

Relacje pomiędzy aktywnością enzymatyczną a właściwościami gleb i sposobem użytkowania

The relationship between soil properties, enzyme activity and land use

Ewa Błońska*, Jarosław Lasota, Maciej Zwydak

Uniwersytet Rolniczy im H. Kołłątaja, Wydział Leśny, Zakład Gleboznawstwa Leśnego, Al. 29 Listopada 46, 31–425 Kraków

*Tel. +48 12 6625031, e-mail: eblonska@ar.krakow.pl

Abstract. The aim of this study was to assess the effects of different types of land use (forest, tillage and pasture) on soil properties, especially enzymes activity. Our investigation was carried out on 53 research plots with 11 plots in broadleaved forest stands, 12 plots in mixed broadleaved stands, 10 plots in mixed coniferous stands, 9 plots on tillage and 11 plots on pasture. The soil samples were collected from a depth of 0–15 cm after removing the organic horizon. Contents of organic carbon and nitrogen, pH and soil texture were investigated. Furthermore, dehydrogenase and urease activity were determined. Significant differences in the enzyme activity between forest and agricultural soils were observed, thus demonstrating that enzyme activity is influenced by the organic matter content of the soil. The highest enzyme activity was recorded in the forest soil within broadleaved stands, whilst the lowest activity was found in tillage soil, because tillage soil contained significantly less organic matter. High enzymatic activity of pasture soils is the combined result of vegetation type and the lack of plowing.

Keywords: forest soil, dehydrogenase activity, urease activity, land use

1. Wstęp

Enzymy glebowe są naturalnymi mediatorami i katalizatorami wielu ważnych procesów glebowych, takich jak: rozkład substancji organicznej uwalnianej do gleby podczas vegetacji roślin, reakcje powstawania i rozkładu próchnicy glebowej, uwalnianie i udostępnianie roślinom substancji mineralnych, wiązanie azotu cząsteczkowego, przepływ węgla, azotu i innych podstawowych elementów biochemicznego cyklu. Oznaczenie aktywności enzymatycznej i zrozumienie czynników ją regulujących jest konieczne do charakterystyki potencjału metabolicznego, żyzności i jakości gleby oraz przydatne do oceny ilości bakterii i grzybów. Może być używana do badania procesów biochemicznych zachodzących w glebie i oceny jakości gleby (Dick 1992, 1994, 1997; Trasar-Cepeda et al. 1998; Acosta-Martinez et al. 1999; Olszowska 2009, 2016). Informacje dotyczące aktywności enzymatycznej w połączeniu z innymi właściwościami gleb ułatwiają dobór sposobu użytkowania gleby (Shaw, Burns 2003).

Aktywność enzymatyczna jest czułym wskaźnikiem zmian środowiska glebowego. Według Kopera i Piotrowskiej (1999) aktywność enzymatyczna zmienia się w zależności od systemu użytkowania. Aktywność dehydrogenaz i prote-

az oraz zawartość węgla organicznego i azotu ogólnego jest wyższa w glebie, na której stosuje się płodozmiann niż w glebie, na której uprawia się rośliny w monokulturze. Podobne spostrzeżenia mają Gianfreda i in. (2005). Saviozzi i in. (2001) zanotowali wyższe wartości potencjału metabolicznego gleby i biologicznego indeksu żyzności BIF zaproponowanego przez Stefanica i in. (1984) na łące i w lesie niż na polu zboża. Według Dahma (1984) i Burns (1985) oddziaływanie roślin wyższych na enzymy glebowe zależy od składu chemicznego rośliny, który nawet w wypadku samych wydzielin korzeniowych może u różnych rodzajów, gatunków, a nawet odmian wykazywać znaczne różnice. Krämer i in. (2000) uważają, że drzewostany stymulują aktywność enzymatyczną gleb w efekcie zwiększania biomasy drobnoustrojów wytwarzających enzymy.

Aktywność dehydrogenaz, jako grupy enzymów wewnątrzkomórkowych, i aktywność mikroflory glebowej dostarczają informacji o biologicznie aktywnej populacji mikroorganizmów w glebie. Według Gil-Sotres i in. (2005) dehydrogenazy reprezentują enzymy, które informują o stanie środowiska i aktywności mikrobiologicznej w glebie. Aktywność dehydrogenaz można wykorzystywać do oceny jakości gleby, wpływu sposobu użytkowania gleby na jej jakość oraz do oceny stopnia regeneracji zdegradowanych gleb. Ureaza

w glebie jest ściśle związana z materią organiczną i iłami (Alef, Nannipieri 1995). Aktywność ureazy według wielu autorów powinna być wykorzystywana jako wskaźnik jakości gleby i zmian w niej zachodzących pod wpływem użytkowania (Gil-Sotres et al. 2005). W pracy podjęto próbę ustalenia zależności pomiędzy aktywnością dehydrogenaz i ureazy a sposobem użytkowania gleb. Przedstawiono różnice we właściwościach fizyko-chemicznych gleb w zależności od sposobu użytkowania. Dodatkowo starano się ustalić związek aktywności enzymatycznej z cechami fizyko-chemicznymi gleb różnie użytkowanych. Poznanie i umiejętność oceny jakości gleb różnie użytkowanych pozwoli efektywniej wykorzystywać ich potencjał i możliwości produkcyjne.

2. Materiały i metody

2.1. Teren badań i pobór próbek

Powierzchnie badawcze zostały zlokalizowane na terenach południowo-zachodniej i centralnej Polski, w nadleśnictwach: Przedbórz, Radomsko, Spała, Smardzewice, Włoszczowa, Kolumna, Piotrków, Chmielnik, Kielce, Prószków, Kup, Wieluń, Prudnik i Brzeg. Badane gleby wykształciły się przede wszystkim na piaskach i glinach wodnolodowcowych. Opisywane gleby zostały zaklasyfikowane do pięciu typów: Cambisols i Arenosols (WRB 2006).

Pobrano 53 próbki gleby z poziomu mineralnego po odgarnięciu poziomu organicznego, z głębokości od 0 do 15 cm. Badane powierzchnie reprezentowały różne sposoby zagospodarowania: leśny ze zróżnicowanym udziałem gatunków liściastych i iglastych (drzewostany liściaste – 11 powierzchni, drzewostany mieszane liściaste – 12 powierzchni, drzewostany mieszane iglaste – 10 powierzchni) oraz rolniczy (tereny uprawne – 9 powierzchni i pastwiska – 11 powierzchni). W drzewostanach liściastych dominowały dąb i buk, w drzewostanach mieszanych iglastych dominowały jodła i sosna, tereny uprawne pokryte były kukurydzą i zbożami, w składzie pastwisk dominowały trawy i rośliny motylkowe.

2.2. Właściwości gleb

W próbkach oznaczono skład granulometryczny za pomocą dyfrakcji laserowej (Analysette 22, Fritsch, Idar-Oberstein, Germany), odczyn gleby metodą potencjometryczną w wodzie i 1M KCl, zawartość azotu ogólnego i zawartość węgla organicznego przy wykorzystaniu aparatu LECO CNS True Mac Analyzer (Leco, St. Joseph, MI, USA), z wyciezeniem stosunku C/N.

Do oznaczenia aktywności enzymatycznej pobrano świeże próbki o naturalnym uwilgotnieniu. Aktywność dehydrogenaz oznaczono metodą Lenharda według procedury Casidy, wyrażając ich aktywność w $\mu\text{mol TPF} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (Alef, Nannipieri 1995). Aktywność ureazy oznaczono metodą Tabatabai i Bremnera (1972) (Alef, Nannipieri 1995), wyrażając ją w $\text{mmol NH}_4^+ \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

2.3. Analiza statystyczna

Statystyczne analizy wykonano, wykorzystując program Statistica 10. Wyznaczono podstawowe statystyki opisowe, tj. średnią arytmetyczną oraz miary określające stopień zróżnicowania wyników (odchylenie standardowe). Wykorzystano test Kruskala-Wallisa do oceny istnienia statystycznie istotnych różnic pomiędzy średnimi dla badanych właściwości gleb. Analizę składowych głównych (PCA) wykorzystano do interpretacji zależności pomiędzy badanymi zmiennymi i poszukiwania związków pomiędzy sposobami użytkowania gleb a badanymi właściwościami.

3. Wyniki

Badane gleby użytkowane w różny sposób charakteryzowały się zawartością piasku w zakresie od 48 do 62%, pyłu w zakresie od 10 do 32% a łu od 3 do 6% (tab.1). Nie zanotowano statystycznie istotnych różnic w zawartości piasku, pyłu i łu w glebach w poszczególnych grupach. Stwierdzono wyraźne różnice w pH pomiędzy glebami użytkowymi rolniczo (uprawy, pastwiska) a glebami leśnymi (tab. 1). Statystycznie istotnie wyższe $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ zanotowano w glebach rolniczych: upraw – średnio 5,96 i pastwisk – średnio 6,01. W glebach leśnych średnie pH wynosiło od 4,18 do 4,51. Najwyższą średnią zawartość węgla zanotowano w glebach leśnych z drzewostanem mieszanym liściastym – 9,05% i iglastym – 8,05%. Najniższą zawartość węgla stwierdzono w glebach upraw – 0,99%. Gleby pastwisk w porównaniu z glebami leśnymi nie różniły się statystycznie istotnie zawartością węgla (tab. 1). Lepszy rozkład materii organicznej wyrażony stosunkiem C/N zanotowano w glebach użytkowanych rolniczo. Statystycznie istotnie wyższy stosunek C/N był w glebach leśnych.

Aktywność badanych enzymów wykazała znaczne zróżnicowanie w glebach różnie użytkowanych. Najwyższą aktywność dehydrogenaz stwierdzono w glebach leśnych porośniętych drzewostanem liściastym i mieszanym liściastym. Aktywność dehydrogenaz w glebach drzewostanów mieszanych iglastych i w glebach pastwisk układała się na podobnym, niskim poziomie. Najniższą aktywność dehydrogenaz zanotowano w glebach upraw (ryc. 1). Podobnie do aktywności dehydrogenaz kształtowała się aktywność ureazy. Najwyższą aktywnością charakteryzowały się gleby drzewostanów liściastych, a najniższą gleby upraw (ryc. 1). W przypadku obu enzymów stwierdzono statystycznie istotne różnice w ich aktywności pomiędzy glebami leśnymi a uprawami.

Rycina 2 przedstawia wyniki analizy głównych składowych (PCA). Wyodrębnione w toku analizy czynniki 1 i 2 sumarycznie wyjaśniają 48,04% wariacji analizowanych właściwości gleb, czynnik 1 wyjaśnia 32,06%, a czynnik 2 – 15,98% ich zmienności. Gleby leśne z drzewostanem liściastym i mieszanym liściastym wykazały silny związek z aktywnością dehydrogenaz i ureazy, dodatkowo ze stosunkiem C/N. Aktywność obu badanych enzymów wykazała dodatni związek ze stosunkiem C/N. Gleby użytkowane rolniczo miały wyższe pH.

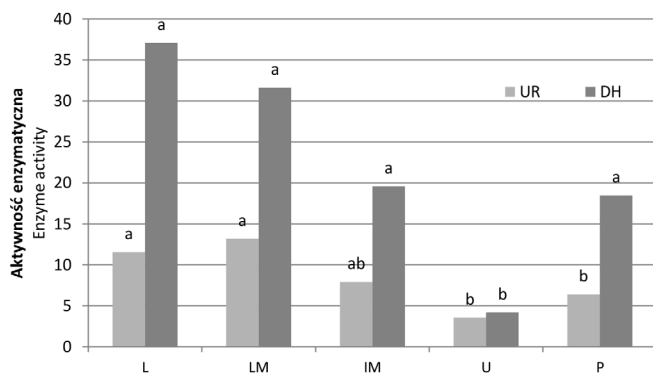
Tabela 1. Wybrane właściwości badanych gleb różnie użytkowanych

Table 1. Selected properties of investigated soils of different types of land use

Właściwości Properties	Sposób użytkowania / Land use				
	L	LM	IM	U	P
Piasek / Sand	61 ^a ±25.18	59 ^a ±8.91	54 ^a ±12.08	62 ^a ±24.46	50 ^a ±25.24
Pył / Silt	13 ^a ±9.66	10 ^a ±9.81	20 ^a ±6.94	32 ^a ±20.97	25 ^a ±12.26
Il / Clay	4 ^a ±0.47	3 ^a ±1.02	6 ^a ±2.01	5 ^a ±2.24	6 ^a ±1.77
pH _{H2O}	4.34 ^b ±0.47	4.18 ^b ±0.37	4.51 ^b ±0.86	5.96 ^a ±0.66	6.01 ^a ±0.76
pH _{KCl}	3.48 ^b ±0.44	3.32 ^b ±0.31	3.64 ^b ±0.95	4.85 ^a ±0.87	5.18 ^a ±0.95
C	8.01 ^b ±3.01	9.05 ^b ±2.24	8.05 ^b ±2.57	0.99 ^a ±0.25	5.44 ^a ±4.77
N	0.38 ^a ±0.11	0.37 ^a ±0.11	0.37 ^a ±0.20	0.08 ^a ±0.01	0.37 ^a ±0.14
C/N	21 ^b ±3.6	24 ^b ±2.59	19 ^b ±5.42	12 ^a ±1.71	13 ^a ±2.22

Oznaczenia: małe litery w indeksie górnym oznaczają statystycznie istotne różnice; L – gleby drzewostanów liściastych, LM – gleby drzewostanów mieszanych liściastych, IM – gleby drzewostanów mieszanych iglastych, U – gleby upraw, P – gleby pastwisk

Explanation: different lower case letters in the upper index of mean values indicate significant differences; L – soils of broadleaf stands, LM – soils of mixed broadleaf stands, IM – soils of mixed coniferous stands, U – soils of tillage, P – soils of pasture



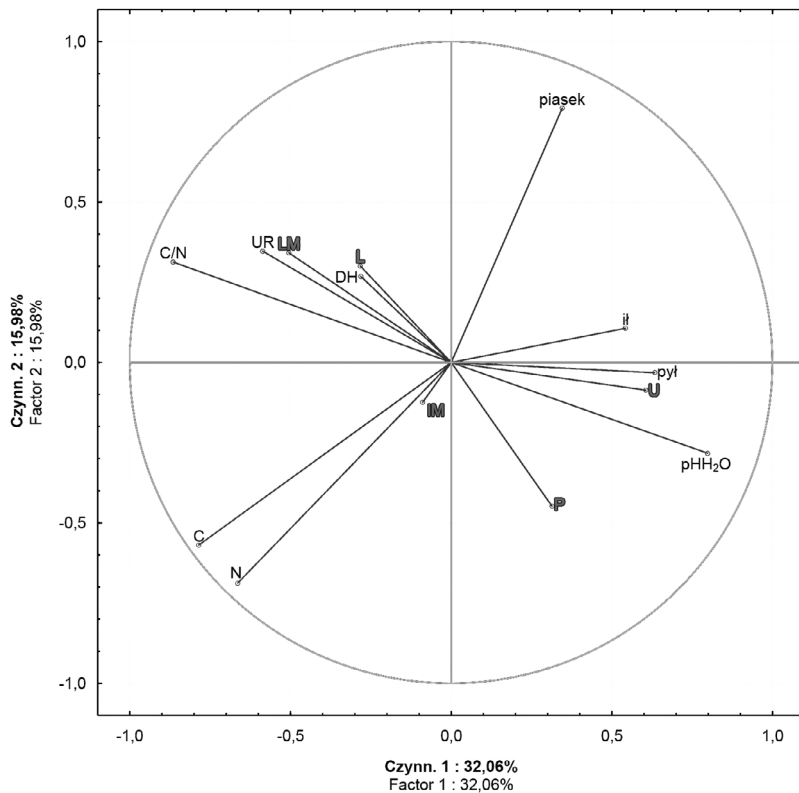
Rycina 1. Aktywność enzymatyczna gleb w różny sposób użytkowanych (różne litery oznaczają statystycznie istotne różnice aktywności enzymatycznej pomiędzy glebami różnie użytkowanymi; L – gleby drzewostanów liściastych, LM – gleby drzewostanów mieszanych liściastych, IM – gleby drzewostanów mieszanych iglastych, U – gleby upraw, P – gleby pastwisk, DH – aktywność dehydrogenaz ($\mu\text{mol TPF} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), UR – aktywność ureazy ($\text{mmol NH}_4^+ \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$))

Figure 1. Enzyme activity of soils of different types of land use (different letters indicate significant differences of enzymes activity between different types of land use; L – soil of broadleaf stands, LM – soil of mixed broadleaf stands, IM – soil of mixed coniferous stands, U – soil of tillage, P – soil of pasture, DH – dehydrogenases activity ($\mu\text{mol TPF} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), UR – urease activity ($\text{mmol NH}_4^+ \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$))

4. Dyskusja

Sposób użytkowania gleb ma wpływ na mikroorganizmy i mikrobiologiczne procesy poprzez zmianę ilości i jakości szczątków roślinnych trafiających do gleby, które są podstawowym źródłem glebowej materii organicznej. W niniejszych badaniach zanotowano zróżnicowanie właściwości gleb, a zwłaszcza aktywności enzymatycznej, które jest mię-

dzy innymi wynikiem różnego sposobu zagospodarowania. Najwyższą aktywność dehydrogenaz i ureazy zanotowano w glebach leśnych, które charakteryzowały się najwyższą akumulacją glebowej materii organicznej. Żyzność i produktywność gleb zależą od glebowej materii organicznej, która jest rezerwuarem składników pokarmowych i jest bardzo ważna w obiegu składników pokarmowych (Steiner et al. 2007), poprawia fizyczne, chemiczne i biologiczne właściwości gleb (Bhattacharya et al. 2010). Procesy związane z przemianami substancji organicznej w glebie dokonują się z udziałem mikroorganizmów glebowych i ich enzymów (Schimel, Bennett 2004). Gleby uprawne na ogół zawierają istotnie mniej materii organicznej, co przekłada się na słabszą strukturalność i mniejszą ilość mikroorganizmów. W przeprowadzonych badaniach odnotowano niską aktywność dehydrogenaz i ureazy w glebach uprawnych, wyższą aktywność tych enzymów wykazały gleby pastwisk. Aktywność gleb pastwisk była porównywalna do gleb leśnych z drzewostanami mieszanyymi iglastymi. Wysoka aktywność enzymatyczna gleb pastwisk związana jest z dość wysoką zawartością materii organicznej o dobrym tempie rozkładu, co potwierdza niski stosunek C/N. Dodatkowo wysoka aktywność enzymatyczna gleb pastwisk jest wynikiem wpływu pokrycia przez rośliny i braku orki. Podobne spostrzeżenia mieli Avellandea-Torres i in. (2013). Zróżnicowany skład roślinności pastwisk, w tym obecność zwłaszcza gatunków roślin motylkowych, przyczynia się do wzmożonej aktywności mikroorganizmów glebowych. Korelacja aktywności enzymatycznej ze stosunkiem C/N potwierdza, jak ważna jest jakość materii organicznej dostarczanej między innymi przez rośliny. Relacja C/N jest od dawna znanym parametrem wykorzystywanym do oceny stopnia rozkładu materii organicznej, była też wykorzystywana w konstrukcji wskaźników do oceny jakości gleb leśnych i żyzności siedlisk (Brożek et al. 2001; Ostrowska, Porębska 2015).



Rycina 2. Projekcja zmiennych na płaszczyznę czynnika pierwszego i drugiego (L – gleby drzewostanów liściastych, LM – gleby drzewostanów mieszanych liściastych, IM – gleby drzewostanów mieszanych iglastych, U – gleby upraw, P – gleby pastwisk, DH – aktywność dehydrogenaz, UR – aktywność ureazy) Figure 2. The projection of variables on a plane of the first and second factor (L – soil of broadleaf stands, LM – soil of mixed broadleaf stands, IM – soil of mixed coniferous stands, U – soil of tillage, P – soil of pasture, DH – dehydrogenases activity, UR – urease activity)

Wyższa aktywność enzymatyczna gleb leśnych może być związana z tym, że gleby leśne w porównaniu z glebami ornymi i łąkowymi zawierają większą biomasę grzybów. Organizmy grzybowe odgrywają ważną rolę w pierwszych etapach rozkładu wielkocząsteczkowych substancji, takich jak ligniny oraz celulozy. Mykoryzy związane z korzeniami drobnymi drzew w drzewostanach iglastych i liściastych wydzielają zewnątrzkomórkowe enzymy i powodują wzrost aktywności enzymatycznej (Colpaert, Van Laere 2006). W lesie skład gatunkowy drzewostanu determinuje zróżnicowanie mikroorganizmów oraz ich aktywność enzymatyczną (Baldrian 2014). Uzyskane wyniki niniejszych badań wskazują na znaczne zróżnicowanie aktywności enzymatycznej w obrębie badanych gleb leśnych. Najwyższą aktywność dehydrogenaz i wysoką aktywność ureazy wykazały gleby pokryte drzewostanem liściastym, najniższą aktywność badanych enzymów odnotowano w glebach drzewostanów mieszanych iglastych. Gatunki drzew kształtują właściwości gleb poprzez różnice w ilości i jakości substancji organicznej, która trafia do gleby (Vesterdal et al. 2008; Guckland et al. 2009). Dodatkowo gatunki drzew wpływają na pH gleb. Wartość pH ma znaczący wpływ na aktywność mikroorganizmów w glebie, enzymy wykazują dużą wrażliwość na odczyn gleby (Błońska et al. 2016).

Szata roślinna bezpośrednio wpływa na właściwości gleb, a pośrednio poprzez modyfikację mikroklimatu we wnętrzu lasu. Poszczególne gatunki drzew mają zróżnicowany wpływ na mikroklimat (Augusto et al. 2002). W drzewostanach liściastych i iglastych wykształcają się różne poziomy próchniczne. W glebach drzewostanów iglastych są to poziomy

organiczne (Ofh), a w glebach drzewostanów liściastych poziomy próchniczno-mineralne (A). Grubość i stopień rozkładu tych poziomów kształtują temperaturę i wilgotność wierzchnich poziomów gleb. Według Brzezińskiej i in. (2001), Brzostek i Finzi (2012) oraz Wallenstein i in. (2012) temperatura i wilgotność kształtują aktywność enzymatyczną w glebie. Wzrost zawartości wody w glebie ma znaczący wpływ na poziom aktywności dehydrogenaz (Brzezińska et al. 2001). Gleby leśne wykazują większą stabilność warunków termicznych i wilgotnościowych w porównaniu z glebami użytkowymi rolniczo, gdzie dochodzi do drastycznych zmian temperatury i uwilgotnienia. Dodatkowym czynnikiem ograniczającym aktywność biologiczną gleb uprawnych są stosowane środki ochrony roślin.

5. Podsumowanie

Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność pomiarów aktywności enzymatycznej do oceny gleb w różny sposób użytkowanych. W badaniach udowodniono silny związek aktywności badanych enzymów z ilością i jakością glebowej materii organicznej. Gleby leśne wykazały najwyższą aktywność dehydrogenaz i ureazy, najniższą aktywność enzymów odnotowano w glebach upraw, które zawierały istotnie mniej materii organicznej. Drzewostany liściaste i mieszane liściaste dostarczają korzystniejszej dla rozkładu mikrobiologicznego materii organicznej w porównaniu z drzewostanami mieszanyymi iglastymi. Wysoka aktywność enzymatyczna gleb pastwisk jest wynikiem wpływu roślinności i braku orki.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania przeprowadzono w ramach projektu sfinansowanego przez Polsko-Norweski Fundusz Badań Naukowych (PNRF-68-AI-1/07) oraz projektu badawczego nr NN309297534.

Literatura

- Acosta-Martínez V., Reicher Z., Bischoff M., Turco R.F. 1999. The role of tree leaf mulch and nitrogen fertilizer on turfgrass soil quality. *Biology and Fertility of Soils* 29: 55–61. DOI 10.1007/s003740050524.
- Alef K., Nannipieri P. 1995. Enzyme activities, w: *Methods in applied Soil Microbiology and Biochemistry* (eds. K. Alef, P. Nannipieri), Academic Press, London, New York, San Francisco.
- Augusto L., Ranger J., Binkley D., Rothe A. 2002. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science* 59: 233–253. DOI 10.1051/forest:2002020.
- Avellaneda-Torres L.M., Melgarejo L.M., Narváez-Cuenca C.E., Sánchez J. 2013. Enzymatic activities of potato crop soils subjected to conventional management and grassland soils. *Journal of Soil Sciences and Plant Nutrition* 13(2): 301–312. DOI 10.4067/S0718-95162013005000025.
- Baldrian P. 2014. Distribution of extracellular enzymes in soils: spatial heterogeneity and determining factors at various scales. *Soil Science Society of American Journal* 78: 11–18. DOI 10.2136/sssaj2013.04.0155dgs.
- Bhattacharyya R., Prakash V., Kundu S., Srisignificantva A.K., Gupta S.M. 2010. Long term effects of fertilization on carbon and nitrogen sequestration and aggregate associated carbon and nitrogen in the Indian sub-Himalayas. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 86: 1–16. DOI 10.1007/s10705-009-9270-y.
- Błońska E., Lasota J., Gruba P. 2016. Effect of temperate forest tree species on soil dehydrogenase and urease activities in relation to Rother properties of soil derived from less and galeoifluvial sand. *Ecological Research* 31(5): 655–664. DOI 10.1007/s11284-016-1375-6.
- Brożek S., Lasota J., Zwydak M. 2001. Próba zastosowania indeksu trofizmu gleb leśnych do diagnozy siedlisk nizinnych i wyżynnych. *Acta Agraria et Silviculturae Series Silvestris* 39: 35–46.
- Brzezińska M., Stępniewska Z., Stępniewski W., Włodarczyk T., Przywara G., Bennicelli R. 2001. Effect of oxygen deficiency on soil dehydrogenase activity (pot experiment with barley). *International Agrophysics* 15(1): 3–7.
- Brzostek E.R., Finzi A.C. 2012. Seasonal variation in the temperature sensitivity of proteolytic enzyme activity in temperate forest soils. *Journal of Geophysical Research* 117: G01018. DOI 10.1029/2011JG001688.
- Burns R.G. 1985. The rhizosphere: microbial and enzymatic gradient and prospects for manipulation. *Pedologie* 35(3): 283–295.
- Colpaert J.V., Van Laere A. 2006. A comparison of the extracellular enzyme activities of two ectomycorrhizal and leaf-saprotrophic basidiomycetes colonizing beech leaf litter. *New Phytologist* 134: 133–141. DOI 10.1111/j.1469-8137.1996.tb01153.
- Dahm H. 1984. Generic composition and physiological and cultural properties of heterotrophic bacteria isolated from soil, rhizosphere and mycorrhizosphere of pine (*Pinus sylvestris* L.). *Acta Microbiologica Polonica* 33(2): 147–156.
- Dick R.P. 1992. A review: Long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agriculture Ecosystems and Environment* 40: 25–36. DOI 10.1016/0167-8809(92)90081-L.
- Dick R.P. 1994. Soil enzyme activities as indicators of soil quality, w: *Defining soil quality for a sustainable environment*. (eds. J.W. Doran, D. Coleman, D.F. Bezdicek, B.A. Stewart). Soil Science Society of America, Madison, Wis., 107–124.
- Dick R.P. 1997. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health, w: *Biological indicators of soil health* (eds. C.E. Panikurst, B.M. Boube, V.V.S.R. Gupta), Oxford, Oxford University Press, 121–156.
- Gianfreda L., Rao A.M., Piotrowska A., Palumbo G., Colombo C. 2005. Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution. *Science of the Total Environment* 341(1–3): 265–79. DOI 10.1016/j.scitotenv.2004.10.005.
- Gil-Sotres F., Trasar-Cepeda C., Leiros M.C., and Seoane S. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 877–887. DOI 10.1016/j.soilbio.2004.10.003.
- Guckland A., Jacob M., Flessa H., Thomas F.M., Leuschner C. 2009. Acidity, nutrient stocks, and organic-matter content in soils of a temperate deciduous forest with different abundance of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172: 500–511. DOI 10.1002/jpln.200800072.
- Koper J., Piotrowska A. 1999. Aktywność enzymatyczna gleby jako parametr jej żyzności wywołany systemem uprawy. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 467: 127–134.
- Krämer S., Douglas M., Green D.M. 2000. Acid and alkaline phosphatase dynamics and their relationship to soil microclimate in a semiarid woodland. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 179–188. DOI 10.1016/S0038-0717(99)00140-6.
- Olszowska G. 2009. Ocena aktywności biochemicznej gleb leśnych w różnych typach siedliskowych terenów górskich. *Leśne Prace Badawcze* 70(4): 383–394. DOI 10.2478/v10111-009-0036-8.
- Olszowska G. 2016. Aktywność enzymatyczna gleb na obszarach sztucznej i naturalnej regeneracji lasu po klęsce huraganu w północno-wschodniej Polsce. *Leśne Prace Badawcze* 77(2): 89–93. DOI 10.1515/frp-2016-0010.
- Ostrowska A., Porębska G. 2015. Assessment of the C/N ratio as an indicator of the decomposability of organic matter in forest soils. *Ecological Indicators* 49: 104–109. DOI 10.1016/j.ecolind.2014.09.044.
- Saviozzi A., Levi-Minzi R., Cardelli R., Riffaldi R. 2001. A comparison of soil quality in adjacent cultivated, forest and native grassland soils. *Plant and Soil* 233: 251–259. DOI 10.1023/A:1010526209076.
- Schimel J.P., Bennett J. 2004. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. *Ecology* 85: 591–602. DOI 10.1890/03-8002.
- Shaw L.J., Burns R.G. 2003. Biodegradation of organic pollutants in the rhizosphere. *Advances in Applied Microbiology* 53: 1–60. DOI 10.1016/S0065-2164(03)53001-5.
- Stefanic G., Eliade G., Chirnoageanu I. 1984. Researches concerning a biological index of soil fertility, w: *Fifth symposium on soil biology*. (ed. M.P. Nemes, S. Kiss, P. Papacostea, C. Stefanic, M. Rusam. Romanian National Society of soil Science, Bucharest, 35–45.

- Steiner C., Teixeira W.G., Lehman J., Nehls T., de Macêdo J.L.U., Blum W.E.M., Zech W. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant Soil* 291: 275–290. DOI 10.1007/s11104-007-9193-9.
- Tabatabai M.A., Bremner J.M. 1972. Assay of urease activity in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 4: 479–487.
- Trasar-Cepeda C., Leiro's M.C., Gil-Sotres F., Seoane S. 1998. Towards a biochemical quality index for soils: an expression relating several biological and biochemical properties. *Biology and Fertility of Soils* 26: 100–106. DOI 10.1007/s003740050350.
- Wallenstein M.D., Haddix M.L., Lee D.D., Conant R.T., Paul E.A. 2012. A litter-slurry technique elucidates the key role of enzyme production and microbial dynamics in temperature sensitivity of organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry* 47: 18–26. DOI 10.1016/j.soilbio.2011.12.009.
- WRB (World Reference Base For Soil Resource). 2006. FAO, ISRIC and ISSS.
- Vesterdal L., Schmidt I., Callesen I., Nilsson L., Gundersen P. 2008. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *Forest Ecology and Management* 255: 35–48. DOI 10.1016/j.foreco.2007.08.015.

Wkład autorów

E.B. – 80% współudział w wykonaniu prac terenowych i zebraniu danych, analiza statystyczna, opracowanie wyników, interpretacja wyników oraz napisanie manuskryptu; J.L. – 15% współudział w wykonaniu prac terenowych i zebraniu danych; MZ – 5% współudział w wykonaniu prac terenowych i zebraniu danych.