

Wpływ siarczanu glinu na wybrane właściwości gleby oraz na wydajność i jakość sadzonek sosny zwyczajnej w leśnej szkółce gruntowej

Impact of aluminium sulphate fertilizer on selected soil properties and the efficiency and quality of pine seedlings in the forest ground tree nursery

Kazimierz Januszek¹, Hanna Stępniewska², Ewa Błońska^{1*}, Joanna Molicka¹,
Krzysztof Koziół¹, Anna Gdula², Anna Wójs²

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, ¹Katedra Gleboznawstwa Leśnego,

²Katedra Fitopatologii Leśnej, Al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

* Tel. +48 12 662 5028, e-mail eblonska@ar.krakow.pl

Abstract. The alkalization of soil is a common phenomenon in forest ground nurseries. Liming, inadequate fertilization and the use of hard water for irrigation are the main reasons for this alkalization. The aim of this study was to investigate the effect of fertilization with aluminium sulphate on soil pH, the activity of selected soil enzymes, efficiency as well as the growth parameters of pine seedlings.

The study was conducted in a forest nursery, on a plot with soil pH 6.4 in water and 5.9 in 1 M KCl. Such a pH is not conducive to the production of conifer seedlings, particularly pines. Two different doses of aluminium sulphate fertilizer were applied: 740 kg ha⁻¹ and 1110 kg ha⁻¹.

Both doses significantly reduced the soil pH, whereas soil enzyme activity did not change. The lower dose had a positive impact on the growth parameters of pine seedlings, while the higher dose led to their deterioration. We observed statistically significant differences in average primary and lateral root lengths, number of short roots, and thickness of the neck root of seedlings. One- and 2-year-old seedlings did not show symptoms of nutrient deficiency and neither did concentrations of the investigated macronutrients and selected micronutrients in needles indicate such. After applying the higher fertilizer dose, we observed a favourable change in the composition of mycorrhizae. Out of the potential seedling pathogens we found *Cylindrocarpon* spp., *Fusarium* spp., *Phytophthora* spp., *Pythium* spp. and *Rhizoctonia solani* of which the most frequent were *Fusarium oxysporum*, *Pythium* spp. and *R. solani*. Their occurrence frequency differed between the treatments used in this experiment.

This study confirms the positive effects of a low aluminium dose on the performance and growth parameters of pine seedlings. However, on the basis of the conducted experiments, it is difficult to say, whether this positive effect is due to a direct action of aluminium on the seedlings or rather an indirect effect caused by lowering the soil pH, which in turn impacts on mycorrhizae composition and hence pathogen development.

Key words: soil pH, aluminium sulphate, pine seedlings quality, ectomycorrhizae, damping-off

1. Wstęp

W leśnych szkółkach gruntowych dochodzi często do alkalizacji gleby. Przyczyną może być zarówno częste wapnowanie i nieodpowiednie nawożenie, jak i

używanie wód twardych do deszczowania. Utrzymanie optymalnego pH gleby w przypadku produkcji sadzonek drzew iglastych ma istotne znaczenie (Januszek 1999). Pomiędzy ilością i rozmiarami jednorocznych sadzonek sosny a wartością pH gleby w H₂O istnieje silna, w

granicach 4,0–6,5, ujemna korelacja (Januszek, Barczyk 2003). Znana jest szeroka tolerancja na odczyn gleby grzybów patogenicznych, powodujących zgorzel siewek drzew leśnych. Ponadto pewien stopień zakwaszenia gleby jest dla większości drzew leśnych korzystny ze względu na symbiozę z grzybami ektomikoryzowymi (Mańka i in. 1987; Kowalski et al. 1996). Odczyn alkaliczny gleby wyraźnie zmniejsza tempo nawiązywania kontaktów ektomikoryzowych (Kowalski et al. 1996). Stwarza korzystne warunki do rozwoju ektendomikoryz (Kowalski 1998).

Zakwaszenie gleby jest pospolicie rekomendowaną praktyką dla opanowania wielu chorób korzeni, ale mechanizm tłumienia nie jest znany (Fichtner 2002). Do zakwaszenia gleby używany jest m.in. siarczan glinu, w obecności którego w glebie powstaje kwas siarkowy, a glin, wchodząc do kompleksu sorpcyjnego, wypiera wodor, dzięki czemu jeszcze bardziej obniża pH (Lityński, Jurkowska 1982).

Celem pracy było: 1) zbadanie skuteczności obniżenia pH gleby przy użyciu siarczanu glinu, 2) ocena wpływu zastosowania siarczanu glinu na właściwości gleby i parametry sadzonek sosny zwyczajnej, oraz 3) ocena wpływu tego zabiegu na wydajność wschodów sosny zwyczajnej, spektrum patogenów zgorzelowych siewek i stan mikoryz.

2. Materiały i metody

Badania przeprowadzono w gruntowej szkółce leśnej Nadleśnictwa Krzeszowice (Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych w Krakowie), w której napotymano trudności w produkcji sadzonek sosny zwyczajnej ze względu na występującą w dużym nasileniu zakaźną zgorzel siewek. Na wytypowanej do badań kwaterze stwierdzono występowanie gleby rdzawej brunatnej opadowoglejowej (Klasyfikacja gleb leśnych 2000), wytworzonej z piasków wodno-lodowcowych, słabo gliniastych przewarstwionych piaskiem luźnym (49–125 cm) zalegających na piasku gliniastym i podścielonych (od 150 cm) gliną piaszczystą. W październiku 2002 r., przed rozpoczęciem badań, w próbkach gleb pobranych z poziomu uprawnego tej kwatery określono: pH w H₂O w granicach 6,09–6,19, pH w 1M roztworze KCl w granicach 5,08–5,17, kwasowość hydrolityczną w granicach 0,31–2,65 cmol (+) kg gleby⁻¹, zmniejszającą się w głąb profilu glebowego, stopień wysycenia kompleksu sorpcyjnego kationami zasadowymi (V%) w granicach 59,3–97,5%.

Do obniżenia pH gleby zastosowano techniczny siarczan glinu [Al₂(SO₄)₃ × 14H₂O], zawierający 57,8% siarczanu glinu [Al₂(SO₄)₃]. Doświadczenie przeprowadzono metodą bloków losowych, w pięciu powtórzeniach,

na 15 poletkach o wymiarach 3×4,5 m każde. Siarczan glinu wysiano na powierzchni doświadczalnej w dniu 07.04.2003 r. Dawki siarczanu glinu ustalono metodą inkubacji laboratoryjnej.

Do badań przyjęto dwie dawki siarczanu glinu, doprowadzające badaną glebę do wartości pH w 1M roztworze KCl zbliżonej do 4,2 (Januszek, Barczyk 2003). Zastosowano dwa warianty: wariant A11 – dawka 740 kg ha⁻¹, i wariant A12 – 1110 kg ha⁻¹. Po wysianiu siarczanu glinu glebę wymieszano, stosując kultywatorowanie i bronowanie. Na wszystkich poletkach oraz na poletkach wariantu kontrolnego (bez siarczanu glinu) zastosowano także nawożenie siarczanem potasu w dawce 180 kg ha⁻¹ (75 kg K ha⁻¹) i siarczanem magnezu, w dawce 210 kg ha⁻¹ (20 kg Mg ha⁻¹). Poletka obsiano nasionami sosny zwyczajnej w dniu 24.04.2003 r. w dawce 0,3 kg ar⁻¹, stosując siew rzędowy. Przed wysiewem nasiona zaprawiono zaprawą Funaben T (3 g kg⁻¹ nasion).

Badanie właściwości gleb

W 2003 i 2004 roku, w odstępach 4–6 tygodniowych, przy użyciu laski Egnera pobierano próbki gleb z poziomu uprawnego (0–25 cm), z pięciu miejsc każdego poletka. Następnie próbki z każdego poletka dokładnie zmieszano w próbkę zbiorczą. Po wysuszeniu ich do stanu powietrznie suchego i przesianiu przez sito o średnicy oczek 2 mm, oznaczano pH gleby w H₂O i w roztworze 1 M KCl, metodą potencjometryczną z zachowaniem stosunku masy gleby do roztworu jak 1:2,5. W próbkach pobranych w lipcu 2004 r. oznaczono ponadto: kwasowość hydrolityczną i sumę zasad metodą Kappena, z wyciżeniem pojemności sorpcyjnej (T) i stopnia wysycenia zasadami (V%), zawartość węgla organicznego metodą oksydometryczną Tiurina i azotu całkowitego metodą Kjeldahla z wyciżeniem stosunku C:N. W próbkach o naturalnym uwilgotnieniu, pobranych w sierpniu 2003 roku i w lipcu 2004 roku, oznaczono także: aktywność fosfatyz metodą Kramera i Erdei (Haziev 1976) oraz aktywność inwertazy metodą Ščerbakovej (Haziev 1976).

Badanie aktywności fosfatazy kwaśnej powierzchni zakończeń korzeni oraz parametrów wzrostowych sadzonek jednorocznych i dwuletних

W dniach 6–8 listopada 2003 r. z każdego poletka pobrano w sposób losowy po 30 sztuk jednorocznych sadzonek sosny. Sadzonki wraz z niewielką ilością gleby umieszczono w plastikowych workach, przewieziono do laboratorium i umieszczono w chłodni w temp. 4–5°C. U wszystkich pobranych sadzonek pomierzono, z dokładnością do 0,1, wysokość części nadziemnej [cm],

długość korzenia głównego [cm] i grubość w szyi korzeniowej [mm].

Z każdej partii 30 sadzonek z poletka wybrano losowo 10 sztuk do dalszych badań. Korzenie opłukiwano wodą destylowaną i osuszano na bibule filtracyjnej. Następnie z każdej sadzonki odcinano końcowe części (do 10 mm długości) korzeni bocznych, biorąc do analizy próbkę o masie około 50 mg. Analizy przeprowadzono według metodyki opisanej przez Januszka i Januszka (2000). W październiku 2004 roku z każdego poletka pobrano po 30 sztuk dwuletnich sadzonek sosny i ponownie oznaczono aktywność fosfatazy kwaśnej i określono parametry wzrostowe w sposób opisany powyżej.

Badanie nasilenia zakaźnej zgorzeli siewek i spektrum patogenów zgorzelowych siewek

W tej części badań uwzględniono tylko dwa warianty doświadczenia: kontrolny (0) i z większą dawką siarczanu glinu (A12). Za miarę nasilenia zgorzeli siewek (przedwschodowej i powschodowej) przyjęto wydajność wschodów, którą oceniono we wrześniu 2003 r. Sadzonki sosny przeliczono na losowo wytyczonych odcinkach rzędów siewnych. Na każdym poletku wytyczono sześć takich odcinków o długości 1 m każdy.

Spektrum patogenów badano u siewek z objawami zakaźnej zgorzeli pobranych w maju i czerwcu 2003 r. Z każdego poletka wariantu kontrolnego i wariantu A12 pobrano losowo po 30 siewek, tj. łącznie po 150 siewek z każdego wariantu doświadczenia. Izolacje patogenów wykonano na pożywki selektywne: P₅ARP i P₅ARPH (Jeffers, Martin 1986) oraz na standardową pożywkę ziemniaczano-glukozową (PDA), każdorazowo na próbie 50 siewek (N=50), pobranych z wariantu kontrolnego i z wariantu A12, według metodyki opisanej wcześniej (Stępniewska 2003). Uzyskane kolonie grzybów zidentyfikowano na podstawie kryteriów morfologicznych.

Badanie architektury systemu korzeniowego i mikoryz jednorocznych i dwuletnich sadzonek sosny

W tej części badań także uwzględniono tylko dwa warianty doświadczenia: kontrolny (0) i z większą dawką siarczanu glinu (A12). W dniach 6 i 8 listopada 2003 r. z każdego poletka pobrano losowo po 6 sadzonek jednorocznych, tj. po 30 z każdego wariantu doświadczenia. W laboratorium opłukano je z resztek gleby, umieszczono w kolbach Erlenmeyera i zalano płynem konserwującym FAA (Russell 1974). Dla każdej sadzonki określono: sumę długości korzeni bocznych poszczególnych rzędów, liczbę korzeni troficznych oraz

udział mikoryz ektotroficznych i ektendotroficznych, zidentyfikowanych na podstawie ich cech morfologicznych i anatomicznych. W dniach 5 i 19 listopada 2004 r. pobrano do badań sadzonki dwuletnie, w taki sam sposób jak jednoroczne. Analizę sadzonek wykonano podobnie jak sadzonek jednorocznych, przy czym obecność korzeni troficznych i mikoryz rejestrowano na korzeniach bocznych sadzonki na 20 losowo pobranych odcinkach po ok. 5 cm (łącznie 1 m).

Zawartość makro- i mikroelementów w igliwiu sadzonek sosny zwyczajnej

W igliwiu jednorocznym pobranym z sadzonek w listopadzie 2003 oraz w igliwiu jedno- i dwuletnim, zmieszonym w równych proporcjach, pobranym z sadzonek w październiku 2004 roku, oznaczono zawartość składników pokarmowych (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn). Zawartość siarki oznaczono nefelometrycznie po mineralizacji igieł w stężonym HNO₃. Zawartość azotu całkowitego oznaczono metodą Kjeldahla. Zawartość pozostałych badanych pierwiastków oznaczono po mineralizacji igieł w stężonych HNO₃ i HClO₄ zmieszanych w stosunku 3:1. Zawartość fosforu oznaczono kolorymetrycznie, pozostałe metale oznaczono spektrofotometrycznie przy użyciu spektrofotometru absorpcji atomowej typu Varian Spectr AA-20 (Ostrowska i in. 1991).

Analizy statystyczne wyników

Wykorzystując program Statistica 9 wykonano statystyczną analizę danych: test Kruskala-Wallisa i U Manna Whitneya w celu testowania różnic pomiędzy średnimi. Dla testów przyjęto poziomy istotności $p=0,05$, $p=0,01$, $p=0,001$.

3. Wyniki

Właściwości fizykochemiczne gleby

Wartość pH gleby w poziomie uprawnym poletek określona w 2002 r., przed założeniem doświadczenia, nie była istotnie statystycznie zróżnicowana i wahała się w zakresie od 5,81 do 6,52 pH w H₂O i od 4,61 do 5,95 pH w KCl (tab. 1).

W 2003 i 2004 roku wartości pH gleby w poziomie uprawnym poletek kontrolnych (0), nawożonych mniejszą (A11) i większą (A12) dawką siarczanu glinu mieściły się w zakresach, odpowiednio: 4,43–6,59; 4,69–6,22 i 4,66–6,41 pH w H₂O oraz 3,97–5,86; 4,25–5,29 i 4,15–5,57 pH w KCl (tab. 1). W 2003 roku średnie wartości pH gleby w wariantach A11 i A12 były niższe niż

w wariancie kontrolnym, odpowiednio o 0,17 i 0,33 jednostki pH w H₂O i 0,11 i 0,20 jednostki pH w KCl (tab. 1). W 2004 r. zaobserwowano podobne relacje, a różnice wynosiły odpowiednio: 0,19 i 0,28 jednostki pH w H₂O oraz 0,17 i 0,24 jednostki pH w KCl (tab. 1). W 2003 roku różnice między wariantem kontrolnym a wariantem A11 i A12 były istotne statystycznie jedynie w przypadku pH gleby w H₂O w sierpniu (ryc. 1) i wynosiły odpowiednio: 0,28 i 0,63 jednostki pH. W 2004 roku istotne statystycznie różnice pomiędzy wariantem kontrolnym a wariantami A11 i A12 stwierdzono w czerwcu i lipcu. Wynosiły one odpowiednio: w czerwcu – 0,21 i 0,53, a w lipcu – 0,25 i 0,45 jednostki pH (ryc. 1). Największe różnice pomiędzy glebą polettek kontrolnych a nawożonych mniejszą (A11) i większą (A12) dawką siarczanu glinu pod względem wartości pH w H₂O zanotowano w lipcu i w sierpniu 2003 roku, odpowiednio 0,34 i 0,63 jednostki pH (ryc. 1), a pH w KCl w maju 2004 r. i w sierpniu 2003 r., odpowiednio 0,20 i 0,42 jednostki pH (ryc. 2). Traktując wszystkie oznaczone wartości pH gleby w 2003 i 2004 roku łącznie (50 powtórzeń pomiaru pH w jednym wariancie doświadczenia), stwierdzono statystycznie istotnie mniej-

sze wartości pH, zarówno w H₂O jak i w KCl (tab. 1), w wariancie A12 niż w wariancie kontrolnym. Średnia wartość pH gleby w wariantach A11 i A12 była niższa niż w wariancie kontrolnym odpowiednio o 0,18 i 0,27 jednostki pH w H₂O oraz 0,15 i 0,23 jednostki pH w KCl (tab. 1). Wartości pH gleby w H₂O w roku 2004 były istotnie statystycznie wyższe niż w roku 2003, zarówno w wariancie kontrolnym, jak i w wariantach A11 i A12, przeciętnie odpowiednio o 0,39; 0,37 i 0,44 jednostki pH (tab. 1). Wartości pH gleby w KCl w latach 2003 i 2004 w poszczególnych wariantach były zbliżone i niezróżnicowane statystycznie (tab. 1).

Wyższe pH badanych gleb w 2004 r. w porównaniu z 2003 r., jest związane prawdopodobnie z większymi opadami (w maju 2003 i 2004 odpowiednio: 117,8 i 42,6 mm) i wyższą temperaturą w 2003 niż w 2004 roku (średnia miesięczna w okresie V–VIII 2003 i 2004 odpowiednio: 18,2 i 16,2°C), co mogło zadecydować o większej aktywności mikrobiologicznej w badanych glebach (więcej CO₂) w 2003 roku w porównaniu z rokiem 2004 jak i bardziej intensywnym wymywaniem zasad z badanych gleb w 2003 niż w 2004 r. (dane Centrum Monito-

Tabela 1. Wartości średnie (śr), minimalne (min) i maksymalne (max) oraz odchylenia standartowe (sd) pH gleby w poziomie uprawnym przed (2002) oraz po (2003 i 2004) zastosowaniu siarczanu glinu

Table 1. Mean (śr), minimal (min), maximal (max) values and standard deviation (sd) of soil pH in the cultivated horizon before (2002) and after (2003 i 2004) application of aluminium sulphate

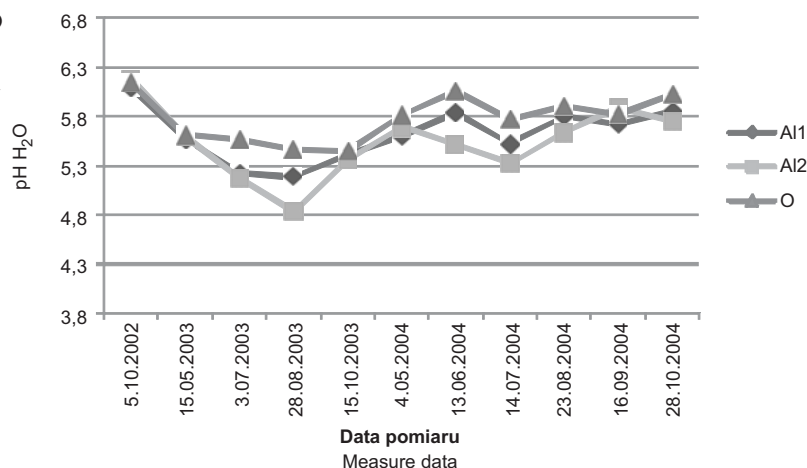
Termin Term	Wartość Value	pH H ₂ O			pH KCl		
		Wariant doświadczenia Variant of the experiment					
		O	A11	A12	O	A11	A12
15.10.2002	Śr (N=5)	6,14 ^a	6,09 ^a	6,19 ^a	5,17 ^a	5,08 ^a	5,16 ^a
	min-max	5,87–6,34	5,81–6,35	5,89–6,52	4,65–5,95	4,61–5,44	4,89–5,51
	sd	0,219	0,222	0,248	0,517	0,318	0,226
	N	5	5	5	5	5	5
2003	Śr (N=20)	5,52 ^{aa}	5,35 ^{aa}	5,19 ^{aa}	4,86 ^{aa}	4,75 ^{aa}	4,66 ^{aa}
	min-max	4,43–6,44	4,69–5,94	4,66–5,99	3,97–5,97	4,25–5,60	4,15–5,32
	sd	0,487	0,292	0,410	0,557	0,326	0,361
	N	20	20	20	20	20	20
2004	Śr (N=30)	5,91 ^{ab***}	5,72 ^{ab***}	5,63 ^{b***B***}	4,89 ^{aa}	4,72 ^{aa}	4,65 ^{aa}
	min-max	5,00–6,59	5,28–6,22	5,22–6,41	4,10–5,86	4,23–5,29	4,24–5,57
	sd	0,337	0,255	0,274	0,479	0,297	0,309
	N	30	30	30	30	30	30
2003–2004	Śr (N=50)	5,75 ^a	5,57 ^{ab}	5,48 ^{b**}	4,88 ^a	4,73 ^{ab}	4,65 ^{b*}
	min-max	4,43–6,59	4,69–6,22	4,66–6,41	3,97–5,97	4,23–5,60	4,15–5,57
	sd	0,442	0,326	0,418	0,506	0,306	0,327
	N	50	50	50	50	50	50

Objaśnienia: O – wariant kontrolny bez siarczanu glinu; A11 – 740 kg Al₂(SO₄)₃·x18H₂O ha⁻¹ (produkt techniczny); A12 – 1110 kg Al₂(SO₄)₃·x18H₂O ha⁻¹ (produkt techniczny); N – liczba powtórzeń; małe różne litery alfabetu oznaczają różnice w wartościach pH pomiędzy wariantami doświadczenia z prawdopodobieństwem: * <0,05; ** <0,01 i *** <0,001; duże różne litery alfabetu oznaczają różnice w wartościach pH pomiędzy latami 2003 i 2004 z prawdopodobieństwem: * <0,05; ** <0,01 i *** <0,001 (test Kruskala-Wallis).

Explanation: O – control variant without aluminium sulphate; A11 – 740 kg Al₂(SO₄)₃·x18H₂O ha⁻¹ (Technical Product); A12 – 1110 kg Al₂(SO₄)₃·x18H₂O ha⁻¹ (Technical Product); N – number of replications; little different letters of the alphabet mean differences in pH values between experience variants with probability: * <0,05; ** <0,01 and *** <0,001; different big letters of the alphabet mean differences in pH

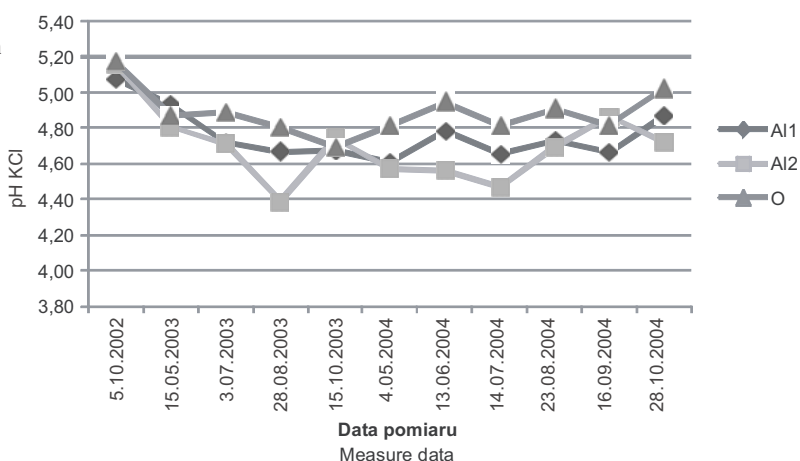
Rycina 1. Wartości średnie (n=5) pH w H₂O gleby w poziomie uprawnym wariantu kontrolnego (O), z mniejszą (A11) i większą (A12) dawką siarczanu glinu

Figure 1. The average values (n = 5) pH in H₂O of soil in the cultivated horizon of control variant (O), with a smaller (A11) and higher (A12) dose of aluminium sulphate



Rycina 2. Wartości średnie (n=5) pH w 1M roztworze KCl gleby w poziomie uprawnym wariantu kontrolnego (O), z mniejszą (A11) i większą (A12) dawką siarczanu glinu

Figure 2. The average values (n = 5) pH in 1M KCl of soil in the cultivated horizon of control variant (O), with a smaller (A11) and higher (A12) dose of aluminium sulphate



ringu Klimatu Polski. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie, 2013).

W próbkach gleb pobranych z wariantów doświadczenia w lipcu 2004 r. nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic w zakresie kwasowości hydrolytycznej, sumy zasad wymiennych, pojemności sorpcyjnej, stopnia wysycenia kompleksu sorpcyjnego kationami o charakterze zasadowym, koncentracji węgla organicznego i azotu całkowitego, jak i wartości stosunku C:N. W glebie wariantu A12 w porównaniu z glebą wariantu kontrolnego, stwierdzono większą kwasowość hydrolytyczną (odpowiednio: 3,95 i 3,86 cmol(+) kg gleby⁻¹), a mniejszą sumę kationów zasadowych (odpowiednio: 2,92 i 3,13 cmol(+) kg gleby⁻¹) i mniejszy stopień wysycenia kompleksu sorpcyjnego kationami o charakterze zasadowym (odpowiednio: 40,78 i 42,17).

Aktywność enzymatyczna gleby

Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic w aktywności inwertazy i fosfataz w glebie badanych wariantów doświadczenia w pierwszym i drugim roku

badania. W 2003 r. najwyższą średnią aktywność inwertazy stwierdzono w wariantcie A11 (1,231 mg glukozy/1 g gleby/1 godz.), a najniższą w wariantcie kontrolnym (1,048 mg glukozy/1 g gleby/1 godz.). Najwyższą średnią aktywność fosfataz oznaczono w glebie poletek kontrolnych (3,322 mg fenolu/5 g gleby/2 godz.), a najniższą w wariantcie A12 (2,644 mg fenolu/5 g gleby/2 godz.). W 2004 r. najwyższą średnią aktywność inwertazy oznaczono w wariantcie A12 (0,458 mg glukozy/1 g gleby/1 godz.), a najniższą w wariantcie kontrolnym (0,366 mg glukozy/1 g gleby/1 godz.). Średnia aktywność fosfataz była najwyższa w wariantcie A11, a najniższa w wariantcie kontrolnym (odpowiednio: 2,722 i 1,774 mg fenolu/5 g gleby/2 godz.).

Aktywność fosfatazy kwaśnej (AFK) powierzchni zakończeń korzeni sadzonek sosny

Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic między rozpatrywanymi wariantami pod względem aktywności fosfatazy kwaśnej (AFK) powierzchni zakończeń korzeni sadzonek sosny zwyczajnej (tab. 2). U jedno-

rocznych sadzonek najwyższą AFK stwierdzono w wariancie A12 a najniższą w wariancie kontrolnym. U dwuletnich sadzonek najwyższą aktywność stwierdzono w wariancie A11 a najniższą w wariancie kontrolnym (tab. 2). W pierwszym roku badań wartości AFK sadzonek sosny były niższe (średnio 28,856 $\mu\text{g p-NF } 50 \text{ mg korzeni}^{-1} \text{ 1 godz.}^{-1}$) a w drugim roku badań wyższe (43,846 $\mu\text{g p-NF } 50 \text{ mg korzeni}^{-1} \text{ 1 godz.}^{-1}$).

Wydajność wschodów i spektrum patogenów zgorzelowych siewek

Stwierdzono istotne statystycznie różnice w wydajności wschodów między badanymi wariantami doświadczenia. Największą średnią liczbę sadzonek zanotowano w wariancie A12, a istotnie mniejszą (średnio o 45%) w wariancie kontrolnym. Średnia liczba sadzonek w wariancie A11 nie różniła się statystycznie od wartości tego parametru w pozostałych wariantach doświadczenia (tab. 2).

Z siewek z objawami zakaźnej zgorzeli wyodrębniono ogółem 15 taksonów grzybów i organizmów grzybobodobnych z rodzaju *Phytophthora* i *Pythium* oraz kultury niezarodnikujące. Spośród potencjalnych patogenów siewek drzew wykryto *Cylindrocarpon* spp., *Fusarium* spp., *Phytophthora* spp., *Pythium* spp. i *Rhizoctonia solani*. Najczęściej z siewek izolowano *Fusarium oxysporum*, organizmy z rodzaju *Pythium* oraz *R. solani*. Frekwencja wymienionych patogenów była różna w badanych wariantach. *Fusarium oxysporum* izolowano częściej z siewek pobranych z wariantu kontrolnego (frekwencja 68%) niż z siewek pobranych z wariantu A12 (48%). Także frekwencja *Pythium* spp. była wyraźnie większa w wariancie kontrolnym (52%) niż w wariancie A12 (28%). Z kolei, *R. solani* izolowano z taką samą częstością (48%). Patogeny rodzaju *Phytophthora* izolowano z siewek znacznie rzadziej (10%) i tylko w wariancie kontrolnym. Pozostałe potencjalne patogeny siewek drzew z rodzaju *Cylindrocarpon* i *Fusarium* izolowano sporadycznie.

Parametry sadzonek

Stwierdzono istotne statystycznie różnice wartości średnich długości korzenia głównego, długości korzeni bocznych I, II i III rzędu, liczby korzeni troficznych oraz grubości w szyi korzeniowej sadzonek w badanych wariantach doświadczenia, zarówno w pierwszym, jak i drugim roku badań (tab. 2).

Wśród sadzonek jednorocznych najdłuższy korzeń główny miały sadzonki z wariantu A11, a najkrótszy z wariantu A12. Z kolei wśród sadzonek dwuletnich największą długość korzenia głównego miały sadzonki na poletkach kontrolnych. Długość korzenia głównego

u jednolatek w wariancie A11 była większa o 11,2%, a w wariancie A12 mniejsza o 10% niż w wariancie kontrolnym. U sadzonek dwuletnich, zarówno w wariancie A11 jak i A12, długość korzenia głównego była mniejsza, odpowiednio o 4,8% i 11,3%, niż w wariancie kontrolnym (tab. 2). Długość korzeni bocznych I i II rzędu sadzonek jednorocznych w wariancie A12 była mniejsza niż w wariancie kontrolnym (odpowiednio o 16% i 20%). Tak samo było w przypadku sadzonek dwuletnich, których korzenie boczne I, II i III rzędu były w wariancie A12 krótsze odpowiednio o 21%, 41% i 66% (tab. 2). Odmienne było w przypadku korzeni bocznych III rzędu sadzonek jednorocznych: w wariancie A12 ich długość była istotnie statystycznie większa (o 37%) niż w wariancie kontrolnym (tab. 2).

Liczba korzeni troficznych u sadzonek jednorocznych i dwuletnich w wariancie A12 była istotnie mniejsza niż w wariancie kontrolnym, odpowiednio o 18,6% i 19,2% (tab. 2).

Wśród sadzonek dwuletnich największą grubością szyi korzeniowej charakteryzowały się sadzonki w wariancie kontrolnym, a najmniejszą w wariancie A12 (tab. 2). Grubość szyi korzeniowej sadzonek jednorocznych w badanych wariantach nawożenia nie różniła się statystycznie. Nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic wysokości części nadziemnej sadzonek jednorocznych i dwuletnich w badanych wariantach nawożenia.

Mikoryzy

Udział procentowy mikoryz u sadzonek jednorocznych pobranych z wariantów kontrolnego i A12 był wyrównany i wysoki (99,2% i 98,2%) (tab. 2). Stwierdzono obecność ektomikoryz i ektendomikoryz. W obu badanych wariantach doświadczenia dominowały ektomikoryzy. Częstość ich występowania u siewek była prawie 2 razy większa niż ektendomikoryz w wariancie kontrolnym i prawie 5 razy większa w wariancie A12 (tab. 2). U sadzonek dwuletnich, podobnie jak u jednolatek, udział procentowy mikoryz był wysoki (95,7% i 98,2%) (tab. 2). Także u tych sadzonek stwierdzono ektomikoryzy i ektendomikoryzy, z wyraźną dominacją ektomikoryz. Dominacja ta była silniejsza niż u sadzonek jednorocznych (tab. 2).

Koncentracja makro- i mikroelementów w igłach sadzonek

Sadzonki jednoroczne i dwuletnie nie wykazywały symptomów deficytu składników pokarmowych. Koncentracja badanych makro- i mikroelementów w igłach (tab. 3) mieściła się w zakresie nie wskazującym na ich deficyt (Baule, Fricker 1978; Fober 1993). Koncentracja

Tabela 2. Liczba sadzonek oraz ich parametry wzrostowe i jakościowe w poszczególnych wariantach doświadczenia
 Table 2. The number of seedlings and their growth and qualitative parameters in experience variants

Wariant Variant ¹	Wartość Value	Liczba sadzonek Number of seedlings per 1 m	H [cm]	Ø [mm]	L [cm]	Długość korzeni bocznych rzędu [cm]: The length of lateral roots of row [cm]:				Liczba korzeni trójczłonnych Number of short roots	Frekwencja mikoryz (%) Frequency of mycorrhizae (%)			AFK
						I	II	III	IV		ogółem total	ektomikoryzy ectomycor- rhizae	ektomikoryzy ectomycor- rhizae	
Sadzonki 1 roczne 1-year-old seedlings														
O	sr	33,8 ^a	9,04 ^d	2,13 ^a	16,99 ^{ab}	87,84 ^d	63,56 ^a	2,35 ^a	0,0	482,8 ^a	99,16	34,52	64,64	27,09 ^{ad}
	min-max	2-84	8,22-9,64	2,0-2,3	15,0-18,7	33,0-181,2	3-307,5	0-14,8	0-0	56-1381	93,97-100	0,00-97,54	2,46-100	5,09-93,34
	sd	20,6	0,64	0,2	3,3	37,19	65,39	4,43	0	333,0	1,55	30,94	30,76	17,01
All	sr	47,5 ^{ab}	10,21 ^a	2,26 ^a	18,94 ^a	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	27,73 ^{ad}
	min-max	8-78	9,16-11,50	2,1-2,6	17,6-19,8	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	7,68-51,43
	sd	20,6	0,85	0,22	0,89	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	11,90
All2	sr	61,5 ^{b***}	9,28 ^d	2,10 ^a	15,31 ^{b**}	73,49 ^{b*}	51,02 ^b	3,23 ^b	0,0	349,0 ^{b*}	98,22	16,78	81,44	29,12 ^d
	min-max	7-135	7,60-10,40	1,5-2,2	12,3-16,8	26,7-138	1,9-154,4	0-29	0-0	52-852	90,32-100	0,00-59,41	39,85-100	5,10-67,83
	sd	27,3	1,18	0,38	1,76	31,24	41,36	7,24	0	199,9	2,45	16,36	16,15	13,47
O	sr	n.o.	26,6 ^d	4,7 ^a	23,1 ^a	26,17 ^a	50,72 ^a	24,47 ^d	1,59 ^a	657,7 ^a	95,73	25,83	69,90	44,52 ^{ad}
	min-max	n.o.	12,4-43,2	2,1-10,9	15,1-46,9	17,1-41	18-114,7	1,9-75,5	0-16,2	405-920	88,35-100	5,47-43,19	49,50-92,07	15,57-70,24
	sd	n.o.	6,3	1,4	5,0	26,17	50,72	15,09	3,57	113,5	3,16	10,61	11,95	13,63
All1	sr	n.o.	27,2 ^d	4,3 ^{ab}	22,0 ^{a**}	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	47,65 ^{ad}
	min-max	n.o.	14,4-42,2	2,4-8,5	12,0-35,5	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	26,10-71,96
	sd	n.o.	6,0	1,1	4,2	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	8,77
All2	sr	n.o.	25,9 ^d	4,2 ^b	20,5 ^{b***}	20,61 ^b	29,78 ^b	8,28 ^b	0,12 ^a	531,3 ^{b*}	98,15	2,12	96,03	45,01 ^a
	min-max	n.o.	11,3-40,4	1,2-7,4	9,0-34,0	10,1-30,9	10,2-46,9	2,2-18,3	0-1,4	325-768	94,33-100	0,00-17,32	82,68-100	25,27-76,03
	sd	n.o.	5,1	1,3	5,8	4,75	29,78	4,42	0,31	123,0	1,79	3,47	3,73	12,96
O	sr	n.o.	14,4-42,2	2,4-8,5	12,0-35,5	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	47,65 ^{ad}
	min-max	n.o.	14,4-42,2	2,4-8,5	12,0-35,5	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	26,10-71,96
	sd	n.o.	6,0	1,1	4,2	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	8,77
All1	sr	n.o.	25,9 ^d	4,2 ^b	20,5 ^{b***}	20,61 ^b	29,78 ^b	8,28 ^b	0,12 ^a	531,3 ^{b*}	98,15	2,12	96,03	45,01 ^a
	min-max	n.o.	11,3-40,4	1,2-7,4	9,0-34,0	10,1-30,9	10,2-46,9	2,2-18,3	0-1,4	325-768	94,33-100	0,00-17,32	82,68-100	25,27-76,03
	sd	n.o.	5,1	1,3	5,8	4,75	29,78	4,42	0,31	123,0	1,79	3,47	3,73	12,96

Oznaczenia : H – wysokość części nadziemnej; Ø – grubość w szyi korzeniowej; L – długość korzenia głównego; AFK – aktywność fosfatazy kwasnej powierzcchni zakończeń korzeni [µg p-NF 50 mg korzeni⁻¹ 1 godz.⁻¹]; sr – wartość średnia; min-max – wartość minimalna i maksymalna; sd – wartość odchylenia standardowego; N – liczba powtórzeń; wartości min-max oraz sd dotyczące H, Ø i L sadzonek 1-rocznych dotyczą wartości średnich z 30 powtórzeń z każdego poleyka; zróżnicowane male litery alfabetu w indeksie górnym przy danych oznaczają istotne różnice w rozkładzie danych z prawdopodobieństwem: * < 0,05; ** < 0,01; *** < 0,001 (test U Manna Whitneyja); n.o. – nie oznaczono; 1 – jak w Tab. 1

Explanation of the table 2: H – height the aboveground part; Ø – thickness in neck root; L – length of the main root; AKF – acid phosphatase activity of the root end faces [µg p-NF 50 mg roots⁻¹ h⁻¹]; sr – mean value, min-max – minimum and maximum value, sd – standard deviation; N – number of repetitions; the min-max and sd values of H, Ø and L 1-year-old seedlings are mean values obtained from 30 repetitions of each plot, different small letters of the alphabet in superscript at the data mean significant differences in the distribution of the data with a probability: * < 0,05, ** < 0,01, *** < 0,001 (U Mann Whitney test); n.o. – not determined; 1 – as in Tab. 1

Tabela 3. Wartości średnie, odchylenie standardowe (z 5 powtórzeń) oraz minimalne i maksymalne (min-max) wartości koncentracji makroelementów (w %) oraz niektórych mikroelementów (w mg kg⁻¹) w igłach sadzonek, jednorocznych (1) oraz dwuletnich (2) sosny zwyczajnej wariantu kontrolnego (O), z mniejszą (A11) oraz większą (A12) dawką siarczanu glinu.

Table 3. Mean values¹, standard deviation (from 5 replicates), and the minimum and maximum (min-max) values of the concentration macronutrients (in%), and some micronutrients (in mg kg⁻¹) in needles of pine seedling one (1) and two years (2) of control variant (O), with a smaller (A11) and higher (A12) dose of aluminium sulphate.

Wariant Variant	N		P		K		Ca		Mg		S		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Wartość Value	%												
Wiek sadzonek / Age of seedlings													
O	śr	2,19 ^a	1,30 ^a	0,21 ^a	0,19 ^a	0,72 ^a	0,87 ^a	0,47 ^a	0,61 ^a	0,087 ^a	0,12 ^a	0,15 ^a	0,10 ^a
	min-max sd	1,89-2,68 0,291	0,98-1,54 0,256	0,20-0,22 0,012	0,18-0,20 0,008	0,59-0,86 0,125	0,78-0,96 0,073	0,43-0,58 0,065	0,59-0,67 0,041	0,08-0,10 0,008	0,11-0,13 0,006	0,11-0,20 0,042	0,047-0,139 0,043
A11	śr	1,83 ^a	1,33 ^a	0,19 ^a	0,18 ^a	0,74 ^a	0,88 ^a	0,46 ^a	0,64 ^a	0,091 ^a	0,11 ^{ab}	0,15 ^a	0,08 ^a
	min-max sd	1,17-2,34 0,472	0,63-1,58 0,401	0,17-0,20 0,009	0,18-0,19 0,003	0,60-0,88 0,120	0,80-0,95 0,053	0,41-0,55 0,050	0,56-0,71 0,067	0,08-0,10 0,007	0,09-0,11 0,008	0,09-0,20 0,040	0,03-0,15 0,045
A12	śr	2,07 ^a	1,51 ^a	0,18 ^a	0,18 ^a	0,68 ^a	0,89 ^a	0,47 ^a	0,71 ^a	0,089 ^a	0,10 ^{b**}	0,19 ^a	0,07 ^a
	min-max sd	1,86-2,59 0,302	1,31-1,71 0,153	0,14-0,21 0,025	0,16-0,20 0,017	0,32-0,84 0,212	0,83-0,95 0,046	0,33-0,55 0,087	0,61-0,78 0,065	0,07-0,10 0,011	0,09-0,11 0,007	0,15-0,20 0,023	0,02-0,12 0,039

Wariant Variant	Mn		Cu		Zn		Fe		N:S		N:P		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Wartość Value	mg kg ⁻¹												
Wiek sadzonek / Age of seedlings													
O	śr	164,20 ^a	152,95 ^a	9,23 ^a	6,95 ^a	88,55 ^a	92,61 ^a	365,50 ^a	364,05 ^a	16,04 ^a	15,47 ^a	10,55 ^a	6,88 ^a
	min-max sd	45,2-280,0 88,95	103,8-204,3 40,27	8,43-10,3 0,92	5,7-11,92 2,78	56,5-115,8 24,49	79,09-99,53 8,11	345,0-410,0 26,01	265,6-474,1 82,36	10,60-25,11 6,09	7,66-22,49 6,35	8,55-13,35 1,80	5,31-7,82 1,21
A11	śr	395,00 ^{ab}	185,01 ^{ab}	8,99 ^a	5,53 ^a	132,10 ^{b*}	97,05 ^a	376,50 ^a	311,94 ^a	12,58 ^a	21,60 ^a	9,79 ^a	7,27 ^a
	min-max sd	198,2-521,3 138,28	129,9-226,1 43,62	8,35-9,93 0,68	4,81-6,31 0,57	122,5-139,8 6,94	91,09-104,7 5,78	280,0-470,0 71,67	278,5-349,1 25,75	6,91-17,36 4,25	5,84-43,44 14,81	5,84-13,39 2,90	3,45-8,73 2,19
A12	śr	548,25 ^{b*}	250,50 ^{b*}	8,73 ^a	5,70 ^a	127,20 ^{ab}	98,03 ^a	426,00 ^a	344,87 ^a	11,24 ^a	32,45 ^a	11,35 ^a	8,25 ^a
	min-max sd	380,3-735,0 164,29	202,3-288,1 34,05	6,65-9,6 1,24	5,03-7,23 0,89	105,3-145,0 16,17	86,38-110,4 10,07	285,0-545,0 96,20	284,8-536,0 107,85	9,48-13,61 2,09	12,31-87,46 31,02	9,66-12,92 1,48	7,40-9,09 0,69

Objaśnienia : małe różne litery alfabetu oznaczają różnice w wartościach pomiędzy wariantami doświadczenia z prawdomobienstwem: * <0,05; ** <0,01 i * <0,001 (test Kruskal-Wallis)**

Explanation : little different letters of the alphabet mean differences in pH values between experience variants with probability: * <0,05; ** <0,01 and *** <0,001 (Kruskal-Wallis test)

makroelementów oraz żelaza w igłach badanych sadzonek była wyraźnie wyższa niż w igłach sadzonek czteroletnich wyhodowanych na glebie z poziomu próchniczno-eluwialnego gleby biellicowej (Prusinkiewicz, Krzemień 1974) oraz igłach sosen z drzewostanów sosnowych I bonitacji III klasy wieku (Prusinkiewicz et al. 1974). Koncentracja cynku w igłach sadzonek jednorocznych pochodzących z wariantów A11 i A12, jak i w igłach sadzonek dwulettnich, przekraczała nieznacznie zakres wartości optymalnych (Fober 1993). W przypadku igieł sadzonek jednorocznych nie odnotowano statystycznie istotnych różnic koncentracji badanych pierwiastków między poszczególnymi wariantami badawczymi, z wyjątkiem manganu i cynku. Istotnie większą koncentrację manganu stwierdzono w igłach sadzonek w wariantcie z większą dawką siarczanu glinu (A12), a cynku – w wariantcie z mniejszą dawką siarczanu glinu (A11) w odniesieniu do koncentracji tych pierwiastków w igłach sadzonek wariantu kontrolnego (tab. 3). W przypadku igieł sadzonek dwulettnich odnotowano istotne różnice statystyczne koncentracji magnezu i manganu między poszczególnymi wariantami badawczymi. Igły sadzonek z wariantu A12 zawierały istotnie więcej manganu, a mniej magnezu w porównaniu z igłami sadzonek wariantu kontrolnego (tab. 3). Nie stwierdzono istotnych różnic wartości stosunków molarnych N:S i N:P w igłach badanych sadzonek, ani jednorocznych, ani też dwulettnich (tab. 3).

4. Dyskusja

Ujemne efekty oddziaływania glinu na wzrost roślin w glebach o niskich wartościach pH uznaje się za regułę (Królikowski, Ciok 1968; Prusinkiewicz, Krzemień 1974; Filipek 1994; Marschner 1995; De Wit et al. 2010). Zastosowane dawki siarczanu glinu przyczyniły się do obniżenia pH badanej gleby. Najniższe średnie wartości pH w H₂O zanotowano w sierpniu w 2003 roku i wynosiły one 5,5, 5,2 i 4,8 w glebie wariantów odpowiednio: O, A11 i A12. Koncentracje glinu toksyczne dla roślin mogą wystąpić w glebach o pH poniżej 4,5 (Filipek 1994). Badania przeprowadzone przez Schöll i in. (2004) wskazały, że toksyczność glinu zależy w dużym stopniu od bezpośredniej koncentracji Al w roztworze glebowym oraz od wrażliwości gatunku rośliny na koncentrację toksycznych jonów glinu w roztworze glebowym (Nowak, Friend 1995). Badania gleb z wysoką koncentracją glinu są szczególnie trudne do interpretacji w aspekcie reakcji fizjologicznych roślin, ponieważ duża część lub prawie cała ilość dodanego glinu jest tracona przypuszczalnie w wyniku strącania (np. w postaci fosforanów) lub w wyniku polimeryzacji i kompleksacji (Marschner 1995).

Z przeprowadzonych badań wynika, że w glebie z większą dawką glinu (A12) koncentracja wolnego glinu w roztworze glebowym, zarówno w 2003, jak i 2004 roku, była zbyt wysoka, przyczyniając się istotnie do skrócenia długości korzeni, a szczególnie korzeni bocznych, oraz do zmniejszenia średnicy szyi korzeniowej sadzonek w drugim roku. Korzenie boczne są bardziej wrażliwe na glin niż korzenie główne i kumulują go więcej (Silva et al. 2000). W badaniach toksyczności wysokich dawek glinu dla roślin powszechnie występuje większa wrażliwość korzeni niż łodyg (Nowak, Friend 1995).

Potwierdzeniem, że koncentracja toksycznych jonów Al w roztworze gleby wariantu A12 była zbyt wysoka, jest zbyt mała koncentracja potasu w igłach badanych sadzonek (Filipek 1994).

Poziom toksyczności glinu modyfikowany jest również występowaniem ektomikoryz (Moyer-Henry et al. 2005). U sadzonek wyhodowanych w wariantcie z większą dawką glinu zanotowano większą frekwencję ektomikoryz, a mniejszą ektendomikoryz, niż w wariantcie kontrolnym. Z badań przeprowadzonych przez Moyer-Henry et al. (2005) wynika, że tolerancja sadzonek sosny na glin jest związana zarówno z usuwaniem glinu ze szczytowego regionu korzenia i absorbowaniem go w peryferyjnych miejscach, w komórkach poza merystemem, jak i gromadzeniem glinu w strzępkach grzybni i w strefie sieci Hartiga w korzeniach bocznych kolonizowanych przez grzyby mikoryzowe (*Pisolithus tinctorius*). Wyraźnie liczniejsze występowanie ektomikoryz niż ektendomikoryz u siewek w wariantcie z większą dawką glinu niż w wariantcie kontrolnym może sugerować, że obecność glinu przy niższym pH gleby determinuje występowanie grzybów ektomikoryzowych i ektendomikoryzowych. Znana jest międzygatunkowa, a także wewnątrzgatunkowa, zmienność reakcji grzybów mikoryzowych w stosunku do jonów glinu (Garcidueñas-Piña, Cervantes 1996; Majewska, Werner 2001).

Zastosowanie siarczanu glinu przyczyniło się do bardziej wydajnych wschodów siewek. Przyczyną mogło być zmniejszenie predyspozycji chorobowej siewek poprzez poprawę warunków wzrostu – korzystniejszy odczyn gleby, co jest zjawiskiem znanym. Inną przyczyną mogło być zahamowanie rozwoju patogenów powodujących rozwój zgorzeli siewek w efekcie zmian w populacji mikroorganizmów glebowych albo w efekcie zmian właściwości fizyko-chemicznych gleby. Na bazie przeprowadzonego doświadczenia trudno jest stwierdzić, czy było to działanie bezpośrednie jonów glinu czy też pośrednie, poprzez obniżenie wartości pH. W badaniach Fichtner (2002) izolaty *Rhizoctonia solani* z siewek sosny z objawami zakaźnej zgorzeli były bardziej hamowane w środowisku z dodatkiem Al₂(SO₄)₃, buforowanym do pH 4, aniżeli do pH 6. Przy pH poniżej

4 najbardziej znaczącą formą glinu jest wolny jon Al^{3+} . Przewaga jonów $Al(OH)_2^+$ i kompleksów Al z materia organiczną torfu wzbogaconego roztworem $Al_2(SO_4)_3$ o pH 6 oznacza, że za tłumienie *Phytophthora parasitica* są odpowiedzialne inne jony niż Al^{3+} (Fichtner 2002).

Obecność glinu przy niskim poziomie pH może ograniczać wzrost strzępek grzybni i hamować kiełkowanie zarodników grzybów z rodzaju *Fusarium* (Dursun, Boddy 2002). Koreluje to z wynikami niniejszych badań, gdyż po zastosowaniu siarczanu glinu frekwencja *F. oxysporum* jako sprawcy zakaźnej zgorzeli siewek sosny była niższa niż w wariancie kontrolnym. W badaniach Huang i Kuhlmana (1991a) zastosowanie preparatu SF-21, zawierającego głównie siarczan glinu, obniżyło straty z powodu zakaźnej zgorzeli siewek sosny (*Pinus elliotii* Engelm.) powodowanej przez *R. solani*, *P. aphanidermatum* i *F. moniliforme* var. *subglutinans*, a populacja patogenów w glebie uległa redukcji. Jednocześnie zaobserwowano wzrost populacji saprotroficznych grzybów z rodzaju *Trichoderma*, *Penicillium* i *Gliocladium*. Grzyby te znane są z antybiotycznego oddziaływania w stosunku do patogenów (Domsch et al. 1980). W badaniach laboratoryjnych Huang i Kuhlman (1991b) wykazali, że wzbogacenie gleby w SF-21 hamuje rozwój strzępek *R. solani* i *P. aphanidermatum*. Gęstość populacji *Trichoderma* spp. i *Penicillium* spp. w glebie wzbogaconej w preparat SF-21 była ujemnie skorelowana z wartością pH w granicach 4–6. Zdolność $Al_2(SO_4)_3$ do hamowania wzrostu *R. solani* i *P. aphanidermatum* w agarze wodnym była dużo większa przy pH 4 niż przy pH 6. Huang i Kuhlman (1991b) na podstawie przeprowadzonych badań doszli do wniosku, że mechanizm hamowania rozwoju *R. solani* miał charakter pośredni i był efektem stymulacji rozwoju innych mikroorganizmów, w szczególności *Trichoderma harzianum* i *Penicillium oxalicum*. Rozwój *P. aphanidermatum* był hamowany zarówno bezpośrednio, przez nieorganiczne i organiczne komponenty preparatu jak i pośrednio, przez obniżenie pH gleby i stymulację rozwoju mikroorganizmów.

Chociaż glin nie jest zaliczany do pierwiastków niezbędnych dla roślin, to jednak niska koncentracja glinu w glebach może korzystnie oddziaływać na rozwój roślin o wysokiej tolerancji na ten pierwiastek i zdolnością do pobierania go (Marschner 1995).

Gawliński (1978) na bazie doświadczenia w kulturach piaskowo-wodnych zanotował stymulujące działanie glinu na wzrost sadzonek sosny zwyczajnej przy dawce 10 ppm w pożywce. Również w niniejszych badaniach sadzonki wyhodowane w wariancie z mniejszą dawką glinu (A11) miały korzystniejsze parametry wzrostowe, choć wartości średnie badanych parametrów nie różniły się statystycznie istotnie od parametrów sadzonek z wariantu kontrolnego. Zastosowane dawki

siarczanu glinu przyczyniły się istotnie do podwyższenia koncentracji manganu w igłach badanych sadzonek. Może to oznaczać, że koncentracja glinu w roztworach badanych gleb nie przyczynia się do zahamowania pobierania manganu, co zanotował Marschner (1995) w glebach o dużej koncentracji Al, ale wynika z obniżenia pH gleby (Lityński, Jurkowska 1982).

W niniejszych badaniach, w igłach sadzonek dwuletnich wariantu A12, stwierdzono istotnie niższą koncentrację magnezu niż w wariancie kontrolnym, natomiast nie zanotowano istotnych różnic koncentracji wapnia. Można dopatrzeć się także zmniejszenia koncentracji fosforu wraz z zastosowaniem dawek glinu. W przypadku pozostałych makro- i mikroelementów w igłach sadzonek jednorocznych i dwuletnich nie stwierdzono istotnych różnic koncentracji. Ich zawartość mieściła się w przedziale wartości optymalnych (Fober 1993). Nie obserwowano wizualnych zmian ubarwienia igieł sadzonek sosny po zastosowaniu obu dawek siarczanu glinu.

Toksyczny efekt glinu (o stężeniu sięgającym do 500 $\mu\text{mol L}^{-1}$) na wzrost drobnych korzeni i wzrost roślin, notowany w badaniach hydroponicznych i w doświadczeniach wazonowych, nie został potwierdzony w długoletnim, polowym doświadczeniu, prowadzonym w dojrzałym drzewostanie świerkowym (De Wit et al. 2010). Jednakże, zawartość magnezu w igłach obniżała się istotnie i stale na poletkach z podwyższoną koncentracją Al, podczas gdy zawartość Ca w igłach nie ulegała zmianie i nie zanotowano innych zmian wskazujących na redukcję żywotności drzewostanu (De Wit et al. 2010).

Obniżona koncentracja fosforu w igłach sadzonek wariantu A11 i A12 w odniesieniu do wariantu kontrolnego, choć statystycznie nieistotna, może być powodem zwiększania sorpcji chemicznej fosforanów wraz z obniżeniem pH gleby i powstawaniem fosforanów glinu, chociaż nie potwierdzają tego rezultaty badań Gawlińskiego (1978).

Obniżona koncentracja magnezu w igłach badanych sadzonek może wynikać z większego tempa wymywania magnezu z gleby wraz ze zwiększaniem stopnia zakwaszenia i łatwiejszym przenikaniem glinu niż magnezu do wnętrza komórki i blokadą miejsc sorbujących (Filipek 1994).

Gatunki drzew z rodzaju *Pinus* i *Picea* rosną na glebach bardzo zakwaszonych z dużą koncentracją glinu. Mogłyby więc być zaliczone do tak zwanych akumulatorów glinu lub tolerujących wysokie koncentracje glinu w glebie ze względu na możliwość wszechstronnych mechanizmów adaptacji do wzrostu w warunkach szkodliwego oddziaływania tego pierwiastka (Filipek 1994; Gruba 2004; Moyer-Henry et al. 2005).

Rezultaty badań Moyer-Henry et al. (2005) wyraźnie wskazują, że sadzonki sosny (*Pinus taeda* L.) są wysoce odporne na Al, wzrost elongacyjny korzenia pierwotnego nie ulega zahamowaniu, dopóki stężenie Al^{3+} nie zbliży się do $40 \mu mol L^{-1}$. Wzrost ten uległ ograniczeniu tylko do 30% przy aktywności Al^{3+} równym $580 \mu mol L^{-1}$.

5. Podsumowanie i wnioski

1. Stwierdzono istotne statystycznie różnice liczby jednorocznych sadzonek w poszczególnych wariantach doświadczenia. Największą średnią liczbę sadzonek zanotowano w wariacie z wyższą dawką siarczanu glinu a najmniejszą w wariacie kontrolnym.

2. Z siewek pobranych z wariantu z większą dawką siarczanu glinu rzadziej izolowano *Fusarium oxysporum* i *Pythium* spp. niż z siewek z wariantu kontrolnego. Wprowadzenie do gleby siarczanu glinu nie wpłynęło różnicująco na częstość izolowania *R. solani* z siewek sosny.

3. Zastosowanie siarczanu glinu w większej dawce wpłynęło korzystnie na spektrum mikoryz sadzonek sosny, wzrósł udział ektomikoryz w stosunku do ektendomikoryz.

4. Zastosowane dawki siarczanu glinu nie wpłynęły na aktywność fosfatyzacji i inwertazy w badanej glebie ani na aktywność fosfatazy kwaśnej powierzchni zakończeń korzeni.

5. Zastosowanie wyższej dawki siarczanu glinu przyczyniło się istotnie do zredukowania długości korzeni bocznych i korzenia głównego oraz liczby korzeni troficznych sadzonek sosny.

6. Zastosowane dawki siarczanu glinu przyczyniły się istotnie do podwyższenia koncentracji manganu i cynku, a do obniżenia koncentracji magnezu w igłach sadzonek sosny.

7. Niższą z zastosowanych dawek siarczanu glinu można uznać za wartość progową dla badanej gleby z uwagi na hamujące oddziaływanie na wzrost sadzonek sosny zwyczajnej wyższej dawki tego związku.

8. Przeprowadzone badania potwierdziły korzystne oddziaływanie małych dawek glinu na wydajność wschodów i parametry wzrostowe sadzonek sosny zwyczajnej. Na bazie przeprowadzonego doświadczenia trudno jest stwierdzić, czy ten korzystny efekt wynika z bezpośredniego oddziaływania glinu na wschody, czy też z działania pośredniego – na rozwój patogenów i kształtowanie struktury mikoryz w wyniku obniżenia wartości pH gleby.

Podziękowanie

Autorzy dziękują Panu inż. Andrzejowi Broda za pomoc w założeniu i prowadzeniu doświadczenia oraz Paniom inż. Reginie Głowackiej, inż. Bożenie Dobroś i mgr Agnieszce Wojciechowicz za wykonanie analiz laboratoryjnych.

Badania były finansowane z funduszy przekazanych przez Nadleśnictwo Krzeszowice (Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych w Krakowie).

Literatura

- Baule H., Fricker C. 1973. Nawożenie drzew leśnych. Warszawa, PWRiL.
- De Wit H.A., Eldhuset T.D., Mulder J. 2010. Dissolved Al reduces Mg uptake in Norway spruce forest: results from a long-term field manipulation experiment in Norway. *Forest Ecology and Management*, 259: 2072–2082.
- Domsch K.H., Gams W., Anderson T.H. 1980. Compendium of soil fungi. Academic Press, London. ISBN 0-12-220402-6.
- Dursun S., Boddy L. 2002. Effects of pH and aluminium ion concentration on spore germination and growth of some soil fungi. *Turkish Journal of Biology*, 26: 99–107.
- Fichtner E.J. 2003. Abiotic pathogen suppression: physiology and biology of aluminium toxicity to soilborne fungi. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirement for Degree of Doctor of Philosophy Plant Pathology and Soil Science. Approved by: Co-Chair of Advisory Committee. Raleigh.
- Filipek T. 1994. The content of exchangeable aluminium in soils and plant growth. *Journal of Chemical Ecology*, 3(3): 367–375.
- Fober H. 1993. Żywnienie mineralne. w: *Biologia sosny zwyczajnej*. Białobok S., Boratyński A., Bugała W. (eds). Instytut Dendrologii PAN – Sorus, Poznań – Kórnik, 182–193.
- Garcidueñas-Piña R., Cervantes C. 1996. Microbial interaction with aluminium. *BioMetals*, 9: 311–316.
- Gawliński S. 1978. Badania nad wpływem glinu rozpuszczalnego na pobieranie fosforu i wzrost sadzonek sosny zwyczajnej. *Roczniki Gleboznawcze*, 3: 61–77.
- Gruba P. 2004. Toksyczność glinu (Al) w glebach leśnych. *Sylwan*, 1: 50–56.
- Haziev F.H. 1976. Fermentativnaa aktivnost počv. Moskva, Izd. Nauka.
- Huang J.W., Kuhlman E.G. 1991a. Formulation of a soil amendment to control damping-off of slash pine seedlings. *Phytopathology*, 81: 163–170.
- Huang J.W., Kuhlman E.G. 1991b. Mechanisms inhibiting damping-off pathogens of slash pine-seedlings with a formulated soil amendment. *Phytopathology*, 81, 171–177.
- Januszek K. 1999. Znaczenie właściwości fizyczno-chemicznych gleb w produkcji sadzonek drzew leśnych oraz zasady obliczania dawki azotu. *Sylwan*, 1: 113–119.

- Januszek K., Barczyk K. 2003. Wpływ pH gleby oraz rodzaju nawożenia na wydajność i jakość sadzonek sosny zwyczajnej. *Roczniki Gleboznawcze*, 54: 51–60.
- Januszek K., Januszek R.A. 2000. Aktywność kwaśnej fosfomonoesterazy powierzchni korzeni mikoryzowych sosny pospolitej oznaką skażenia środowiska. *Sylwan*, 4: 87–92.
- Jeffers S.N., Martin S.B. 1986. Comparison of two media selective for *Phytophthora* and *Pythium* species. *Plant Disease*, 70: 1038–1043.
- Klasyfikacja gleb leśnych Polski. 2000. Warszawa, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych. ISBN 8388478206.
- Kowalski S. 1977. Zgorzel siewek daglezi (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco) w namiocie foliowym na tle mikrobiologicznej analizy substratów użytych jako podłoże hodowlane. *Roczniki Nauk Rolniczych Seria E*, 7, 2: 29–36.
- Kowalski S., Obłozka E., Wojewoda W. 1996. Susceptibility of ectomycorrhizal and ectendomycorrhizal fungi to pH of the environment. *Acta Mycologica*, 31, 2: 127–136.
- Kowalski S. 1998. Mikoryzy. Choroby Drzew Leśnych, 11. Poznań, PWRiL.
- Królikowski L., Ciok B. 1968. Glin wymienny hamuje rozwój i wzrost siewek sosnowych. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa*, 365 (2): 13–19.
- Lityński T., Jurkowska H. 1982. Żyzność gleby i odżywianie się roślin. Warszawa, PWN. ISBN 8301028874.
- Majewska B., Werner A. 2001. Wpływ przemysłowych zanieczyszczeń powietrza generujących stres glinowy na grzyby leśne. *Wiadomości Botaniczne*, 45(1/2): 45–52.
- Mańka K., Przezbórski A., Kwaśna H., Żółtańska E. 1987. Wpływ pH na aktywność niektórych grzybów wyizolowanych ze środowisk leśnych i rolnych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 307: 175–196.
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second Edition. London, Academic Press. ISBN 978-0124735439.
- Moyer-Henry K., Silva L., Macfall J., Johannes E., Allen N., Goldfarb B., Rufty T. 2005. Accumulation and localization of aluminium in root tops of loblolly pine seedlings and the associated ectomycorrhiza *Pisolithus tinctorius*. *Plant Cell and Environment*, 28, 111–120.
- Nowak J., Friend A.L. 1995. Aluminium sensitivity of loblolly pine and slash pine seedlings grown in solution culture. *Tree Physiology*, 15: 605–609.
- Ostrowska A., Gawliński S., Szczubiałka Z. 1991. Metody analizy i oceny właściwości gleb i roślin. Katalog. Warszawa, Instytut Ochrony Środowiska, 334.
- Prusinkiewicz Z., Biały K., Chrapkowski B. 1974. Skład chemiczny i cechy biometryczne organów asymilacyjnych jako wskaźniki warunków glebowych oraz mineralnego odżywiania i potrzeb nawozowych drzewostanów sosnowych. *Roczniki Gleboznawcze*, 25(3): 223–236.
- Prusinkiewicz Z., Krzemień K. 1974. Toksyczny wpływ wolnego glinu z orsztynowego poziomu bielicy na rozwój sadzonek sosny pospolitej *Pinus silvestris* L. *Roczniki Gleboznawcze*, 25(3): 207–222.
- Russell B.S. (ed.). 1974. Mycology Guidebook. Seattle, University of Washington Press. ISBN: 0295953136.
- Schöll L., Keltjens W.G., Hoffland E., Breemen N. 2004. Aluminium concentration versus the base cation to aluminium ratio as predictors for aluminium toxicity in *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings. *Forest Ecology and Management*, 195: 301–309.
- Silva I.R., Smyth T. J., Moxley D.F., Allen N.S., Rufty T.W. 2000. Aluminium accumulation at nuclei of cells in the root tip. Fluorescence detection using lumogallion and confocal laser scanning microscopy. *Plant Physiology*, 123: 543–522.
- Stępniewska H. 2003. Occurrence of *Phytophthora cactorum* on tree seedlings with damping-off symptoms in some forest nurseries in south of Poland. *Phytopathologia Polonica*, 29: 53–67.

Wkład autorów

K.J. i H.S. – koncepcja, założenia, interpretacja wyników, pisanie, koordynacja, przegląd literatury; E.B. – analiza statystyczna, przygotowanie rycin, redagowanie, przygotowanie maszynopisu; J.M. i K.K. – pobieranie próbek gleb i sadzonek, przygotowanie pobranych materiałów do badań, zestawienie danych, przegląd literatury; A.G. i A.W. – pobieranie i analiza korzeni sadzonek i mikoryz, zestawienie danych.