

MARCIN PIETRZYKOWSKI, JAROSŁAW SOCHA, BARTŁOMIEJ WOŚ

Biomasa i przekształcenia systemów korzeniowych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w warunkach siedliskowych zrehabilitowanego wyrobiska i zwałowiska górnictwa odkrywkowego*

Biomass and deformation of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) root systems in reclaimed open-cast mining pit and dumping ground conditions

ABSTRACT

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. Sylwan 154 (2): 107-116.

The paper analyses the biomass and the deformation of the root systems of the Scots pine growing on an afforested post-mining area. Deformation of the root systems was detected in the pines growing on excessively compacted soils of a dump and in the pines growing in a sand mine pit with a shallow groundwater table. In both cases, the ratio of root biomass to aboveground biomass was considered too low, which might indicate a risk to stand nutrition and stability.

KEY WORDS

reclamation, Scots pine, root system, root biomass

ADDRESSES

Marcin Pietrzykowski ⁽¹⁾ – e-mail: rlpietrz@cyf-kr.edu.pl

Jarosław Socha ⁽²⁾ – e-mail: rlsocha@cyf-kr.edu.pl

Bartłomiej Woś ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Katedra Ekologii Lasu; Uniwersytet Rolniczy; al. 29 Listopada 46; 31-425 Kraków

⁽²⁾ Katedra Dendrometrii; Uniwersytet Rolniczy; al. 29 Listopada 46; 31-425 Kraków

Wstęp i cel pracy

W ekosystemach leśnych, charakteryzujących się znaczną biomasa nadziemną w stosunku do innych ekosystemów lądowych, występuje również znaczna biomasa podziemna, odgrywająca dużą rolę w obiegu materii i energii [Waring, Schlesinger 1985; Wardle i in. 2004]. Badania systemów korzeniowych drzew, w tym biomasy z podziałem na frakcje korzeni grubych i drobnych, ocena ich żywotności, zasięgu i zagęszczenia oraz dystrybucji w profilu glebowym są istotne dla oceny kondycji drzew. Ma to znaczenie w badaniach mechanizmów żywienia mineralnego oraz zdolności adaptacyjnych i strategii życiowych gatunków drzewiastych w różnych warunkach siedliskowych [Nielsen, Hansen 2006]. W ostatnim okresie znaczenia nabiera również kwestia udziału korzeni w biomacie ekosystemów lądowych, stanowiących ogniwo w sekwestracji CO₂ i wpływających na minimalizację efektu cieplarnianego [Miller i in. 2006]. Dobrze rozpoznane

* Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy w ramach grantu N 309 013 32 /2076 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego

i licznie cytowane w literaturze są zagadnienia dotyczące biomasy nadziemnej drzewostanów i fitocenoz oraz produktywności ekosystemów [Lieth, Whittaker 1975; Vanninen i in. 1996; Rodrigue i in. 2002; Orzeł i in. 2005]. Określenie biomasy podziemnej drzew i drzewostanów jest trudne metodycznie i bardzo pracochłonne. Zasięg korzeni nawet pojedynczego drzewa może być bardzo rozległy [Puchalski, Prusinkiewicz 1975]. Ponadto włóśniki i drobne korzenie, którymi drzewo pobiera wodę i sole mineralne, żyją bardzo krótko i szybko się rozkładają. Dlatego stosowane metody badań bezpośrednich (wykopywanie, metody cylindrowe, metody liczenia w objętości gleby, a nawet ostatnio opisywane metody badań z użyciem kamer wprowadzanych pod ziemię) oraz metody pośrednie oparte na szacowaniu z użyciem wzorów empirycznych dają najczęściej przybliżone wyniki [Waisel i in. 1991; Vogt i in. 1998].

W przypadku terenów pogórnicych rekultywowanych dla leśnictwa, badania biomasy korzeni drzew są bardzo istotne dla oceny strategii i przystosowania do nowych warunków siedliskowych [Harabin 1971; Rodrigue i in. 2002; Pietrzykowski 2008]. W powstających układach ekologicznych na terenach rekultywowanych inicjalne gleby nie zawsze spełniają sprawnie rolę harmonijnego zaspokojenia potrzeb pokarmowych fitocenoz. Podstawowym problemem w rekultywacji leśnej staje się zdolność gleb do żywienia wprowadzonych drzewostanów. Znajomość biomasy korzeni, stopnia ich wykształcenia i deformacji jest istotna w perspektywie oceny żywienia i stabilności drzewostanów na zalesionych terenach pogórnicych [Heinsdorf 1996; Pietrzykowski 2008]. Jak wspomniano, badania biomasy korzeni na terenach pogórnicych mogą mieć również lokalnie znaczenie w ocenie możliwości regulacji ilości węgla akumulowanego w powstających ekosystemach [Waisel i in. 1991; Vogt i in. 1998; Rodrigue i in. 2002]. Ponadto dystrybucja korzeni w profilu glebowym, jako tzw. głębokość biologiczna [Puchalski, Prusinkiewicz 1975], stanowi istotny czynnik oceny rozwoju gleb na terenach pogórnicych [Fabijanowski, Zarzycki 1969; Pietrzykowski 2006].

Jak dotąd, w Polsce niewiele jest opracowań dotyczących rozwoju korzeni w warunkach siedlisk na terenach pogórnicych. W pionierskich pracach Fabijanowski i Zarzycki [1969] analizowali rozwój systemów korzeniowych roślin z sukcesji na zwałowisku kopalni siarki w Piasecznie. Harabin [1971] przeprowadził badania systemów korzeniowych drzew w aspekcie ich przydatności dla biologicznej obudowy zboczy zwałów skał przywęglowych towarzyszących głębiniowemu górnictwu węgla kamiennego. Krzaklewski [1977] określił biomasę korzeni podbiału pospolitego (*Tussilago farfara*) w inicjalnych zbiorowiskach z sukcesji na zboczach zwałowiska kopalni węgla brunatnego „Adamów”. Autor ten prowadził również badania, z bogatą dokumentacją fotograficzną, systemów korzeniowych drzew w warunkach wyrobiska Kopalni Piasku „Szczakowa” [Krzaklewski 1978; dane niepublikowane]. Pietrzykowski [2006] wykazał wzrost głębokości biologicznej gleb na podstawie zasięgu korzeni w chronosekwencji na terenach rekultywowanych i pozostawionych sukcesji na wyrobisku KP „Szczakowa”.

O ile dotychczasowe wyniki badań z terenów pogórnicych wskazują na ogół na dobry przyrost biomasy wprowadzonych drzewostanów, to zauważalny jest problem deformacji systemów korzeniowych w stosunku do typowych dla danego gatunku w warunkach siedlisk naturalnych. Zwracano również uwagę na problem zbyt małej biomasy korzeni w stosunku do biomasy nadziemnej dynamicznie przyrastających drzewostanów na zwałowiskach [Pietrzykowski 2008]. Jednym z podstawowych gatunków wprowadzanych w zalesieniach na terenach pogórnicych w warunkach Europy środkowej jest sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.) [Baumann i in. 2006]. Gatunek ten cechuje się nadzwyczajną zdolnością przystosowania do siedlisk ubogich. Możliwe to jest między innymi dzięki znacznym zdolnościom przystosowawczym systemu korzeniowego do różnych warunków glebowych i mikoryzie [Obmiński 1970].

Celem pracy było zbadanie biomasy korzeni grubych (o średnicy w przybliżeniu > 8,0 mm) oraz dostosowania i przekształceń systemów korzeniowych sosny zwyczajnej wzrastającej w warunkach siedliskowych wybranych terenów pogórnicych. Badania prowadzono na stanowiskach zróżnicowanych rodzajem substratów, uziarnieniem gleb i występowaniem wód gruntowych.

Obiekty i metodyka badań

Badania prowadzono na rekultywowanych dla leśnictwa obiektach pogórnicych na wierzchowinie zwałowiska zewnętrznego nadkładu odkrywkowej kopalni węgla brunatnego KWB „Bełchatów” (Polska centralna) oraz wyrobisku kopalni piasków podsadzkowych „Szczakowa” (Górny Śląsk). Powierzchnie badawcze zlokalizowano w litych drzewostanach sosnowych (*Pinus sylvestris* L.) w wieku od 12 do 23 lat. Ogółem założono 16 powierzchni badawczych (kwadraty 10×10 m), tj. po 4 powtórzenia w 4 wariantach siedliskowych. Warianty siedliskowe zostały przyjęte umownie, a głównym kryterium różnicującym były: rodzaj skały macierzystej (zwałowanych lub odsłoniętych utworów), uziarnienie gleby oraz występowanie wód gruntowych. Na zwałowisku „Bełchatów” badania prowadzono na potencjalnie żyznych czwartorzędowych utworach o uziarnieniu glin i glin piaszczystych (wariant siedliskowy oznaczono symbolem CzGP) oraz na potencjalnie uboższych, zawęglonych i kwaśnych trzeciorzędowych utworach piaszczystych. Utwory toksycznie kwaśne były poddane neutralizacji z użyciem kredy jeziornej (wariant ten oznaczono symbolem TP). Powierzchnie na wyrobisku popiaskowym „Szczakowa” lokalizowano na fragmentach potencjalnie żyźniejszych w obrębie tego obiektu, tj. na piaskach z wkładkami gliniastymi bez wód gruntowych do głębokości 3 m (PG) oraz na fragmentach z przewagą potencjalnie uboższych piasków luźnych, lecz z wodą gruntową na głębokości od 0,8 do 1,0 m (P). Podstawowe właściwości tych gleb zamieszczono w tabeli 1. Gleby na obiektach pogórnicych zaliczono według branżowej Klasyfikacji Gleb Leśnych Polski [Biały i in. 2000] do industrio- i urbanoziemnych o niewykształconym profilu. Gleby na zwałowisku bełchatowskim charakteryzowały się bardzo zmiennym odczynem od silnie kwaśnego i kwaśnego na piaskach

Tabela 1.

Niektóre właściwości gleb na rekultywowanych fragmentach wyrobiska „Szczakowa” i zwałowiska „Bełchatów” w badanych wariantach siedliskowych (podano wartości średnie)

Selected soil properties of reclaimed sites of the Szczakowa mine pit and the Bełchatów dumping ground in the analysed site variants (mean values)

Cecha	Bełchatów		Szczakowa		Poziom
	CzPG	TP	PG	P	
Zawartość pyłu (0,05-0,002 mm) [%]	31,75	7,50	8,25	4,50	Ain oraz C (do
Zawartość ilu (<0,002 mm) [%]	3,00	2,75	3,50	1,25	110 cm głęb.)
pH H ₂ O	4,45	4,18	4,30	4,45	Olf
	7,65	5,70	5,30	6,53	AinCan
	8,06	5,33	6,11	6,98	Can
	4,10	3,83	3,65	3,75	Olf
pH KCl	7,35	4,95	4,15	5,93	AinCan
	7,50	4,69	4,60	6,18	Can
Pojemność kompleksu sorpcyjnego [cmol (+)/kg]	27,98	5,68	2,20	3,70	AinCan
	27,68	5,49	3,13	2,18	Can

CzPG – siedliska lepsze na czwartorzędowych utworach piaszczysto-gliniastych; TP – siedliska słabsze na trzeciorzędowych piaskach po neutralizacji; PG – na piaskach z glinami; P – na oligotroficznych piaskach z wodą gruntową 0,8-1,0 m

CzPG – better sites on Quaternary loamy-sands; TP – on Tertiary sands after liming; PG – sands with loams; P – sands with ground water 0.8-1.0 m depth

trzeciorzędowych (TP) do obojętnego i zasadowego na piaskach gliniastych i glinach czwartorzędowych (CzGP). Gleby w wariacie CzGP charakteryzowały się dobrymi właściwościami sorpcyjnymi, jednak ich cechą niekorzystną było znaczne zagęszczenie i zbity układ w profilu na głębokości około 0,5 m (właściwości fizyczne i chemiczne analizowano szczegółowo w opracowaniu Pietrzykowskiego [2010]). Gleby na zwałowisku „Bełchatów” w wariacie na piaskach kwaśnych po neutralizacji (TP) charakteryzowały się małymi zdolnościami sorpcyjnymi i dużym stopniem zmienności właściwości fizykochemicznych w profilu. Z kolei gleby na wyrobisku popiaskowym „Szczakowa” posiadały odczyn kwaśny do lekko kwaśnego, a niekiedy w warstwach głębszych odczyn był bliski obojętnemu. Ogólnie gleby te wykazywały niskie zdolności sorpcyjne (tab. 1).

Na powierzchniach próbnych na wszystkich drzewach zmierzono: średnicę w szyi korzeniowej (D_0), pierśnicę ($D_{1,3}$) i wysokość (H). Następnie wybrano 50 drzew próbnych, reprezentujących cały zakres grubości. Po ich ścięciu wyrwano pozostałe w ziemi karpy, stosując w tym celu wyciągarki (na wyrobisku „Szczakowa”) i koparki (na zwałowisku KWB Bełchatów). Wyrwane korzenie płukano i ważono wagą elektroniczną w terenie z dokładnością do 1 g oraz sporządzono ich dokumentację fotograficzną. Na podstawie uzyskanych danych opracowano wzór empiryczny na określenie biomasy systemów korzeniowych drzew (korzeni grubych o średnicy w przybliżeniu > 8 mm). W celu opisanego zależności biomasy korzeni od grubości w szyi korzeniowej zastosowano podstawowe równanie funkcji allometrycznej o postaci:

$$B_{cechy} = a \cdot D_0^b \quad [1]$$

Parametry równania szacowano trzema sposobami. W pierwszym linearyzowano powyższą zależność przez logarytmowanie, w drugim parametry obliczano stosując regresję nieliniową z funkcją straty najmniejszych kwadratów, a w trzecim zastosowano regresję nieliniową, w której jako funkcję straty zastosowano ważoną metodę najmniejszych kwadratów. Wagą była odwrotność kwadratu grubości D_0 . Najlepsze dopasowanie do danych empirycznych i związany z tym największy udział wariacji wyjaśnionej uzyskano stosując metodę 3. W wyniku przeprowadzonych analiz uzyskano wzór empiryczny wyjaśniający 79% zmienności biomasy korzeni grubych ($R=0,89$):

$$B_{Krz} = 0,02298 \cdot D_0^{1,7295} \quad [2]$$

gdzie:

- B_{Krz} – biomasa systemu korzeniowego, korzenie o średnicy > 8 mm [kg],
- D_0 – grubość w szyi korzeniowej [cm].

Stosując opracowany wzór obliczono wielkość biomasy korzeni poszczególnych drzew, a następnie drzewostanów, którą porównano z biomasą nadziemną. Wykorzystano w tym celu wyniki oszacowania biomasy analizowanych drzewostanów zawarte w opracowaniu Pietrzykowskiego i Sochy [2010]. W cytowanych badaniach nadziemną biomasę drzew i drzewostanów oszacowano na podstawie pomiarów bezpośrednich oraz wzorów empirycznych opracowanych dla drzewostanów sosnowych młodszych klas wieku (I-II) rosnących w warunkach zrekultywowanych obiektów pogórnich w Polsce [Pietrzykowski, Socha 2010].

Oceniano również w terenie stopnie przekształceń systemów korzeniowych drzew. Oparto się na podziale Nörra [2003], który wyróżnił 5 stopni deformacji uwzględniających takie cechy jak skręt korzeni, zmiany kierunku wzrostu, powstawanie „nowotworów” w wyniku prób regeneracji oraz trwałość zmian degeneracyjnych. Podział ten nieco zmieniono i uproszczono. Ostatecznie w opracowaniu przyjęto czterostopniową skalę deformacji i przekształceń dla badanych systemów korzeniowych sosen wznoszących na obiektach pogórnich:

- 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, skręcony główny palowy, silny wzrost korzeni bocznych;
- 4 – system silnie zdeformowany, spłaszczony, silnie poskręcany korzeń główny, deformacje trwałe.

Dane o udziale stopni deformacji korzeni palowych traktowano szacunkowo, dla zobrazowania ogólnego dostosowania sosny do wzrostu w warunkach siedlisk antropogenicznych.

Wyniki i dyskusja

Biomasa zważonych w terenie korzeni pojedynczych sosen wzrastających na zwałowisku „Bełchatów” wynosiła od 0,40 kg (przy grubości w szyi korzeniowej $D_0=6,5$ cm) do 7,52 kg ($D_0=14,3$ cm), a sosen wzrastających na wyrobisku popiaskowym „Szczakowa” – od 0,74 kg ($D_0=6,8$ cm) do 43,45 ($D_0=21,1$ cm). Guź [1996 za Jaworski 2004] stwierdził, że biomasa korzeni sosen w wieku 20 lat, w zależności od wzrostu drzew, może wynosić od 6,0 do 17,4 kg przy pierśnicy odpowiednio 8,4 i 12,4 cm. W wieku 30 lat biomasa korzeni pojedynczych sosen o słabym wzroście wynosiła 18 kg (pierśnica 14 cm) i 54,5 kg przy wzroście dobrym (pierśnica 16 cm). Badania przeprowadzone w Japonii wykazały, że systemy korzeniowe 40-letnich sosen (*Pinus thunbergii* Parl.) ważyły średnio 34,7 kg. Z tego biomasa korzeni grubych stanowiła około 70%, a pozostałą część stanowiła karpa (podziemna część pniaka) i korzenie drobne [Konopka i in. 2000]. Korzenie grube wraz z pniakiem stanowią zwykle około 90% całkowitej żywej podziemnej biomasy drzewa [Miller i in. 2006], jednak bezpośrednie pobieranie składników pokarmowych drzewa odbywa się przez korzenie drobne i włosniki, stanowiące tylko około 10% biomasy podziemnej.

Biomasa korzeni drzew wzrastających na badanym wyrobisku i zwałowisku stanowiła stosunkowo mały udział w porównaniu do oszacowanej biomasy nadziemnej. Na wyrobisku po eksploatacji piasków podsadzkowych „Szczakowa” biomasa korzeni 21- i 23-letnich drzewostanów sosnowych wynosiła od 5,39 (w wariancie PG) do 5,17 t/ha (w wariancie P) (tab. 2). Na zwałowisku „Bełchatów” masa systemów korzeniowych 19-letnich drzewostanów sosnowych rosnących na żyzniejszych utworach (wariant na piaskach gliniastych CzGP) wynosiła 4,57 t/ha, a 12-letnich drzewostanów rosnących na uboższych piaskach (wariant TP) – 1,14 t/ha. W przy-

Tabela 2.

Biomasa systemów korzeniowych sosny zwyczajnej wzrastającej w warunkach siedliskowych rekultywowanych obiektów pogórnich przy przykładzie wyrobiska popiaskowego „Szczakowa” i zwałowiska zewnętrznej kopalni węgla brunatnego „Bełchatów”

Root biomass of the Scots pine growing at reclaimed sites as illustrated by the Szczakowa mine pit and outer dumping ground of the Bełchatów lignite mine

Obiekt badań	Wariant siedliskowy i wiek drzewostanów [lata]	Biomasa (średnia/odch. stand.) [Mg/ha]		K/B [%]
		nadziemna	korzeni	
Zwałowisko „Bełchatów”	CzPG [17]	44,26*/8,34	4,57*/1,02	10,33
	TP [12]	8,12*/2,60	1,14*/0,29	14,04
Wyrobisko „Szczakowa”	PG [21]	76,75/6,15	5,39/0,73	7,03
	P [23]	80,93/7,36	5,17/1,04	6,39

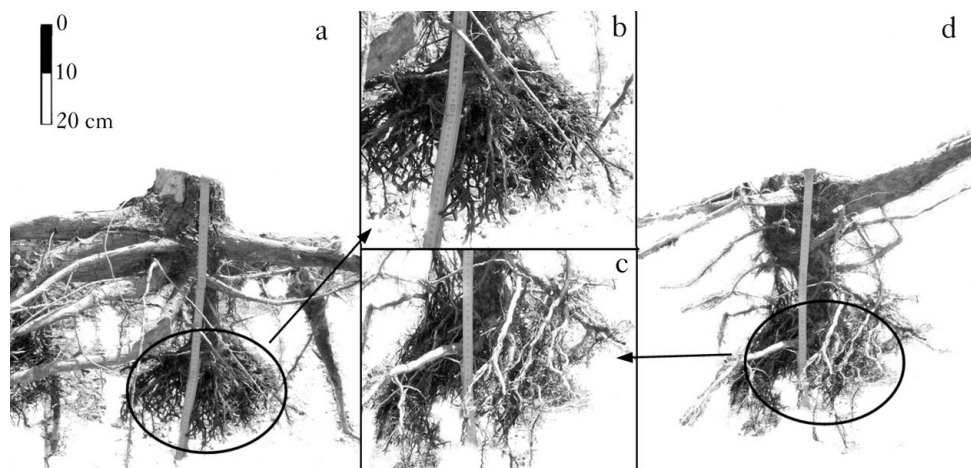
K/B – udział procentowy biomasy korzeni w stosunku do biomasy nadziemnej drzewostanów; * różnice istotne z $p<0,05$

K/B – root biomass to aboveground tree stand biomass ratio; * differences significant at $p<0,05$

padku badanych obiektów pogórnicych oszacowana wielkość biomasy korzeni była znacznie niższa niż podawana dla drzewostanów sosnowych w II klasie wieku, rosnących w warunkach naturalnych niżu polskiego (Bory Lubuskie), gdzie wynosiła od około 31,44 do 39,82 t/ha [Bijak, Zasada 2007]. Helmisaari i in. [2002] podawali, że w warunkach Finlandii biomasa systemów korzeniowych 15-letnich drzewostanów sosnowych wynosiła 37,9 t/ha.

Wielkość biomasy korzeni drzew w naturalnych ekosystemach leśnych szacowana jest najczęściej na 20% w stosunku do nadziemnej biomasy drewna [Lieth, Whittaker 1975; Miller i in. 2006], jakkolwiek wielkość ta może być zmienna w zależności od gatunku drzewa i warunków siedliskowych. W intensywnie zagospodarowanych plantacjach sosnowych (*Pinus taeda* L.) biomasa korzeni grubych stanowić może od 19% do 24% biomasy całego drzewa [Miller i in. 2006]. Guź [1996 za Jaworskim 2004] wykazał, że stosunek masy korzeni sosny do całego drzewa może wynosić od 16,0 do 18,3% w drzewostanach 20-letnich i 15,6 do 17,9% w 30-letnich. Helmisaari i in. [2002] określili udział biomasy systemów korzeniowych drzewostanów sosnowych w wieku 15 lat w warunkach wschodniej Finlandii na około 25%. Z wiekiem udział ten zwykle maleje do kilkunastu procent. W przypadku badanych drzewostanów wzrastających w warunkach zrekultywowanego wyrobiska i zwałowiska, biomasa korzeni drzew stanowiła stosunkowo mały udział, w porównaniu do oszacowanej biomasy nadziemnej. Na wyrobisku po eksploatacji piasków podsadzkowych „Szcakowa” biomasa korzeni stanowiła od 6,4 do 7,0%, a na zwałowisku „Bełchatów” od 10 do 14% w stosunku do biomasy nadziemnej drzew (obliczono na podstawie tabeli 2 i danych dotyczących biomasy nadziemnej zawartych w opracowaniu Pietrzykowskiego i Sochy [2010]).

Przebadane systemy korzeniowe wykazywały przekształcenia i deformacje w stosunku do typowych palowych korzeni sosny (ryc. 1). Drzewa leśne wykształcają trzy główne typy systemów korzeniowych: palowy (głęboki), płaski (talerzowy) i sercowy (ukośny), które mogą ulegać deformacjom pod wpływem czynników działających zarówno w glebie, jak i poza nią (np. czynników klimatycznych). Stąd ten sam gatunek drzewa może wykształcać różne przekształcenia typów systemów korzeniowych. Palowy system korzeniowy, który wytwarza sosna w typowych dla siebie warunkach siedliskowych, charakteryzuje się obecnością silnego korzenia dominującego przebiegającego mniej lub bardziej pionowo w głąb profilu glebowego [Jaworski 2004]. Korzeń drzewa może ulegać znacznym modyfikacjom w wyniku dostosowania do różnych warunków glebowych. Czynniki glebowo-siedliskowymi wpływającymi na te przekształcenia są zmiany strefowe uwilgotnienia, zwięzłość, właściwości powietrzno-wodne, przepuszczalności gleb, oglejenie i występowanie warunków beztlenowych lub występowanie rudawca. Systemy korzeniowe ulegają również przekształceniu i spłaszczeniu w warunkach płytkiego profilu glebowego lub płytko występującej wody gruntowej [Obmiński 1970]. Dlatego sosna, która w warunkach głębokich piaszczysto-gliniastych gleb wytwarza typowy system palowy, na glebach bagiennych może wykształcać płytki, talerzowy system korzeniowy [Jaworski 2004]. Występowanie wody gruntowej już na głębokości od 1,0 do 1,5 m utrudnia sośnie wykształcenie korzenia palowego i wtedy może on ulegać przekształceniu na rozległy i powierzchniowy system korzeniowy [Obmiński 1970]. Ten typ przekształceń uwidocznił się w przypadku systemów korzeniowych sosny wzrastającej na wyrobisku popiaskowym z wodami gruntowymi na głębokości około 0,8 m (ryc. 1a, b). W tych warunkach siedliskowych zaobserwowano zanik wyraźnego głównego korzenia palowego, a korzenie boczne wykazywały zwiększoną grubość. Często uwidaczniały się również deskowate zgrubienia korzeni bocznych, przy zaniku głównego korzenia palowego, które w takich warunkach, jak się przypuszcza [Köstler i in. 1968 za Jaworskim 2004], mają związek z zachowaniem statyki drzewa. Na odpowiednich dla siebie siedliskach naturalnych, na



Ryc. 1.

Systemy korzeniowe sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) rosnącej w warunkach obiektów pogórnictwa (fot. M. Pietrzykowski, opracowanie graficzne C. Bania)

Root systems of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growing in post-mining conditions (photo M. Pietrzykowski, graphical design C. Bania)

a – korzeń 23-letniej sosny rosnącej na czwartorzędowych piaskach na wyrobisku kopalni piasku „Szczakowa” (wariant PG); b – przekształcenie systemu palowego i gęste ukorzenie w strefie saturacji (zbliżenie); c – korzeń 17-letniej sosny rosnącej na czwartorzędowych piaskach gliniastych i glinach na zwałowisku kopalni węgla brunatnego „Bełchatów” (wariant CzPG); d – widoczna deformacja systemu palowego (zbliżenie)

a – root system of a 23 year-old pine growing on Quaternary sands in the "Szczakowa" sand mine pit (site variant PG); b – deformation of the tap root and dense rooting in the saturation zone (zoom); c – root system of a 17 year-old pine growing on Quaternary loamy sands and loams on the Bełchatów lignite mine dumping ground (site variant CzPG); d – deformation of the tap root (zoom)

których gleba umożliwia wykształcenie się silnego palowego korzenia, sosna odznacza się dużą odpornością na wiatry wywalające [Obmiński 1970]. Poza wspomnianymi spłaszczeniami systemów korzeniowych sosny rosnącej na wyrobisku popiaskowym, zaobserwowano charakterystyczne przekształcenia w postaci pęczków korzeni drobnych w strefie saturacji, tj. strefie ruchów lustra wód i nasycenia przestworów kapilarnych wodą gruntową (ryc. 1b). Jest to zjawisko charakterystyczne w glebach, w których występuje zmienność strefowa zarówno pod względem żyzności, jak i wilgotności [Jaworski 2004]. Zaobserwowane przekształcenia systemów korzeniowych sosen wzrastających na piaskach spągu wyrobiska są typowym przykładem dostosowania do wzrostu na glebach piaszczystych z płytko zalegającymi wodami gruntowymi.

Z kolei na zwałowisku KWB „Bełchatów” sosny wykazywały wyraźne deformacje systemów korzeniowych (ryc. 1c, d). Na glebach charakteryzujących się dużą zwięzłością rozwój systemu korzeniowego jest ograniczony przede wszystkim w kierunku pionowym. W warunkach naturalnych sosna wzrastająca na glebach ciężkich i zwięzłych wytworzonych z ilów lub glin rzadko wykształca wyraźny palowy korzeń główny [Jaworski 2004]. Gleby pogórnictwa powstające na terenach zwałowisk nawet przy stosunkowo wysokiej zasobności, wykazują często wadliwe stosunki powietrzno-wodne oraz nadmiernie zbity układ [Pietrzykowski 2008]. Na wierzchołku zwałowiska bełchatowskiego, w części zbudowanej z potencjalnie żyznych utworów piaszczysto gliniastych i gliniastych (wariant CzGP), stwierdzano silnie zbity układ w profilu gleb na głębokości około 50 cm [Pietrzykowski 2010]. Główny system palowy ulegał w tych warunkach skręceniu w strefie silnego zbitcia gleby, a korzenie boczne wykazywały zwiększoną grubość. Według przyjętego w metodyce podziału prawie 40% z przebadanych systemów korzeniowych na zwałowisku „Bełchatów” wykazywało 3 stopień deformacji. Były to korzenie

wyraźnie spłaszczone, ze skręconym głównym korzeniem palowym (ryc. 1c, d) w strefie gleby o układzie silnie zbitym (na głębokości około 50 cm). Przy tym korzenie boczne wykazywały zgrubienia. W tych warunkach przejmować one będą funkcję utrzymywania statyki drzewa w warunkach spłyconego w wyniku wadliwych właściwości fizycznych profilu glebowego. Tylko niecałe 15% korzeni wykazywało normalnie wykształcony, typowy dla sosny w tej fazie rozwojowej, palowy system korzeniowy. Taki system sosna wytwarzała na glebach mniej zwięzłych rozmieszczonych mozaikowato na zwałowisku. Duża zmienność właściwości fizycznych i chemicznych gleb jest zjawiskiem często spotykanym na obiektach pogórnicznych. Można przypuszczać, że drzewostany sosnowe wzrastające na fragmentach zbudowanych z bardziej zwięzłych utworów, nawet przy stosunkowo dużej ich zasobności w składniki pokarmowe, mogą przy wadliwych właściwościach powietrzno-wodnych gleb wykazywać gorsze odżywienie i mniejszą stabilność spowodowaną deformacjami systemów korzeniowych.

Wnioski

- ✦ Większość przebadanych systemów korzeniowych sosen wzrastających na wierzchowinie zwałowiska KWB „Bełchatów” wykazywała wyraźne deformacje korzenia palowego spowodowane występującym strefowo silnie zbitym układem gleb pogórnicznych. Wynik ten potwierdza doniesienia z innych zrekultywowanych dla leśnictwa terenów zwałowisk pogórnicznych. Technologia budowania zwałowisk z użyciem ciężkich maszyn wpływa na znaczne zagęszczenie utworów, w wyniku czego powstające gleby wykazują wadliwe właściwości fizyczne (zbity układ, złe stosunki powietrzno-wodne), niesprzyjające swobodnemu rozwojowi systemów korzeniowych.
- ✦ Badane drzewostany sosnowe, wzrastające na zrekultywowanym wyrobisku popiaskowym oraz na wierzchowinie zwałowiska zewnętrznego kopalni węgla brunatnego, charakteryzowały się małą biomasa korzeni w stosunku do biomasy nadziemnej. Fakt ten oraz stwierdzone deformacje korzeni drzew na wierzchowinie zwałowiska KWB „Bełchatów” mogą mieć znaczenie w aspekcie stabilności i żywienia drzewostanów w kolejnych fazach rozwojowych.
- ✦ Systemy korzeniowe sosen wzrastających w warunkach wyrobiska popiaskowego „Szczakowa” na inicjalnych glebach piaszczystych z płytko zalegającymi wodami gruntowymi, wykazywały modyfikacje i przystosowania, podobne do przystosowań korzeni do wzrostu na siedliskach naturalnych z wysokim poziomem wód gruntowych. Polegały one na zaniku głównego systemu palowego i zwiększonym udziale drobnych korzeni w postaci pęczków w strefie zasięgu lustra wód gruntowych. Ponadto silniej rozwinięte były korzenie boczne stanowiące główną podporę dla stabilizacji drzewa. Wyraźnie wykształcone na poziomie lustra wód gruntowych strefy pęczków korzeni drobnych w profilu glebowym wskazują również na ustabilizowanie stosunków wodnych na badanych fragmentach wyrobiska. To pozytywny symptom rozwoju siedlisk na wyrobisku popiaskowym, zważywszy na to, że częstym problemem na tych obiektach w przeszłości były silne wahania lustra wód gruntowych, powodujące zamieranie całych drzewostanów.

Podziękowania

Prace terenowe: Łukasz Piechnik, Bartosz Kurzeja i Anna Urbańska (UR Kraków) oraz Marek Łach (Nadleśnictwo Chrzanów). Opracowanie graficzne rycin systemów korzeniowych Cyprian Bania.

Literatura

Baumann K., Rumpel A., Schneider B. U., Marschner P., Hüttl R. F. 2006. Seedling biomass and element content of *Pinus sylvestris* and *Pinus nigra* grown in sandy substrates with lignite. *Geoderma* 136: 573–578.

- Biały K., Brożek S., Chojnicki J., Czępińska-Kamińska D., Januszek K., Kowalkowski A., Krzyżanowski A., Okołowicz M., Sienkiewicz A., Skiba S., Wójcik J., Zielony R. 2000. Klasyfikacja gleb leśnych Polski. Centrum Informacyjne Lasów, Warszawa.
- Bijak Sz., Zasada M. 2007. Oszacowanie biomasy korzeni w drzewostanach sosnowych Borów Lubuskich. Sylwan 151 (12): 21-29.
- Fabijanowski J., Zarzycki K. 1969. Spontane Vegetation als Grundlage für die Haldenaufforstung in Piaseczno bei Tarnobrzeg (Südtpolen). Beihefte zur Zeitschrift des schweizerischen Forstwesens 46: 271-280.
- Harabin Z. 1971. Analiza systemów korzeniowych wybranych gatunków drzew kątem ich przydatności dla biologicznej obudowy zboczy zwalów kopalnictwa węgla kamiennego. Praca doktorska, Wydział Leśny AR, Kraków.
- Heinsdorf D. 1996. Development of forest stands in the Lusatian Lignite Mining District after mineral fertilization adapted to site and tree species. Water, Air, Soil Poll. 91: 33-42.
- Helmisaari H.-S., Makkonen K., Kellomaki S., Valtonen E., Malkonen E. 2002. Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. For. Ecol. and Manage. 165: 317-326.
- Jaworski A. 2004. Podstawy przyrostowe i ekologiczne odnawiania i pielęgnacji drzewostanów. PWRiL, Warszawa.
- Konopka B., Tsukahara H., Netsu A. 2000. Biomass Distribution in 40-year-old Trees of Japanese Black Pine. J. For. Res. 5: 163-168.
- Krzaklewski W. 1977. Roślinność spontaniczna jako wskaźnik warunków siedliskowych oraz podstawa do zalesienia skarp zwalówisk na przykładzie Kopalni Węgla Brunatnego „Adamów”. Praca doktorska, Wydział Leśny AR, Kraków.
- Lieth H., Whittaker R. H. 1975. Primary productivity of the biosphere. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Miller A. T., Allen H. L., Maier Ch. A. 2006. Quantifying the coarse-root biomass of intensively managed loblolly pine plantations. Can. J. For. Res. 36: 12-22.
- Nielsen C. C. N., Hansen J. K. 2006. Root CSA-root biomass prediction models in six tree species and improvement of models by inclusion of root architectural parameters. Plant and Soil 280: 339-356.
- Nörr R. 2003. Wurzeldeformationen - ein Risiko für die Bestandesstabilität? Entstehung, Entwicklung und Auswirkungen von Wurzeldeformationen. Forstl. Forschungsber. München 195: 179-196.
- Obmiński Z. 1970. Zarys ekologii. W: Sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* L. Nasze drzewa leśne. Monografie popularnonaukowe t. I. Zakład Dendrologii i Arboretum Kurmickie PAN, PWN, Warszawa-Poznań.
- Orzeł S., Socha J., Forgiel M., Ochał W. 2005. Biomasa i roczna produkcja drzewostanów mieszanych Puszczy Niepołomickiej. Act. Sci. Pol. Silv. Colendar. Rat. Ind. Lignar. 4(2): 63-79.
- Pietrzykowski M. 2006. Właściwości gleb powstających na rekułtywowanych i pozostawionych sukcesji terenach wyrobiska po eksploatacji piasków podszkrywowych. Roczn. Glebozn. 57 (3/4): 97-105.
- Pietrzykowski M. 2008. Macronutrient accumulation and relationships in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) ecosystem on reclaimed open-cast lignite mine spoil heaps in central Poland. Proc. of 25th Annual Meeting of ASMR and IALR, "New Opportunities to Apply Our Science", Richmond, Virginia, USA, June 14 to 19, 2008, 856 - 877.
- Pietrzykowski M. 2010. Charakterystyka gleb. W: Pietrzykowski M. [red.]. Analiza i optymalizacja metod klasyfikacji siedlisk i kryteriów oceny rekułtywacji leśnej na wybranych terenach pogórnicych w Polsce. Monografia naukowa. Wydawnictwo UR Kraków (w druku).
- Pietrzykowski M., Socha J. 2010. Biomasa fitocenoz. W: Pietrzykowski M. [red.]. Analiza i optymalizacja metod klasyfikacji siedlisk i kryteriów oceny rekułtywacji leśnej na wybranych terenach pogórnicych w Polsce. Monografia naukowa. Wydawnictwo UR Kraków (w druku).
- Puchalski T., Prusinkiewicz Z. 1975. Ekologiczne podstawy siedliskoznawstwa leśnego. PWRiL, Warszawa.
- 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. Nort. J. of App. For. 19 (3): 106-114.
- 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.
- Vogt K. A., Vogt D. J., Bloomfield J. 1998. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. Plant and Soil 200: 71-89.
- Waisel Y., Eshel A., Kafkafi U. 1991. Plant Roots. The Hidden Half. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Wardle D. A., Bardgett R. D., Klironomos J. N., Setälä H., Van der Putten W. H., Wall D. H. 2004. Ecological Linkages between aboveground and underground biota. Science 304: 1629-1633.
- Waring R. H., Schlesinger W. H. 1985. Forest Ecosystem - concepts and management. Academic Press, San Diego-New York-Boston-London-Sydney-Tokyo-Toronto.

SUMMARY

Biomass and deformation of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) root systems in reclaimed open-cast mining pit and dumping ground conditions

Assessment of the root system of the trees planted on rehabilitated post-mining land is essential from the point of view of their adaptation to the new site conditions. The paper analyses biomass and deformation of the root systems of Scots pines growing on a lignite dumping ground and in a sand mine pit in four site variants varying in substrate and groundwater depth.

In the framework of research 50 root systems were excavated, weighed and photographed. Trees were measured on sample plots and empirical equations to estimate root biomass were developed. Pines growing on the fertile but excessively compacted rock soil of the dumping ground showed strong deformation of tap roots. The roots of the pines growing in the mine pit showed their adaptation to the shallow groundwater table. In general, root biomass was too small in relation to aboveground biomass, which may indicate a risk to the nutrition, and stability of the established stands in the future.