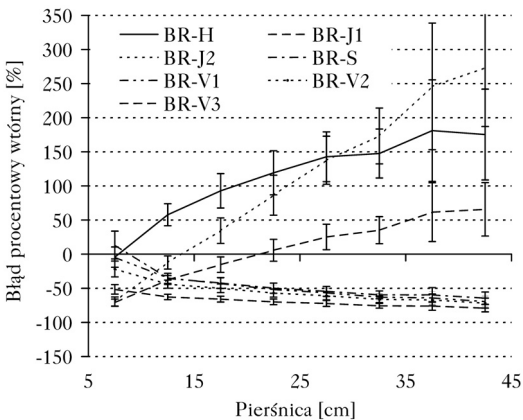
Average and 95% confidence interval of the percentage error of the stem wood biomass determination depending on on breast height diameter



Ryc. 4.

Średnia oraz 95-procentowy przedział ufności błędu procentowego wtórnego określania biomasy kory w zależności od grubości drzew

Average and 95% confidence interval of the percentage error of the bark biomass determination depending on breast height diameter



Ryc. 5.

Średnia oraz 95-procentowy przedział ufności błędu procentowego wtórnego określania biomasy gałęzi w zależności od grubości drzew

Average and 95% confidence interval of the percentage error of the branches biomass determination depending on breast height diameter

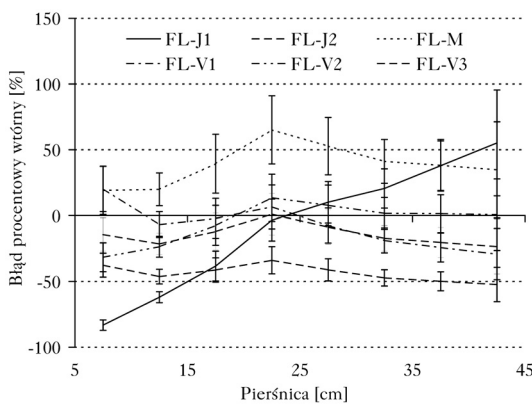
BIOMASA APARATU ASYMLACYJNEGO. Oszacowania biomasy liści pojedynczych drzew obarczone były błędami od  $-95,1\%$  do  $208,8\%$  (tab. 3). Średnia wartość błędu w zależności od zastosowanej metody wahała się od  $-43,1\%$  do  $39,0\%$ . Najmniejszy błąd systematyczny ( $-5,1\%$ ) i standardowy ( $1,8$  kg) stwierdzono w przypadku wzoru FL-V2. Żadna z ocenianych metod nie zapewnia obiektywnych oszacowań biomasy aparatu asymilacyjnego w całym analizowanym zakresie grubości drzew. Metody FL-V3, FL-J2 w całym zakresie pierśnic zaniżają oszacowania biomasy liści,



a metoda FL-M zawiąza je. Pozostałe metody (FL-J1, FL-V1 i FL-V2) w pewnych przedziałach grubości zawiązają oszacowania biomasy liści, w innych zaś je zaniżają (ryc. 6).

## Dyskusja

W pracy oceniono dokładność trzydziestu empirycznych równań przeznaczonych do określania biomasy sześciu nadziemnych komponentów drzew olszy czarnej. Opracowano je w różnych rejonach naturalnego zasięgu występowania olszy czarnej: od południowych obszarów Europy [Saraçoğlu 2000; Montero i in. 2005; Ruiz-Peinado i in. 2012] po północną granicę występowania tego gatunku [Johansson 1999, 2000], a także w obszarach położonych na zachód [Hughes 1971] oraz na wschód od Polski [Vares 2000]. Wykorzystanie równań regresji do szacowania biomasy poza miejscem, w którym je opracowano, możliwe jest pod warunkiem, że obie populacje drzew są identyczne lub bardzo podobne do siebie [Parresol 1999; Chojnacki i in. 2008]. Niektóre z przedstawionych równań [Hughes 1971; Vares 2000] powstały w oparciu o próby pobrane z pojedynczych drzewostanów. Zgodnie z przytoczonym założeniem wykorzystanie tych wzorów możliwe byłoby tylko w wybranych drzewostanach o zbliżonej budowie i strukturze do tych, w jakich je opracowano. Z kolei wzory powstałe z wykorzystaniem drzew próbnych pochodzących z różnych drzewostanów [Johansson 1999, 2000; Montero i in. 2005; Ruiz-Peinado i in. 2012], mające charakter bardziej ogólny, mogłyby znaleźć zastosowanie do oszacowań biomasy dla większych obszarów, na których struktura powierzchniowa i wiekowa drzewostanów zbliżona byłaby do tej, z której wybierano drzewa próbne. Jednoznaczne określenie stopnia podobieństwa pomiędzy populacją źródłową a docelową jest bardzo trudne, a ponadto wyniki wielu badań wskazują na istotny wpływ czynników środowiskowych oraz uwarunkowań genetycznych na wzorec alokacji biomasy pojedynczych drzew. Zhao i in. [2012] oraz Hegazy i in. [2008] stwierdzili, że relacja biomasy pnia i gałęzi zależy od początkowej więźby oraz zagęszczenia, w jakim wzrastają drzewa. Pośrednio na oddziaływanie zagęszczenia na alokację biomasy wskazują liczne badania poświęcone konkurencji wewnątrzdrzewostanowej [Mäkinen 1996; Naidu i in. 1998; Vanninen 2004; Ochał i in. 2013]. Wzorec alokacji biomasy różni się także u drzew wzrastających w odmiennych warunkach klimatycznych i edaficznych. Helmisaari i in. [2007] stwierdzili, że populacje sosny i świerka rosnące w północnej i południowej części Finlandii oraz na żyznych i ubogich siedliskach różnią się relacją biomasy igliwia i korzeni. Przeprowadzone przez Oleksyna i in. [1999] badania na powierzchni doświadczalnej z różnymi proveniencjami sosny nie potwierdziły wpływu pochodzenia na alokację biomasy. Autorzy ci sugerują, że brak oddziaływania uwarunkowań genetycznych na zależności allometryczne u sosny pozwala na dokładne określanie produkcji biomasy dla tego gatunku za pomocą wzorów allometrycznych. Z kolei Socha i Kulej [2005], w po-



Ryc. 6.

Średnia oraz 95-procentowy przedział ufności błędu procentowego wtórnego określania biomasy aparatu asymilacyjnego w zależności od grubości drzew

Average and 95% confidence interval of the percentage error of the foliage biomass determination depending on breast height diameter

dobnym doświadczeniu proveniencyjnym, wykazali wpływ pochodzenia na kształt pnia jedlicy zielonej, co oznacza, że strzały o tych samych wymiarach (pierśnica i wysokość) różnią się miąższością, a tym samym prawdopodobnie i biomasa.

Fakt odmiennego rozmieszczenia biomasy u drzew z różnych populacji potwierdzają także analizy funkcji alometrycznych powstałych w różnych rejonach naturalnych zasięgów gatunków drzew. Porównanie wielu równań biomasy sosny i świerka powstałych w różnych częściach Europy wskazuje na duże zróżnicowanie biomasy, zwłaszcza aparatu asymilacyjnego i korzeni u drzew o takich samych wymiarach [Zianis i in. 2005].

Jak można było się spodziewać, oceniane wzory charakteryzowały się błędami systematycznymi występującymi w całym zakresie analizowanych pierśnic bądź w pewnych ograniczonych przedziałach. Szacowanie biomasy takich komponentów jak liście, gałęzie, drewno pnia czy kora pnia obarczone jest błędami systematycznymi z reguły większymi niż kilkanaście procent, a w pewnych zakresach pierśnic (najczęściej dla drzew cieńszych niż 10 cm) błąd systematyczny może sięgać kilkudziesięciu lub kilkuset procent. Oszacowania biomasy pnia oraz całkowitej nadziemnej biomasy obarczone są również dużymi błędami, sięgającymi w niektórych zakresach pierśnic kilkudziesięciu procent. Spośród trzydziestu analizowanych równań tylko trzy (AB-J1, ST-H i FL-V2) charakteryzują się akceptowalnymi błędami – nieprzekraczającymi 10%, w stosunkowo szerokim zakresie pierśnic. Ponieważ próba drzew, na której dokonywano oceny wzorów, pochodziła z drzewostanów różniących się wiekiem, a więc również przeciętną pierśnicą, użycie wzorów w pojedynczych drzewostanach, zwłaszcza takich, gdzie przeciętna pierśnica zbliżona będzie do tych zakresów pierśnic, które obarczone są dużymi błędami systematycznymi, prowadzić będzie do błędnego oszacowania zasobów ich biomasy.

Wyniki pracy oraz wymienionych publikacji świadczyć mogą o odmiennych wzorcach alokacji biomasy u drzew rosnących w różnych rejonach zasięgu olszy czarnej oraz o tym, że wykorzystanie zależności alometrycznych z populacji drzew rosnących w odmiennych warunkach geograficznych, a także prawdopodobnie poddanych odmiennym zabiegom hodowlanym, jest obarczone dużym prawdopodobieństwem wystąpienia błędów w oszacowaniach całkowitej biomasy lub poszczególnych jej komponentów.

## Wnioski

- ✦ Opublikowane w literaturze wzory przeznaczone do określania zarówno całkowitej nadziemnej biomasy, jak i poszczególnych komponentów drzew olszy czarnej w warunkach południowo-wschodniej Polski dostarczają błędnych oszacowań biomasy.
- ✦ Zastosowanie wzorów w odniesieniu do pojedynczych drzewostanów może być obarczone nieakceptowalnie dużymi błędami systematycznymi, w związku z czym nie powinny być one stosowane do szacowania biomasy pojedynczych wydziałów.
- ✦ Do czasu opracowania dokładniejszych metod jedynie wzory AB-J1, ST-H i FL-V2 mogą być używane do szacowania nadziemnej biomasy i jej komponentów w drzewostanach olszowych.
- ✦ Niezbędne jest opracowanie dokładniejszych metod szacowania biomasy olszy czarnej oraz kontynuowanie badań nad wzorcami alokacji biomasy tego i innych gatunków drzew na terenie Polski.

## Literatura

- Baskerville G. L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 2: 49-53.
- Bronisz K., Bronisz A., Zasada M., Bijak S., Wojtan R., Tomusiak R. 2009. Biomasa aparatu asymilacyjnego w drzewostanach sosnowych zachodniej Polski. *Sylwan* 153 (11): 758-767.

- Chojnacki D. C., Jenkins J. C., Holland A. K. 2008. Improving North American Forest Biomass Estimates from Literature Synthesis and Meta-Analysis of Existing Biomass Equations. W: 2008 Forest Inventory and Analysis (FIA) Symposium, 21-23 October 2008, Park City. Proc. RMRS-P-56CD. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins. 1-7.
- Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council, of 13 October 2003, establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC. 2003. Official Journal of the European Union.
- Eamus D., McGuinness K., Burrows W. 2000. Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the Northern Territory and Western Australia. National Carbon Accounting System Technical Report 5b. Australian Greenhouse Office, Canberra.
- Hegazy S. S., Aref I. M., Al-Mefarrej H., El-Juhany L. I. 2008. Effect of spacing on the biomass production and allocation in *Conocarpus erectus* L. trees grown in Riyadh, Saudi Arabia. Saudi Journal of Biological Science 15: 315-322.
- Helmisaari H. S., Derome J., Nöjd P., Kukkola M. 2007. Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. Tree Physiology 27: 1493-1504.
- Hughes M. K. 1971. Tree Biocontent, Net Production and Litter Fall in a Deciduous Woodland. Oikos 22: 62-73.
- Jelonek T., Pazdrowski W., Walkowiak R., Tomczak A. 2012. Model biomasy igliwia sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) wyrosłej w warunkach gruntów porolnych i leśnych. Leśne Prace Badawcze 73 (2): 97-106.
- 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. GTR-NE-319, USDA Forest Service, Northeastern Research Station, Newtown Square, PA.
- Johansson T. 1999. Dry matter amounts and increment in 21- to 91-year-old common alder and grey alder and some practical implications. Canadian Journal of Forest Research 29: 1679-1690.
- Johansson T. 2000. Biomass equations for determining fractions of common and grey alders growing on abandoned farmland and some practical implications. Biomass and Bioenergy 18: 147-159.
- Mäkinen H. 1996. Effect of intertree competition on biomass production of *Pinus sylvestris* (L.) half-sib families. Forest Ecology and Management 86: 105-112.
- Montero G., Ruiz-Peinado R., Munoz M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid.
- Muukkonen P. 2007. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. European Journal of Forest Research 126 (2): 157-166.
- 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: 1116-1124.
- Ochał W., Grabezyński S., Orzeł S., Wertz B., Socha J. 2013. Alokacja nadziemnej biomasy u sosen zajmujących różne pozycje biosocjalne w drzewostanie. Sylwan 157 (10): 737-746.
- Oleksyn J., Reich P. B., Chaturpka W., Tjoelker M. G. 1999. Differential Above- and Below-ground Biomass Accumulation of European *Pinus sylvestris* Populations in a 12-year-old. Scandinavian Journal of Forest Research 14: 7-17.
- Parde J. 1980. Forest biomass. Forestry Abstracts 41: 343-362.
- Parresol B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. Forest Science 45: 573-593.
- Protokół z Kioto, do Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu. 2005. Dz. U. 2005 nr 203 poz. 1684.
- Ruiz-Peinado R., Montero G., del Rio M. 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. Forest Systems 21: 42-52.
- Saraçoğlu N. 2000. Sakallı Kızılağaç (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. subsp. *barbata* (C.A. Mey.) Yalt.) Biyokütle Tabloları. Turk. J. Agric. For. 24: 147-156.
- Snowdon P., Eamus D., Gibbons P., Khanna P. K., Keith H., Raison R. J., Kirschbaum M. U. F. 2000. Synthesis of allometrics, review of root biomass and design of future woody biomass sampling strategies. National Carbon Accounting System Technical Report 17. Australian Greenhouse Office, Canberra.
- Socha J., Kulej M. 2005. Provenance-dependent variability of *Abies grandis* stem form under mountain conditions of Beskid Sądecki (southern Poland). Canadian Journal of Forest Research 35: 2539-2552.
- Socha J., Wężyk P. 2004. Empirical formulae to assess the biomass of the above-ground part of pine trees. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities 7: 1-8.
- Socha J., Wężyk P. 2007. Allometric equations for estimating the foliage biomass of Scots pine. European Journal of Forest Research 126: 263-270.
- Somogyi Z., Cienciala E., Mäkipää R., Muukkonen P., Lehtonen A., Weiss P. 2007. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. Eur. J. Forest Res. 126: 197-207.
- Ter-Mikaelian M. T., Korzukhin M. D. 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. For. Ecol. Manage. 97: 1-24.

- Turski M., Beker C., Kazmierczak K., Najgrakowski T. 2008. Allometric equations for estimating the mass and volume of fresh assimilational apparatus of standing Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. *Forest Ecology and Management* 255 (7): 2678-2687.
- Vanninen P. 2004. Allocation of above-ground growth in *Pinus sylvestris* – impacts of tree size and competition. *Silva Fennica* 38 (2): 155-166.
- Vares A. 2000. Biomass, nitrogen and phosphorus allocation in above-ground parts of Black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) plantations. *Baltic Forestry* 1: 47-52.
- Zasada M., Bronisz K., Bijak S., Wojtan R., Tomusiak R., Dudek A., Michalak K. 2008. Wzory empiryczne do określania suchej biomasy nadziemnej części drzew i ich komponentów. *Sylwan* 152 (3): 27-39.
- Zhao D., Kane M., Borders B., Subedi S., Akers M. 2012. Effects of cultural intensity and planting density on stand-level aboveground biomass production and allocation for 12-year-old loblolly pine plantations in the Upper Coastal Plain and Piedmont of the southeastern United States. *Canadian Journal of Forest Research* 42: 111-122.
- Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fenn.* ed. The Finnish Society of Forest Science, The Finnish Forest Research Institute.

## SUMMARY

### Accuracy of empirical formulas for determining aboveground biomass of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.)

The aim of this study was the review of available empirical formulas used for determining biomass of aboveground components of black alder as well as the assessment of these formulas' suitability for estimating biomass of black alder in south-eastern Poland.

Thirty formulas used for determining the biomass of six aboveground tree components were selected from the literature (tab. 2). The reference material consisted of 168 sampled trees aged 6-96 from 56 alder stands located in the western part of Kotlina Sandomierska (tab. 1). Fresh biomass of stem wood, stem bark, stem, branches and foliage was specified for each tree. Then, samples were collected from each distinguished fraction and taken to the laboratory, where they were dried in 105°C until they reached a stable weight. Dry mass of the distinguished components was calculated by multiplying fresh mass by the ratio of dry and fresh mass of collected samples. The biomass obtained as a result of applying formulas was compared to real values, and percentage error for each observation according to a formula was calculated [3]. Additionally, a standard error (*SE*, [4]) and coefficient of variation (*CV*; [5]) were estimated and correlation between percentage errors and tree diameter for each analysed method.

The assessed formulas, given the conditions in south-eastern Poland, resulted in biased biomass calculations (tab. 3). The estimation of such components as leaves, branches, stem wood or bark is subject to systematic errors which are normally larger than a couple of dozens per cent, and in the case of some ranges of breast height diameters even a few hundred per cent (fig. 3-6). Stem and total aboveground biomass are assessed with better accuracy, however in the case of certain ranges of breast height diameters errors may still exceed a dozen or so per cent. Formulas AB-J1, ST-H and FL-V2 are not so biased (up to  $\pm 10\%$ ) within a wide range of breast height diameters (10-45 cm) and they are the only formulas which may be considered valuable for assessing biomass in alder stands in Poland until some more accurate methods are being formulated.