

STANISŁAW MIŚCICKI, ANNA SOŁTYS

Liczba i wielkość jednostek próbnych do pomiaru leżących martwych drzew metodą liniową

Number and size of sample units for the estimation of coarse woody debris volume using the line intersect method

ABSTRACT

Miścicki S., Sołtys A. 2019. Liczba i wielkość jednostek próbnych do pomiaru leżących martwych drzew metodą liniową. Sylwan 163 (1): 35-46.

The line intersect method is recommended for coarse woody debris (CWD) inventories. This is due to the fact that for the CWD volume estimation with the assumed standard error (SE), the total time of measurements using line sampling units is shorter than when using the fixed-area sample units. The aim of the research was to determine: (1) the number and size of sample units whose use will allow achieving the assumed SE of the CWD volume estimation, and (2) dependence of this number and size of sample units on the quantity of CWD. The research material was collected from 131 sample units (sampling lines) with a length of 50.48 m each. They were systematically located in the stands (128 ha) on Bukowa Góra in the Roztocze National Park (south-east Poland). Data concerning the intersection points of the sampling line (in relation to its beginning) with the axis of a downed log, made it possible to simulate the measurement using shorter sampling lines (4, 8, ..., 44 m) than the original ones. The simulation was performed using the original data (when the average CWD volume was 73 m³/ha), which also represented an inventory unit in which the CWD volume accounted for 10, 40 and 70% of the original value. These data were obtained by a random elimination of the appropriate portion of trees. The relationship between the single-tree-plot coefficient of variation (calculated for such a size of a sample unit which on average contains only one log) and the length of the sampling line was determined (figs. 2 and 3). On this basis the number of sample units necessary to obtain the assumed SE value of the target variable was determined (tab. 1). Using the data on labour consumption of individual measurement operations, the total working time was calculated for such a number of sample units that would guarantee obtaining the assumed SE of the CWD volume estimation (tab. 2). The total time of measurements was longer in an inventory unit with scarcer CWD resources (figs. 5 and 6). The optimal (due to the time of measurements needed to achieve the assumed SE of the CWD volume estimation) line length occurred within the range of 4-150 m. The use of sample units with a length of 60-150 m each was recommended in forests with the average CWD volume over 30 m³/ha, and with a length of 150-200 m in forest with sparser CWD resources.

KEY WORDS

Bukowa Góra, protected forest, sampling line, single-tree-plot coefficient of variation, standard error, time of measurements

ADDRESSES

Stanisław Miścicki ⁽¹⁾ – e-mail: stanislaw_miscicki@sggw.pl
Anna Sołtys ⁽²⁾ – e-mail: anna_maria_soltys@o2.pl

⁽¹⁾ Katedra Urządzania Lasu i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

⁽²⁾ Katedra Ochrony Lasu i Ekologii, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Wstęp

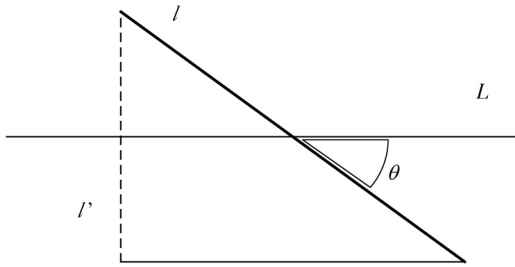
Do lat 80. XX wieku pomiar zasobów martwych drzew był związany najczęściej z badaniami nad strukturą drzewostanów naturalnych [Leibundgut 1982; Jaworski i in. 2007]. W Europie usuwano wówczas z lasów zagospodarowanych niemal wszystkie martwe drzewa [Siitonen 2001]. Duże znaczenie przyrodnicze takich drzew przyczyniło się do powstania koncepcji pozostawiania w drzewostanach pewnej ich liczby [Ammer 1991]. Szacowanie wielkości zasobów martwych drzew – konieczne w tej nowej sytuacji – okazało się być wyzwaniem metodycznym. Wpływała na to duża zmienność liczby martwych drzew oraz ich zróżnicowana postać: stojące, leżące i pniaki. W przypadku pomiaru zasobów drzew stojących najczęściej stosuje się kołowe powierzchnie próbne [Ritter, Saborowski 2014], a specyficznym zagadnieniem jest określanie miąższości drzew złamanych. W przypadku pomiarów drzew leżących także stosowane są powierzchnie próbne kołowe. Ponieważ jednak wiele drzew nie w całości znajduje się w obrębie nawet dużej powierzchni próbnej, przyjmowane są różne warianty zaliczania drzew do próby [Bujoczek 2015]. Propagowana była – także w Polsce – liniowa metoda pomiaru drzew leżących [Wolski 2002], którą stosowano w rozległych pomiarach [Skwarek, Bijak 2015]. Ritter i Saborowski [2014] przeprowadzili badania dotyczące różnych metod pomiaru martwych drzew z wykorzystaniem losowania warstwowego. W przypadku pomiaru drzew leżących lub ich fragmentów (o długości $\geq 1,3$ m) o grubości $\geq 7,0$ cm w grubszym końcu metoda z użyciem prób liniowych okazała się bardziej efektywna niż metoda powierzchni próbnych kołowych. Czas pomiaru jednostek próbnych takiej liczby, aby uzyskać określony błąd oszacowania średniej miąższości martwych drzew leżących, był w przypadku użycia powierzchni próbnych kołowych o 93% większy niż w przypadku użycia prób liniowych.

Ocena zasobów martwych drzew stała się w Polsce częścią planu urządzenia lasu nadleśnictwa [Instrukcja... 2012]. Pomiar jest wykonywany na co dziesiątej kołowej powierzchni próbnej wykorzystywanej do pomiaru zasobu drzew żywych. W zależności od wieku drzewostanów ich wielkość wynosi od 50 do 500 m². Z powodu małej liczby jednostek próbnych interpretacja wyników jest wykonywana dla nadleśnictwa. Bujoczek i in. [2017] sugerowali wykorzystanie metody liniowej, argumentując, że jej mniejsza pracochłonność pozwoliłaby zwiększyć liczbę jednostek próbnych, a przez to dokładność oszacowania zasobów leżących martwych drzew.

Liniowa metoda pomiarów po raz pierwszy została opisana przez Canfielda [1941]. Choć może być wykorzystywana do pomiarów wszelkich elementów mających określoną długość (np. dróg leśnych), to była rozwijana głównie na potrzeby pomiaru leżących martwych drzew, m.in. przez Warrena i Olsena [1964], van Wagnera [1968] i Browna [1974]. Teoretyczne podstawy metody zostały opisane m.in. przez Kaisera [1983] oraz Marshalla i in. [2000], a w oparciu głównie o tę ostatnią pracę udostępnione w polskiej literaturze przez Wolskiego [2002].

W opracowaniu Kangas [2006] jednostką próbną jest linia L określonej długości, położona na obszarze lasu według azymutu θ (ryc. 1). Każda kłoda, której oś jest skrzyżowaną z linią L , jest zaliczana do próby. Prawdopodobieństwo, że kłoda l będzie zaliczona do próby, zależy od długości linii próbnej L i od efektywnej długości kłody l' – czyli rzutu kłody l prostopadle do linii próbnej. Wartość mierzonej cechy y w odniesieniu do jednostki powierzchni lasu wynosi na podstawie estymatora Horwitza-Thompsona:

$$\hat{T} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{l'(\theta)} \quad [1]$$



Ryc. 1.

Schemat pomiaru z użyciem próby liniowej
Scheme of line intersect sampling

L – linia próbna określonej długości, l – długość kłody przeciętej przez linię próbną, l' – efektywna długość kłody (prostokąta do linii próbnej), θ – kąt ostry pomiędzy osią kłody a linią próbną

L – linear transect of a certain length, l – length of a CWD piece crossed by the transect, l' – an effective length (perpendicular to the sampling line) of CWD piece, θ – acute angle between CWD piece and the transect

gdzie:

L – długość linii próbnych,

l' – efektywna długość drzewa lub jego fragmentu zależna od azymutu linii próbnej θ ,

y_i – mierzona cecha drzewa i (np. miąższość, biomasa, grubość),

n – liczba kłód.

W terenie o nachyleniu δ_i efektywna długość kłody zależy także od $\cos(\delta_i)$. Jeżeli przyjmie się, że azymut linii próbnych zmienia się równomiernie w zakresie od 0 do 180° (czyli od 0 do π), to oczekiwana efektywna długość kłody i wynosi $E(l'_i(\theta)) = 2l_i/\pi$. Na tej podstawie wzór na oszacowanie wartości średniej danej cechy y w odniesieniu do jednego metra kwadratowego ma postać [de Vries 1973]:

$$\hat{T} = \frac{\pi}{2L} \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{l_i} \quad [2]$$

gdzie:

l_i – długość drzewa lub jego fragmentu i [m],

pozostałe oznaczenia jak we wzorze 1.

Jeżeli do pomiaru miąższości stosuje się wzór środkowego przekroju Hubera, to możliwe jest zrezygnowanie z pomiaru długości drzew zaliczonych do próby, ale konieczne jest zmierzenie ich grubości w miejscu przecięcia osi kłody przez linię próbną. Wzór na obliczenie miąższości leżących martwych drzew, wyrażonej w m^3/ha , przyjmuje wtedy postać:

$$\hat{V} = \frac{\pi^2}{8L} \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad [3]$$

gdzie:

d = grubość kłody lub jej fragmentu [cm],

pozostałe oznaczenia jak we wzorze 1.

Ponieważ grubość kłody w miejscu przecięcia z linią próbną na ogół nie jest zgodna z grubością w środku kłody (wykorzystywaną we wzorze Hubera), to przyjmuje się, że nieobciążone oszacowanie średniej miąższości martwych drzew uzyskuje się przy dużej próbie [van Wagner, Wilson 1976]. W związku z tym, że drzewa po zamarcu mogą przewracać się w podobnym kierunku, zaleca się stosowanie losowego przebiegu linii próbnych lub rozmieszczanie ich według przyjętego azymutu w formie litery L, trójkąta, prostokąta lub 3-4 odcinków zaczynających się w tym samym punkcie i usytuowanych pod określonym kątem w stosunku do siebie. Według Marshalla i in. [2000] dana kłoda tyle razy jest zaliczana do próby, ile raz została przecięta (w różnych miejscach) przez linię próbną, np. z powodu krzywizny kłody lub łamanego przebiegu linii próbnej. Punkty wyznaczające położenie jednostek próbnych są losowane na obszarze lasu, a linie wyznacza się najczęściej taśmą na gruncie, odpowiednio wydłużając je w terenie nachylonym.

Wolski [2002] wskazał, że na podstawie literatury trudno ustalić, ile w metodzie liniowej powinno być jednostek próbnych i jak długa powinna być linia próbna. Zatem w przypadku szerszego jej stosowania ważne jest udzielenie odpowiedzi na następujące pytania:

- jaka jest liczba jednostek próbnych danej wielkości umożliwiających uzyskanie założonego błędu oszacowania średniej miąższości leżących martwych drzew;
- jaki jest łączny czas pomiarów określonej liczby jednostek próbnych danej wielkości, koniecznych dla uzyskania założonego błędu oszacowania średniej miąższości leżących martwych drzew;
- jak powyższe wartości są związane z zasobami (miąższością) leżących martwych drzew.

Obiekt badań

Materiał badawczy został zebrany w drzewostanach Obszaru Ochrony Ścisłej Bukowa Góra (dawny rezerwat ścisły Bukowa Góra) zajmujących 128 ha na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego. Został on objęty ochroną nieformalnie w roku 1934, a formalnie dwa lata później. Według regionalizacji przyrodniczo-leśnej znajduje się w Małopolskiej (VI) krainie, w Mezoregionie Roztocza Środkowego (12) [Zielony, Kliczkowska 2012]. Aż 95% zapasu drzew żywych stanowią tylko dwa gatunki: jodła pospolita *Abies alba* (62%) i buk zwyczajny *Fagus sylvatica* (33%). Domieszkę stanowią sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* (3%) i świerk pospolity *Picea abies* (2%). Pozostałe gatunki – wierzbka iwa *Salix caprea*, grab pospolity *Carpinus betulus*, czereśnia *Cerasus avium* i jarzab pospolity *Sorbus aucuparia* – występują pojedynczo. Główną przyczyną zamierania drzew, poza konkurencją o zasoby pokarmowe i świetlne, jest oddziaływanie wiatru. W roku 1974 huragan złamał lub przewrócił drzewa, których miąższość stanowiła około $\frac{1}{3}$ zapasu [Gazda, Miścicki 2016]. W kolejnych latach wystąpiły porywiste wiatry (najgroźniejszy w roku 1999), jednak nie spowodowały tak znacznych uszkodzeń drzewostanów.

Miąższość martwych drzew określono w drzewostanach Bukowej Góry w roku 2016. Wykorzystano do tego wyniki własnych pomiarów: z 131 jednostek próbnych rozmieszczonych w więźbie 100×100 m w formie powierzchni kołowej 500 m² do pomiaru drzew stojących oraz linii o długości 50,48 m do pomiaru drzew leżących. Średnia miąższość martwych drzew wyniosła 105,5 ± 16,7 m³/ha (błąd przy poziomie istotności $p=0,05$), w tym jodła stanowiła 80 ± 8%, a buk 17 ± 7%. Miąższość martwych drzew stojących wynosiła 33,0 ± 9,3 m³/ha (jodła 80 ± 12%, buk 15 ± 11%). Znacznie większa była miąższość leżących martwych drzew – 72,5 ± 12,6 m³/ha (jodła 80 ± 8%, buk 18 ± 8%). Udział miąższości drzew leżących w poszczególnych czterech stopniach rozkładu drewna [Pyle, Brown 1998] (nie zaliczano do próby kłód z drewnem w piątym stopniu rozkładu ze względu na niemożność określenia ich oryginalnej grubości) był nierówny. Najmniej było drzew z drewnem w 1 stopniu rozkładu (nierozłożonym) – 12 ± 6%, a coraz więcej w kolejnych: w 2 stopniu 20 ± 5%, w 3 stopniu 28 ± 7%, a w 4 stopniu 40 ± 8%.

Materiał i metody

Materiały empiryczne wykorzystane w niniejszej pracy były częścią danych zebranych podczas pomiaru wskazanych wyżej 131 jednostek próbnych. Każda z nich miała postać linii próbnej o długości 50,48 m służącej do pomiaru leżących martwych drzew. Linia była oznaczana w terenie przez rozłożenie taśmy mierniczej. Określano:

- nachylenie terenu (w celu odpowiedniego wydłużenia linii próbnej),
- odległość między środkiem jednostki próbnej a miejscem przecięcia linii próbnej z osią danego leżącego martwego drzewa (kłody lub gałęzi),
- gatunek drzewa,

- stopień rozkładu drewna,
- średnicę danej kłody lub gałęzi w miejscu przecięcia z linią próbną; jako minimalną wartość średnicy przyjęto 7,0 cm w korze, a gdy kłoda (lub gałąź) była bez kory – odpowiednio mniej, w zależności od gatunku drzewa.

Uzyskane wyniki wykorzystano do utworzenia serii nowych danych przedstawiających rezultaty pomiarów z użyciem linii próbnych krótszych niż oryginalne. Przyjęto, że długość linii w kolejnych seriach wynosi 4, 8, ..., 44 m (z interwałem 4 m). Każda seria zawierała dane dla 131 jednostek próbnych. W celu uniknięcia przypadkowego wyniku losowanie dla każdej długości odcinka linii próbnych wykonano 30 razy. W pierwszej serii losowanych danych początek każdego odcinka znajdował się w punkcie początkowym linii próbnej, a w serii trzydziestej koniec każdego odcinka znajdował się w punkcie końcowym tej linii. Początki odcinków linii próbnych dla pozostałych 28 serii rozmieszczono systematycznie, stosując interwał $k=(50,48-L)/29$ (L – długość odcinka linii próbnej).

W badaniach wykorzystano cztery jednostki inwentaryzacyjne. W pierwszej uwzględniono wszystkie fragmenty leżących martwych drzew, które zmierzono na Bukowej Górze. Kolejne trzy jednostki utworzono sztucznie, uwzględniając w przybliżeniu 10, 40 i 70% oryginalnej miąższości leżących martwych drzew. W tym celu ponumerowano kłody, które zaliczono do próby podczas pomiarów 131 jednostek próbnych (z liniami o długości 50,48 m), i stosując liczby losowe, pobrano 10, 40 i 70% kłód. W ten sposób utworzono trzy nowe zbiory danych z kłodami identyfikowanymi według numeru jednostki próbnej i odległości od środka. Zbiór danych dla każdej jednostki inwentaryzacyjnej (sztucznie utworzonej, różniącej się miąższością leżących martwych drzew) uzyskano na podstawie losowania przeprowadzonego tak jak dla pełnego zbioru leżących martwych drzew.

Dla każdej serii danych zawierającej wyniki pomiarów 131 jednostek próbnych obliczono: średnią sumę miąższości leżących martwych drzew (\bar{m}), średnią liczbę kłód zaliczonych do próby (\bar{n}), współczynnik zmienności ($s_{\%}$) i jednostkowy współczynnik zmienności sumy miąższości leżących martwych drzew w jednostce próbnej ($s_{\%1}$). Ten ostatni współczynnik obliczono według koncepcji Bruchwalda [1970]:

$$s_{\%1} = s_{\%} \cdot \sqrt{\bar{u}} \quad [4]$$

W przypadku losowego rozmieszczenia danej cechy na powierzchni lasu wartość $s_{\%1}$ nie zmienia się wraz z wielkością jednostki próbnej. Z tego powodu jest on lepszy niż współczynnik zmienności do określenia zależności i ewentualnych zaburzeń zmienności danej cechy od wielkości jednostki próbnej.

Używając regresji wielorakiej, obliczono zależność $s_{\%1}$ od długości linii próbnej L i średniej miąższości kłód \bar{m} . Zależność ta została wykorzystana do określenia liczby jednostek próbnych danej wielkości w jednostce inwentaryzacyjnej z daną średnią miąższością leżących martwych drzew, niezbędnych do uzyskania założonego błędu oszacowania wartości średniej przy przyjętym poziomie istotności p . Obliczenia wykonano dla czterech poziomów procentowego błędu oszacowania $S_{\%}$: 5, 10, 15 i 20% oraz czterech poziomów miąższości leżących martwych drzew wynoszących 10, 40, 70 i 100% średniej wartości z obiektu badań. Liczbę jednostek próbnych n ustalono na podstawie wzoru:

$$n = \frac{s_{\%}^2 \cdot t_{p,v}^2}{S_{\%}^2} \quad [5]$$

gdzie:

$s_{\%}$ – współczynnik zmienności,

$t_{p,v}$ – kwantyl rozkładu t -Studenta dla poziomu istotności p i liczby stopni swobody $v=n-1$,
 $S_{\%}$ – oczekiwana wartość błędu procentowego przy poziomie istotności p .

W obliczeniach zastosowano metodę kolejnych przybliżeń ze względu na fakt, że wartość $t_{p,v}$ zależy od poszukiwanej liczby jednostek próbnych n .

Dane dotyczące wymaganej liczby jednostek próbnych w połączeniu z danymi dotyczącymi czasu pomiaru jednostki próbnej zostały wykorzystane do obliczenia zależności ogólnego czasu pomiarów (niezbędnych do uzyskania założonego błędu oszacowania wartości średniej miąższości martwych drzew) od wielkości jednostki próbnej (długości linii próbnej) i z uwzględnieniem średniej miąższości martwych drzew w danej jednostce inwentaryzacyjnej. Wyodrębniono cztery grupy czynności, a na podstawie chronometrażu ustalono czas pracy dwuosobowego zespołu w odniesieniu do jednostki próbnej:

- Tp – przygotowanie stanowiska do pracy (rozkładanie sprzętu do pomiarów – 43 s, składowanie sprzętu – 24 s, przygotowanie formularzy – 23 s; łącznie $Tp=90$ s),
- Taz – pomiar azymutu linii próbnej i rozciągnięcie taśmy mierniczej ($Taz=9+1,95 \cdot L$; L =długość linii próbnej w metrach),
- Tm – pomiar kłód ($Tm=7 \cdot u \cdot L$; u =liczba kłód na metr linii próbnej),
- Tf – przejście między jednostkami próbnymi ($Tf=1,5 \cdot b$; b =odległość między środkami jednostek próbnych w metrach).

Obliczenia ogólnego czasu pomiarów wykonano dla jednostki inwentaryzacyjnej o powierzchni 128 ha (czyli takiej jak obiekt Bukowa Góra wykorzystany do zebrania danych empirycznych) oraz 8000 ha (czyli w przybliżeniu takiej jak obręb leśny stanowiący jednostkę opracowania urządzania lasu). Postanowiono, że w przypadku gdy najkrótszy ogólny czas pomiarów nie wystąpi przy długości linii próbnej w zakresie 4-50,48 m, będzie wykonana ekstrapolacja przy przyjęciu długości linii próbnej w zakresie 50,48-150 m.

Wyniki

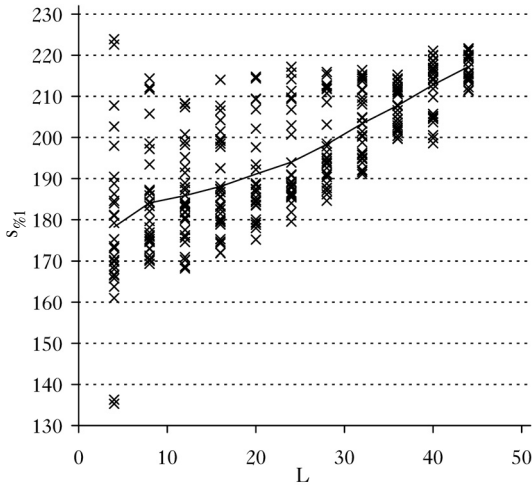
W jednostce inwentaryzacyjnej, w której było średnio 72,5 m³/ha leżących martwych drzew (czyli w takiej jak w drzewostanach Bukowej Góry w roku 2016), średnia wartość jednostkowego współczynnika zmienności sumy miąższości leżących martwych drzew $s_{\%1}$ zwiększała się wraz z długością linii próbnej (ryc. 2). W jednostce, w której średnia miąższość kłód była znacznie mniejsza i wynosiła 7,3 m³/ha, wartość $s_{\%1}$ zwiększała się wraz z długością linii próbnej tylko w przedziale 4-16 m, a w przedziale 16-44 m była na prawie jednakowym poziomie (ryc. 3). W jednostce inwentaryzacyjnej, w której miąższość kłód wynosiła średnio 29,1 m³/ha, jednostkowy współczynnik zmienności sumy miąższości leżących martwych drzew zwiększał się nieznacznie wraz z długością linii próbnej. Podobnie było w jednostce inwentaryzacyjnej, w której miąższość kłód wynosiła 51,0 m³/ha, choć zmiana wartości $s_{\%1}$ była znaczniejsza. Zależność wartości jednostkowego współczynnika zmienności sumy miąższości leżących martwych drzew od długości linii próbnej L [m] i miąższości kłód na jednostce powierzchni m [m³/ha] przyjęła postać:

$$s_{\%1} = 170,4 + 0,266 \cdot L - 0,0003 \cdot m^2 + 0,0001 \cdot L \cdot m^2$$

gdzie:

liczba prób $n=1600$, współczynnik korelacji $R=0,489$, korelacja istotna przy $p<0,001$.

Na tej podstawie można było obliczyć wyrównaną zależność współczynnika zmienności miąższości martwych drzew leżących na jednostce powierzchni od długości linii próbnej (ryc. 4). Im mniejsza była średnia miąższość martwych drzew, tym – przy danej długości linii próbnej – większy był

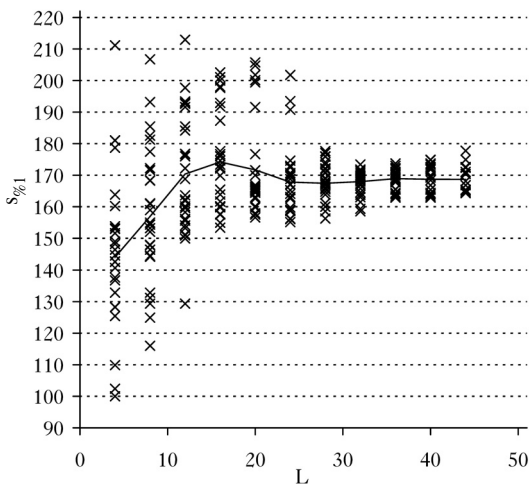


Ryc. 2.

Zależność jednostkowego współczynnika zmienności miąższości leżących martwych drzew ($s_{%1}$ [%]) od długości linii w jednostce próbnej (L [m]) w jednostce inwentaryzacyjnej, w której miąższość tych drzew wynosi $72,5 \text{ m}^3/\text{ha}$

Relationship between the one-tree-plot coefficient of variation of the coarse woody debris volume ($s_{%1}$ [%]) and the sampling line length (L [m]) in the inventory unit with the average CWD volume of $72,5 \text{ m}^3/\text{ha}$

krzyżykami oznaczono wyniki obliczeń uzyskanych z 30 losowań z użyciem 131 jednostek próbnych; wartości średnie połączono linią
the results of 30 inventories using 131 sample units are marked with crosses; mean values are connected by a line



Ryc. 3.

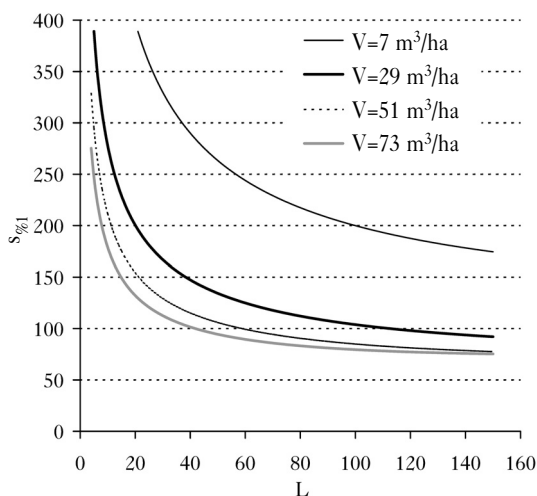
Zależność jednostkowego współczynnika zmienności miąższości leżących martwych drzew ($s_{%1}$ [%]) od długości linii w jednostce próbnej (L [m]) w jednostce inwentaryzacyjnej, w której miąższość tych drzew wynosi $7,3 \text{ m}^3/\text{ha}$

Relationship between the one-tree-plot coefficient of variation of the coarse woody debris volume ($s_{%1}$ [%]) and the sampling line length (L [m]) in the inventory unit with the average CWD volume of $7,3 \text{ m}^3/\text{ha}$

krzyżykami oznaczono wyniki obliczeń uzyskanych z 30 losowań z użyciem 131 jednostek próbnych; wartości średnie połączono linią
the results of 30 inventories using 131 sample units are marked with crosses; mean values are connected by a line

współczynnik zmienności. Jego wartość zmniejszała się wraz ze zwiększaniem długości linii próbnych. Jednak w przypadku linii najdłuższych zmiana ta była niewielka, co wyraźnie wystąpiło w przypadku obiektu o dużej średniej miąższości martwych drzew na jednostce powierzchni.

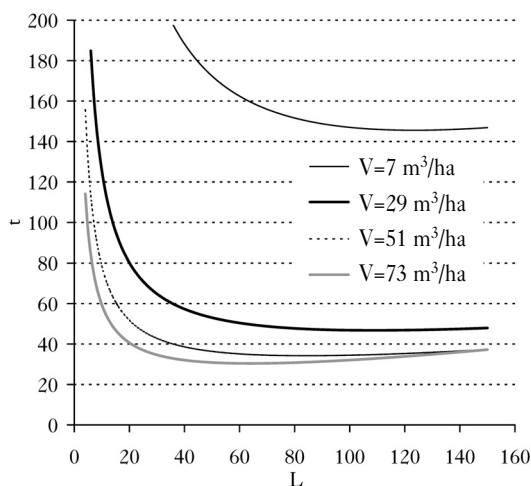
Łączny czas pomiarów (obejmujący pomiar jednostek próbnych i przemieszczenie się między nimi) potrzebnych do osiągnięcia założonego błędu procentowego oszacowania średniej miąższości leżących martwych drzew w lesie o powierzchni 128 ha zmniejszał się do pewnego punktu, a dalej zwiększał się wraz ze zwiększaniem długości linii jednostki próbnej (ryc. 5). Odzwierciedla to oddziaływanie dwóch przeciwstawnych zjawisk pozostających w związku ze zwiększaniem się wielkości (długości linii) jednostek próbnych: (1) zmniejszania się udziału czasu nieproduktywnych prac oraz (2) zwiększania się czasu prac bezpośrednio wpływających na błąd oszacowania miąższości martwych drzew. To drugie zjawisko wiązało się ze zwiększaniem – wraz z długością linii jednostki próbnej – wartości jednostkowego współczynnika (ryc. 2), a stąd ze zwiększaniem wielkości próby (czyli łącznej długości linii jednostek próbnych) niezbędnej do osiągnięcia założonego błędu procentowego oszacowania średniej miąższości leżących martwych drzew. W przypadku gdy średnia miąższość leżących martwych drzew wynosiła $72,5 \text{ m}^3/\text{ha}$,



Ryc. 4.

Zależność współczynnika zmienności miąższości leżących martwych drzew ($s_{\%}$ [%]) od długości linii w jednostce próbnej (L [m]) średnich zasobów martwych drzew

Relationship between the coefficient of variation of the CWD volume ($s_{\%}$ [%]) and the sampling line length (L [m]), and average resources of CWD



Ryc. 5.

Zależność łącznego czasu (t [godz.]) pomiarów jednostek próbnych z daną długością linii (L [m]) i takiej ich liczby, że uzyskuje się błąd procentowy oszacowania wartości średniej miąższości leżących martwych drzew $S_{\%} = \pm 10\%$ (przy poziomie istotności $p=0,05$) w jednostce inwentaryzacyjnej o powierzchni 128 ha

Relationship between a given sampling line length (L [m]) and the total time of measurements (t [hours]) of such a number of sample units that would guarantee obtaining the assumed per cent standard error of the coarse woody debris volume estimation $S_{\%} = \pm 10\%$ (at $p=0.05$) in the inventory unit with an area of 128 ha

optymalna długość linii próbnej wyniosła: 123 m (miąższość martwych drzew leżących $7 \text{ m}^3/\text{ha}$), 109 m ($29 \text{ m}^3/\text{ha}$), 84 m ($51 \text{ m}^3/\text{ha}$) i 64 m ($73 \text{ m}^3/\text{ha}$)

optimal sampling line length was: 123 m (CWD volume $7 \text{ m}^3/\text{ha}$), 109 m ($29 \text{ m}^3/\text{ha}$), 84 m ($51 \text{ m}^3/\text{ha}$), and 64 m ($73 \text{ m}^3/\text{ha}$)

a oczekiwany błąd oszacowania wartości średniej był równy $S_{\%} = \pm 10\%$ (przy $p=0,05$), minimalny czas pomiarów wystąpił, gdy linia w jednostce próbnej miała długość 64 m. Ten wynik uzyskano dzięki ekstrapolacji zależności od długości linii w jednostce próbnej czasochłonności poszczególnych czynności pomiarowych i wartości współczynnika zmienności miąższości leżących martwych drzew na jednostce powierzchni. Podobnie uzyskano wyniki dla jednostek inwentaryzacyjnych o innej średniej miąższości martwych drzew leżących. Im mniejsza była ta miąższość, tym dłuższa była linia jednostki próbnej, przy której stosowaniu łączny czas pomiarów był najkrótszy.

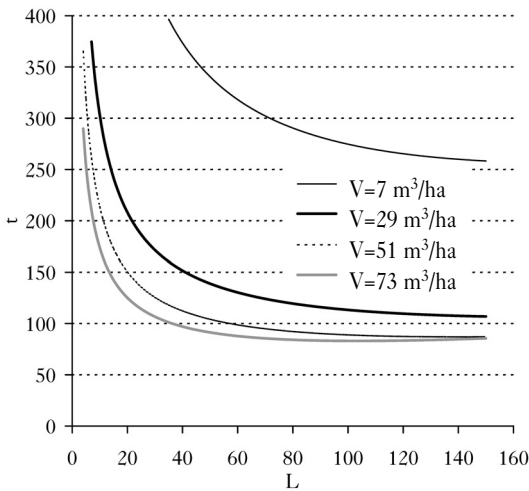
W przypadku jednostki inwentaryzacyjnej o powierzchni 8000 ha, gdy oczekiwany błąd oszacowania wartości średniej był równy $S_{\%} = \pm 10\%$, tylko w przypadku jednostek ze średnią miąższością martwych drzew 51 lub $72,5 \text{ m}^3/\text{ha}$ minimalny czas pomiarów wystąpił, gdy długość linii jednostki próbnej była mniejsza niż 150 m (ryc. 6).

Ogólny czas pomiarów takiej liczby jednostek próbnych, która zapewniłaby osiągnięcie założonego błędu procentowego oszacowania wartości średniej, zwiększał się wraz ze zmniejszaniem średniej miąższości leżących martwych drzew (ryc. 5 i 6).

Duża zmienność miąższości leżących martwych drzew powodowała, że liczba jednostek próbnych, które należałoby zmierzyć, aby osiągnąć założony błąd procentowy oszacowania wartości średniej, była duża – zwłaszcza w jednostce inwentaryzacyjnej, w której średnia miąższość martwych drzew była niewielka (tab. 1). Wprawdzie z powodu małej liczby leżących martwych drzew przypadających na dany odcinek linii próbnej czas pomiaru jednostki próbnej był niewielki, ale duża liczba tych jednostek powodowała, że łączny czas pomiarów był dłuższy niż w jednostce inwentaryzacyjnej z większym zasobem martwych drzew (tab. 2). Jeżeli długość linii w jednostce próbnej wynosiła 50,48 m, a średnia miąższość leżących martwych drzew 7,3 m³/ha i założono, że błąd oszacowania tej wartości średniej nie przekroczy $S_{\%}=\pm 10\%$ (przy $p=0,05$), to w jednostce inwentaryzacyjnej o powierzchni 8000 ha ogólny czas pomiarów był 1,9-krotnie większy niż w jednostce o powierzchni 128 ha. W innej sytuacji, gdy średnia miąższość leżących martwych drzew wynosiła 72,5 m³/ha i założono, że błąd oszacowania tej średniej nie przekroczy $S_{\%}=\pm 15\%$, relacja ogólnego czasu pomiarów pomiędzy tymi dwoma obiektami wynosiła już 3,4:1.

Dyskusja

Badania wykazały, że – przy pomiarze określonej liczby jednostek próbnych danej wielkości – im większa była średnia miąższość leżących martwych drzew, tym mniejszy był błąd procentowy oszacowania wielkości ich zasobów. Ma to znaczenie praktyczne. Przyjmując, że obiekt,



Ryc. 6.

Zależność łącznego czasu pomiarów jednostek próbnych (t [godz.]) z daną długością linii (L [m]) i takiej ich liczby, że uzyskuje się błąd procentowy oszacowania wartości średniej miąższości leżących martwych drzew $S_{\%}=\pm 10\%$ (przy poziomie istotności $p=0,05$) w jednostce inwentaryzacyjnej o powierzchni 8000 ha

Relationship between a given sampling line length (L [m]) and the total time of measurements (t [hours]) of such a number of sample units that would guarantee obtaining the assumed per cent standard error of the coarse woody debris volume estimation $S_{\%}=\pm 10\%$ (at $p=0.05$) in the inventory unit with an area of 8000 ha

optymalna długość linii próbnej wyniosła 140 m (miąższość martwych drzew leżących 51 m³/ha) i 104 m (73 m³/ha)
optimal sampling line length was: 140 m (CWD volume 51 m³/ha), and 104 m (73 m³/ha)

Tabela 1.

Liczba jednostek próbnych z linią o długości 50,48 m, których pomiar zapewni osiągnięcie założonego błędu procentowego oszacowania (przy $p=0,05$) średniej miąższości leżących martwych drzew ($S_{\%}$) dla czterech jednostek inwentaryzacyjnych różniących się miąższością leżących martwych drzew

Number of sample units with a 50.48 meter-long line, whose measurement ensures the achievement of the assumed standard error (at $p=0.05$) of the average CWD volume estimation ($S_{\%}$) for four inventory units with different CWD volume

$S_{\%}$	7 m ³ /ha	29 m ³ /ha	51 m ³ /ha	73 m ³ /ha
5%	10575	2755	1718	1365
10%	2646	691	432	344
15%	1178	309	193	154
20%	664	175	110	88

Tabela 2.

Łączny czas pomiaru [godz.] przez dwuosobowy zespół jednostek próbnych z linią o długości 50,48 m, których pomiar zapewni osiągnięcie założonego błędu procentowego oszacowania (przy $p=0,05$) średniej miąższości leżących martwych drzew ($S_{\%}$) dla czterech jednostek inwentaryzacyjnych różniących się miąższością leżących martwych drzew

Total time [hours] of measurements on sample units with a 50.48 meter-long line carried out by a two-person team that ensures the achievement of the assumed standard error (at $p=0.05$) of the average CWD volume estimation ($S_{\%}$) for four inventory units with different CWD volume

$S_{\%}$	7 m ³ /ha	29 m ³ /ha	51 m ³ /ha	73 m ³ /ha
F=128 ha				
10%	191,7	58,1	39,6	33,5
15%	90,7	28,7	19,9	16,9
20%	54,2	17,8	12,5	10,8
F=8000 ha				
5%	1052,5	377,9	273,1	235,8
10%	359,2	143,7	107,3	93,9
15%	202,5	86,0	65,1	57,3

w którym miąższość leżących martwych drzew wynosi 29 m³/ha, reprezentuje sytuację drzewostanów w przeciętnym polskim parku narodowym, błąd oszacowania wielkości tych zasobów wyniósłby $S_{\%}=\pm 15\%$ (przy $p=0,05$), gdyby zmierzono 309 jednostek próbnych (każda z linią o długości 50,48 m). Ponieważ przeciętnie liczba powierzchni próbnych (na ogół stałych) mierzonych w ramach sporządzania planu ochrony parku narodowego jest większa i wynosi ponad 400, to można w przybliżeniu przyjąć, że miąższość martwych drzew (łącznie ze stojącymi) może być oceniona z błędem $S_{\%}=\pm 10\%$.

Inaczej wygląda sytuacja w przypadku lasów gospodarczych. Przyjmując, że miąższość leżących martwych drzew wynosi 2,7 m³/ha i zmierzono 287 jednostek próbnych (co dziesiątą wykorzystaną do określenia zasobów drzew żywych w nadleśnictwie – zgodnie z Instrukcją... [2012]), to błąd oszacowania wartości średniej wyniósłby $S_{\%}=\pm 50\%$. Wskazuje to, że wykorzystywanie tak małej liczby jednostek próbnych jest niewłaściwe, jeżeli chce się uzyskać oszacowanie zasobów martwych drzew z dokładnością odpowiednią dla potrzeb interpretacji przyrodniczej i dla podejmowania decyzji gospodarczych. Innym zagadnieniem jest to, czy powinno się oczekiwać tej samej wartości procentowego błędu oszacowania, gdy wartość średnia jest niewielka. Praktycznym rozwiązaniem byłoby wskazanie oczekiwanej wartości błędów dla przedziałów miąższości martwych drzew – np. dla średniej miąższości 2-5 m³/ha $S_{\%}=\pm 20\%$, dla 5-20 m³/ha $S_{\%}=\pm 15\%$ itd.

Wykorzystanie wyników niniejszych badań w inwentaryzacji zasobów martwych drzew leżących wymaga wskazania: (1) jaka powinna być długość linii w jednostce próbnej oraz (2) czy powinna być ona zróżnicowana w zależności od wieku drzewostanów. W lesie, w którym średnia miąższość leżących martwych drzew była duża (umownie powyżej około 30 m³/ha), łączny czas pomiarów był najkorzystniejszy, gdy długość linii w jednostce próbnej mieściła się w granicach około 60-150 m. Dotyczyło to zarówno obiektów małych (w niniejszych badaniach o powierzchni 128 ha), jak i dużych (takich jak obręb leśny o wielkości 8000 ha). W przypadku niewielkiej średniej miąższości martwych drzew leżących (w niniejszych badaniach 7 m³/ha), ze względu na łączny czas pomiarów, najkorzystniejsze były jednostki próbne z liniami o długości powyżej 120-150 m. Tak więc przy obecnych niewielkich zasobach martwych drzew leżących w lasach gospodarczych w Polsce odpowiednie byłoby stosowanie jednostek próbnych z liniami o długości 150-200 m.

Badania cytowane przez Bujoczka i in. [2017] wskazują, że niewłaściwe jest różnicowanie wraz z wiekiem drzewostanów wielkości jednostek próbnych do pomiaru zasobów leżących martwych drzew. Wielkość tych zasobów nie zmieniała się regularnie wraz z wiekiem drzewostanów, a obiekty leśne różniły się między sobą pod tym względem. Oznacza to, że właściwe byłoby stosowanie jednakowej wielkości jednostki próbnej (długości linii próbnej) we wszystkich drzewostanach mierzonego obrębu leśnego czy nadleśnictwa.

Wnioski

- ✦ W jednostkach inwentaryzacyjnych, w których średnia miąższość leżących martwych drzew mieściła się w granicach od 7,3 do 72,5 m³/ha, w zakresie objętym badaniami (4-50,48 m z ekstrapolacją do 150 m) istniała optymalna (ze względu na najkrótszy łączny czas pomiarów potrzebnych do osiągnięcia założonej dokładności oszacowania średniej miąższości tych drzew) długość linii jednostki próbnej. W lasach o dość dużej średniej miąższości martwych drzew leżących (umownie powyżej 30 m³/ha, czyli takiej jak w wielu parkach narodowych czy rezerwach przyrody) odpowiednia byłaby ze względów praktycznych długość linii w jednostce próbnej w zakresie 60-150 m. W lasach o niewielkiej miąższości tych drzew – takiej jak obecnie w lasach gospodarczych – linia w jednostce próbnej powinna mieć długość 150-200 m.
- ✦ Przy obecnych zasobach martwych drzew w polskich lasach gospodarczych zmienność miąższości leżących martwych drzew w jednostce próbnej jest bardzo duża, a przez to obecnie stosowana liczba tych jednostek jest za mała, aby uzyskać oszacowanie zasobów z dokładnością odpowiednią dla potrzeb interpretacji przyrodniczej i dla podejmowania decyzji gospodarczych. Sugeruje się, aby liczba jednostek próbnych, na których – w ramach sporządzania planu urządzenia lasu – mierzy się zasoby martwych drzew, była taka sama jak liczba powierzchni próbnych do pomiaru zasobów żywych drzew.

Podziękowania

Dziękujemy Annie Gaździe, Radosławowi Kanabusowi, Joannie Mielczarczyk, Emilii Wysockiej-Fijorek oraz Robertowi Zawadce za pomoc w zbieraniu danych terenowych.

Literatura

- Ammer U. 1991. Konsequenzen aus den Ergebnissen der Totholzforchung für die forstliche Praxis. Forstwissenschaftliches Centrblatt 110: 149-157.
- Brown J. K. 1974. Handbook for inventorying downed woody material. USDA Forest Service General Technical Report INT-16, 1974. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah 84401.
- Bruchwald A. 1970. Dokładność określania pierśnicowej powierzchni przekroju drzewostanu w metodach pomiarowo-szacunkowych. Sylwan 104 (3): 15-31.
- Bujoczek L. 2015. Problematyka pomiarów oraz określania miąższości martwego drewna na kołowych powierzchniach próbnych. Sylwan 159 (10): 795-803.
- Bujoczek L., Bujoczek M., Banaś J., Zięba S. 2017. Inwentaryzacja martwego drewna statystyczną metodą reprezentacyjną z zastosowaniem warstw gatunkowo-wiekowych. Sylwan 161 (2): 114-123.
- Canfield R. H. 1941. Application of the line interception method in sampling range vegetation. Journal of Forestry 39: 388-394.
- Gazda A., Miścicki S. 2016. Prognoza rozwoju drzewostanów lasu naturalnego z wykorzystaniem modelu według klas wymiarów. Sylwan 160 (3): 207-218.
- Instrukcja urządzania lasu 2012. PGL LP, CILP, Warszawa.
- Jaworski A., Kołodziej Z., Łapka M. 2007. Mortality, recruitment, and increment of trees in the *Fagus-Abies-Picea* stands of a primeval character in the lower mountain zone. Dendrobiology 58: 15-26.
- Kaiser L. 1983. Unbiased estimation in line-intercept sampling. Biometrics 39: 965-976.
- Kangas A. 2006. Sampling rare populations. W: Kangas A., Maltamo M. [red.]. Forest inventory; methodology and applications. Springer, Dordrecht. 119-139.

- Leibundgut H. 1982. Europäische Urwälder der Bergstufe. Haupt, Bern-Stuttgart.
- Marshall P. L., Davis G., Le May V. M. 2000. Using line intersect sampling for coarse woody debris. Forest Research Technical Report, TR-003, Ecology, Vancouver Forest Region, Nanaimo.
- Pyle C., Brown M. M. 1988. A rapid system of decay classification for hardwood logs of the eastern deciduous forest floor. *The Journal of the Torrey Botanical Society* 125 (3): 237-245.
- Ritter T., Saborowski J. 2014. Efficient integration of a deadwood inventory into an existing forest inventory carried out as two-phase sampling for stratification. *Forestry* 87: 571-581.
- Siitonen J. 2001. Forest management, coarse woody debris and saproxylic organisms: Fennoscandian boreal forests as an example. *Ecological Bulletins* 49: 11-41.
- Skwarek K., Bijak S. 2015. Zasoby martwego drewna w lasach miejskich Warszawy. *Leś. Pr. Bad.* 76 (4): 322-330.
- de Vries P. G. 1973. A general theory on line intersect sampling with application to logging residue inventory. *Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen, Nederland.* 73-11.
- van Wagner C. E. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. *Forest Science* 14: 20-26.
- van Wagner C. E., Wilson A. L. 1976. Diameter measurement in the line intersect method. *Forest Science* 22: 230-232.
- Warren W. G., Olsen P. F. 1964. A line intersect technique for assessing logging waste. *Forest Science* 10: 267-276.
- Wolski J. 2002. Metoda pomiarów leżącego martwego drewna w lesie – założenia teoretyczne i przebieg prac terenowych. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa A 2 (932):* 27-45.
- Zielony R., Kliczkowska A. 2012. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010. CILP, Warszawa.