

Dorota Farfal<sup>1</sup>

## Żywotność korzeni w wierzchnich warstwach gleby w drzewostanach sosnowych w 10 lat po trzebieży

Root vitality in the upper soil of pine stands ten years after thinning

**Abstract.** The vitality of roots in the soil at depths of 0–5 cm and 5–15 cm was determined for pine stands which had been thinned ten years earlier using various different methods and means of timber harvest. The parameters adopted to assess root vitality were: total root density (g/100 cm<sup>3</sup> of soil) and fractional root density divided into live and dead root diameters for individual tree species. Overall, live roots were most prevalent (88–96%) in the investigated stands. Whereas, the total density of dead roots was 0.033–0.111 g/100 cm<sup>3</sup> of soil at 0–5 cm depth and 0.039–0.058 g/100 cm<sup>3</sup> of the soil at 5–15 cm depth. The opening of the canopy in older stands caused more-intense development of fine roots in the plants of the forest floor (0.411–0.567 g/100 cm<sup>3</sup> of soil) compared to the fine roots of pine trees (0.145–0.177 g/100 cm<sup>3</sup> of soil), especially at 0–5 cm soil depth. The studies did not reveal significant differences in root development on the old skidding roads due to variation in the methods of timber harvesting during thinning operations ten years earlier nor when compared with the control plots.

**Key words:** fine root, harvesting, Scots pine, *Pinus sylvestris* L.

### 1. Wstęp

Podczas wykonywania trzebieży, niezależnie od zastosowanego procesu pozyskania drewna, powstają uszkodzenia drzew i gleby. Zmiany struktury wierzchnich warstw gleby, a tym samym warunków rozwoju korzeni, zachodzą przede wszystkim w wyniku nacisku statycznego powyżej 50 kPa (Wästerlund 1992). Wiele innowacji konstrukcyjnych maszyn wykorzystywanych w pracach trzebieżowych, np. harwesterów, dotyczy ograniczenia ich nacisku statycznego (Matthies 1997). Mimo że gleba zostaje najbardziej uszkodzona podczas pierwszego przejazdu maszyn, to stopień uszkodzenia korzeni drzew leśnych zależy także od typu gleby, szerokości szlaku zrywkowego, warunków pogodowych oraz liczby przejazdów maszyn (Suwała et al. 1996). W wierzchnich warstwach gleby (0–15 cm) rozwijają się przede wszystkim korzenie drobne (średnica 2 mm), które odgrywają podstawową rolę w procesie odżywiania drzew. Uszkodzenie korzeni drobnych powoduje za-

kłócenie gospodarki wodnej, a w konsekwencji osłabienie zdolności regeneracyjnych drzew (Schütt 1981). Dotychczas większość badań dotyczących oceny uszkodzeń środowiska leśnego podczas trzebieży prowadzono w drzewostanach świerkowych (Isomäki et Kallio 1974; Bucht 1977; Kremer et Matthies 1997), natomiast rozwój drzewostanów sosnowych w kolejnych latach po trzebieży jest zagadnieniem wciąż słabo poznanym.

Celem prezentowanych badań było określenie żywotności korzeni w warstwie gleby 0–15 cm w drzewostanach sosnowych 10 lat po wykonaniu trzebieży.

### 2. Metodyka

Badania przeprowadzono w latach 2003–2005 w ramach realizacji II etapu projektu „Wpływ techniki i technologii pozyskania drewna na wybrane elementy środowiska leśnego” (Suwała et al. 2006). Powierzchnie badawcze były usytuowane w Nadleśnictwie Dąbrowa,

<sup>1</sup> Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Ekologii Lasu, Sękocin Las, 05–090 Raszyn, Fax. +48 227150408, e-mail: farfald@ibles.waw.pl

**Tabela 1. Charakterystyka badanych drzewostanów sosnowych w Nadleśnictwie Dąbrowa**

Table 1. Characteristic of the examined pine stands in the Dąbrowa Forest District

Powierzchnia badawcza Study site	Oddział Compartment	STL Site type*	Typ gleby Soil type	Wiek Stand age	Pierśnica DBH (cm)	Wysokość Height (m)
Jeżewnica	55i/j/k	BMśw / Bśw	<b>rdzawa</b> rusty soil	78	26	22
Taszewo	146i/j	BMśw / Bśw	<b>rdzawa</b> rusty soil	102	29	21
Bąkowo	257a	Bśw	<b>rdzawa</b> rusty soil	73	19	16

\* Bśw – fresh coniferous forest, BMśw – fresh mixed coniferous forest

w trzech drzewostanach sosnowych (Jeżewnica, Bąkowo, Taszewo), w których trzebieże zostały przeprowadzone w latach 1994–1995. Charakterystyka wybranych drzewostanów została przedstawiona w tabeli 1.

W każdym drzewostanie analizowano wpływ dwóch metod pozyskania drewna na żywotność korzeni w wierzchnich warstwach gleb. Założenia metodyczne przeprowadzonych trzebieży uwzględniały zarówno najczęściej stosowane warianty pozyskania oraz nowe rozwiązania w tym zakresie (Suwała 1995). Pozyskanie drewna metodą całej strzały obejmowało trzy warianty: C-PK (ścinka pilarką, zrywka konna), C-PS (ścinka pilarką, zrywka skiderem), C-HS (ścinka harwesterem – nacisk statyczny ok. 60 kPa, zrywka skiderem), natomiast pozyskanie metodą krótkiego drewna (sortymentowa) obejmowało dwa warianty: K-PF (pilarka i forwarder – nacisk statyczny ok. 80 kPa) oraz K-HF (harwester i forwarder).

Próbki gleby z korzeniami pobrano w koleinach na starych szlakach zrywkowych. W wybranych koleinach dla każdego wariantu pozyskania drewna wyznaczono transekt o długości 30 m i następnie co 2–3 m (odległość związana z położeniem drzew w stosunku do szlaku zrywkowego) pobrano próbki gleby za pomocą próbnika o średnicy 8 cm z głębokości 0–15 cm (łącznie 140 próbek dla wszystkich wariantów pozyskania drewna). Jednocześnie poza powierzchnią manipulacyjną w każdym drzewostanie wyznaczono transekt porównawczy, wzdłuż którego pobrano według tej samej metodyki 10 próbek gleby z głębokości 0–15 cm (łącznie 30 próbek gleby). Prace terenowe przeprowadzono w terminie jesiennym (wrzesień) w trzech kolejnych sezonach badawczych.

W warunkach laboratoryjnych próbki gleby zostały podzielone na dwie warstwy 0–5 cm i 5–15 cm. Następnie, z każdej warstwy gleby, oczyszczone fragmenty korzeni posegregowano według średnicy w grubszym końcu do 4 frakcji grubości (I – średnica 2 mm, II – 2–5 mm, III – 5–10 mm, IV – 10 mm). Na podstawie analizy morfologii korzeni pod mikroskopem stereoskopowym wyróżniono: żywe korzenie sosny, żywe korze-

nie innych gatunków (głównie roślinności runa leśnego) oraz korzenie martwe (Persson 1983; Bauhus, Bartsch 1996; Bakker 1999). Ocenione korzenie wysuszone w temperaturze 105°C, w czasie odpowiednim do ich średnicy (Böhm 1985).

Sucha masa korzeni (g) została przeliczona na jednostkę objętości gleby (100 cm<sup>3</sup>). Żywotność korzeni w wierzchnich warstwach gleby (0–5 cm, 5–15 cm) w drzewostanach po trzebieży została scharakteryzowana poprzez całkowitą gęstość korzeni (g/100 cm<sup>3</sup> gleby) oraz gęstość korzeni z podziałem na 4 frakcje grubości, wyróżniając w nich żywe korzenie sosny, żywe korzenie innych gatunków i korzenie martwe.

Różnice gęstości korzeni w wierzchnich warstwach gleby pomiędzy badanymi drzewostanami oraz w zależności od wariantu pozyskania drewna w trzebieżach testowano wykorzystując test Kruskal-Wallis'a.

### 3. Wyniki

W badanych drzewostanach ogólna gęstość korzeni wynosiła 0,604–0,923 g/100 cm<sup>3</sup> gleby w warstwie gleby 0–5 cm (tab. 2). Najwięcej korzeni stwierdzono w najstarszym (102 lata) drzewostanie w Taszewie, natomiast najmniej w najmłodszym (73 lata) w Bąkowie. We wszystkich drzewostanach dominowały żywe korzenie (88–96%). Ponadto w Bąkowie wśród żywych korzeni stwierdzono najwięcej korzeni sosny (0,391 g/100 cm<sup>3</sup> gleby), a najmniej korzeni innych gatunków (0,169 g/100 cm<sup>3</sup> gleby). W Jeżewnicy była natomiast sytuacja odwrotna, tzn. rozwój korzeni sosny był najslabszy (0,206 g/100 cm<sup>3</sup> gleby), a wzrost korzeni innych gatunków najbardziej intensywny (0,639 g/100 cm<sup>3</sup> gleby). Różnice gęstości żywych korzeni w I warstwie gleby było statystycznie istotne pomiędzy drzewostanami w Bąkowie i Jeżewnicy:  $H=29,1899$ ;  $p=0,0000$  dla żywych korzeni sosny,  $H=35,4986$ ;  $p=0,0000$  dla żywych korzeni innych gatunków; oraz pomiędzy drzewostanami w Bąkowie i Taszewie:  $H=14,3983$ ;  $p=0,0001$  dla żywych korzeni sos-

**Tabela 2. Całkowita gęstość korzeni (G) w wybranych drzewostanach sosnowych (g/100 cm<sup>3</sup> gleby)**Table 2. Total root density (G) in the examined pine stands (g/100 cm<sup>3</sup> soil)

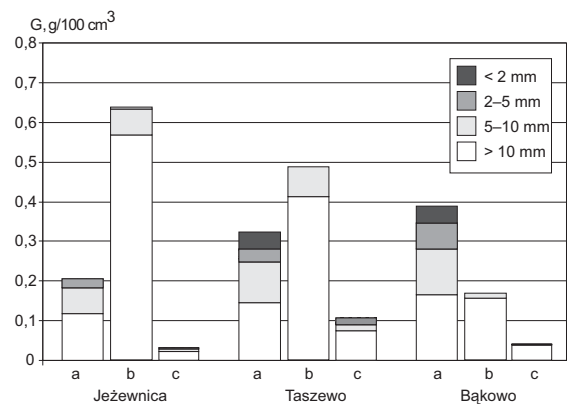
Powierzchnia badawcza Study site	G						
	sosna żywa live pine		inne żywe other live species		martwe dead		ogółem total
	g/100 cm <sup>3</sup> gleby	%	g/100 cm <sup>3</sup> gleby	%	g/100 cm <sup>3</sup> gleby	%	g/100 cm <sup>3</sup> gleby
	<b>warstwa gleby 0–5 cm / soil layer 0–5 cm</b>						
Jeżewnica	0,206	24	0,639	72	0,033	4	0,878
Taszewo	0,326	35	0,486	53	0,111	12	0,923
Bąkowo	0,391	65	0,169	28	0,044	7	0,604
	<b>warstwa gleby 5–15 cm / soil layer 5–15 cm</b>						
Jeżewnica	0,144	45	0,085	38	0,039	17	0,268
Taszewo	0,194	50	0,079	29	0,057	21	0,330
Bąkowo	0,209	64	0,067	18	0,058	18	0,334

ny,  $H=27,1154$ ;  $p=0,0000$  dla żywych korzeni innych gatunków.

Szczegółowa analiza gęstości żywych korzeni sosny w warstwie gleby 0–5 cm wykazała, że we wszystkich drzewostanach najliczniej występowały korzenie drobne zaliczone do I frakcji grubości (43–57%). Ich gęstość była w granicach 0,117–0,166 g/100 cm<sup>3</sup> gleby, a istotne różnice wystąpiły pomiędzy Bąkowem i Jeżewnicą ( $H=17,4319$ ;  $p=0,0000$ ) oraz Bąkowem i Taszewem ( $H=8,8222$   $p=0,003$ ). Gęstość korzeni II frakcji grubości była w granicach 0,066–0,114 g/100 cm<sup>3</sup> gleby, a istotne zróżnicowanie wykazano tylko pomiędzy Bąkowem i Jeżewnicą ( $H=11,1842$ ;  $p=0,0008$ ). Ocena gęstości pozostałych dwóch frakcji grubości korzeni sosny nie wykazała istotnego zróżnicowania pomiędzy badanymi drzewostanami, niemniej jednak najwięcej korzeni o średnicy powyżej 5 mm (III frakcja 0,065 g/100 cm<sup>3</sup> gleby; IV frakcja 0,043 g/100 cm<sup>3</sup> gleby) stwierdzono w drzewostanie w Bąkowie (ryc. 1).

Ocena gęstości żywych korzeni innych gatunków, czyli gatunków runa leśnego, wykazała zdecydowaną przewagę korzeni drobnych (85–92%) w warstwie gleby 0–5 cm (ryc. 1). Zróżnicowanie tego parametru było istotne pomiędzy drzewostanem w Bąkowie i Jeżewnicy ( $H=32,9699$ ;  $p=0,0000$ ) oraz w Bąkowie i Taszewie ( $H=27,5795$ ;  $p=0,0000$ ).

Udział martwych korzeni w badanych próbkach gleby był niewielki, w granicach 4–12%. Największą gęstością korzeni martwych wyróżniała się powierzchnia w Taszewie (0,111 g/100 cm<sup>3</sup> gleby), natomiast najmniejszą – powierzchnia w Jeżewnicy (0,033 g/100 cm<sup>3</sup> gleby; tab. 2). Różnice gęstości korzeni martwych były istotne zarówno pomiędzy Bąkowem i Jeżewnicą ( $H=7,8382$ ;  $p=0,0051$ ), jak i pomiędzy Bąkowem i Taszewem ( $H=8,2695$ ;  $p=0,004$ ), a również pomiędzy Jeżewnicą i Taszewem ( $H=26,8135$ ;  $p=0,000$ ). We wszystkich drzewostanach wśród korzeni martwych największy był udział korzeni drobnych (69–93%), których gę-



**Rycina 1. Gęstość korzeni (g/100 cm<sup>3</sup> gleby) w poszczególnych frakcjach grubości w warstwie gleby 0–5 cm: a – korzenie sosny, b – korzenie innych gatunków, c – korzenie martwe**

Figure 1. Root density of pine (g/100 cm<sup>3</sup> of soil) dependent on root size fraction (soil layer 0–5 cm): a – pine roots, b – roots of other species, c – dead roots

tość zawierała się w granicach 0,023–0,077 g/100 cm<sup>3</sup> gleby (ryc. 1). Istotne różnice gęstości martwych korzeni drobnych stwierdzono pomiędzy Jeżewnicą i Taszewem ( $H=27,1386$ ;  $p=0,0000$ ) oraz pomiędzy Jeżewnicą i Bąkowem ( $H=10,1003$ ;  $p=0,0015$ ). Korzenie zaliczone do II i III frakcji grubości występowały nielicznie przede wszystkim w Taszewie, ich gęstość wynosiła odpowiednio: 0,016 g/100 cm<sup>3</sup> gleby i 0,018 g/100 cm<sup>3</sup> gleby.

Wraz ze wzrostem głębokości w glebie (warstwa 5–15 cm) stwierdzono spadek ogólnej gęstości korzeni (tab. 2). Zmniejszeniu uległa przede wszystkim gęstość żywych korzeni innych gatunków (0,067–0,085 g/100 cm<sup>3</sup> gleby), ale również gęstość żywych korzeni sosny (0,144–0,209 g/100 cm<sup>3</sup> gleby). W badaniach nie wykazano istotnego zróżnicowania tych parametrów pomiędzy powierzchniami. We wszystkich drzewostanach stwierdzono natomiast wzrost udziału korzeni martwych

**Tabela 3. Całkowita gęstość korzeni  $G$  (g/100 cm<sup>3</sup> gleby) w wierzchnich warstwach gleby w zależności od wariantu pozyskania drewna w drzewostanie sosnowym w 10 lat po trzebieży**Table 3. Total root density  $G$  (g/100 cm<sup>3</sup> gleby) in top soil layer depending on the harvesting variant in pine stands 10 years after thinning

Wariant pozyskania drewna* harvesting variant *	$G$			
	żywe korzenie sosny live roots of pine	inne żywe live roots of other species	martwe dead roots	ogółem total
<b>Jeżewnica</b>				
<b>warstwa gleby 0–5 cm / soil layer 0–5 cm</b>				
K-HF	0,173	0,966	0,026	1,165
K-PF	0,202	0,576	0,023	0,801
C-HS	0,261	0,350	0,022	0,633
C-PK	0,154	0,614	0,074	0,842
CONTROL	0,237	0,690	0,017	0,944
<b>warstwa gleby 5–15 cm / soil layer 5–15 cm</b>				
K-HF	0,097	0,102	0,072	0,271
K-PF	0,101	0,056	0,028	0,157
C-HS	0,092	0,138	0,051	0,280
C-PK	0,086	0,045	0,015	0,130
CONTROL	0,346	0,087	0,032	0,465
<b>Taszewo</b>				
<b>warstwa gleby 0–5 cm / soil layer 0–5 cm</b>				
K-HF	0,464	0,592	0,053	1,109
K-PF	0,313	0,244	0,169	0,726
C-HS	0,284	0,355	0,162	0,803
C-PS	0,313	0,671	0,098	1,082
C-PK	0,315	0,386	0,130	0,831
CONTROL	0,281	0,483	0,066	0,830
<b>warstwa gleby 5–15 cm / soil layer 5–15 cm</b>				
K-HF	0,119	0,095	0,038	0,252
K-PF	0,665	0,050	0,067	0,782
C-HS	0,072	0,047	0,074	0,193
C-PS	0,088	0,090	0,045	0,223
C-PK	0,159	0,096	0,071	0,326
CONTROL	0,170	0,084	0,063	0,317
<b>Bąkowo</b>				
<b>warstwa gleby 0–5 cm / soil layer 0–5 cm</b>				
K-HF	0,305	0,201	0,030	0,536
K-PF	0,299	0,160	0,038	0,497
C-PS	0,424	0,176	0,051	0,652
C-HS	0,695	0,127	0,031	0,853
C - PK	0,323	0,212	0,038	0,573
CONTROL	0,302	0,139	0,076	0,517
<b>II warstwa gleby 5–15 cm / soil layer 5–15 cm</b>				
K-HF	0,250	0,112	0,039	0,401
K-PF	0,124	0,075	0,068	0,267
C-PS	0,261	0,066	0,075	0,402
C-HS	0,323	0,053	0,046	0,422
C-PK	0,089	0,038	0,035	0,162
CONTROL	0,210	0,061	0,087	0,358

K-HF - pozyskanie metodą krótkiego drewna (sortymentowa) (harwester i forwarder), K-PF - pozyskanie metodą krótkiego drewna (sortymentowa) (pilarka i forwarder - nacisk statyczny ok. 80 kPa), C-HS - pozyskanie metodą całej strzały (ścinka harwesterem - nacisk statyczny ok. 60 kPa, zrywka skiderem), C-PS - pozyskanie metodą całej strzały (ścinka pilarką, zrywka konna), C-PK - pozyskanie metodą całej strzały (ścinka pilarką, zrywka konna), CONTROL - drzewostan bez trzebieży

K-HF - cut-to-length method - CTL (harvester and forwarder), K-PF - CTL (chain saw and forwarder - static pressure of ca 80 kPa), C-HS - tree length method (felling with harvester - static pressure 60 kPa, extraction with skidder), C-PS - tree length method (felling with chain saw, extraction with skidder), C-PK - tree length method (felling with chain saw, extraction by horse), CONTROL - stand without thinning

wraz ze wzrostem głębokości w glebie (tab. 2). Istotne okazały się różnice gęstości martwych korzeni pomiędzy Jeżewnicą i Taszewem ( $H=16,0231$ ;  $p=0,0001$ ) oraz Jeżewnicą i Bąkowem ( $H=8,4382$ ;  $p=0,0037$ ).

Wyniki badań żywotności korzeni na starych szlakach zrywkowych w drzewostanach sosnowych wskazały na brak istotnych różnic w rozwoju korzeni, zarówno na głębokości 0–5 cm, jak i 5–15 cm, pomiędzy powierzchniami, niezależnie od zastosowanego wariantu pozyskania drewna (tab. 3).

#### 4. Podsumowanie

Rozwój korzeni przebiega etapami zarówno w cyklu życiowym drzew leśnych, jak i w sezonie wegetacyjnym (Vogt et al. 1980; Gier et al. 1981; Claus et George 2005; Finer et al. 2007). Zmiany zwarcia drzewostanu powstające w wyniku prowadzonej gospodarki leśnej lub zachodzące na skutek naturalnych zaburzeń wpływają na wzrost konkurencji pomiędzy korzeniami poszczególnych drzew i roślin runa leśnego o zasoby środowiska, szczególnie w wierzchnich warstwach gleby (Wilczynski, Pickett 1993; Parsons et al. 1994; Riegel et al. 1995).

Warunki wzrostu i rozwoju drzew leśnych są kształtowane podczas trzebieży. Często w wyniku prowadzenia prac trzebieżowych powstają uszkodzenia części nadziemnej drzew, które najczęściej są konsekwencją błędów popełnionych przez ludzi obsługujących maszyny. Zmiany środowiska glebowego powstające podczas trzebieży są natomiast efektem statycznych nacisków maszyn (Suwała et al. 1996). W wybranych drzewostanach sosnowych na terenie Nadleśnictwa Dąbrowa, bezpośrednio po zakończeniu trzebieży w latach 1994–1995, oceniono uszkodzenia korzeni w wierzchnich warstwach gleby. Wyniki badań świadczyły, że uszkodzenia korzeni były niewielkie, a ich zróżnicowanie w zależności od zastosowanych wariantów pozyskania drewna w trzebieżach było statystycznie nieistotne. Wykorzystanie harwestera, skindera i forwadera do prac trzebieżowych nie spowodowało istotnego wzrostu uszkodzeń korzeni sosny w wierzchnich warstwach gleby w porównaniu z tradycyjną (pilarka, zrywka konna) metodą pozyskania drewna (Dobrowolska et al. 1996).

Po 10 latach ponownie oceniono wpływ pozyskania drewna na wybrane elementy środowiska leśnego, w tym na żywotność korzeni sosny na powierzchniach trzebieżowych (Suwała et al. 2006). W badanych drzewostanach w wierzchnich warstwach gleby (0–5 cm i 5–15 cm) dominowały żywe korzenie (odpowiednio: 88–96% i 79–83%). W najmłodszym drzewostanie (Bąkowo), w którym podczas trzebieży usunięto 258

drzew/ha pozostawiając 904 drzewa/ha stwierdzono w obu warstwach gleby większą całkowitą gęstość korzeni sosny niż pozostałych gatunków, czyli roślin runa leśnego. W starszych drzewostanach sosnowych, tzn. w Jeżewnicy i Taszewie, podczas trzebieży usunięto mniej drzew (odpowiednio: 153 drzewa/ha i 139 drzew/ha) pozostawiając na powierzchniach manipulacyjnych odpowiednio: 731 drzew/ha i 532 drzewa/ha. Rozluźnienie zwarcia w starszych drzewostanach spowodowało w kolejnych latach bardziej intensywny rozwój korzeni drobnych roślinności runa leśnego niż korzeni drobnych sosny, szczególnie w warstwie gleby 0–5 cm.

O rozwoju korzeni drobnych drzew leśnych decydują także właściwości fizyko-chemiczne gleby, w tym dostępność kationów wymiennych. Wpływają one na parametry morfologiczne korzeni np. długość, gęstość, suchą masę, liczbę żywych i martwych mikoryz (Entry et al. 1987; Bakker 1999; Ostonen et al. 1999; Leuchner et al. 2004). Warunki wilgotnościowe gleby determinowane przez krótkotrwałe okresy suszy poprzedzane opadami deszczu w specyficzny sposób stymulują wzrost korzeni drobnych i mikoryz drzew leśnych (Fell et al. 1988). Ponadto mikrobiologia środowiska glebowego, w szczególności obecność grzybów mikoryzowych, jak również grzybów patogenicznych kształtuje rozwój korzeni drobnych sosny w ekosystemach leśnych (Farfał, Dobrowolska 1996; Rudawska 1997).

#### Literatura

- Bakker M. R. 1999. Fine-root parameters as indicators of sustainability of forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 122: 7–16.
- Bauhus J., Bartsch N. 1996. Fine-root growth in beech (*Fagus sylvatica*) forest gaps. *Canadian Journal of Forest Research*, 26: 2153–2159.
- Böhm W. 1985. Metody badań systemów korzeniowych. Warszawa, PWRiL.
- Bucht S. 1977. Vad kostar stickvägarna i tillväxt? *Skogen*, 6/21: 218–221.
- Claus A., George E. 2005. Effect of stand age on fine-root biomass and biomass distribution in three tree European forest chronosequences. *Canadian Journal of Forest Research*, 36: 1617–1625.
- Dobrowolska D., Farfał D., Józefaciukowa W. 1996. Wpływ wybranych metod i środków pozyskania drewna na uszkodzenia korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) w późnych trzebieżach drzewostanów sosnowych. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa*, A, 820: 36–44.
- Entry J.A., Cromack Jr. K., Stafford S. G., Castellano M. A. 1987. The effect of pH and aluminum concentration on ectomycorrhizal formation in *Abies balsamea*. *Canadian Journal of Forest Research*, 17: 865–871.
- Farfał D., Dobrowolska D. 1996. Wpływ zróżnicowanych warunków wzrostu sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)



- na żywotność korzeni drobnych i mikoryz. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, A*, 817: 101–115.
- Fell W., Kottke I., Oberwinkler F. 1988. The effect of drought on mycorrhizal production and very fine root system development of Norway spruce under natural and experimental conditions. *Plant and Soil*, 108: 221–231.
- Finer L., Helmisaari H. S., Löhmus K., Majdi H., Brunner I., Borja I. et al. 2007. Variation in fine root biomass of three European tree species: beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.), and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Plant Biosystems*, 141, 3: 394–405.
- Grier C.C., Vogt K. A., Keyes M.R., Edmonds R.L. 1981. Biomass distribution and above- and below-ground production in young and mature *Abies amabilis* zone ecosystems of the Washington Cascades. *Canadian Journal of Forest Research*, 11, 1: 63–68.
- Isomäki A., Kallio T. 1974. Consequences of injury caused by timber harvesting machines on the growth and decay of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Acta Forestalia Fennica*, 136: 1–24.
- Leuschner C. Hertel D., Schmid I., Koch O., Muhs A., Hölscher D. 2004. Stand fine root biomass and fine root morphology in old-growth beech forests as a function of precipitation and soil fertility. *Plant and Soil*, 258, 1/2: 43–56.
- Matthies D. 1997. Maschinelle Holzernte und ihre Auswirkungen auf unsere Bestände. *Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge*, 52, 9: 471–473.
- Kremer, J.; Matthies, D. 1997. Auswirkungen der Befahrung auf das Wachstum der forstlichen Vegetation. *Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge*, 52, 9: 474–477.
- Ostonen I., Löhmus K., Lasn R. 1999. The role of soil conditions i fine root ecomorphology in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Plant and Soil*, 208, 22: 283–292.
- Parsons W. F. J., Miller S. L., Knight D. H. 1994. Root-gap dynamics in a lodge pine forest: ectomycorrhizal and nonmycorrhizal fine root activity after gap formation. *Canadian Journal of Forest Research*, 24, 1531–1538.
- Persson H. 1983. The distribution and productivity of fine-roots in boreal forests. *Plant and Soil*, 71: 87–101.
- Riegel G. M., Miller R. F. Krueger W. C. 1995. The effects of aboveground and belowground competition on understory species composition in a *Pinus ponderosa* forest. *Forest Science*, 41, vol. 4: 864–889.
- Rudawska M. 1997. Znaczenie mikoryzy we wzroście i rozwoju sosny. *Sylwan*, 6: 81–87.
- Schütt P. 1981. Erste Ausätze zur experimentellen klärung des Tannensterbens. *Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen*, 132, 6: 443–452.
- Suwała M., Farfał D., Dobrowolska D. Józefaciuk W., Żółciak A., Oszako T. et al. 1996. Wpływ techniki i technologii pozyskiwania drewna na wybrane elementy środowiska leśnego. Dokumentacja IBL. Warszawa.
- Suwała M. 1995. Wpływ wybranych metod i środków pozyskiwania drewna na uszkodzenia nadziemnych części drzew oraz powierzchniowych warstw gleb w późnych trzebieżach drzewostanów sosnowych. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, A*, 783/789: 59–79.
- Suwała M., Farfał D., Żółciak A., Ślusarski S., Olejarski I., Filipiak W. 2006. Wpływ techniki i technologii pozyskiwania drewna na wybrane elementy środowiska leśnego – II etap. Dokumentacja IBL. Warszawa.
- Wästerlund I. 1992. Extent and causes of site damage due to forestry traffic. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 7: 135–142.
- Wilczynski C.J., Pickett S.T.A. 1993. Fine root biomass within experimental canopy gaps: evidence for a below-ground gap. *Journal of Vegetation Science*. 4: 571–574.
- Vogt K. A., Edmonds R.L., Grier C.C., Piper S.R. 1980. Seasonal changes in mycorrhizal and fibrous-textured root biomass in 23- and 180-year-old Pacific silver fir stands in western Washington. *Canadian Journal of Forest Research*, 10, 4: 523–529.