

Ocena żywotności drzew oraz biomasy i morfologii systemów korzeniowych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) wzrastającej na zrehabilitowanym składowisku odpadów po flotacji rud cynku i ołowiu

Assessment of tree vitality, biomass and morphology of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) root systems growing on reclaimed landfill waste after zinc and lead flotation

Marcin Pietrzykowski, Bartłomiej Woś*, Marek Pająk, Justyna Likus-Cieślik

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Instytut Ekologii i Hodowli Lasu, Zakład Ekologii Lasu i Rekultywacji, Al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

*Tel. +48 12 6625083, e-mail: b.wos@ur.krakow.pl

Abstract. The stability of introduced stands depends not only on aboveground but also on the belowground biomass. Results from reclaimed sites often indicate good growth of the aboveground part of stands, but data on the development of root systems are still lacking. Our aim was to assess the vitality of trees, their biomass and the morphology of the root systems of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) introduced on reclaimed landfill waste after zinc and lead flotation in Bukowno (southern Poland). The landfill site was reclaimed 20 years ago and reclamation treatments involved isolation and covering with mineral substrate layers (110–150 cm thickness) which formed a technogenic soil profile. Four research plots (10×10m) were set up in pure pine stands where soil profiles consisted entirely of flotation waste. Trees on the plots were assayed according to the Kraft and IUFRO classification system. In total, 15 trees of average growth parameters and bio-sociological position (I and II Kraft class) were selected for biomass and root system analyses and the root systems were excavated, washed, measured, weighed and photographed.

Our results support pine as a useful species in reforestation of post-mining areas. However, although pine trees were characterized by good vitality, their root systems were shallow and their depth reduced by up to 60 cm due to strong skeletal loamy substrate. Individual root biomass ranged from 1.2 to 9.1 kg and was comparable to pine root biomass on other reclaimed mining sites. This indicates that during restoration, the thickness of the substrate covering the flotation waste should be increased or the amount of skeletal substrate in the top layers of technosol reduced.

Keywords: reforestation, technosols, stand, belowground biomass, heavy metals

1. Wstęp

Podstawowym zadaniem rekultywacji z punktu widzenia dynamiki odtworzenia ekosystemu na terenach pogórnich jest zainicjowanie procesu glebotwórczego (Bradshaw 1983; Pietrzykowski 2015). Metody odtwarzania gleb można ogólnie podzielić na techniczne, w których odtwarzany jest pełny profil rekonstruowanej gleby, lub biologiczne, w których odtworzenie inicjalnej warstwy organicznej następuje z zastosowaniem głównie roślin próchnicotwórczych (Pietrzykowski, Krzaklewski 2014; Pietrzykowski 2015). Technologia odtworzenia pełnego profilu glebowego jest ograniczona dostępnością korzystnych z punktu widzenia właściwości glebotwórczych skał nadkładu. Gdy występuje niedostatek dobrej jakości gruntów, techniki odtworzenia gleb w fazie

rekultywacji biologicznej wykorzystują tzw. nawożenie zielone, tj. uprawę roślin próchnicotwórczych, wiążących azot atmosferyczny (Pietrzykowski, Krzaklewski 2009).

W Polsce rekultywacja w kierunku leśnym przebiega według wypracowanych wzorców z podziałem na etapy rekultywacji technicznej, biologicznej, a następnie zagospodarowania (zalesienia). Zróżnicowane, a często niekorzystne i zmieniające się skokowo właściwości gleb technogennych na terenach przemysłowych sprawiają, że kluczowy dla powodzenia rekultywacji i zalesienia staje się odpowiedni dobór gatunków drzew, charakteryzujących się dużymi zdolnościami przystosowawczymi do warunków siedliskowych (Knoche et al. 2002; Pietrzykowski et al. 2014). W grupie głównych niekorzystnych cech gleb technogennych, wpływających na obniżenie ogólnie pojętego trofizmu, wymienić należy zakwaszenie, alkalizację, niską biodostępność składni-

Wpłynęło: 7.07.2017 r., zrecenzowano: 5.10.2017 r., zaakceptowano: 21.11.2017 r.

ków pokarmowych i zaburzenia ich wzajemnych stosunków ilościowych, a także zanieczyszczenie metalami ciężkimi, wadliwe stosunki powietrzno-wodne i kompakcję (Katzur, Haubold-Rosar 1996; Knoche et al. 2002; Pietrzykowski 2014). To z kolei wpływa na złe zaopatrzenie w składniki pokarmowe drzew, ich przyrost i zdrowotność, a w długofalowej perspektywie stabilność wprowadzonych drzewostanów i w konsekwencji powodzenie rekultywacji leśnej (Katzur, Haubold-Rosar 1996; Knoche et al. 2002; Pietrzykowski 2015). W ekosystemach leśnych występuje znaczna biomasa podziemna, odgrywająca równie istotną rolę jak biomasa nadziemna w obiegu materii i energii (Waring, Schlesinger 1985). System korzeniowy drzew umownie zbudowany jest z korzeni grubych (ang. coarse roots, o średnicy $d > 2$ mm) i drobnych (ang. fine roots, o $d < 2$ mm) (Millikin, Bledsoe 1999). Korzenie grube odpowiedzialne są przede wszystkim za stabilizację mechaniczną (stabilność) drzew, natomiast korzenie drobne odpowiadają za żywienie mineralne (Böhm 1985; Danjon, Reubens 2008). Z tych względów znajomość biomasy systemów korzeniowych, stopnia ich wykształcenia i deformacji jest istotna w perspektywie oceny strategii odżywiania mineralnego i stabilności wprowadzonych drzewostanów na zalesionych terenach pogórnicych (Pietrzykowski, Woś 2010; Pietrzykowski et al. 2010). Dystrybucja korzeni w profilu glebowym, jako tzw. głębokość biologiczna (Puchalski, Prusinkiewicz 1990), stanowi czynnik oceny rozwoju gleb na terenach pogórnicych (Pietrzykowski, Woś 2010) oraz oceny rozwoju życia biologicznego gleby, czyli mikroorganizmów zasiedlających strefę bezpośredniego oddziaływania korzeni, czyli ryzosferę (Węgorzek 2003). Ponadto badania biomasy systemów korzeniowych na terenach pogórnicych mogą mieć również lokalne znaczenie w ocenie możliwości regulacji ilości węgla akumulowanego w powstających ekosystemach (Rodrigue et al. 2002).

Celem pracy była ocena żywotności oraz zbadanie biomasy i morfologii systemów korzeniowych sosny zwyczajnej wprowadzonej na składowisko odpadów po flotacji rud cynku i ołowiu zrehabilitowane z zastosowaniem izolacji i pokrycia odpowiednimi utworami mineralnymi. Odpady tego typu, produkowane w znacznych ilościach w przemyśle wydobywczym rud metali nieżelaznych w wielu miejscach na świecie, zaliczane są do trudnych w przypadku rekultywacji biologicznej, gdyż zawierają znaczne ilości metali ciężkich. Stąd ocena i optymalizacja metod ich zagospodarowania i rekultywacji ma znaczenie dla ochrony środowiska nie tylko w skali lokalnej, ale i globalnej.

2. Teren badań

Teren badań stanowiło zrehabilitowane byłe składowisko odpadów po flotacji rud cynku i ołowiu ZGH „Bolesław” S.A. w Bukownie (N 50 17.781; E 19 29.195). Składowisko zlokalizowane jest około 40 km na północny zachód od Krakowa. Według regionalizacji przyrodniczo-leśnej obiekt położony jest w Krainie IV Małopolskiej, mezoregionie Górnośląskim (Zielony, Kliczkowska 2012).

Osadniki nadpoziomowe odpadów poflotacyjnych stanowią duże zagrożenie dla środowiska przyrodniczego poprzez zanieczyszczenia gleb pierwiastkami śladowymi wskutek pylenia i migracji pierwiastków w wodach odciekowych (Krzaklewski et al. 2004). Z tego względu, wykorzystanie odpadów poflotacyjnych do wypełnienia wyrobiska po eksploatacji rud cynkowo-olowiowych miało ograniczyć powierzchnię zajmowaną przez osadniki nadpoziomowe i ich negatywne oddziaływanie (Projekt techniczny... 1992). Eksploatacja górnicza rud cynkowo-olowiowych w obszarze wyrobiska prowadzona była w latach 1955–1985. Powierzchnia terenu zrehabilitowanego obejmowała obszar 9,28 ha, w tym wypełnione odpadami wyrobisko o powierzchni 7,64 ha oraz przylegający 'pas ochronny', w którym projektowano zadrzewienia złożone z gatunków drzew szybko rosnących (głównie topól). Wyrobisko przed wypełnieniem odpadami poflotacyjnymi miało głębokość ok. 20 m i pojemność ponad 1500 tys. m³. Po zdeponowaniu odpadów poflotacyjnych i wyrównaniu powierzchni wyrobiska do rzędnej terenów przyległych wykonano warstwę izolacyjną z ilów kajprowych, permskich lub innych utworów zbliżonych do gruntów zwięzłych dla ograniczenia przesiąkania wód opadowych do górotworu. Następnie warstwę izolacyjną przykryto warstwą wierzchnią, pełniącą funkcję substratu – medium dla procesów glebotwórczych. Zastosowana technologia nawiązuje do tzw. 'glebowej' metody rekultywacji, polegającej na pokrywaniu obiektów przemysłowych warstwą o odpowiedniej miąższości, którą stanowią żyzne (próchniczne i mineralno-próchniczne) poziomy gleb pozyskane z przedpola odkrywek lub terenów przeznaczonych pod obiekty przemysłowe (np. osadniki, zwałowiska) (Krzaklewski 2017). Po wykonaniu zabiegów agrotechnicznych obiekt zalesiono głównie gatunkami pionierskimi: sosną zwyczajną (*Pinus sylvestris* L.), a w domieszce modrzewiem europejskim (*Larix decidua* Mill.) i brzozą brodawkowatą (*Betula pendula* Roth) (Projekt techniczny ... 1992). Przez następne 20 lat w drzewostanach tych nie wykonywano żadnych zabiegów pielęgnacyjnych (czyszczeń, trzebieży itp.).

3. Metodyka

W pierwszym etapie badań wyznaczono w transekcie cztery jednoarowe powierzchnie o wymiarach 10×10 m, zlokalizowane w litych płatach 20-letnich drzewostanów sosnowych. Dla zbadania pełnego profilu gleby technogennej na każdej powierzchni badawczej wykonano, z wykorzystaniem koparki, odkrywki glebowe do głębokości występowania odpadów poflotacyjnych (do 120–160 cm głębokości). W wykonanych profilach glebowych opisano szczegółowo morfologię gleb, rozmieszczenie korzeni w profilu i sporządzono dokumentację fotograficzną. Następnie z wyróżnionych poziomów glebowych (Olf, AinCan, Can) pobrano próbki gleb do oznaczeń laboratoryjnych. W próbkach pobranych z poziomów mineralnych oznaczono: uziarnienie aparatem Fritsch GmbH Laser Particle Sizer ANALYSETTE 22; pH w H₂O i w 1 mol dm³ KCl metodą potencjometryczną w proporcji 1:2,5; prze-

wodność elektrolityczną właściwą (PEW) z zachowaniem proporcji gleba : roztwór 1:5; zawartość węglanów CaCO_3 metodą Scheiblera, a we wszystkich próbkach glebowych (tj. razem z próbkami z poziomów organicznych) zawartość węgla organicznego (C_{org}) i azotu ogólnego (Nt) na aparacie TruMac® – CNS; zawartość Zn, Cd i Pb po trawieniu w mieszaninie HNO_3 i 60% HClO_4 w proporcji 1:3 na spektrofotometrze CP OES ICAP 6000 Series. Na każdej powierzchni badawczej zmierzono pierśnicę ($d_{1,3}$) i wysokość (h) oraz przeprowadzono klasyfikację wszystkich drzew pod względem żywotności i tendencji rozwojowej z zastosowaniem klasyfikacji biologicznej Krafta i systemu IUFRO.

Następnie w zasadniczej części badań obejmującej systemy korzeniowe wyznaczono na powierzchniach 15 drzew próbnych o przeciętnych parametrach wzrostowych i pozycji biosocjalnej w drzewostanie (tj. drzewa należące do I i II klasy Krafta). Drzewom próbnym nadano numery (od 1 do 15) i ścięto część nadziemną na wysokości szyi korzeniowej. Systemy korzeniowe wykopano z zastosowaniem koparki. Pozyskane systemy korzeniowe oczyszczono wodą pod ciśnieniem. Po osuszeniu korzenie zważono w stanie świeżym (wagą hakową Mensor WM150P2 z dokładnością do 1,0 g), zmierzono grubość w szyi korzeniowej oraz zasięg pionowy i poziomy korzeni grubych (o średnicy $d > 1$ cm). Każdy system korzeniowy sfotografowano i opisano jego morfologię. Fotografie systemów korzeniowych poddano obróbce graficznej z zastosowaniem oprogramowania CorelDRAW® Graphics Suite X8.

W celu oznaczenia wilgotności korzeni i określenia biomasy w stanie suchym pobrano mieszaną próbkę tkanki drzewnej z karp. Wilgotność korzeni określono w laboratorium metodą suszarkowo-wagową po wysuszeniu próbek w temperaturze 105°C do stałej suchej masy.

Przy opisie morfologii systemów korzeniowych sosen zastosowano skalę Nörra (2003), nieco zmodyfikowaną i wykorzystaną w badaniach korzeni sosny zwyczajnej na terenach zrehabilitowanych i opisaną w pracy Pietrzykowskiego i in. (2010). Wyróżniono następujące stopnie przekształceń systemów korzeniowych:

1 – system palowy, typowy dla sosny zwyczajnej, wykształcany w warunkach swobodnego wzrostu na optymalnych dla tego gatunku glebach piaszczysto-gliniastych;

2 – system palowy, lecz już lekko spłaszczony, z widoczną słabą deformacją korzenia głównego;

3 – system zdeformowany, wyraźnie spłaszczony, skrzywiony korzeń palowy, silny wzrost korzeni bocznych;

4 – system silnie zdeformowany, spłaszczony, silnie poskręcany korzeń główny, deformacje trwałe.

W celu porównania stosunku biomasy korzeni do biomasy nadziemnej każdego drzewa próbnego określono biomasę sumaryczną strzały i gałęzi z wykorzystaniem formuły empirycznej opracowanej dla sosny zwyczajnej wzrastającej na zrehabilitowanych siedliskach pogórnicych w Polsce (Pietrzykowski, Socha 2011):

$$B_{\text{nadz}} = 0,102080 \cdot (D_{1,3}^2 \cdot H)^{0,793199}$$

gdzie:

B_{nadz} – biomasa części nadziemnej drzewa [kg],

$D_{1,3}$ – pierśnica [cm],

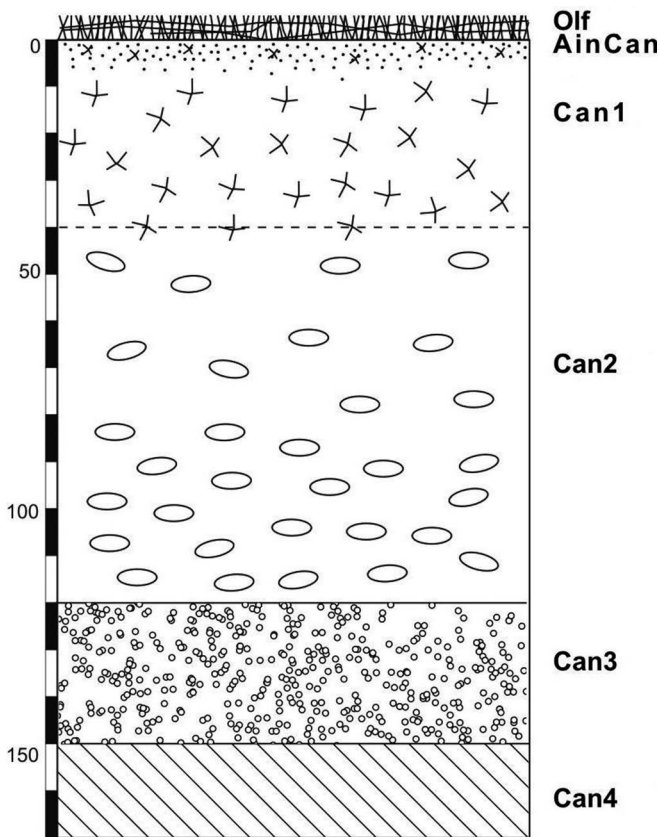
H – wysokość [m].

4. Wyniki i dyskusja

Według „Systematyki gleb Polski” (2011) gleby na zrehabilitowanym obiekcie zaliczono do antropogenicznych, industrioziemnych inicjalnych, natomiast według klasyfikacji IUSS Working Group WRB (2015) do typu Technosols. Badane gleby charakteryzują się budową profilu o następującym układzie poziomów i warstw: Olf (poziom organiczny inicjalny surowinowy z zaczątkami butwiny, o miąższości 4–5 cm), AinCan (inicjalny poziom organiczno-mineralny z cechami skały macierzystej, o miąższości 5–8 cm), Can1 (antropogeniczny poziom skały macierzystej, bezszkieletowy o miąższości 25–35 cm), Can2 (antropogeniczny poziom silnie szkieletowy, tj. $>50\%$ szkieletu, o miąższości 60–80 cm), Can3 (20–30 cm, antropogeniczny poziom stanowiący warstwę izolacyjną, zbudowany z utworów ilastych) oraz Can4 (odizolowane odpady poflotacyjne). Zastosowana najgłębsza warstwa izolacyjna miała za zadanie oddzielić profil podlegający przerośnięciu przez korzenie roślin drzewiastych od odpadów poflotacyjnych. Z punktu widzenia rekultywacji jest to przykład gleby technogennej utworzonej w fazie rekultywacji technicznej poprzez nawiezenie odpowiednich warstw izolacyjnych i medium glebotwórczego (ryc. 1).

Badane gleby charakteryzowały się odczynem obojętnym lub zasadowym (pH w H_2O od 7,1 do 7,9, a w KCl od 6,9 do 7,7 w poziomach mineralnych). Zawartość węgla organicznego w wierzchnich poziomach organiczno-mineralnych (AinCan) wynosiła średnio 1,4%, a azotu ogólnego 0,076%. Wyniki były wyższe od wartości średnich uzyskanych pod drzewostanami sosnowymi w wieku 25 lat na wyrobisku piasków podsadzkowych „Szczakowa” (C_{org} 0,32–0,40%; Nt 0,01–0,03%) (Józefowska et al. 2016), co wskazuje na pozytywny przebieg procesu rozwoju gleb na przedmiotowym obiekcie. Zawartość pierwiastków śladowych (Zn, Cd, Pb) była zróżnicowana w profilu glebowym. Najwyższą zawartością Zn, Cd i Pb charakteryzowały się odpady poflotacyjne (Can4), następnie poziom Can2, który tworzyły skały dolomitowe bogate w omawiane pierwiastki śladowe. W pozostałych wyróżnionych poziomach mineralnych gleb zawartość omawianych pierwiastków była wyraźnie niższa (tab. 1).

W ocenie tempa procesu glebotwórczego podstawowe znaczenie ma tempo akumulacji i jakość glebowej materii organicznej (SOM) (Pietrzykowski, Krzaklewski 2007), niemniej ważna jest również ocena właściwości biologicznych (Chodak et al. 2009). Prosty i bardzo przydatny wskaźnikiem oceny głębokości biologicznej gleb na terenach zrehabilitowanych jest stosowana od dawna w siedliskoznawstwie leśnym ocena zasięgu i intensywności występowania korzeni w profilu glebowym (Puchalski, Prusinkiewicz 1990). Badane gleby charakteryzują się występowaniem korzeni drzew do głębokości 60 cm, przy czym stwierdzona w profilach



Rycina 1. Schemat poglądowy profilu odtworzonej gleby technogenicznej na zrehabilitowanym składowisku odpadów po flotacji rud cynku i ołowiu z ilastą warstwą izolacyjną odpadów i warstwami utworów użytych jako medium glebotwórcze, Olf – igliwie sosnowe, AinCan – glina piaszczysta, Can1 – glina lekka, Can2 – glina zwykła, silnie szkieletowa (70–80%), Can3 – warstwa izolacyjna z łu bezzkieletowego, Can4 – odpady poflotacyjne

Figure 1. Scheme of reconstructed technogenic soil profile on reclaimed landfill waste after zinc and lead flotation with clay insulating layer and layers of substrate used as soil formation medium, Olf – pine litter, AinCan – sandy loam; Can1 – sandy loam; Can2 – loam, strong skeletal (70–80%), Can3 – clay insulating layer; Can4 – flotation waste

glebowych miąższość warstw pokrywających osady poflotacyjne wynosiła od 110 do 150 cm. Ograniczenie głębokości korzenia związane jest z silną szkieletowością i zbitym układem głębszych warstw profilu. Poziom silnie szkieletowy (o zawartości szkieletu powyżej 50%) w badanych glebach występuje na głębokości 30–40 cm, stanowiąc istotną barierę rozwoju korzeni drzew (ryc. 1). Pod względem właściwości fizycznych badane gleby upodabniają się do gleb tworzących się z utworów (skał macierzystych) o większej szkieletowości (rankery, rędziny itp.). Warunki takie na naturalnych siedliskach leśnych są typowe dla gleb gór i pogórza oraz wyżyn, w tym np. dla pobliskiego zrehabilitowanego obiektu na Wyżynie Krakowsko-Częstochowskiej, na którym występują rędziny (Brożek, Zwydak 2010).

Zgodnie z tablicami przyrostu i miąższości drzewostanów Szymkiewicza (2001) drzewostany sosnowe w wieku 20 lat na zrehabilitowanym składowisku odpadów poflotacyjnych

charakteryzowały się I klasą bonitacji wzrostowej. Zagęszczenie drzewostanów było wysokie i wynosiło średnio 7350 szt. ha⁻¹, przy błędzie standardowym (SE) 650 szt. ha⁻¹, co jest cechą charakterystyczną drzewostanów niepielęgowanych (Szymański 2000). Przeciętna pierśnica danego drzewostanu wynosiła 8 cm (przy SE 0,2 cm), a przeciętna wysokość 11,5 m (przy SE 0,2 m). W drzewostanach zaobserwowano oznaki wyraźnego procesu przemieszczania drzew w klasach biologicznych, czyli warstwach drzewostanu. Większość drzew wzrastała w górnej warstwie drzewostanu, jak to ma miejsce w tej fazie rozwojowej drzewostanów złożonych z gatunków światłolubnych (Szymański 2000), jednak wyraźnie wykształcił się drzewostan opanowany. Pod względem żywotności w badanych drzewostanach przeważały drzewa normalnie rozwinięte i o normalnej żywotności (46%). Drzewa słabiej rozwinięte, o obniżonej żywotności, miały stosunkowo wysoki udział w drzewostanie (28%). W badanych drzewostanach przeważały drzewa awansujące do wyższych klas biosocjalnych (55%), stosunkowo wysoki udział miały drzewa spadające do niższych klas biosocjalnych (31%). Zjawisko to jest naturalną konsekwencją intensywnego wzrostu w tej fazie rozwojowej, tj. w okresie drzewostanu młodocianego, szczególnie w przypadku gatunków światłolubnych (Szymański 2000). Pod względem wartości hodowlanej w badanych drzewostanach przeważały drzewa pożyteczne (56%), natomiast udział drzew szkodliwych wynosił 18%. Taki udział drzew o słabszej żywotności, spadających i szkodliwych, jest wynikiem naturalnej dynamiki drzewostanu, związanej z ustalaniem pozycji biosocjalnej i silnej konkurencji w fazach rozwojowych w okresie drzewostanu młodocianego (Szymański 2000). W badanych drzewostanach przeważały drzewa o przeciętnej jakości (klasa 50 według IUFRO – drewno użytkowe). Ocenione parametry można uznać za dobre w badanych warunkach siedliskowych, a nawet perspektywiczne do dalszego rozwoju i hodowli drzewostanów na zrehabilitowanym obiekcie (tab. 2).

W optymalnych warunkach siedliskowych na glebach piaszczystych sosna zwyczajna wykształca głęboki, palowy system korzeniowy, charakteryzujący się obecnością silnego korzenia dominującego, przebiegającego mniej lub bardziej pionowo w głąb profilu glebowego (Köstler et al. 1968; Jaworski 2004). Jednakże systemy korzeniowe sosny mogą ulegać znacznym modyfikacjom do warunków wzrostu na danym siedlisku. Sosna wzrastająca na glebach ze strefowymi zmianami uwilgotnienia, zwięzłości, właściwości powietrzno-wodnych lub przepuszczalności często wykształca spłaszczony, talerzowy system korzeniowy (Köstler et al. 1968; Jaworski 2004).

Przebadane systemy korzeniowe wykazywały przekształcenia i deformacje w stosunku do typowego systemu korzeniowego sosny (ryc. 2). Około 13% systemów korzeniowych oceniono na drugi stopień przekształceń, 67% na trzeci stopień, a 20% na czwarty, najsilniejszy stopień przekształceń według zastosowanej skali Pietrzykowskiego i in. (2010). W warunkach zrehabilitowanego składowiska odpadów poflotacyjnych rozwój systemów korzeniowych ograniczany był przede wszystkim w kierunku pionowym poprzez płytko

zalegający poziom szkieletowy (o udziale szkieletu powyżej 50%). Systemy korzeniowe sosen zwyczajnych charakteryzowały się zanikiem głównego korzenia palowego, a korzenie boczne wykazywały zwiększoną grubość. System korzeniowy w tych warunkach siedliskowych przyjmował najczęściej postać płaską z rozmieszczonymi powierzchniowo silnymi korzeniami bocznymi i wyrastającymi z nich

w głąb gleby delikatnymi korzeniami. Zasięg pionowy korzeni grubych ($d > 1$ cm) wynosił od 21 do 51 cm (średnio 36,3 cm), natomiast poziomy od 68 do 216 cm (średnio 139,4 cm) (tab. 3). Uwidaczniały się ponadto deskowate zgrubienia korzeni bocznych, które w tych warunkach mają związek z zachowaniem statyki drzewa (Jaworski 2004). Część systemów korzeniowych posiadała charakterystyczne przekształcenia

Tabela 1. Wybrane właściwości gleby technogennej na zrehabilitowanym składowisku odpadów po flotacji rud cynku i ołowiu
Table 1. Selected technosol properties on reclaimed landfill waste after zinc and lead flotation

Poziom glebowy Soil horizons	Właściwości / Properties				PEW	CaCO ₃	C _{org}	Nt	Zn	Cd	Pb
	pył/ dust (0,05– 0,002 mm)	ił/ loam (<0,02 mm)	pH w H ₂ O	pH w KCl							
	[%]	[%]	[μS cm ⁻¹]	[%]							
Olf	n.o. ¹	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	n.o.	34,2±3,7	1,01±0,06	3224,0±324,3	27,5±3,0	1026,5±136,8
AinCan	27±10 ²	6±1	7,1±0,1	6,9±0,1	110,8±26,2	3,1±2,0	1,4±0,3	0,076±0,031	867,0±247,2	6,7±1,6	284,4±86,5
Can1	28±7	9±1	7,6±0,2	7,3±0,2	91,5±26,4	17,4±15,9	0,5±0,2	0,019±0,002	1241±690,4	11,5±8,0	606,9±436,5
Can2	39±3	15±3	7,9±0,1	7,7±0,1	179,5±3,5	58,0±8,0	n.o.	n.o.	3550,6±533,1	37,4±10,2	1600,3±247,3
Can3	74±1	26±1	7,9±0,1	7,4±0,1	233,5±47,5	47,3±36,8	n.o.	n.o.	272,9±129,2	1,8±0,7	77,4±18,5
Can4	39±10	3±2	7,7±0,1	7,6±0,1	1321,5±21,5	72,1±1,5	n.o.	n.o.	2871,7±115,5	42,8±3,8	2115,9±405,4

¹n.o. – nie określono; ²średnia±błąd standardowy (SE)

¹n.o. – not specified; ²mean±standard error (SE)

Tabela 2. Struktura rozkładu drzew w klasach Krafta i IUFRO w drzewostanach sosnowych wzrastających na zrehabilitowanym składowisku odpadów po flotacji rud cynku i ołowiu

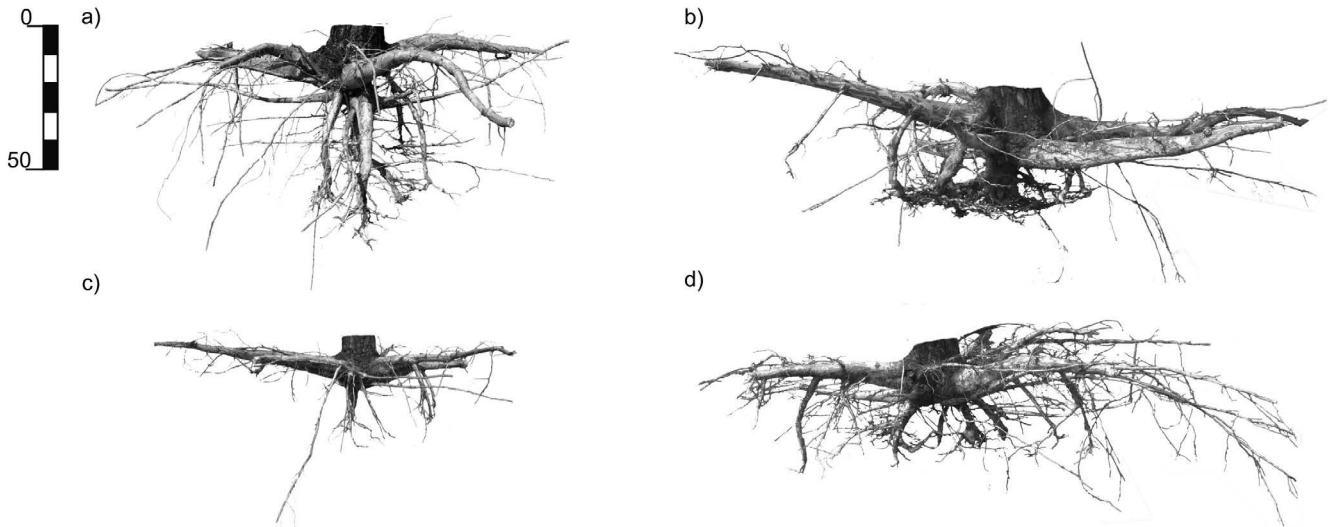
Table 2. Distribution structure of trees in Kraft and IUFRO classes in Scots pine stands growing on reclaimed landfill waste after zinc and lead flotation

Klasyfikacja Krafta Kraft classification		Liczba drzew Number of trees	%
Drzewostan główny Dominant stand	I drzewa górujące predominant trees	48	25
	II drzewa panujące dominant trees	79	41
	III drzewa współpanujące co-dominant trees	31	16
Drzewostan podrzędny Suppressed stand	IVa drzewa opanowane wkleszczone pomiędzy inne intermediate trees, with restricted lateral crown growth	12	6
	IVb drzewa opanowane, korony w części podokapowej intermediate trees, the crown under canopy cover	14	7
	Va drzewa przygluszone z koroną jeszcze żywą suppressed trees, with crowns still alive	7	4
	Vb drzewa przygluszone z koroną obumierającą lub obumarłą suppressed trees, with dead crowns	2	1

Klasyfikacja IUFRO IUFRO classification			Liczba drzew Number of trees	%
Stanowisko biologiczne Biological position				
	100	górna upper layer	124	64
Warstwa drzewostanu Stand layer	200	środkowa middle layer	46	24
	300	dolna lower layer	23	12
	10	drzewa silnie rozwinięte luxuriant trees	50	26
Żywotność Vitality	20	drzewa normalnie rozwinięte trees normally developed	89	46
	30	drzewa słabo rozwinięte trees weakly developed	54	28
	1	drzewa awansujące trees with an accelerated rate of growth	107	55
Tendencja wzrostowa Growth tendency	2	drzewa stagnujące trees with a normal rate of growth	26	13
	3	drzewa spadające trees with a decelerated rate of growth	60	31
	Stanowisko gospodarcze Silvicultural position			
	400	drzewa dorodne valuable, outstanding tree	50	26
Wartość hodowlana Silvicultural value	500	drzewa pożyteczne usable wood	108	56
	600	drzewa szkodliwe poor to unusable quality	35	18
	40	drewno cenne valuable wood	3	2
Jakość pnia Trunk quality	50	drewno użytkowe normal wood	134	69
	60	drewno najgorszej jakości substandard wood	56	29
	4	długa, >0,5 wysokości drzewa deep crown, >0.5 tree height	33	17
Długość korony Crown length	5	średnia medium	87	45
	6	krótka, <0,25 wysokości drzewa shallow, <0.25 tree height	73	38

w postaci „pęczków” korzeni drobnych na granicy występowania poziomów szkieletowych. Jest to zjawisko charakterystyczne dla gleb, w których występuje strefowa zmienność

pod względem żyzności lub wilgotności (Jaworski 2004). Zaobserwowane przekształcenia systemów korzeniowych sosen są, podobnie jak w warunkach niektórych siedlisk leśnych,



Rycina 2. Systemy korzeniowe 20-letnich sosen wzrastających na zrekonstruowanej glebie technogennej z różnymi stopniami deformacji według zastosowanej w opracowaniu skali: a) stopień przekształceń – 2; b) oraz c) stopień przekształceń – 3; d) stopień przekształceń – 4
 Figure 2. Root systems of 20-year-old pine trees growing on reconstructed technogenic soil, with varied deformation degree according to used scale in the work: a) 2nd degree deformation; b) and c) 3rd degree of deformation; d) 4th degree of deformation

przykładem dostosowania do gleb z płytko występującymi poziomami szkieletowymi. W przyszłości, planując rekultywację i zalesienie tego rodzaju obiektów z zastosowaniem przedstawionej technologii, można by rozważyć dwa warianty, tzn. zwiększyć znacznie (dwu-trzykrotnie) miąższość utworów stanowiących medium glebotwórcze i pokrywających osady nad warstwą izolacyjną, co może być bardzo kosztochłonne i uzależnione od dostępności odpowiednich substratów, lub też poprawić układ fizyczny zbitych utworów i zastosować w rekonstrukcji gleby technogennej mniej szkieletowe utwory.

Drzewa próbne, z których pozyskano systemy korzeniowe, charakteryzowały się następującymi parametrami: pierśnicą od 7,5 do 13,6 cm, wysokością od 7,9 do 11,1 m i obliczoną biomasą nadziemną od 15,3 do 43,0 kg. Biomasa (sucha masa) systemów korzeniowych wynosiła od 1,2 kg (przy d_0 – 9,4 cm i $d_{1,3}$ – 7,5 cm) do 9,1 kg (przy d_0 – 17,8 cm i $d_{1,3}$ – 13,6 cm) (tab. 3) i była zbliżona do biomasy systemów korzeniowych sosen w wieku od 12 do 23 lat wzrastających w warunkach zrekonstruowanego zwałowiska KWB „Bełchatów” (od 0,74 kg przy d_0 – 6,8 cm do 7,52 kg przy d_0 – 14,3 cm) i wyrobiska piasków podsadzkowych „Szczakowa” (od 0,74 kg przy d_0 – 6,8 cm do 43,45 kg przy d_0 – 21,1 cm) (Pietrzykowski et al. 2010). Zbliżone wyniki osiągnięto w badaniach przeprowadzonych na siedliskach naturalnych w południowej Finlandii, w których stwierdzono, że biomasa systemu korzeniowego pojedynczych sosen w wieku 18 i 19 lat wynosiła odpowiednio: 5,5 i 8,3 kg, przy pierśnicy 9 i 11 cm (Vanninen et al. 1996). Udział biomasy korzeni drzew leśnych w naturalnych ekosystemach szacowany jest zwykle na ok. 20% w stosunku do nadziemnej biomasy drewna (Lieth, Whittaker 1975; Miller et al. 2006). Jednakże wielkość ta jest zmienna w zależności od gatunku drzewa, zagęszczenia drzewostanu i warunków siedlisko-

wych. W warunkach rekultywowanych obiektów pogórniczych deformacje systemów korzeniowych drzew i zbyt mała biomasa korzeni w stosunku do części nadziemnej może negatywnie wpływać na stabilność wprowadzonych drzewostanów (Pietrzykowski et al. 2010). W przypadku badanych systemów korzeniowych sosen na zrekonstruowanym składowisku odpadów poflotacyjnych stosunek biomasy korzeni do biomasy części nadziemnej (B_{korz}/B_{nadz}) był zróżnicowany i wynosił od 8% do 21%, średnio zaś 14%. W cytowanych badaniach z terenów rekultywowanych (Pietrzykowski et al. 2010) stwierdzano podobne wartości dla sosen ze zwałowiska bełchatowskiego, na którym wartości stosunku B_{korz}/B_{nadz} przyjmowały wartości z zakresu od 10 do 14%. Natomiast uzyskane w niniejszej pracy wartości B_{korz}/B_{nadz} były wyższe w porównaniu z wynikami cytowanych badań (Pietrzykowski et al. 2010) sosen wzrastających w warunkach wyrobiska popiaskowego „Szczakowa” z płytkim lustrem wód gruntowych (od 6,4 do 7%).

5. Wnioski

Zastosowana technologia rekultywacji, polegająca na pokryciu zdeponowanych w starym wyrobisku odpadów poflotacyjnych warstwą izolacyjną i dostępnymi na miejscu utworami mineralnymi, a następnie na zalesieniu, była skuteczna. Po 20 latach odnotowano dobre efekty w postaci wykształcenia inicjalnych poziomów próchnicznych, wskazujących na prawidłowy kierunek rozwoju gleb i siedlisk leśnych.

Sosna zwyczajna wzrastająca na zrekonstruowanej glebie technogennej charakteryzowała się dobrą żywotnością i parametrami wzrostowymi, aczkolwiek w morfologii systemów korzeniowych stwierdzano przekształcenia typowego dla sosny systemu palowego na system spłaszczony. Zauważone deformacje są jednak objawem dobrego dosto-

Tabela 3. Cechy wzrostowe i parametry systemów korzeniowych 20-letnich sosen wzrastających na zrehabilitowanym składowisku odpadów po flotacji rud cynku i ołowiu

Table 3. Characteristics of growth and root systems parameters of 20-year-old pine trees growing on reclaimed landfill waste after zinc and lead flotation

	Część nadziemna Aboveground part			Część podziemna Belowground part			$B_{\text{korz}}/B_{\text{nadz}}$	
	d_0 [cm]	$d_{1,3}$ [cm]	h [m]	B_{nadz} [kg]	Z_{pion} [cm]	Z_{poz} [cm]		B_{korz} [kg]
Średnia Mean	13,3	10,0	9,9	24,5	36,3	139,4	3,7	14
Minimum	9,4	7,5	7,9	15,3	20,0	68,0	1,2	8
Maksimum	17,8	13,6	11,1	43,0	51,0	216,0	9,1	21
Błąd standardowy (SD) Standard error (SE)	0,6	0,4	0,2	1,8	2,4	10,4	0,5	1

d_0 – grubość w szyi korzeniowej; $d_{1,3}$ – pierśnica; h – wysokość; B_{nadz} – biomasa części nadziemnej; Z_{pion} – zasięg pionowy korzeni; Z_{poz} – zasięg poziomy korzeni; B_{korz} – biomasa korzeni; $B_{\text{korz}}/B_{\text{nadz}}$ – stosunek biomasy korzeni do biomasy części nadziemnej

d_0 – diameter at root collar; $d_{1,3}$ – diameter at breast height; h – height; B_{nadz} – aboveground biomass; Z_{pion} – vertical depth of roots; Z_{poz} – horizontal length of roots; B_{korz} – coarse roots biomass; $B_{\text{korz}}/B_{\text{nadz}}$ – root biomass to aboveground tree biomass ratio

sowania (plastyczności) sosny do wzrostu w warunkach silnej szkieletowości utworów mineralnych zastosowanych do rekonstrukcji gleby.

Na podstawie przeprowadzonych badań dla ulepszenia technologii rekultywacji można zalecić zwiększenie miąższości utworów pokrywających odpady poflotacyjne lub wykonanie wierzchniej warstwy z utworów o mniejszej szkieletowości w celu poprawy warunków wzrostu korzeni drzew na tego rodzaju obiektach.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródło finansowania badań

Badania sfinansowano ze środków własnych DS3420 Zakładu Ekologii Lasu i Rekultywacji, Wydziału Leśnego, Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Materiał badawczy zebrano i opublikowano za zgodą Zakładów Górniczo-Hutniczych „Bolesław” S.A. w Bukowniu.

Literatura

- Böhm W. 1985. Metody badania systemów korzeniowych. PWRiL, Warszawa, 267 s. ISBN 83-09-00902-X.
- Bradshaw A.D. 1983. The reconstruction of ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 20: 1–17.
- Brożek S., Zwydak M. 2010. Atlas gleb leśnych Polski. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa, 467 s. ISBN 83-88478-17-6.
- Chodak M., Pietrzykowski M., Niklińska M. 2009. Development of microbial properties in a chronosequence of sandy mine soils. *Applied Soil Ecology* 41(3): 259–268. DOI 10.1016/j.apsoil.2008.11.009.
- Danjon F., Reubens B., 2008. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. *Plant and Soil* 303(1–2): 1–34. DOI 10.1007/s11104-007-9470-7.
- IUSS Working Group WRB 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 193 s. ISBN 978-92-5-108369-7.
- Jaworski A. 2004. Podstawy przyrostowe i ekologiczne odnawiania i pielęgnacji drzewostanów. PWRiL, Warszawa, 374 s. ISBN 83-09-01775-8.
- Józefowska A., Woś B., Pietrzykowski M. 2016. Tree species and soil substrate effects on soil biota during early soil forming stages at afforested mine sites. *Applied Soil Ecology* 102: 70–79. DOI 10.1016/j.apsoil.2016.02.012.
- Katzur J., Haubold-Rosar M. 1996. Amelioration and reforestation of sulfurous mine soils in Lusatia (Eastern Germany). *Water, Air and Soil Pollution* 91(1-2): 17–32.
- Knoche D., Embacher A., Katzur J. 2002. Water and element fluxes of red oak ecosystems during stand development on post-mining sites (Lusatian Lignite District). *Water, Air and Soil Pollution* 141: 219–231. DOI 10.1023/A:1021350321058.
- Köstler J.N., Brückner E., Bibelriether H. 1968. Die Wurzeln der Waldbäume. Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Paul Parey, Hamburg, Berlin, 284 s. ISBN 978-3-490-05116-5.
- Krzaklewski W. 2017. Podstawy rekultywacji leśnej. Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków, 213 s. ISBN 978-83-64758-53-9.
- Krzaklewski W., Barszcz J., Małek S., Kozioł K., Pietrzykowski M. 2004. Contamination of Forest Soils in the Vicinity of the Sedimentation Pond after Zinc and Lead Ore Flotation (in the Re-

- gion of Olkusz, Southern Poland). *Water, Air and Soil Pollution* 159(1): 151–164.
- Lieth H., Whittaker R.H. 1975. Primary productivity of the biosphere. Springer Verlag, Berlin–Heidelberg–New York, 339 s. ISBN 978-3-642-80915-6.
- Miller A.T., Allen H.L., Maier Ch.A. 2006. Quantifying the coarse-root biomass of intensively managed loblolly pine plantations. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 12–22. DOI 10.1139/x05-229.
- Millikin C.S., Bledsoe C.S. 1999. Biomass and distribution of fine and coarse roots from blue oak (*Quercus douglasii*) trees in the northern Sierra Nevada foothills of California. *Plant and Soil* 214(1–2): 27–38. DOI 10.1023/A:1004653932675.
- Nörr R. 2003. Wurzeldeformationen – ein Risiko für die Bestandesstabilität? Entstehung, Entwicklung und Auswirkungen von Wurzeldeformationen. *Forstliche Forschungsberichte München* 195, 179–196 s. ISBN 978-3-933506-26-9.
- Pietrzykowski M. 2014. Soil quality index as a tool for Scots pine (*Pinus sylvestris*) monoculture conversion planning on afforested, reclaimed mine land. *Journal of Forestry Research* 25: 63–74. DOI 10.1007/s11676-013-0418-x.
- Pietrzykowski M. 2015. Reclamation and reconstruction of terrestrial ecosystems on mine sites - ecological effectiveness assessment, w: Energy Science and Technology, Volume 2: Coal Energy (red. S. Sri, S.U. Chandra, P. Ram). Studium Press LLC, New Delhi, Houston, USA, 120–151 s. ISBN 1-62699-061-1.
- Pietrzykowski M., Krzaklewski W. 2007. Soil organic matter, C and N accumulation during natural succession and reclamation in an opencast sand quarry (southern Poland). *Archives of Agronomy and Soil Science* 53(5): 473–483. DOI 10.1080/03650340701362516.
- Pietrzykowski M., Krzaklewski W. 2009. Rekultywacja leśna terenów wyrobisk po eksploatacji piasków podsadzkowych na przykładzie Kopalni „Szczakowa”. Monografia. Katedra Ekologii Lasu UR, Kraków, 134 s. ISBN 978-83-904974-1-9.
- Pietrzykowski M., Krzaklewski W. 2014. Rekultywacja - współdziałanie technologii i ekologii, w: Monografia: Węgiel brunatny - szanse i zagrożenia (red. D. Sierpień). Akademia Górniczo-Hutnicza in. Stanisława Staszica w Krakowie, 333–343 s. ISBN 978-83-7783-088-8.
- Pietrzykowski M., Socha J. 2011. An estimation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) ecosystem productivity on reclaimed post-mining sites in Poland (central Europe) using of allometric equations. *Ecological Engineering* 37(2): 381–386. DOI 10.1016/j.ecoeng.2010.10.006.
- Pietrzykowski M., Woś B. 2010. Biomass and distribution of pine forest phytocenosis fine roots in sandy soil and sandy clay loam soil on reclaimed spoil heap of the Piaseczno sulphur mine. Teza Komisji Ochrony i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego O.L. PAN 7, 319–327.
- Pietrzykowski M., Socha J., van Doorn N.S. 2014. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) site index in relation to physico-chemical and biological properties in reclaimed mine soils. *New Forests, International Journal on the Biology, Biotechnology, and Management of Afforestation and Reforestation* 46(2): 247–266. DOI 10.1007/s11056-014-9459-z.
- Pietrzykowski M., Socha J., Woś B. 2010. Biomasa i przekształcenia systemów korzeniowych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w warunkach siedliskowych zrehabilitowanego wyrobiska i zwałowiska górnictwa odkrywkowego. *Sylvan* 154(2): 107–116.
- Puchalski T., Prusinkiewicz Z. 1990. Ekologiczne podstawy siedliskoznawstwa leśnego. PWRiL, Warszawa, 463 s. ISBN 83-09-01423-6.
- Projekt techniczny rekultywacji odkrywki „Ujków” w Bolesławiu 1992. Przedsiębiorstwo Produkcyjno-Usługowe Eko-Śląsk, Spółka Cywilna, Katowice.
- Rodrigue J.A., Burger J.A., Oderwald R.G. 2002. Forest productivity and commercial value of pre-law reclaimed mined land in the eastern United States. *Northern Journal of Applied Forestry* 19(3): 106–114.
- Systematyka gleb Polski. 2011. *Roczniki Gleboznawcze* 62(3): 1–193.
- Szymański S. 2000. Ekologiczne podstawy hodowli lasu. PWRiL, Warszawa, 478 s. ISBN 83-09-01728-6.
- Szymkiewicz B. 2001. Tablice zasobności i przyrostu drzewostanów ważniejszych gatunków drzew leśnych. PWRiL, Warszawa, 179 s. ISBN 83-09-01745-6.
- Vanninen P., Ylitalo H., Sievänen R., Mäkelä A. 1996. Effects of age and site quality on the distribution of biomass in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees* 10: 231–238. DOI 10.1007/BF02185674.
- Waring R.H., Schlesinger W.H. 1985. Forest Ecosystem – concepts and management. Academic Press, San Diego–New York–Boston–London–Sydney–Tokyo–Toronto, 340 s. ISBN 0127354409.
- Węgorzek T. 2003. Zmiany niektórych właściwości materiału ziemnego i rozwój fitocenoz na zwałowisku zewnętrznym kopalni siarki w wyniku leśnej rekultywacji docelowej. *Rozprawy Naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie* 275, 1–140. ISBN 0860-4355.
- Zielony R., Kliczkowska A. 2012. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa, 356 s. ISBN 9788361633624.

Wkład autorów

M.P. – koncepcja i plan badań, przygotowanie i korekta tekstu artykułu; B.W. – pomiary, obliczenia, przygotowanie tekstu artykułu; M.P. – pomiary, przygotowanie tekstu artykułu; J.L.-C. – przygotowanie tekstu artykułu, wykonanie rycin.