

ROMAN WAĆLAWOWICZ, PRZEMYSŁAW BĄBELEWSKI, MAGDALENA PANCERZ,
EWA TENDZIAGOLSKA

Struktura gleb w wybranych lasach miejskich Wrocławia

Structure of soils in selected urban forests of Wrocław

ABSTRACT

Waćlawowicz R., Bąbelewski P., Pancierz M., Tendziagolska E. 2017. Struktura gleb w wybranych lasach miejskich Wrocławia. Sylwan 161 (7): 592-599.

The objective of the research was to assess the soil structure parameters (the index of cloddiness, of pulverization, of soil structure and the mean weighted diameter of soil aggregates – MWDa), as well as the selected chemical soil properties (pH, the content of organic carbon, total nitrogen and available potassium and phosphorus) in the three urban forests in Wrocław (SW Poland) depending on the occurrence of tree species (*Quercus robur*, *Fagus sylvatica*, *Carpinus betulus*). Soil samples were collected under the crown of each tested tree taxons, from three different sites, in three replications, separately in every forest. The soil was taken from two layers: 0-20 cm and 20-40 cm. The structure and weight of mechanically solid soil aggregates were determined using dry separation method. The content of total nitrogen was determined with Kjeldahl method, while phosphorus and potassium – with Egner-Riehm method. Organic carbon was determined with the use of elementary carbon analyser Behr C-50 IRE. The pH was determined by potentiometric method in 1M solution of KCl. The results were statistically analysed using the ANOVA. The correlation coefficient between the mean weighted diameter of soil aggregates and the content of organic carbon in the soil was calculated. The tree species occurring in the urban forests of Wrocław affected the soil structure parameters as well as changed the chemical properties of the soil. In both Mokrzański and Rędziński Forests the significantly higher index of soil cloddiness was observed under hornbeam crowns than in the oak and beech surroundings. In the Osobowicki Forest the highest index of cloddiness was determined on the soil with the oak. In general, higher values of index of soil structure and the mean weighted diameter of soil aggregates were noticed for the hornbeam sites than the oak and the beech ones. There was a significant positive correlation between the MWDa and the content of soil organic matter ($r=0.711$, $Y=0.4569 \cdot x+1.6523$). The differences in the content of organic carbon depending on tree species were observed in the Rędziński Forest, while in content of total nitrogen also in the Mokrzański Forest. The highest content of organic carbon and nitrogen was noticed in the soil under the hornbeam. The species of trees affected the content of phosphorus and potassium in the soil, but there was no unambiguous direction of changes.

KEY WORDS

soil structure index, cloddiness, pulverization, MWDa, chemical properties of soil

ADDRESSES

Roman Waćlawowicz ⁽¹⁾ – e-mail: roman.waclawowicz@up.wroc.pl
Przemysław Bąbelewski ⁽²⁾, Magdalena Pancierz ⁽²⁾, Ewa Tendziagolska ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Katedra Kształtowania Agroekosystemów i Terenów Zieleni, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu; pl. Grunwaldzki 24 A, 50-363 Wrocław

(2) Zakład Roślin Ozdobnych i Dendrologii, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu;
pl. Grunwaldzki 24 A, 50-363 Wrocław

Wstęp

W granicach administracyjnych Wrocławia znajdują się duże kompleksy leśne o łącznym areale 2286,21 ha, co stanowi około 7,5% powierzchni miasta. Mają one bardzo istotne znaczenie, ponieważ są integralną częścią zieleni miejskiej decydującej o jakości życia w dużej aglomeracji, jaką jest Wrocław. W głównej mierze są to pozostałości dawnych łąg nadodrzańskich, obejmujących pierwotnie olbrzymie powierzchnie obecnego Wrocławia. Układ wrocławskich siedlisk leśnych odzwierciedla budowę geologiczną, rzeźbę terenu, warunki klimatyczne i hydrologiczne obszarów leśnych. Na terenie Wrocławia dominują zbiorowiska leśne o charakterze grądów, a na siedliskach podmokłych łągów wiązowo-jesionowych i wierzbowo-topolowych. W miarę rozwoju rolnictwa tereny grądów zmieniono w pola uprawne, a łągi w żyzne łąki [Oszańcy i in. 2012]. Niestety, regulacja rzek przyczyniła się do dalszego zanikania lasów pierwotnych [Degórska 2004]. Na terenie Wrocławia można wyróżnić 29 większych kompleksów leśnych, wśród nich Las Mokrzyński, Las Rędziński i Las Osobowicki.

W warunkach naturalnych rozmieszczenie gatunków drzew leśnych uzależnione jest od właściwości fizycznych i chemicznych gleb [Jha, Singh 1990; Scull, Harman 2004], które są w znacznej mierze kształtowane pod wpływem długotrwałej roślinności leśnej [Osman 2013]. Jednym z ważniejszych czynników decydujących o warunkach siedliskowych jest obecność i trwałość agregatów glebowych. Gleba o korzystnej strukturze ułatwia penetrację korzeni roślin, reguluje stosunki wodno-powietrzne, zapewnia magazynowanie składników odżywczych oraz sprzyja infiltracji wody opadowej [White 1985; Lal 1991; Passioura 1991; Pardo i in. 2000; Franzluebbers 2002; Six i in. 2004; Bronick, Lal 2005], a także pozwala na zachowanie równowagi biologicznej w glebie [Elliott i in. 1980; van Veen i in. 1984]. Stabilna struktura agregatowa stanowi ochronę materii organicznej przed zbyt szybką mineralizacją [Tisdall, Oades 1982; Lenart 2008], co zapobiega procesom erozji wodnej [Barthes, Roose 2002; Jonczak 2011]. W efekcie strukturalność gleby wpływa na wzrost i rozwój roślinności drzewiastej, zarówno w aspekcie ilościowym, jak i jakościowym [Carmean 1957].

Powstawanie i utrzymywanie się korzystnej struktury agregatowej gleby zależy od wielu czynników i interakcji zachodzących pomiędzy nimi [Bronick, Lal 2005]. Znaczący wpływ mają naturalne procesy, m.in. przemarzanie, nawilżanie oraz osuszanie gleby, a także szata roślinna, materia organiczna, edafon oraz parametry fizyczno-chemiczne gleby [Tebügge, Düring 1999; Paluszek 2011; Osman 2013]. W ekosystemie leśnym struktura gleby na ogół jest znacznie stabilniejsza niż w glebach użytkowanych rolniczo [Carmean 1957]. Wynika to ze stałego pokrycia gleby materią organiczną, większej liczebności makro- i mikroorganizmów [Hu i in. 2016], zaniechania uprawy roli, niższej temperatury sprzyjającej spowolnieniu rozkładu materii organicznej oraz mniejszego ryzyka wystąpienia erozji [Rybicki 2006].

Liczne badania wskazują na zróżnicowanie właściwości fizycznych [Tamminen, Starr 1994; Augusto i in. 2002; Osman 2013], chemicznych [Davis 1990; Niewinna 2010] i biologicznych gleb leśnych [Mardulyn i in. 1993; Saetre 1998] w zależności od składu gatunkowego lasu. Niewiele (i dodatkowo niejednoznacznych) jest natomiast doniesień dotyczących wpływu gatunków roślin drzewiastych na parametry struktury gleb [Grieve 1978; Graham i in. 1995; Johnson-Maynard i in. 2002], szczególnie w lasach aglomeracji miejskich.

Celem badań była ocena parametrów struktury gleby oraz wybranych właściwości chemicznych gleby w trzech lasach miejskich Wrocławia w zależności od występujących w nich gatunków drzew.

Materiał i metody

W celu określenia parametrów struktury oraz właściwości chemicznych gleby w październiku 2015 roku pobrano próbki gleby z Lasu Osobowickiego, Rędzińskiego i Mokrzańskiego. Badaniami objęto stanowiska pod dębem szypułkowym (*Quercus robur*), bukiem pospolitym (*Fagus sylvatica*) i grabem pospolitym (*Carpinus betulus*). W wymienionych kompleksach leśnych pobrano próbki gleby spod koron każdego z badanych gatunków drzew, z trzech różnych stanowisk. Glebę do analizy pobierano z dwóch warstw: 0-20 cm i 20-40 cm, w 3 powtórzeniach, z różnych miejsc w zasięgu korony danego gatunku drzewa.

Strukturę i masę mechanicznie trwałych agregatów glebowych określono metodą separacji na sucho [Rewut 1980]. Po doprowadzeniu do stanu powietrznie suchego próbki glebowe o masie 500 g rozdzielono na zestawie sit o średnicy oczek: 0,25, 0,5, 1, 3, 5, 7 i 10 mm. Określono udział każdej frakcji agregatów i obliczono wskaźniki strukturalności gleby: B – wskaźnik zbrzylenia, S – wskaźnik rozpylenia, W – wskaźnik struktury oraz MWDa – średnią ważoną średnicę agregatów według wzorów:

$$B = \frac{\% \text{ udział masy agregatów o średnicy } >10 \text{ mm w } \%}{\% \text{ udział masy agregatów o średnicy } <10 \text{ mm w } \%}$$

$$S = \frac{\% \text{ udział masy agregatów o średnicy } <0,25 \text{ mm w } \%}{\% \text{ udział masy agregatów o średnicy } >0,25 \text{ mm w } \%}$$

$$W = \frac{\% \text{ udział masy agregatów o średnicy } 1-10 \text{ mm w } \%}{\% \text{ udział masy agregatów o średnicy } >10 \text{ mm i o średnicy } <0,25 \text{ mm w } \%}$$

Zawartość azotu ogólnego w glebie oznaczono metodą Kjeldahla, a przyswajalnych form fosforu i potasu – metodą Egnera-Riehma. Węgiel organiczny oznaczono na analizatorze węgla elementarnego Behr C-50 IRF. Wartość pH gleby określono w 1M KCl metodą potencjometryczną. Wyniki poddano analizie wariancji. Różnice graniczne określono przez zastosowanie testu Tukeya przy poziomie istotności 0,05. Współczynniki korelacji liniowej między średnią ważoną średnicą agregatów a zawartością węgla organicznego w glebie wyliczono w pakiecie Statistica 12.5.

Wyniki i dyskusja

Stopień agregacji gleby w znacznej mierze uzależniony był od gatunków drzew występujących w lasach miejskich Wrocławia (tab. 1). W Lesie Mokrzańskim oznaczono istotnie wyższy wskaźnik zbrzylenia gleby pod koroną grabu niż w otoczeniu dębu lub buka. Zależność tę zanotowano zarówno w płytszej (0-20 cm), jak i głębszej (20-40 cm) warstwie gleby. Podobny kierunek zmian stwierdzono w Lesie Rędzińskim, jednak statystycznie zostało to udowodnione tylko w głębszej warstwie. Z kolei w Lesie Osobowickim w warstwie 0-20 cm największym zbrzyleniem charakteryzowała się gleba, na której występował dąb. Wskaźnik B był wówczas o 88% większy niż w drzewieniach buka czy grabu. W głębszej warstwie gleby nie odnotowano istotnego zróżnicowania jej zbrzylenia. Makroagregaty zawierają zazwyczaj więcej materii organicznej niż mikroagregaty. W konsekwencji utrzymują wyższy poziom składników odżywczych oraz zapewniają lepszą infiltrację wody opadowej [Six i in. 2004].

Znaczącym parametrem charakteryzującym strukturę gleby jest współczynnik rozpylenia (S). W Lesie Rędzińskim najbardziej rozpyloną glebę obserwowano pod bukiem, a w Lesie Mokrzań-

Tabela 1.

Wskaźniki zbylenia (B), rozpylenia (S) i struktury (W) oraz średnia ważona średnica agregatów (MWDa) w wierzchnich (0-20 i 20-40 cm) warstwach gleby w wybranych lasach wrocławskich w zależności od gatunku drzewa

Index of cloddiness (B), pulverization (S) and structure (W) as well as mean weighed diameter of soil aggregates (MWDa) in top (0-20 and 20-40 cm) soil layers in selected forests of Wrocław depending on tree species

		<i>Quercus robur</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Carpinus betulus</i>
B				
Osobowicki	0-20	0,30b	0,16a	0,16a
	20-40	0,19a	0,18a	0,13a
Rędziński	0-20	0,20a	0,10a	0,23a
	20-40	0,12a	0,04a	0,31b
Mokrzański	0-20	0,09a	0,02a	0,32b
	20-40	0,06ab	0,02a	0,10b
S				
Osobowicki	0-20	0,08a	0,13a	0,10a
	20-40	0,06a	0,07a	0,06a
Rędziński	0-20	0,03a	0,19b	0,03a
	20-40	0,03a	0,16b	0,01a
Mokrzański	0-20	0,16b	0,20b	0,07a
	20-40	0,15b	0,19b	0,10a
W				
Osobowicki	0-20	1,40a	1,99ab	2,65b
	20-40	2,09a	2,51a	4,12b
Rędziński	0-20	3,63b	1,08a	3,11b
	20-40	4,10b	1,63a	2,72ab
Mokrzański	0-20	1,03a	1,28a	1,51a
	20-40	1,48ab	1,08a	2,48b
MWDa				
Osobowicki	0-20	2,45a	3,15a	2,91a
	20-40	1,81a	3,67b	3,06b
Rędziński	0-20	4,84a	4,98a	5,03a
	20-40	3,48ab	2,65a	5,11b
Mokrzański	0-20	1,07a	2,21a	2,57a
	20-40	1,94a	0,97a	1,89a

ta sama litera w wierszu oznacza brak istotnej różnicy przy $\alpha=0,05$
the same letter in row indicate lack of significant difference at $\alpha=0,05$

skim w strefie występowania buka i dębu. Zróżnicowanie stopnia agregacji gleby uzależnione jest od zawartości materii organicznej w glebie [Bronick, Lal 2005]. Duże agregaty stabilizowane są przez korzenie roślin, strzępki grzybni i odchody mezofauny glebowej. Z kolei mikroagregaty tworzą się głównie dzięki obecności koloidów organicznych [Tisdall, Oades 1982].

Wskaźnik struktury gleby (W) zależał od gatunków drzew występujących w lasach miejskich Wrocławia (tab. 1). W Lesie Osobowickim najkorzystniejszą strukturą charakteryzowała się gleba, na której występował grab. W takich warunkach wskaźnik W był prawie dwukrotnie wyższy od uzyskanego pod koroną dębu. Podobną zależność, choć udowodnioną tylko w głębszej warstwie gleby, zanotowano w mokrzańskim kompleksie leśnym. Z kolei w Lesie Rędzińskim wysoki wskaźnik struktury w warstwie 0-20 cm stwierdzono pod koroną dębu i grabu, a w warstwie 20-40 cm pod koroną grabu. Prawdopodobną przyczyną korzystnego oddziaływania grabu na parametry struktury gleby jest duży opad liści, stanowiący źródło substancji organicznej, która

jest jednym z głównych czynników wpływających na powstawanie i utrzymywanie się korzystnej struktury agregatowej. Józwiak i in. [2015], badając dynamikę opadu z ośmiu gatunków drzew, stwierdzili, że na ogół znacznie wyższy jest opad liści grabu niż dębu i buka. Ważną rolę w procesie powstawania agregatów glebowych odgrywają mikroorganizmy – rozkładając materię organiczną, produkują one polisacharydy, które pełnią rolę lepiszcza glebowego [Graham i in. 1995].

Wskaźnikiem charakteryzującym strukturę gleby, zwłaszcza stopień jej agregacji, jest również średnia ważona średnica agregatów (MWDa). Udowodnione statystycznie zróżnicowanie tego parametru określono jedynie w głębszej z badanych warstw. W Lesie Osobowickim średnica agregatów glebowych była istotnie wyższa pod koroną buka i grabu niż dębu (średnio o 86%). Z kolei w kompleksie rędzińskim najwyższy wskaźnik MWDa określono pod grabem. Był on 2,5-krotnie wyższy niż w glebie spod buka. Znaczącą rolę w kształtowaniu struktury ma zawartość substancji organicznej w glebie [Johnson-Maynard i in. 2002; Osman 2013]. Przeprowadzona analiza korelacji prostej wykazała istotny związek pomiędzy średnią ważoną średnicą agregatów (MWDa) a zawartością materii organicznej w glebie. Udowodniono, że wzrost zawartości węgla organicznego w glebie o 1% przyczynia się do zwiększenia średnicy agregatów o 0,46 mm ($r=0,711$, $Y=0,4569 \cdot x+1,6523$). Podobną zależność, choć o nieco słabszej sile ($r=0,516$), zaobserwował Grieve [1978].

Wartość pH gleby była istotnie modyfikowana przez gatunki drzew, ale tylko w wybranych kompleksach leśnych (tab. 2). W Lesie Rędzińskim najniższe pH w obu warstwach gleby zanotowano pod koroną grabu, natomiast najwyższe w warstwie 0-20 cm pod bukiem, a w warstwie 20-40 cm pod dębem. W Lesie Mokrzańskim najwyższą wartość pH stwierdzono natomiast w warunkach występowania grabu, zależność tę udowodniono jednak statystycznie tylko w płytszej z badanych warstw. Augusto i in. [2003] oraz Hagen-Thorn i in. [2004] podają, że na zmiany pH w glebie ma wpływ gatunek drzewa, jednak większe zróżnicowanie notowane jest w warstwie płytszej (0-10 cm) niż w warstwach głębszych.

Istotne zmiany zawartości węgla organicznego w glebie oznaczono tylko w Lesie Rędzińskim. Pod koroną grabu zawartość tego pierwiastka w warstwie 0-20 cm była odpowiednio o 51 i 131% wyższa niż pod dębem lub bukiem. Podobną tendencję obserwowano w płytszej z badanych warstw w Lesie Osobowickim i głębszej w Lesie Mokrzańskim. W ekosystemach leśnych głównym źródłem materii organicznej jest opad roślinny, którego wielkość uzależniona jest od szeregu czynników, m.in. składu gatunkowego drzewostanu. Józwiak i in. [2015] udowodnili, że grab charakteryzuje się na ogół znacznie większym opadem roślinnym niż dąb i buk.

Zawartość podstawowych makroelementów w glebie w trzech lasach miejskich Wrocławia na ogół zależała od występujących w nich gatunków drzew (tab. 2). Zarówno w Lesie Rędzińskim, jak i Mokrzańskim największą koncentrację azotu ogólnego zanotowano w glebie pod koroną grabu. Grab sprzyjał również zwiększeniu zawartości potasu w glebie, co udowodniono jednak tylko w osobowickim i mokrzańskim kompleksie leśnym. W Lesie Rędzińskim zaobserwowano odwrotną zależność – na stanowiskach dębu i buka zawartość K w płytszej z badanych warstw gleby była średnio trzykrotnie niższa niż pod grabem. Gatunek drzewa wpłynął również na zawartość fosforu w glebie. W Lesie Osobowickim najwięcej tego pierwiastka oznaczono w glebie spod buka, w Lesie Rędzińskim spod grabu, a w Mokrzańskim spod dębu. Zróżnicowanie koncentracji składników pokarmowych w glebie może wynikać m.in. ze zmiennego dopływu opadu roślinnego (zarówno w sensie ilościowym, jak i jakościowym), tempa jego rozkładu, a także różnych właściwości fizycznych i biologicznych gleby [Augusto i in. 2002, 2010; Jonczak 2011]. Zależności takiej nie udowodnili jednak Hagen-Thorn i in. [2004], którzy badali właściwości chemiczne gleb, m.in. spod buka i dębu. Kucaba [1983] donosił, że do obiegu biologicznego

najszybciej przechodzą składniki pokarmowe zawarte w ściółce grabu, nieco wolniej dębu i najwolniej buka.

Wnioski

✚ Gatunki drzew występujące w lasach miejskich Wrocławia kształtowały parametry struktury gleby oraz przyczyniły się do zmian jej właściwości chemicznych.

Tabela 2.

Odczyn (pH KCl) gleby, zawartość węgla organicznego (Corg [%]), azotu ogólnego (N [g/kg]) oraz przyswajalnych form fosforu (P) i potasu (K) [mg/kg] w wierzchnich (0-20 i 20-40 cm) warstwach gleby w wybranych lasach wrocławskich w zależności od gatunku drzewa

Reaction (pH KCl) and the content of organic carbon (Corg [%]), total nitrogen (N [g/kg]) and available phosphorus (P) and potassium (K) [mg/kg] in top (0-20 and 20-40 cm) soil layers in selected forests of Wrocław depending on tree species

		<i>Quercus robur</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Carpinus betulus</i>
pH KCl				
Osobowicki	0-20	3,5a	3,6a	3,5a
	20-40	3,6a	3,5a	3,5a
Rędziński	0-20	3,7ab	4,0b	3,4a
	20-40	4,1b	3,9b	3,6a
Mokrzański	0-20	3,6a	3,6a	4,0b
	20-40	3,8a	3,7a	4,0a
Corg				
Osobowicki	0-20	3,76a	3,52a	4,49a
	20-40	1,19a	1,54a	1,24a
Rędziński	0-20	5,40a	5,90a	8,17b
	20-40	1,55a	1,93a	3,59b
Mokrzański	0-20	2,62a	2,96a	2,45a
	20-40	0,68a	0,69a	0,96a
N				
Osobowicki	0-20	1,58a	2,14a	1,81a
	20-40	0,80a	0,90a	0,92a
Rędziński	0-20	2,12a	1,76a	3,14b
	20-40	1,09a	1,17a	1,87b
Mokrzański	0-20	0,99a	1,21ab	1,44b
	20-40	0,38a	0,46a	0,69b
P				
Osobowicki	0-20	40a	75b	55ab
	20-40	60a	55a	65a
Rędziński	0-20	110a	100a	120a
	20-40	50a	75b	95c
Mokrzański	0-20	115b	76a	90ab
	20-40	70a	55a	75a
K				
Osobowicki	0-20	4,28b	0,88a	4,36b
	20-40	1,03a	0,93a	3,08b
Rędziński	0-20	20,45b	18,45b	6,43a
	20-40	5,38a	9,23a	4,40a
Mokrzański	0-20	0,44a	3,19ab	5,50b
	20-40	9,52b	2,53a	6,41ab

ta sama litera w wierszu oznacza brak istotnej różnicy przy $\alpha=0,05$
the same letter in row indicate lack of significant difference at $\alpha=0.05$

- ✦ W Lesie Mokrzańskim i Rędzińskim istotnie wyższy wskaźnik zbrzylenia gleby (B) oznaczono pod koroną grabu niż w otoczeniu dębu lub buka. Z kolei w Lesie Osobowickim największym zbrzyleniem charakteryzowała się gleba, na której występował grab.
- ✦ Korzystniejszą agregację gleby wyrażoną wskaźnikami struktury (W) i średnią ważoną średnicą agregatów (MWDa) stwierdzono na ogół na stanowiskach grabu niż dębu lub buka.
- ✦ Wykazano istotną dodatnią korelację między średnią ważoną średnicą agregatów (MWDa) a zawartością materii organicznej w glebie.
- ✦ Zróżnicowanie zawartości węgla organicznego w glebie w zależności od gatunku drzewa obserwowano w Lesie Rędzińskim, a azotu ogólnego dodatkowo w Lesie Mokrzańskim. Najwyższą koncentracją C i N charakteryzowała się gleba, na której występował grab.
- ✦ Gatunki drzew kształtowały zawartość fosforu i potasu w glebie, jednak kierunek zmian był niejednoznaczny. Zwiększeniu zawartości potasu w Lesie Osobowickim i Mokrzańskim sprzyjał grab, natomiast w Lesie Rędzińskim buk i dąb. Z kolei najwięcej fosforu w osobowickim kompleksie leśnym zanotowano pod bukiem, w mokrzańskim pod dębem, a rędzińskim pod grabem.

Literatura

- Augusto L., Dupouey J. L., Ranger J. 2003. Effects of tree species on understory vegetation and environmental conditions in temperate forests. *Ann. For. Sci.* 60: 823-831.
- Augusto L., Ranger J., Binkley D., Rothe A. 2002. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Ann. For. Sci.* 59: 233-253.
- Barthes B., Roose E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion validation at several levels. *Catena* 47: 133-149.
- Bronick C. J., Lal R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22.
- Carmean W. H. 1957. The Structure of Forest Soils. *Ohio J. Sci.* 57 (3): 165-168.
- Davis M. R. 1990. Chemical composition of soil solutions extracted from New Zealand beech forests and West German beech and spruce forests. *Plant Soil* 126: 237-246.
- Degórska B. 2004. Planowanie terenów otwartych w nowej przestrzeni miejskiej (na przykładzie strefy podmiejskiej Warszawy). W: Kistowski M. [red.]. *Studia ekologiczno-krajobrazowe w programowaniu rozwoju zrównoważonego. Przegląd polskich doświadczeń w prognozie integracji z Unią Europejską*. Gdańsk. 141-148.
- Elliott E. T., Anderson R. V., Coleman D. C., Cole C. V. 1980. Habitable pore space and microbial trophic interactions. *Oikos* 35: 327-335.
- Franzluebbers A. J. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil Till. Res.* 66: 197-205.
- Graham R. C., Ervin J. O., Wood H. B. 1995. Aggregate stability under oak and pine after four decades of soil development. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1740-1744.
- Grieve I. C. 1978. Some effects of the plantation of conifers on a freely drained lowland soil, Forest of Dean, U.K. *Forestry* 51 (1): 21-28.
- Hagen-Thorn A., Callesen I., Armolaitis K., Nihlgård B. 2004. The impact of six European tree species on the chemistry of mineral topsoil in forest plantations on former agricultural land. *Forest Ecol. Manag.* 195: 373-384.
- Hu L., Xiang Z., Wang G., Rafique R., Liu W., Wang C. 2016. Changes in soil physicochemical and microbial properties along elevation gradients in two forest soils. *Scand. J. Forest Res.* 31 (3): 242-253.
- Jha C. S., Singh J. S. 1990. Composition and dynamics of dry tropical forest in relation to soil texture. *J. Veg. Sci.* 1: 609-614.
- Johnson-Maynard J. L., Graham R. C., Wu L., Shouse P. J. 2002. Modification of soil structural and hydraulic properties after 50 years of imposed chaparral and pine vegetation. *Geoderma* 110: 227-240.
- Jonczak J. 2011. Struktura, dynamika i właściwości opadu roślinnego w 110-letnim drzewostanie bukowym z domieszką sosny i świerka. *Sylwan* 155 (11): 760-768.
- Józwiak M., Józwiak M. A., Kozłowski R. 2015. Dynamika opadu organicznego na terenie rezerwatu przyrody Jaskinia Raj. *Rocz. Świętokrz. Ser. B.* 36: 71-84.
- Kucaba S. 1983. Wpływ składu gatunkowego i zagęszczenia podrostów liściastych w drzewostanie sosnowym na cechy poziomów akumulacji biologicznej. Cz. II. Charakterystyka gleb oraz zawartość składników mineralnych w ściółce i jej podpoziomach. *Rocz. Glebozn.* 34 (1-2): 209-225.
- Lal R. 1991. Soil structure and sustainability. *J. Sustain. Agr.* 1: 67-92.

- Lenart S. 2008. Wpływ sposobu użytkowania gruntów oraz stosowanej agrotechniki na strukturę gruzelkową gleby. *Ochr. Środ. Zasob. Natur.* 35/36: 173-179.
- Mardulyn P., Godden B., Amiano-Echezarreta P., Penninckx M., Gruber W., Herbauts J. 1993. Changes in humus microbiological activity induced by the substitution of the natural beech forest by Norway spruce in the Belgian Ardennes. *Forest Ecol. Manag.* 59: 15-27.
- Niewinna M. 2010. Wielkość opadu i tempo rozkładu ściółki w wybranych drzewostanach Bieszczadów. *Rocz. Bieszcz.* 18: 59-73.
- Osman K. T. 2013. Forest soils: properties and management. In *physical properties of forest soils*. Springer International Publishing, Switzerland. 19-28.
- Oszańczyk K., Banas A., Chmura U., Gallus A., Królikowska K., Kuczer M., Owczarek-Nowak E., Pawelec T., Pietrasiak J., Kuczer J. 2012. Program ochrony środowiska dla miasta Wrocławia na lata 2012-2015. Projekt. Urząd Miejski Wrocławia, Wrocław.
- Paluszek J. 2011. Kryteria oceny jakości fizycznej gleb uprawnych Polski. *Acta Agrophys., Rozpr. Monogr.* 191: 139.
- Pardo A., Amato M., Chiaranda F. Q. 2000. Relationships between soil structure, root distribution and water uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Plant growth and water distribution. Eur. J. Agron.* 13: 39-45.
- Passioura J. B. 1991. Soil structure and plant growth. *Aust. J. Soil Res.* 29 (6): 717-728.
- Rewut I. B. 1980. *Fizyka gleby*. PWRiL, Warszawa.
- Rybicki R. 2006. Zagospodarowanie gruntów zagrożonych erozją w świetle rolnictwa zrównoważonego. *Inż. Rol.* 6: 231-239.
- Saetre P. 1998. Decomposition, microbial community structure, and earthworm effects along a birch-spruce soil gradient. *Ecology* 79: 834-846.
- Scull P. R., Harman J. R. 2004. Forest distribution and site quality in southern Lower Michigan, USA. *J. Biogeogr.* 31: 1503-1514.
- Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79: 7-31
- Tamminen P., Starr M. 1994. Bulk density of forested mineral soils. *Silva Fenn.* 28 (1): 53-60.
- Tebrügge F., Düring R. A. 1999. Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. *Soil Till. Res.* 53: 15-28.
- Tisdall J. M., Oades J. M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Eur. J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- van Veen J. A., Ladd J. N., Frissel M. J. 1984. Modelling C and N turnover through the microbial biomass in soil. *Plant Soil* 76: 257-274.
- White R. E. 1985. The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil. *Adv. Soil. Sci.* 3: 95-120.