

## Określenie intensywności przemian biochemicznych gleb w zależności od składu gatunkowego drzewostanu

Denoting the intensity of soil biochemical transition according to stand species composition

Grażyna Olszowska 

Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Ekologii Lasu, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn, Polska

Tel. +48 22 7150408, fax +48 22 7150507, e-mail: G.Olszowska@ibles.waw.pl

**Abstract.** The aim of this study was to denote biochemical soil activity in pure Scots pine, Norway spruce, silver fir, European larch, European beech and oak stands as well as in mixed fir-pine, beech-pine and fir-beech forests growing on a fertile fresh mixed deciduous site. The field work was carried out in the following Forest Districts: Nowe Ramuki (Mazursko-Podlaska forest region), Płońsk, Jabłonna, Brzeziny Siedlce, Grójec (Mazowiecko-Podlaska forest region) and Skarżysko, Ostrowiec and Marcule (Małopolska forest region). In 2015–2017, sample plots were assigned and chemical as well as soil enzyme activity measurements were made in each forest stand. Samples were taken from the organic (O) and humus (A) layers and for both the acidity (in 1M KCl), content of nitrogen, carbon, sum of exchangeable alkaline cations and hydrolytic acidity were determined. The investigation of soil enzymes included the measurements of urease, asparaginase, acid phosphatase and dehydrogenase activity. Coniferous trees, especially fir, spruce or larch, and mixed fir-beech and pine-beech stands were observed to have a very positive influence on the biochemical soil properties. The highest activity of dehydrogenase was observed in soils of spruce and mixed fir-beech stands, whereas it was lower in soils of beech and pine stands, and the lowest in oak stands. Oak stands were furthermore characterized by the lowest soil acidity, lowest concentration of alkaline cations, the lowest nitrogen and carbon content as well as the smallest C/N ratio. In overall, soil enzyme activity showed a significant correlation with chemical soil parameters.

**Keywords:** enzymatic activity, chemical properties, coniferous trees, beech, oak, mixed stand

**Słowa kluczowe:** aktywność enzymatyczna, właściwości chemiczne, drzewa iglaste, buk, dąb, drzewostan mieszany

### 1. Wstęp

Jednym z czynników decydujących o zasobności gleb leśnych w składniki pokarmowe jest skład gatunkowy drzewostanu (Błońska, Januszek 2010; Olszowska 2016). Trafiający do gleby materiał roślinny (opad roślinny, obumarłe korzenie, wydzieliny korzeni) poszczególnych gatunków drzew jest zróżnicowany pod względem właściwości chemicznych, co ma istotny wpływ na jakość gleb i skład ilościowo-jakościowy drobnoustrojów glebowych oraz na przebieg mikrobiologicznych procesów rozkładu substancji organicznej (Burns 1982; Alkrota et al. 2003; Caldwell 2005; Allison 2006). Szereg doniesień (Côte et al. 2000; Bonifacio et al. 2008) wskazuje na korzystniejszy wpływ gatunków liściastych niż iglastych na rozwój drobnoustrojów glebowych, bowiem w drzewostanach liściastych zarówno ściółka, jak i rozmieszczone w górnych poziomach mineralnych obumarłe korzenie stanowią lepszy jakościowo (bardziej podatny na dekompo-

zycję) substrat, pozwalający na efektywniejsze uwalnianie przyswajalnych przez rośliny składników pokarmowych. Stwierdzono także, że są one szybciej wymywane do gleby ze świeżej ściółki drzew liściastych (Zwoliński 2004). W praktyce leśnej wprowadzanie gatunków liściastych do monokultur sosnowych ma na celu poprawę zarówno jakości gleb, jak i efektywności wykorzystania przez drzewa zasobów pokarmowych, skutkującą większą produktywnością gatunku panującego (Zak et al. 1994; Lucas-Borja et al. 2016). Wpływ różnych składów gatunkowych na intensywność przemian biochemicznych nie jest do końca poznany. Trudno to przewidzieć na podstawie wyników dotyczących zasobności gleb i stanu odżywienia drzew w drzewostanach poszczególnych gatunków, ponieważ nie pozwalają one na określenie interakcji międzygatunkowej. Niektóre doniesienia (Šnajdr et al. 2008; Olszowska 2016) wskazują, że zawartość i właściwości substancji organicznej gleb, mające istotny wpływ na produktywność ekosystemu, kształtować się mogą w wyniku

Wpłynęło: 16.10.2018 r., recenzowano: 22.11.2018 r., zaakceptowano: 10.12.2018 r.

synergicznego lub antagonistycznego oddziaływania występujących gatunków drzew. Ze względu na duże znaczenie drobnoustrojów glebowych w przemianach biochemicznych, jak również w cyklach krążenia pierwiastków, bardzo ważne jest poznanie oddziaływania składu gatunkowego drzewostanu na aktywność enzymatyczną mikroorganizmów w glebie (Bielińska et al. 2005; Błońska 2011a; Błońska et al. 2013).

Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu różnych gatunków drzew leśnych: sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L., świerka pospolitego *Picea abies* (L.) Karst., jodły pospolitej *Abies alba* Mill., modrzewia europejskiego *Larix decidua* Mill., dębu szypułkowego *Quercus robur* L., buka zwyczajnego *Fagus sylvatica* L., a także mieszanych drzewostanów: jodłowo-sosnowego, sosnowo-bukowego oraz jodłowo-bukowego na właściwości fizyko-chemiczne oraz biochemiczne, a zwłaszcza na aktywność enzymatyczną: dehydrogenaz, ureazy, asparaginazy i fosfatazy kwaśnej.

## 2. Teren i metodyka badań

Badania były prowadzone w nadleśnictwach: Nowe Ramuki, Jabłonna, Brzeziny, Płońsk, Siedlce, Grójec, Skarżysko, Ostrowiec Świętokrzyski i Marcule. Do badań wytypowano 27 powierzchni na siedliskach lasowych, z drzewostanem w wieku 90–120 lat (tab. 1).

W latach 2015–2017 wiosną i jesienią pobierano z każdej powierzchni próby ogólne do analiz chemicznych oraz pomiarów aktywności enzymatycznej gleb (z 10 punktów równomiernie rozmieszczonych na powierzchni) z poziomu organicznego (O) i poziomu próchnicznego (A). Oznaczenie właściwości chemicznych oraz aktywności enzymatycznej gleb wykonano po przesianiu powietrznie suchych prób glebowych przez sito o średnicy oczek 2 mm. Analizy chemiczne, wykonane według ogólnie przyjętych metod (Ostrowska et al. 1991), obejmowały oznaczenia: odczynu gleby w 1 M KCl – metodą potencjo-

**Tabela 1. Charakterystyka powierzchni badawczych**

Table 1. Characteristics of research plots

Nadleśnictwo Forest district	Kraina przyrodniczo-leśna <sup>1</sup> Forest region <sup>1</sup>	Skład gatunkowy Species composition	Gatunek Tree species	STL Forest site type	Typ i podtyp gleby Soil type
Nowe Ramuki	II Mazursko-Podlaska	6So, 3Md, 1Św 8So, 1Brz, 1Db	So	LMśw	RDbr RDb
Jabłonna	IV Mazowiecko-Podlaska	6Św, 3So, 1Św	Św	LMśw	RDbr RDw
Płońsk	IV Mazowiecko-Podlaska	8Św, 2So 7Św, 3So		LMśw	RDbr RDbr
Brzeziny	IV Mazowiecko-Podlaska	7Jd, 2So, 1Db 8Jd, 1Db, 1Db	Jd	LMśw	RDw
Skarżysko	VI Małopolska	6Jd, 2Jd, 2Db 7Jd, 3Jd		LMśw	RDw
Ostrowiec Świętokrzyski	VI Małopolska	10Md 8Md, 1Bk, 1Db	Md	LMśw	BRwy
Marcule	VI Małopolska	9Md, 1Bk		LMśw	RDbr
Grójec	IV Mazowiecko-Podlaska	8Db, 2So	Db	LMśw	RDbr
Siedlce	IV Mazowiecko-Podlaska	9Db, 1So		LMśw	RDw
Brzeziny	IV Mazowiecko-Podlaska	8Bk, 1Bk, 1Db	Bk	LMśw	BRwy
Brzeziny	IV Mazowiecko-Podlaska	5So, 3Bk, 2Db	So-Bk	LMśw	RDbr BRk
Brzeziny	IV Mazowiecko-Podlaska	4Jd, 3So, 3Db	Jd-So	LMśw	BRwy BRwy
Skarżysko	VI Małopolska	6Jd, 2Bk, 2So 9Bk, 1Jd	Jd-Bk	LMśw	RDw RDbr

<sup>1</sup> według / according to Zielony and Kliczkowska (2012)

RDbr – **gleby rdzawe brunatne** / cambic brunic arenosol, BRwy – **gleby brunatne wylugowane** / dystric cambisol, RDw – **gleby rdzawe właściwe** / cambic arenosol, RDb – **gleby rdzawe bielcowe** / albic brunic arenosol, LMśw – fresh mixed broadleaved forest, So – Scots pine, Św – Norway spruce, Jd – silver fir, Md – European larch, Db – oak sp., Bk – European beech, So-Bk – beech-pine, Jd-So – fir-pine, Jd-Bk – fir-beech

metryczną, zawartości azotu – metodą destylacyjną Kjeldahla, węgla – na analizatorze Leco SC-132, sumę wymiennych kationów zasadowych ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$ ), po ekstrakcji gleby 1 M octanem amonu – techniką absorpcji atomowej, kwasowości hydrolitycznej – metodą Kappena, oraz pojemności sorpcyjnej (T) oraz stopnia wysycenia zasadami (V%).

Badania enzymatyczne obejmowały pomiar aktywności: ureazy i asparaginazy – metodą Tabatabai i Bremnera (w mg  $\text{N-NH}_4$  na 10 g gleby), fosfatazy kwaśnej – metodą Tabatabai i Bremnera (w mg PNP na 100 g gleby) i dehydrogenaz – metodą Lenharda według procedury Casidy i in. (w  $\mu\text{mol}$  trójfenyloformazanu (TPF) na 100 g gleby (Alef, Nanniperi 1995; Tabatabai, Bremner 1969).

Do statystycznej oceny wpływu siedliska na badane parametry chemiczne i biologiczne zastosowano analizę wariancji

wieloczynnikowej ANOVA. Zależności pomiędzy aktywnością biologiczną gleb a właściwościami chemicznymi gleb oraz pomiędzy poszczególnymi parametrami biochemicznymi określono na podstawie współczynników korelacji Pearsona, przyjmując 95% granice ufności ( $p < 0,05$ ) do weryfikacji istotności. Obliczenia statystyczne przeprowadzono przy pomocy programu statystycznego Statistica 10 (Statsoft 2010).

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Właściwości chemiczne gleb

Stwierdzono duże zróżnicowanie parametrów chemicznych w obu poziomach pod badanymi gatunkami drzew (tab. 2). Wyniki pomiarów pH w 1M KCl wskazują, że odczyn gleb,

**Tabela 2. Właściwości chemiczne gleb pod różnymi gatunkami drzew**

Table 2. Chemical properties of soils under different species of trees

Poziom organiczny Organic horizon (O)	Gatunek drzewa / Tree species																	
	So		Św		Jd		Md		Db		Bk		So-Bk		Jd-So		Jd-Bk	
	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a
pH w KCl	3,0	0,1	3,0	0,1	3,2	0,08	3,55	0,17	3,8	0,03	3,3	0,07	3,1	-	3,1	0,1	3,7	0,3
$C_{\text{org}}$ [%]	21,3	4,3	28,7	1,7	21,7	2,19	16,06	1,50	4,8	0,62	10,8	1,19	22,1	4,1	20,1	3,0	19,4	2,5
N [%]	0,9	0,2	1,2	0,1	1,1	0,10	0,80	0,07	0,3	0,03	0,6	0,05	1,0	0,2	0,9	0,1	0,9	0,1
C/N	23,2	1,8	23,1	0,6	20,2	0,35	20,1	0,76	16,2	0,22	19,1	0,48	22,8	0,7	22,5	0,1	21,7	0,3
H [cmol/kg]	59,4	13,6	83,1	4,6	59,2	4,85	43,01	4,85	12,4	1,26	32,5	4,41	61,8	11,9	57,7	10,9	46,9	7,7
S [cmol/kg]	8,3	1,6	11,3	1,6	10,1	0,96	14,54	1,23	4,1	0,35	4,8	0,27	10,5	3,4	9,7	0,2	19,5	3,3
T [cmol/kg]	67,7	15,2	94,4	4,0	69,3	4,65	57,55	3,89	16,4	1,32	37,4	4,48	72,2	15,4	67,5	11,0	66,4	4,4
V [%]	14,7	0,9	13,9	2,3	18,7	2,85	39,45	8,57	35,0	4,94	15,9	2,34	16,5	2,4	17,4	3,0	44,0	14,2
Poziom próchniczny Humus horizon (A)	Gatunek drzewa / Tree species																	
	So		Św		Jd		Md		Db		Bk		So-Bk		Jd-So		Jd-Bk	
	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a	x	±a
pH w KCl	3,3	0,1	3,1	0,0	3,1	0,04	3,4	0,12	3,7	0,02	3,4	0,04	3,2	0,2	3,1	0,1	3,3	0,2
$C_{\text{org}}$ [%]	2,2	0,2	3,0	0,4	2,4	0,29	2,2	0,14	1,8	0,20	2,4	0,12	2,2	0,2	2,5	0,3	2,8	0,4
N [%]	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,02	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0
C/N	20,7	1,7	20,3	1,2	19,0	0,67	16,8	0,95	16,1	0,88	20,8	0,28	20,2	3,5	18,8	0,2	18,2	0,1
H [cmol/kg]	11,8	1,0	17,3	1,8	12,2	1,36	11,9	1,12	8,0	0,49	10,6	0,52	12,1	0,0	11,9	0,8	13,3	0,1
S [cmol/kg]	0,6	0,1	0,8	0,1	0,7	0,09	1,9	0,65	0,7	0,22	0,5	0,08	1,0	0,2	0,9	0,1	2,1	0,8
T [cmol/kg]	12,4	1,0	18,1	1,7	13,0	1,36	13,8	0,96	8,7	0,46	11,1	0,55	13,1	0,2	12,8	0,9	15,4	0,8
V [%]	5,0	0,6	4,7	0,8	6,3	1,09	18,7	8,01	9,3	3,10	4,3	0,75	8,0	1,6	7,3	0,3	16,0	6,4

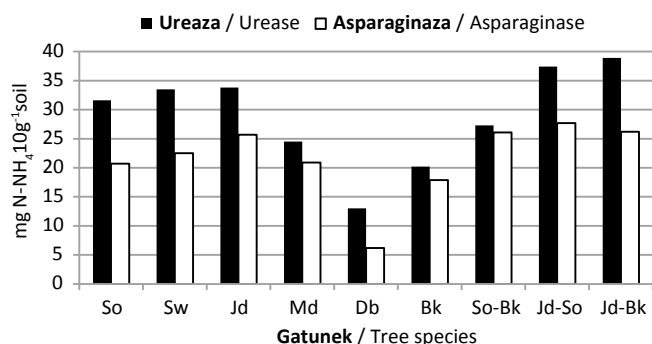
x – wartość średnia / average value, ±a – błąd standardowy / standard error, S – suma zasadowych kationów wymiennych / sum of exchangeable bases, T – całkowita pojemność sorpcyjna / hydrolytic sorption capacity, V – stopień wysycenia kompleksu sorpcyjnego kationami zasadowymi / degree of base saturation, H – kwasowość hydrolityczna / hydrolytic acidity

So – Scots pine, Św – Norway spruce, Jd – silver fir, Md – European larch, Db – oak sp., Bk – European beech, So-Bk – beech-pine, Jd-So – fir-pine, Jd-Bk – fir-beech

niezależnie od gatunku drzewa, był kwaśny. Notowano istotne różnice w odczynie gleb pomiędzy dębem a sosną oraz świerkiem w poziomie O ( $H=23,7$ ;  $p=0,003$ ) oraz pomiędzy świerkiem i jodłą a dębem w poziomie A ( $H=25,83$ ;  $p=0,001$ ). Widoczne różnice pomiędzy modrzewiem i bukiem nie były istotne. Analizy chemiczne wykazały istotną zależność pomiędzy zawartością węgla organicznego a miejscem pobrania prób glebowych. W poziomie O notowano statystycznie wyższe wartości pod świerkiem i jodłą niż pod dębem ( $H=25,48$ ;  $p=0,0013$ ). W poziomie A badanych gleb różnice nie były istotne. W poziomie O, podobnie jak w przypadku węgla, stwierdzono istotnie więcej azotu w glebach pod świerkiem i jodłą niż pod dębem ( $H=24,97$ ;  $p=0,0016$ ). W poziomie A badanych gleb różnice te nie były istotne. W poziomie O stwierdzono istotnie szerszy ( $H=24,99$ ;  $p=0,0016$ ) stosunek C/N w glebach pod sosną i świerkiem niż pod dębem, natomiast w poziomie A najniższy stosunek C/N wystąpił w glebach pod modrzewiem i pod dębem, najwyższy pod sosną i świerkiem oraz bukiem, a różnice te nie były istotne. Gleby pod modrzewiem i pod drzewostanem mieszanym Jd-Bk charakteryzowały się istotnie ( $H=26,83$ ;  $p=0,0008$ ) wyższą niż pod dębem i bukiem zawartością kationów zasadowych (S) w obu badanych poziomach. Stwierdzono istotnie wyższą ( $H=25,28$ ;  $p=0,0014$ ) kwasowość hydrolityczną ( $H_i$ ) gleb pod świerkiem i jodłą oraz sosną niż pod dębem w obu badanych poziomach. Istotnie wyższą ( $H=25,99$ ;  $p=0,001$ ) pojemność sorpcyjną gleb (T) notowano pod jodłą i świerkiem niż pod dębem i bukiem, a prawidłowość ta występowała w obu badanych poziomach. Natomiast w glebach pod modrzewiem i dębem oraz drzewostanem Jd-Bk udział kationów zasadowych (V) był istotnie wyższy ( $H=23,7$ ;  $p=0,0026$ ) niż pod sosną, świerkiem oraz bukiem, przy czym istotne różnice notowano tylko w poziomie O.

### 3.1. Aktywność enzymatyczna gleb

Aktywność ureazy była istotnie ( $H=25,7$ ;  $p=0,0012$ ) wyższa w glebach pod jodłą i drzewostanem mieszanym Jd-Bk,



Oznaczenia jak w tabeli 2 / Denotes as in table 2

Rycina 1. Aktywność ureazy i asparaginazy w poziomie O pod różnymi gatunkami drzew

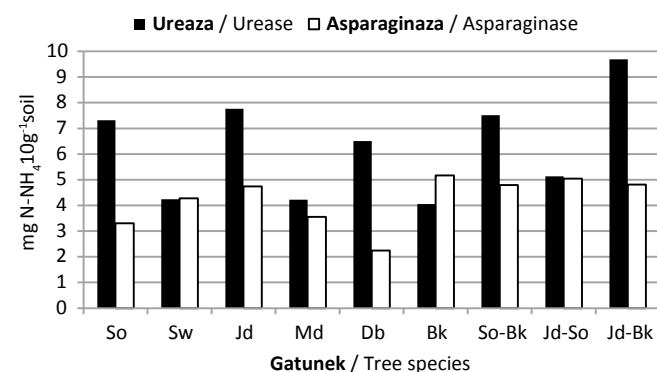
Figure 1. Urease and asparaginase activity in O level under different species of trees

niż pod dębem, przy czym statystycznie istotne różnice notowano jedynie w poziomie O (ryc. 1). Aktywność asparaginazy była istotnie wyższa pod bukiem i jodłą niż pod dębem w obu badanych poziomach gleby (poziom O,  $H=18$ ;  $p=0,02$ , poziom A,  $H=22$ ;  $p=0,004$ ) (ryc. 1 i 2). Nie stwierdzono istotnych różnic aktywności fosfatazy kwaśnej w poziomie A badanych gleb (ryc. 4). Aktywność tego enzymu była natomiast istotnie wyższa ( $H=27,3$ ;  $p=0,006$ ) w poziomie O gleb pod świerkiem, modrzewiem i sosną oraz pod drzewostanem mieszanym Jd-So, Jd-Bk i So-Bk, niż pod dębem (ryc. 3). Podobnie jak w przypadku wyżej omawianych enzymów, istotnie wyższą ( $H=18$ ;  $p=0,02$ ), jednak tylko w poziomie O, aktywność dehydrogenaz stwierdzono pod świerkiem niż pod dębem i bukiem oraz pod drzewostanem mieszanym Jd-So (ryc. 3).

Badane parametry chemiczne istotnie korelowały z parametrami biochemicznymi gleb na powierzchniach z różnymi gatunkami drzew (tab. 3).

## 4. Podsumowanie

Analizując wpływ różnych gatunków na właściwości biochemiczne gleb, wykazano wyjątkowo korzystny wpływ drzew iglastych, zwłaszcza jodły, świerka i modrzewia oraz drzewostanów mieszanych jodłowo-bukowych oraz sosnowo-bukowych. Gleby pod drzewostanem dębowym odznaczały się najniższym zakwaszeniem, najniższą koncentracją zasadowych kationów oraz zawartością węgla i azotu, najniższym stosunkiem C/N. Znacznie wyższe wartości wymienionych powyżej parametrów chemicznych obserwowano w glebach pod drzewostanami: jodłowym, modrzewiowym i świerkowym oraz pod drzewostanami mieszanymi. Najwyższą aktywność dehydrogenaz, enzymów uznawanych za wskaźnik intensywności metabolizmu mikroorganizmów glebowych (Nannipieri et al. 2002; Piotrowska 2011), stwierdzono w glebach drzewostanu świerkowego oraz drzewostanu mieszanego jodłowo-bukowego, niższą w glebie drzewostanu bukowego i sosnowego, a najniższą w glebach drzewostanu dębowego. Drzewa oddziałują na właściwości gleb nie



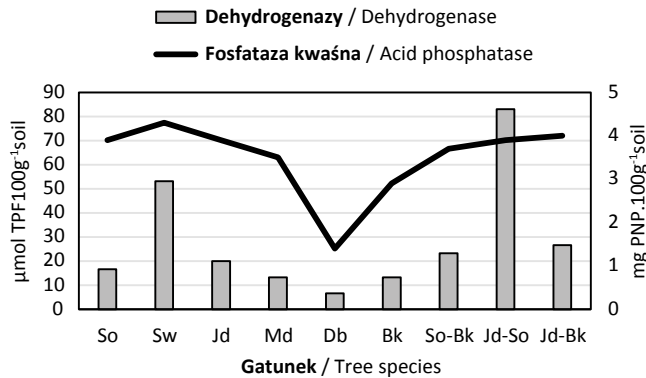
Oznaczenia jak w tabeli 2 / Denotes as in table 2

Rycina 2. Aktywność ureazy i asparaginazy w poziomie A pod różnymi gatunkami drzew

Figure 2. Urease and asparaginase activity in A level under different species of trees

tylko poprzez opad martwych szczątków, ale również poprzez systemy korzeniowe – najwyższą biomasę korzeni drobnych stwierdzono w drzewostanie bukowo-dębowym (Grygoruk 2016). Jednocześnie w niniejszych badaniach w glebie pod tymi gatunkami zanotowano najniższą aktywność badanych enzymów glebowych. Doświadczenie potwierdziło korzystny wpływ drzewostanów mieszanych Jd-Bk, Jd-So oraz So-Bk na aktywność biochemiczną gleb. Błońska i Januszek (2010)

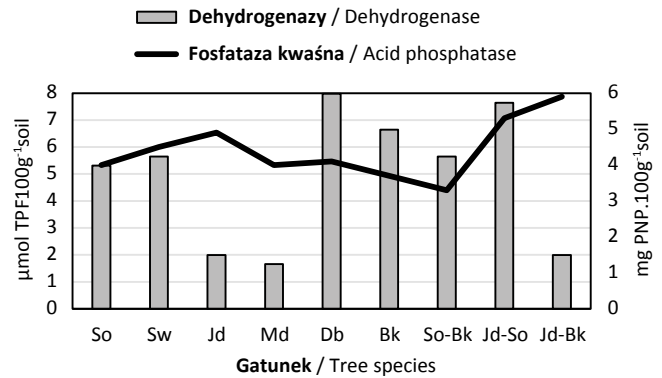
stwierdzają jednak pozytywne oddziaływanie dębu jako domieszki w drzewostanach sosnowych, skutkujące wzrostem aktywności biochemicznej gleb. W efekcie tego oddziaływania formują się poziomy akumulacji próchnicy bogate w azot. W niniejszych badaniach jodła, modrzew i świerk oraz drzewostany mieszane Jd-Bk najkorzystniej wpływały na intensyfikację aktywności enzymatycznej. Aktywność enzymów była ściśle związana z zawartością substancji organicznej,



Oznaczenia jak w tabeli 2 / Denotes as in table 2

**Rycina 3. Aktywność dehydrogenaz i fosfatazy kwaśnej w poziomie O pod różnymi gatunkami drzew**

Figure 3. Dehydrogenase and acid phosphatase activity in the O level under different species of trees



Oznaczenia jak w tabeli 2 / Denotes as in table 2

**Rycina 4. Aktywność dehydrogenaz i fosfatazy kwaśnej w poziomie A pod różnymi gatunkami drzew**

Figure 4. Dehydrogenase and acid phosphatase activity in the A level under different species of trees

**Tabela 3 . Korelacje ( $r_{yx}$ ) pomiędzy parametrami chemicznymi (y) a biologicznymi (x) gleb**

Table 3. Correlation ( $r_{yx}$ ) between chemical (y) and biological (x) parameters of soil

y	x			
	Ureaza Urease	Asparaginaza Asparaginase	Dehydrogenazy Dehydrogenases	Fosfataza kwaśna Acid phosphatase
C [%]	0,80167***	0,77566***	0,36731*	0,88436***
pH KCl	-0,59116***	-0,6157***	-0,31786*	-0,6582***
N [%]	0,81466***	0,782553***	0,35029*	0,87804***
C/N	0,65078***	0,73944***	0,355705*	0,79491***
<b>Kwasowość hydrolityczna</b>				
Hydrolytic acidity ( $H_h$ )	0,78044***	0,74014***	0,38399*	0,86928***
<b>Suma zasadowych kationów wymiennych</b>				
Sum of exchangeable bases (S)	0,47484**	0,46866**	0,19099	0,59145**
<b>Pojemność sorpcyjna</b>				
Hydrolytic sorption capacity (T)	0,80256***	0,764425***	0,387206**	0,90519***
<b>Suma zasad</b>				
Degree of base saturation V [%]	-0,41566**	-0,4414**	-0,22881	-0,37992*

\*\*\*  $p < 0,001$  \*\*  $p < 0,01$  \*  $p < 0,05$

czego dowodem była ich wyższa aktywność w poziomach organicznych niż próchnicznych gleb, niezależnie od składu gatunkowego drzewostanu. Liczne dane literaturowe (Landgra et al. 2000; Leirós et al. 2000; Zwoliński 2008; Olszowska 2010; Kotroczó et al. 2014) potwierdzają ścisły związek aktywności enzymatycznej i rozwoju drobnoustrojów z zawartością węgla organicznego, który jest ich podstawowym substratem energetycznym.

Właściwości fizyczne i chemiczne gleb są silnie powiązane ze sobą oraz istotnie oddziałują na organizmy glebowe, a tym samym na aktywność enzymów (Gil-Sotres et al. 2005; Mueller et al. 2012). Szereg prac wskazuje na istotną korelację pomiędzy aktywnością biologiczną a żyznością gleb (np. Myśków et al. 1996; Trasar-Cepeda et al. 2000, 2008; Zwoliński 2004; Olszowska et al. 2005, 2007). Potwierdzają to uzyskane wyniki badań, wskazujące na wyraźną zależność aktywności enzymatycznej od właściwości chemicznych gleb. Omówione powyżej charakterystyki biochemiczne gleb były istotnie skorelowane przynajmniej z kilkoma parametrami określającymi ich żyzność, jak: zawartość węgla organicznego i azotu, suma kationów zasadowych, kwasowość hydrolityczna i pojemność sorpcyjna. Poza właściwościami chemicznymi gleb, inne czynniki, takie jak skład granulometryczny gleb, jakość substancji organicznej – determinowana składem gatunkowym drzewostanu, warunki klimatyczne, miały wpływ na badane parametry biochemiczne (Bauchus et al. 1998; Côte et al. 2000; Chaer et al. 2009). Wszystkie testowane parametry biochemiczne są związane, aczkolwiek w różnym aspekcie, z przebiegiem rozkładu substancji organicznej, procesu gwarantującego utrzymanie niezbędnego dla rozwoju roślin zapasu składników pokarmowych. Za miarodajny wskaźnik żyzności siedlisk uważa się właściwości gleb określone m.in. składem chemicznym, stanem mikrobiologicznym i aktywnością enzymatyczną (Nannipieri et al. 2002; Olszowska et al. 2005; Błońska 2011b; Piotrowska 2010, 2011). Analiza wskazuje, że rodzaj materii organicznej akumulowanej pod drzewostanami zależy od składu gatunkowego drzewostanu, ale i cech utworów glebowych, na jakich te drzewostany wznoszą się, zwłaszcza od uziarnienia i obecności lub braku węglanu wapnia. Drzewostany jodłowe, świerkowe oraz mieszane So-Bk, Jd-Bk, So-Bk dostarczają korzystniejszej dla rozkładu mikrobiologicznego materii organicznej, natomiast oddziaływanie dębu i buka wykazuje działanie hamujące jej rozkład. Błońska (2015) stwierdziła, że oddziaływanie buka jest zróżnicowane w zależności od zasobności skały macierzystej w wapń. Jeżeli jest go dużo w skale macierzystej, buk powoduje alokację wapnia do poziomów akumulacji próchnicy, przez co korzystnie oddziałuje na aktywność biologiczną. Gdy podłoże jest ubogie w ten składnik, wpływ buka jest mniej korzystny, a szczątki organiczne są wolniej rozkładane. W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że zróżnicowanie właściwości biochemicznych gleb uzależnione jest nie tylko od składu gatunkowego drzewostanu, ale także od homogeniczności poziomu akumulacji próchnicy. Gleby są największym lądowym złożem węgla organicznego (Corg.) w biosferze, gromadzącym

większe zasoby niż rośliny wraz z atmosferą. W związku z dużym arealem lasów gleby leśne odgrywają ważną rolę w globalnym obiegu węgla (Jastrow et al. 2007; Mueller et al. 2012). Akumulacja węgla organicznego jest również procesem o kluczowym znaczeniu dla ekosystemów leśnych. Ma on szczególne znaczenie w obiegu pierwiastków i kształtowaniu się żyzności gleb. Obecny skład gatunkowy lasów jest przede wszystkim wynikiem działalności gospodarczej człowieka. Rozwój rolnictwa doprowadził do wycinania lasów i pozyskiwania żyznych gleb pod uprawę rolniczą. W wyniku takiego działania, przetrwały w przeważającej mierze lasy rosnące na ubogich glebach, przede wszystkim lasy sosnowe. W Polsce sosna zajmuje najsłabsze dystroficzne i oligotroficzne siedliska. Na takim ubogim podłożu niezwykle istotne jest dbanie o odpowiedni udział gatunków domieszkowych, które wzbogacają swoim opadem powierzchniową warstwę gleby, przyczyniając się tym samym do przyspieszenia tempa rozkładu materii organicznej i sprawnego obiegu składników pokarmowych. Prezentowane badania wskazują, że jodła, modrzew i świerk, a także drzewostany mieszane jodłowo-bukowe i sosnowo-bukowe, korzystnie wpływają na właściwości biochemiczne gleb.

Stosunkowo niewielkie wykorzystanie testów biochemicznych w diagnostyce gleb leśnych wynika z braku standaryzowanych metod analitycznych, pozwalających na interpretację uzyskanych wyników (Sariyildiz et al. 2005; Zornoza et al. 2007). Zróżnicowana profilowa budowa gleb leśnych, a także wpływ szeregu czynników środowiskowych na aktywność enzymów glebowych, uniemożliwiają ustalenie „norm” parametrów biochemicznych dla poszczególnych typów gleb lub siedlisk leśnych, podobnie jak ma to miejsce w przypadku parametrów chemicznych (Nielsen et al. 2002; Moffat 2003). Wskaźniki biochemiczne mogą natomiast być bardzo przydatne w badaniach porównawczych – do oceny jakości gleb lub ich reakcji na czynniki zewnętrzne, zarówno naturalne, jak i antropogeniczne. Pokazały to badania przeprowadzone na obszarach z różnymi gatunkami drzew. Przemawia to za szerszym wykorzystaniem wskaźników biochemicznych w badaniach gleb leśnych, zwłaszcza przy ocenie wpływu czynników stresowych na lasy (np. zanieczyszczeń przemysłowych, pożarów, anomalii pogodowych), zmian klimatycznych oraz zabiegów hodowlanych a także w prognozowaniu dalszego ich rozwoju.

## 5. Wnioski

Wyraźnie niższą zasobność gleb w składniki pokarmowe, wyrażoną mniejszą zawartością węgla organicznego, azotu i kationów zasadowych oraz niższą pojemnością sorpcyjną, stwierdza się na powierzchniach pod bukiem, niż pod drzewami iglastymi i drzewostanami mieszanymi.

Wyższa aktywność ureazy, asparaginazy, fosfatazy kwaśnej i dehydrogenaz w drzewostanach mieszanych niż w monokulturach może wskazywać na pozytywny wpływ wprowadzania gatunków liściastych na jakość i żyzność gleb, skutkującą większą produktywnością gatunku panującego.

Aktywność badanych enzymów jest istotnie skorelowana z zawartością węgla organicznego i azotu, sumą kationów zasadowych, kwasowością hydrolityczną oraz pojemnością sorpcyjną. Wyraźny związek tych parametrów z żyznością gleb przemawia za możliwością wykorzystania parametrów aktywności biochemicznej jako miarodajnych wskaźników żyzności gleb leśnych.

Pozytywne oddziaływanie jodły i buka, jako domieszki w drzewostanach sosnowych, skutkuje wzrostem aktywności mikrobiologicznej gleby.

## Konflikt interesów

Autorka deklaruje brak potencjalnych konfliktów.

## Źródło finansowania badań

Badania sfinansowano z funduszu badań własnych Instytutu Badawczego Leśnictwa – nr tematu 260101.

## Literatura

- Aikio S., Väre H., Strömmer R. 2000. Soil microbial activity and biomass in the primary succession of a dry heath forest. *Soil Biology & Biochemistry* 32(8-9): 1091–1100. DOI 10.1016/S0038-0717(00)00019-5.
- Alef K., Nannipieri P. 1995. Enzyme activities, w: Alef K., Nannipieri P. (eds.) *Methods in applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, London, New York, San Francisco, 311–366. ISBN 9780125138406.
- Alkrota I., Aizpurua A., Riga P., Albizu I., Amezaga I., Garbisu C. 2003. Soil enzyme activities as biological indicators of soil health. *Reviews on environmental health* 18(1): 65–73. DOI 10.1515/REVEH.2003.18.1.65.
- Allison S.D. 2006. Soil minerals and humic acids alter enzyme stability: implications for ecosystem processes. *Biogeochemistry* 81: 361–373. DOI 10.1007/s10533-006-9046-2.
- Bauchus J., Paré D., Côte L. 1998. Effects of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in southern boreal forest. *Soil Biology & Biochemistry* 30: 1077–1089.
- Bielińska E.J., Węgorok T. 2005. Ocena oddziaływania zadrzewienia śródpołnego na aktywność enzymatyczną gleby płowej. *Acta Agrophysica* 5(1): 17–24.
- Błońska E. 2011a. Enzymy glebowe i ich znaczenie w ocenie aktywności biologicznej gleb leśnych na przykładzie rezerwatów przyrody nizin i wyżyn Polski. *Roczniki Gleboznawcze* 62(4): 163–172.
- Błońska E. 2011b. Soil enzyme activity as an indicator of changes in forest soil. *Polish Journal of Soil Science* 44(1): 75–80.
- Błońska E. 2015. Effect of stand species composition the enzyme activity and organic matter stabilization in forest soil. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kollątaja w Krakowie* 404: 1–86.
- Błońska E., Januszek K. 2010. Wpływ składu gatunkowego drzewostanów na aktywność enzymatyczną i właściwości fizykochemiczne gleb leśnych. *Roczniki Gleboznawcze* 61(2): 5–14.
- Błońska E., Lasota J., Januszek K. 2013. Relation between properties of humus horizon and oak participation in a Scots pine stands. *Soil Science Annual* 64(3): 82–87. DOI 10.2478/ssa-2013-0016.
- Bonifacio E., Caimi A., Falsone G., Trofimov S., Zanini E., Godbold D L. 2008. Soil properties under Norway spruce differ in spruce dominated and mixed broadleaf forests of the Southern Taiga. *Plant and Soil* 308: 149–159. DOI 10.1007/s11104-008-9615-3.
- Burns R.G. 1982. Enzyme activity in soil: location and a possible role on microbial ecology. *Soil Biology & Biochemistry* 34: 423–427. DOI 10.1016/0038-0717(82)90099-2.
- Caldwell B.A. 2005. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. *Pedobiologia* 49: 637–644. DOI 10.1016/j.pedobi.2005.06.003.
- Chaer G.M., Myrold D.D., Bottomley P.J. 2009. A soil quality index based on the equilibrium between soil organic matter and biochemical properties of undisturbed coniferous forest soils of the Pacific Northwest. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 822–830. DOI 10.1016/j.soilbio.2009.02.005.
- Côte L., Brown S., Paré D., Fyles J., Bauchus J. 2000. Dynamics of carbon and nitrogen mineralization in relation to stand type, stand age and soil texture in the boreal mixed wood. *Soil Biology & Biochemistry* 32: 1079–1090. DOI 10.1016/S0038-0717(00)00017-1.
- 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.
- Grygoruk D. 2016. Root vitality of *Fagus sylvatica* L., *Quercus petraea* Liedl. and *Acer pseudoplatanus* L. in mature mixed forest stand. *Folia Forestalia Polonica, Seria A Forestry* 58(2): 55–61. DOI 10.1515/ffp-2016-0006.
- Jastrow J.D., Amonette J.E., Bailey V.L. 2007. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change* 80: 5–23.
- Kotroczo Z., Veres Z., Fekete J., Krakomperger Z., Tóth J.A., Lajtha K., Tóthmérész B. 2014. Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation. *Soil Biology and Biochemistry* 70: 237–243. DOI 10.1016/j.soilbio.2013.12.028.
- Landgra D., Wedig S., Klose S. 2000. Medium- and short-term available organic matter, microbial biomass, and enzyme activities in soils under *Pinus sylvestris* L. and *Robinia pseudoacacia* L. in a sandy soil in NE Saxony, Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168(2): 193–201. DOI 10.1016/S0038-0717(99)00195-9.
- Leirós M.C., Trasar-Cepeda C., Seoane S., Gil-Sotres F. 2000. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in an area of European temperature-humid zone (Galicia, NW Spain): General parameters. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 733–745. DOI 10.1016/S0038-0717(99)00195-9.
- Lucas-Borja M.E., Hedo J., Cerdá A., Candel-Pérez D., Viñegla B. 2016. Unravelling the importance of forest age stand and forest structure driving microbiological soil properties, enzymatic activities and soil nutrients content in Mediterranean Spanish black pine (*Pinus nigra* Ar. ssp. salzmannii). *Forest Science of the Total Environment* 562: 145–154. DOI 10.1016/j.scitotenv.2016.03.160.
- Moffat A.J. 2003. Indicators of soil quality for UK forestry. *Forestry* 5: 547–567.
- Mueller K.E., Eissenstat D.M., Hobbie S.E., Oleksyn J., Jagodzinski A.M., Reich P.B., Chadwick O.A., Chorover J. 2012. Tree species effects on coupled cycles of carbon, nitrogen, and acidity in

- mineral soils at a common garden experiment. *Biogeochemistry* 111: 601–614. DOI 10.1007/s10533-011-9695-7.
- Myśków W., Stachyra A., Zięba S., Masiak D. 1996. Aktywność biologiczna gleby jako wskaźnik jej żyzności i urodzajności. *Roczniki Gleboznawcze* 47(1/2): 89–99.
- Nannipieri P., Kandeler E., Ruggiero P. 2002. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil, in: Burns R.G., Dick R.P. (eds.) *Enzymes in the environment: activity ecology and applications*. Marcel Dekker, New York, 1–33.
- Nielsen M.N., Winding A. 2002. Microorganisms as indicators of soil health. NERI Technical Report No.388, National Environmental Research Institute, Denmark.
- Olszowska G. 2010. Rozkład pionowy aktywności enzymatycznej gleb różnych siedlisk leśnych. *Sylwan* 154(6): 405–411.
- Olszowska G. 2016. Biochemiczna aktywność gleb różnych siedlisk leśnych. *Sylwan* 160(8): 666–673.
- Olszowska G., Zwoliński J., Matuszczyk I., Syrek D. 2007. Zastosowanie biochemicznych charakterystyk gleb w diagnostyce typologicznej siedlisk leśnych. *Leśne Prace Badawcze* 4: 83–105.
- Olszowska G., Zwoliński J., Matuszczyk I., Syrek D., Zwolińska B., Pawlak U., Kwapis Z., Dudzińska M. 2005. Wykorzystanie badań aktywności biologicznej do wyznaczenia wskaźnika żyzności gleb w drzewostanach sosnowych na siedliskach boru świeżego i boru mieszanego świeżego. *Leśne Prace Badawcze* 3: 17–37.
- Ostrowska A., Gawliński S., Szczubiałka Z. 1991. Metody analizy i oceny właściwości gleb i roślin. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa, 334 s.
- Piotrowska A. 2011. Enzymes as biological indices of the soil environmental status. *Ekologia i Technika* 19(5): 247–260.
- Piotrowska A., Długosz J., Namysłowska-Wilczyńska B., Zamorski R. 2010. Field-scale variability of topsoil dehydrogenase and cellulase activities as affected by variability of some physico-chemical properties. *Biology and Fertility of Soils* 47: 101–109.
- Russel S. 1972. Metody oznaczania enzymów glebowych. Polskie Towarzystwo Gleboznawcze. Komisja Biologii Gleby, Warszawa, 64 s.
- Sariyildiz T., Anderson J.M., Kucuk M. 2005. Effects of tree species and topography on soil chemistry, litter quality, and decomposition in northeast Turkey. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 1695–1706. DOI org/10.1016/j.soilbio.2005.02.004.
- Šnajdr J., Valášková V., Merhautová V., Herinková J., Cajthaml T., Baldrian P. 2008. Spatial variability of enzyme activities and microbial biomass in the upper layers of *Quercus petraea* forest soil. *Soil Biology and Biochemistry* 40: 2068–2075. DOI 10.1016/j.soilbio.2008.01.015.
- Tabatabai M.A., Bremner J.M. 1969. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry* 1(4): 301–307. DOI 10.1016/0038-0717(69)90012-1.
- Trasar-Cepeda C., Leirós M.C., Gil-Sotres F. 2008. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils some implications for their use as indicators of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry* 40: 2146–2155. DOI 10.1016/j.soilbio.2008.03.015.
- Trasar-Cepeda C., Leirós M.C., Seoane S., Gil-Sotres F. 2000. Limitations of soil enzymes as indicators of soil pollution. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 867–875. DOI 10.1016/S0038-0717(00)00160-7.
- Zak D.R., Tilman D., Parmenter R.R., Rice C.W., Fisher F.M., Vose J., Milchanus D., Martin C.W. 1994. Plant production and soil microorganisms in late-succession ecosystems: a continental study. *Ecology* 75: 2333–2347.
- Zielony R., Kliczkowska A. 2012. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa. ISBN 978-83-61633-62-4.
- Zornoza R., Mataix-Solera J., Guerrero C., Arcenegui V., Garcia-Orenes F., Mataix-Beneyto J., Morugán A. 2007. Evaluation of soil quality using multiple lineal regressions based on physical, chemical and biochemical properties. *Science of the Total Environment* 378: 233–237.
- Zwoliński J. 2004. Microbial biomass versus soil fertility in forest sites. *Polish Journal Ecology* 52(4): 553–561.
- Zwoliński J. 2008. Rozkład pionowy biomasy drobnoustrojów w glebach leśnych. *Leśne Prace Badawcze* 69(3): 225–231.