



## **Wpływ systemu korzeniowego topoli czarnej i robinii akacjowej na wytrzymałość na ścinanie gruntów**

*Tymoteusz Zydroń, Bartłomiej Bienias, Andrzej T. Gruchot*  
*Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kollątaja, Kraków*

### **1. Wprowadzenie**

Zdolność systemów korzeniowych roślin do przenoszenia naprężeń rozciągających jest powszechnie znana i w praktyce wykorzystywana w zabiegach bioinżynierskich do wzmacniania skarp. Podstawowym parametrem opisującym interakcję systemów korzeniowych roślin z gruntem jest najczęściej tzw. spójność pozorna, która może być określana bezpośrednio z badań (Docker & Hubble 2008, Mickowski & van Beek 2009, Rai & Shrivastva 2012) lub obliczana z wykorzystaniem modeli teoretycznych (Pollen & Simon 2005, Mao i in. 2012). W zagadnieniach praktycznych określenie spójności pozornej sprowadza się najczęściej do określenia ilości i wielkości korzeni oraz ich wytrzymałości na rozciąganie. Wyniki badań wykazują, że parametr ten charakteryzuje się dużą zmiennością, która wynika z czynników gatunkowych czy też siedliskowych. Dlatego jak podkreślają niektórzy naukowcy (Bischetti i in. 2007, Mickowski & van Beek 2009) w dalszym ciągu istnieje potrzeba prowadzenie tego typu badań. W większości przypadków są to badania spójności pozornej roślin w starszym wieku, natomiast w mniejszym stopniu analizuje się wpływ drzew w młodym wieku na wytrzymałość ośrodka gruntowego. Zagadnienie to wydaje się mieć istotne znaczenie z punktu widzenia stosowania zabiegów zabezpieczających skarpy wykopów. Jest to istotne z punktu widzenia ekologii jak i ochrony środowiska, gdzie zastosowanie roślinności na skarpach nasypów i wykopów inżynierskich

oraz zboczy naturalnych może stanowić alternatywę dla tradycyjnie stosowanych konstrukcji inżynierskich, jak również wpływa pozytywnie na środowisko przyrodnicze.

## 2. Cel i metodyka pracy

Celem pracy było określenie wartości spójności pozornej gruntów związanej z obecnością w profilu systemów korzeniowych topoli czarnej (*Populus nigra*) oraz robinii akacjowej (*Robinia pseudoacacia* L.). Rośliny te zostały zasadzone 2009 roku na poletku doświadczalnym Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, a ich badania przeprowadzone po 5 latach od zasadzenia. W ramach prac badawczych przeprowadzone zostały pomiary powierzchni względnej korzeni, wykonano badania wytrzymałości na rozciąganie korzeni, określono podstawowe właściwości fizyczne i mechaniczne gruntów występujących w pobliżu roślin, a w dalszej części pracy przeprowadzono obliczenia spójności pozornej oraz przeprowadzono obliczenia stateczności celem wykazania pozytywnego wpływu korzeni badanych gatunków drzew na stateczność skarp.

### 2.1. Badania terenowe

Określenie powierzchni względnej korzeni ( $Ar/A$ ) wykonano metodą profilowania ścian wykopu (vertical trench profile wall method) (Böhm 1979) dla 6 drzew z każdego gatunku. W tym celu w odległości około 0,75 m od drzewa wykonano wkopy badawcze o głębokości 0,8 i szerokości 1,0 m. Po oczyszczeniu powierzchni ściany wykopu wykonano pomiary średnic korzeni w rozstawie pionowej 0,1 m. W analizie pominięto korzenie o średnicach mniejszych od 1 mm zakładając, że powodują one przeszacowanie wytrzymałości gruntu na ścinanie (Adhikari i in. 2013). W ramach badań wykonano również oznaczenie gęstości objętościowej gruntów metodą pierścienia tnącego, określono ich wilgotności oraz pobrano próbki do badań laboratoryjnych. Wilgotność gruntów oznaczono zarówno jako wilgotność wagową (metoda suszarkowo-wagowa), jak i wilgotność objętościową, która została określona bezpośrednio w terenie sondą TDR (technika reflektrometrii domenowoczesowej). W ramach analizy wyników badań przeprowadzona została analiza statystyczna istotności różnic pomiędzy gęstością systemu korzeniowego obydwu gatunków drzew z wykorzystaniem programu Statisti-

ca. Analizie poddano normalność rozkładu gęstości względnej systemu korzeniowego testami W Shapiro-Wilka oraz Kołgomorowa-Smirnova, a po stwierdzeniu braku normalności rozkładów zastosowano test U Manna-Withneya. Wykonano również analizę statystyczną testem Kruskala-Wallisa celem określenia zróżnicowania powierzchni względnej systemu korzeniowego pomiędzy poszczególnymi drzewami danego gatunku.

Badania terenowe obejmowały również określanie oporu penetracji gruntu do głębokości 0,8 m w 5 powtórzeń za pomocą penetrometru stożkowego firmy Eijkelkamp. Szczegółowe zasady badań tym urządzeniem opisane są w pracy Kiełbasy (2011). Pole powierzchni stożka wynosiło  $1 \text{ cm}^2$ , jego kąt rozwarcia  $30^\circ$ , a prędkość wciskania stożka  $2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , a więc analogicznie jak stosowali w swoich badaniach Osman i Barakbah (2006, 2011). Badania wykonano w czterech punktach badawczych, dwa zlokalizowano w odległości co najmniej 1,0 m od najbliższego drzewa, a kolejne dwa znajdowały się możliwie jak najbliżej pni drzew (około 0,3 m). Uzyskane wyniki oporów penetracji porównywano osobno dla każdego gatunku drzew sprawdzając zgodność rozkładu danych z rozkładem normalnym, a przy braku tej zgodności zastosowano test U Manna-Withneya na poziomie istotności 0,01.

## 2.2. Badania laboratoryjne

Zakres badań obejmował oznaczenie składu granulometrycznego gruntów, strat prażenia, maksymalnej i minimalnej gęstości objętościowej szkieletu oraz wytrzymałości na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania. Zasadnicze badania obejmujące określenie wytrzymałości na rozciąganie korzeni obydwu gatunków drzew przeprowadzono w zrywarce Hounsfield H50KS. Pobrane próbki korzeni wyczyszczono i przed badaniem na około 24 godziny zanurzone w wodzie, a przed samym badaniem starannie wycierano. Całkowita długość próbek korzeni wynosiła około 20–25 cm, przy czym rozciąganiu poddawano korzeń o długości 10 cm z prędkością  $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  do chwili jego zerwania lub wysunięcia ze szczęk urządzenia. Następnie mierzono średnicą korzenia w miejscu zerwania notując sposób zniszczenia próbki. Uzyskane wartości siły zrywającej przeliczono na wytrzymałość na rozciąganie zakładając, że przekrój korzeni jest kołowy.

Opracowanie zależności „siła zrywająca – średnica korzenia” oraz „wytrzymałość na rozciąganie – średnica korzenia” przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów w programie Microsoft Excel. Z kolei dla określenia istotności różnic wytrzymałości na rozciąganie pomiędzy badanymi gatunkami drzew zastosowano analizę kowariancji (ANCOVA) w programie Statistica, w której zmienną towarzyszącą stanowiła średnica korzeni. Przed przystąpieniem do analizy dane zostały zlogarytmizowane celem uzyskania liniowej zależności pomiędzy siłą zrywającą a średnicą korzeni, a normalność rozkładu danych została zweryfikowana testem  $\chi^2$ .

### 2.3. Obliczenia spójności pozornej oraz stateczności

Na podstawie wyników badań powierzchni względnej korzeni oraz ich wytrzymałości na rozciąganie określono spójność pozorną, związaną z przenoszeniem naprężeń rozciągających w gruncie przez systemy korzeniowe. Do jej obliczeń zastosowano klasyczny model Wu-Waldrona (Waldrona 1977, Wu i in. 1979):

$$c_R = k' \cdot \sum_{i=1}^N T_{Ri} \cdot \left( \frac{A_{ri}}{A} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$k'$  – współczynnik orientacji korzeni, przyjmowany zazwyczaj z przedziału 1,0-1,3, w obliczeniach przyjęto  $k'=1,2$ ,

$T_{Ri}$  – wytrzymałość korzeni na rozciąganie,

$A_{ri}$  – względna powierzchnia korzeni w gruncie,

$A$  – pole powierzchni rozpatrywanego przekroju.

W modelu tym zakłada się, że korzenie są zorientowane prostopadle względem płaszczyzny poślizgu, a w trakcie ścięcia gruntu następuje pełna mobilizacja naprężeń rozciągających w całym systemie korzeniowym. Jednak jak wykazują wyniki badań m.in. Pollen and Simon (2005) i Docker and Hubble (2008) drugie z założeń modelu Wu-Waldrona (WWM) nie opisuje w pełni reakcji systemu korzeniowego na przyrost naprężeń w gruncie.

Drugim teoretycznym modelem opisu interakcji grunt-korzenie jest model wiązkowy (Fiber Bundle Model – FBM), który po raz pierwszy zaproponowali Pollen i Simon (2005). W modelu tym zakłada się, że

przekazywanie naprężeń rozciągających na system korzeniowy ma charakter progresywny. W początkowej fazie system korzeniowy przejmuje naprężenia rozciągające równomiernie. Gdy naprężenia te wzrastają i osiągają wartości wytrzymałości na rozciąganie najsłabszego korzenia następuje jego zniszczenie, a siła rozciągająca przekazywana jest na pozostałe korzenie powodując równocześnie wzrost naprężeń rozciągających działających na pozostałe, nieuszkodzone korzenie.

Spójność pozorna gruntu zbrojonego korzeniami drzew w modelu wiązkowym może być opisana za pomocą następującej formuły (Mao i in. 2012):

$$c_R = k' \cdot \max \left( T_{Rj} \cdot \frac{A_{Rj}}{A} \cdot j \right) \quad (2)$$

gdzie:

$T_{Rj}$  – wytrzymałość na rozciąganie najsłabszego korzenia,

$A_{Rj}$  – powierzchnia korzeni w gruncie,

$j$  – ilość korzeni w systemie nie zerwanych,

$k'$  – jak w równaniu (1).

Jako kryterium kolejności zniszczenia korzeni został przyjęty iloczyn ich wytrzymałości na rozciąganie i kwadratu średnicy. Zgodnie z tym kryterium korzeń  $x$  ulegnie zerwaniu wcześniej niż korzeń  $y$ , jeśli zostanie spełniony warunek:

$$T_{rx} \cdot d_x^2 < T_{ry} \cdot d_y^2 \quad (3)$$

gdzie:

$T_{rx}, T_{ry}$  – wytrzymałość na rozciąganie odpowiednio korzenia  $x$  i  $y$ ,

$d_x, d_y$  – średnica odpowiednio korzenia  $x$  i  $y$ .

Pośrednią metodą określenia spójności pozornej gruntu jest propozycja Preti (2006), która stanowi modyfikację modelu Wu-Waldrona:

$$c_R = k' \cdot k'' \cdot \sum_{i=1}^N T_{Ri} \cdot \left( \frac{A_{ri}}{A} \right) \quad (4)$$

gdzie:

$k''$  – empiryczny współczynnik korekcyjny,

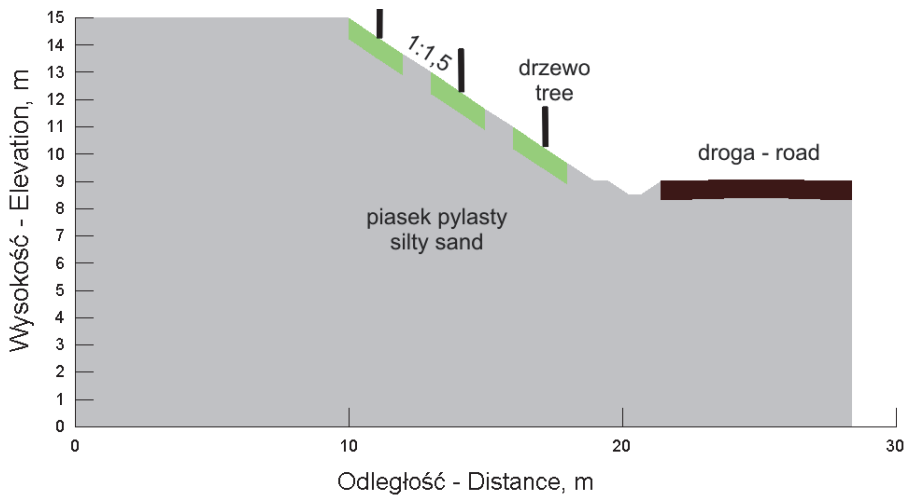
$k', T_{ri}, A_{ri}, A$  – jak w równaniu (1).

Współczynnik  $k''$  redukuje przeszacowanie wartości spójności pozornej otrzymywanej z modelu Wu-Waldrona i według Preti może być przyjmowany jako 0,4.

Dla potrzeb pracy przyjęto, że wartość współczynnika  $k''$  oznacza stosunek spójności pozornej obliczonej modelem wiążkowej do wyniku uzyskanego z modelu Wu-Waldrona.

W dalszej części pracy przedstawiono wpływ efektu zbrojenia obydwoma gatunkami drzew na wzmocnienie skarpy wykopu drogowego. W tym celu przeprowadzono obliczenia stateczności modelowej skarpy stosując analizę probabilistyczną, która uwzględni zmienność właściwości geotechnicznych gruntu oraz systemu korzeniowego. W analizie wartości współczynnika bezpieczeństwa obliczono metodą Bishopa. Przyjęto, że wysokość skarpy wykopu drogowego wynosi 6 m, a jej nachylenie 1:1,5. Założono, że w przekroju poprzecznym przez skarpe występują trzy drzewa, a zasięg ich korzeni powierzchni jest analogiczny jak określono z badań terenowych. Schemat obliczeniowy skarpy przedstawiono na rysunku 1.

Przyjęto dwa możliwe przypadki utraty stateczności skarpy. W pierwszym przyjęto, że osuwisko występuje na całej jej długości, a w drugim przypadku obejmuje tylko dolną jej część.



**Rys. 1.** Schemat obliczeniowy skarpy

**Fig. 1.** Scheme of slope

Na podstawie obliczeń uzyskano rozkład wartości współczynnika bezpieczeństwa i wyliczono jego średnią oraz określano wskaźnik bezpieczeństwa:

$$\beta = \frac{\mu - 1,0}{\sigma} \quad (5)$$

oraz prawdopodobieństwo utraty stateczności skarpy:

$$p_f = P[FS \leq 1,0] = \int_{-\infty}^1 f(FS) dFS \quad (6)$$

gdzie:

$\mu$  – średnia wartość współczynnika bezpieczeństwa,

$\sigma$  – odchylenie standardowe współczynnika bezpieczeństwa,

FS – współczynnik stateczności.

Przy interpretacji wyników badań posłużono się wytycznymi Korpusu Inżynierów Armii Amerykańskiej (U.S. Army Corps of Engineers 1999). Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem programu SLOPE/W (GEOSLOPE 2010).

### 3. Ogólna charakterystyka badanych gatunków roślin

**Topola czarna** (*Populus nigra* L.) należy do drzew dorastającej do wysokości 30-50 m i nawet 2 m pierśnicy. Gatunek ten charakteryzuje się silnie rozwiniętym systemem korzeniowym, który jest częściowo powierzchniowy, a częściowo głęboko. W przypadku zasypania piaskiem topola ta wytwarza na pniu korzenie przybyszowe. Topola czarna charakteryzuje się szybkim przyrostem (Tomanek 1997), ma duże wymagania w stosunku do wilgotności gleby, a najlepsze warunki rozwoju znajduje na żyznych glebach typu mady. Gatunek ten jest silnie światłoządny od początku stadium rozwoju (Jaworski 1995).

**Robinia akacjowa** (*Robina pseudacacia* L.) jest gatunkiem pochodzącym z Ameryki Północnej. W Polsce uprawiana jest w parkach, ogrodach, rzadziej hodowana w lasach. Roślina ta, ze względu na małe wymagania glebowe, jest gatunkiem pionierskim wpływając użyźniająco na glebę i może być stosowana do zalesiania terenów piaszczystych, rekultywacji terenów zdegradowanych czy też utrwalania stromych zboczy (Tomanek 1997, Stachowski 2006). System korzeniowy robinii jest do-

brze rozwinęty. Początkowo występuje korzeń palowy, który w późniejszym okresie ustępuje licznym korzeniom bocznym, silnie rozgałęzionym w gruncie. Roślina ta daje silne i trwałe odrośla zarówno z pnia, jak i korzeni, co powoduje, że jest ona silnie ekspansywna i wypiera gatunki drzew rodzimych, a tym samym jest uważana za gatunek niepożądany (Kujawa 2012). Z drugiej strony może ona pełnić funkcję ochrony przeciwozroyjnej (Tomanek 1997, Węgorek i Kraszkiewicz 2005).

Należy również wspomnieć, że na obydwu gatunkach drzew były prowadzone prace badawcze pod kątem możliwości ich zastosowania do celów energetycznych (Juliszewski i in. 2012), które stanowią alternatywę do powszechnie stosowanej w tym celu wierzby energetycznej (Styszko i in. 2008, 2011, Fijałkowska & Styszko 2011).

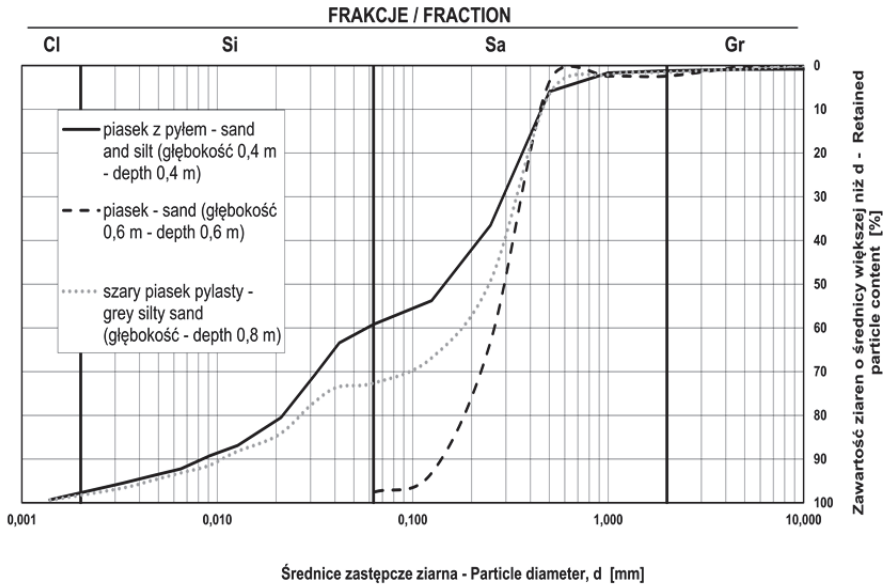
## **4. Wyniki badań**

### **4.1. Charakterystyka geotechniczna siedliska drzew**

Badane gatunki drzew zasadzone zostały na terenie w dużym stopniu przekształconym przez człowieka. Podłoże stanowią grunty antropogeniczne piaszczyste i piaszczysto-pylaste z dużą zawartością odpadów budowlanych w postaci gruzu, cegieł, drewna oraz tworzyw sztucznych, których znaczną obecność stwierdzono zwłaszcza w miejscach nasadzeń robinii akacjowej. Do głębokości ok. 0,6-0,7 m ppt występują utwory piaszczyste ze zróżnicowaną zawartością pyłu barwy żółtej, szaro-żółtej lub czarno-żółtej, natomiast poniżej tej warstwy występują grunty piaszczysto-pylaste barwy szarej o dużym zagęszczeniu ( $I_D = 0,77$ ) i wyraźnie większej wilgotności. W warstwie tej stwierdzono obecność licznych łodyg skrzypu, co może świadczyć, że warstwa ta w przeszłości stanowiła naturalne podłoże. Na rysunku 2 przedstawiono krzywe granulometryczne gruntów pobranych z różnych głębokości. Badania zagęszczalności przeprowadzone metodą widełkową, polegającą na wibracyjnym zagęszczeniu gruntów (PN-88/B-04481), wykazały, że charakteryzują się one maksymalnymi i minimalnymi wartościami gęstości objętościowej szkieletu w zakresach odpowiednio 1,79-1,94 oraz 1,26-1,55 g cm<sup>-3</sup>. Mniejsze wartości obu parametrów uzyskano dla piasku pylastego. Z kolei badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzone dla próbek gruntów nawodnionych przy prędkości ścinania 0,1 mm min<sup>-1</sup> wykazały, że wartości kąta tarcia wewnętrznego badanych gruntów



mieszczą się w zakresie  $28,5-29,4^\circ$ , a spójności –  $6,6-10,0$  kPa. Otrzymane wartości spójności są wyraźnie większe od podawanych w literaturze dla tego typu gruntów (Wiłun 2000) i są prawdopodobnie spowodowane były wysokim zagęszczeniem gruntów ( $I_D = 0,45-0,77$ ), a częściowo były efektu klinowania się ziaren.



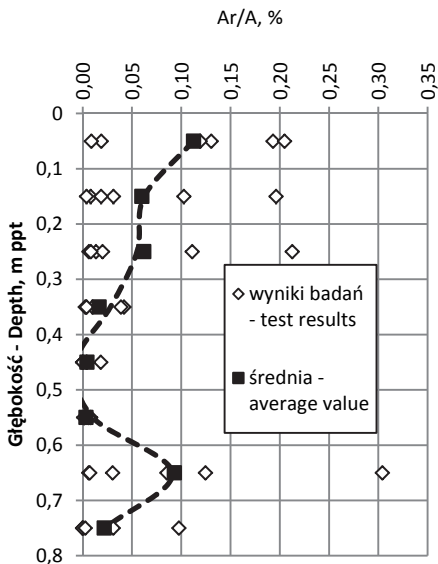
**Rys. 2.** Krzywe uziarnienia gruntów na badanych terenie  
**Fig. 2.** Grain-size distribution of soils from tested area

#### 4.2. Powierzchnia względna korzeni (Ar/A)

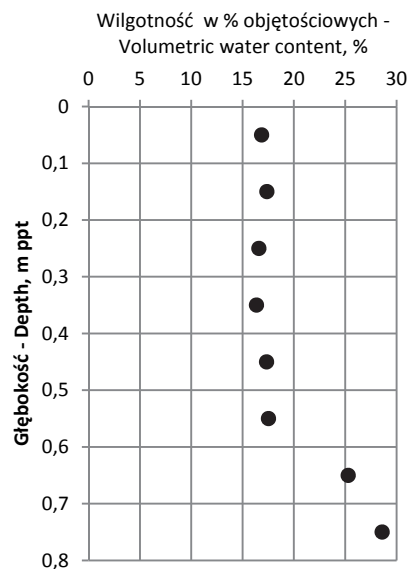
Ogólnie stwierdzono, że badane drzewa charakteryzują się dużym zróżnicowaniem powierzchni względnej systemu korzeniowego, co było zwłaszcza widoczne w przypadku topoli czarnej. System korzeniowy topoli był bardziej rozwinięty i charakteryzował się obecnością pojedynczych, grubszych, poziomo rozchodzących się (silnie rozgałęzionych) korzeni. Wartości średniej powierzchni względnej korzeni (Ar/A) w całym profilu wyniosły  $0,045\%$  (rys. 3a) w przypadku topoli czarnej i  $0,03\%$  (rys. 4a) dla robinii akacjowej, przy czym analiza statystyczna wykonana przy poziomie istotności  $0,01$  nie potwierdziła istotności różnic tego parametru pomiędzy obydwooma gatunkami drzew, natomiast

różnice takie stwierdzono porównując korzeni poszczególnych drzew w obrębie gatunków. Ogólnie wyróżniono dwie strefy zwiększonej gęstości systemu korzeniowego badanych gatunków. Pierwsza z nich występowała przy powierzchni terenu, ograniczonej do głębokości około 0,25 m ppt, co jest typowe dla większości gatunków roślin. Natomiast druga strefa o dużych wartościach powierzchni względnej korzeni występowała na głębokości 0,65 m ppt i była związana z obecnością gruntu o dużej wilgotności (por. rys. 3b i 4b), który stanowił piasek pylasty. W przypadku obu gatunków wzrost powierzchni względnej korzeni był wynikiem obecności pojedynczych grubych korzeni o średnicy przekraczającej 4 mm.

a)

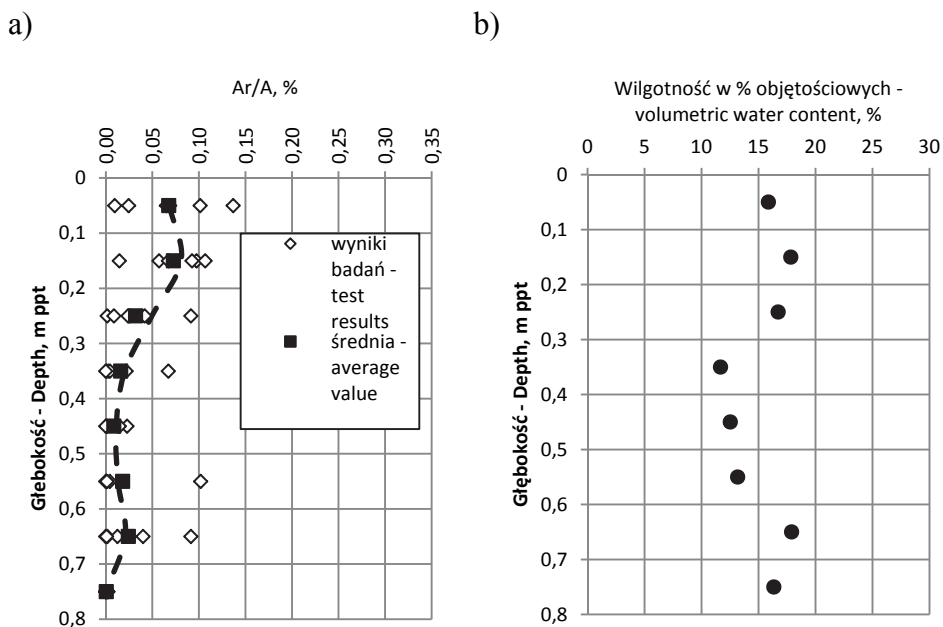


b)



**Rys. 3.** Wyniki pomiarów powierzchni względnej korzeni (Ar/A) topoli czarnej (a) i wilgotności profilu gruntowego (b)

**Fig. 3.** Results of root area ration (Ar/A) of black poplar tree (a) and volumetric moisture content profile of soil (b)



**Rys. 4.** Wyniki pomiarów powierzchni względnej korzeni (Ar/A) robinii akacyjnej (a) i wilgotności profilu gruntowego (b)

**Fig. 4.** Results of root area ratio (Ar/A) of Black locust tree (a) and volumetric moisture content profile of soil (b)

### 4.3. Opór penetracji gruntu

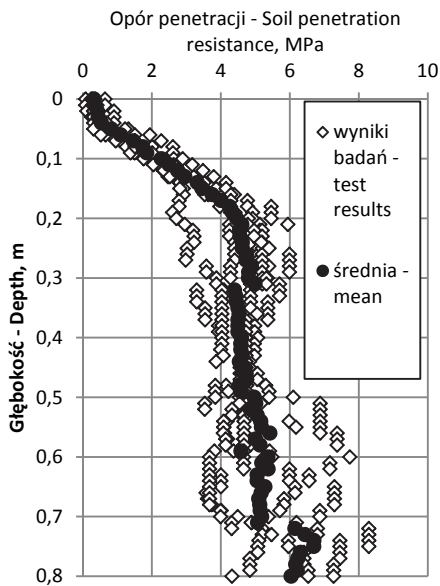
Na rysunkach 5-6 przedstawiono wyniki pomiarów oporu penetracji gruntu z badań ręcznym penetrometrem. W przypadku obydwu drzew niezależnie od umiejscowienia punktu badawczego zauważono, że wraz głębokością opór ten wzrasta.

W przypadku topoli czarnej, największe zmiany oporu penetracji występowały do głębokości 0,3-0,4 m, a poniżej opór ten był podobny w obydwu punktach badawczych. Analiza statystyczna wyników badań otrzymanych w strefie powierzchniowej (do 0,4 m ppt.), wykazała, że dla poziomu istotności 0,01 opór penetracji w odległości 1,0 m od topoli czarnej był większy niż w odległości 0,3 m.

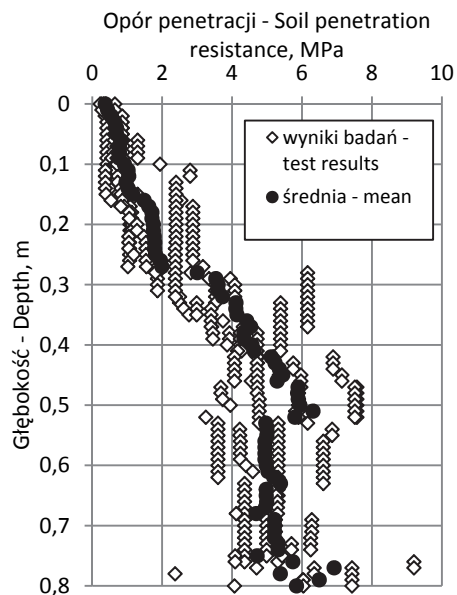
Natomiast w przypadku badań przeprowadzonych w pobliżu robinii akacyjnej nie udało się osiągnąć założonej głębokości penetracji. Wykonane wkopy badawcze wykazały, że teren ten charakteryzował się dużą zawartością różnego typu odpadów (gruz budowlany, drewno, two-

rzywa sztuczne), co było przyczyną ograniczonej głębokości badania. Dlatego też porównując wyniki badań ograniczono się do rezultatów uzyskanych do głębokości 0,4 m ppt. Wyniki analizy statystycznej wykazały, że podobnie jak w przypadku topoli czarnej, większe wartości oporu penetracji gruntu uzyskano w punkcie położonym w większej odległości od drzewa.

a)

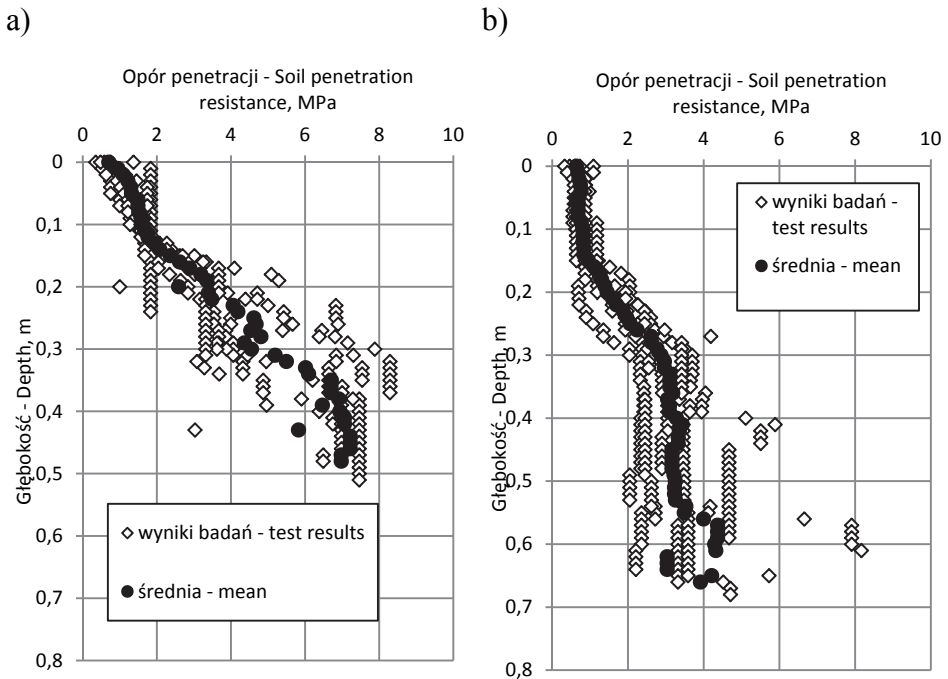


b)



**Rys.5.** Zależność oporu penetracji gruntu od głębokości w profilach badawczych zlokalizowanych w odległości 1 m (a) oraz 0,3 m (b) od topoli czarnej

**Fig. 5.** Soil penetration resistance vs. depth at sites located 1 m (a) and 0,3 m (b) from black poplar tree



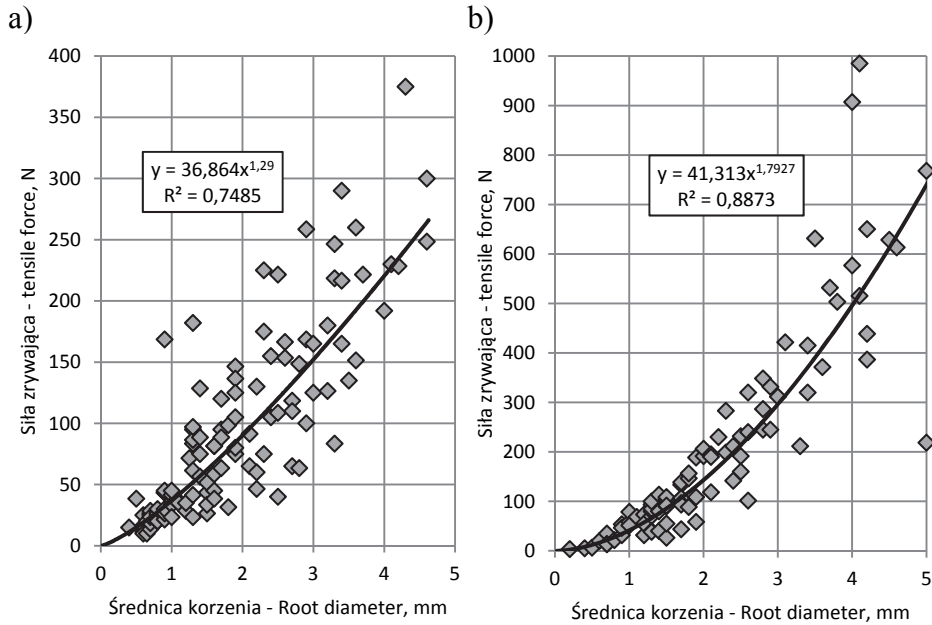
**Rys. 6.** Zależność oporu penetracji gruntu od głębokości w profilach badawczych zlokalizowanych w odległości 1 m (a) oraz 0,3 m (b) od robinii akacyjnej

**Fig. 6.** Soil penetration resistance vs. depth at sites located 1 m (a) and 0,15 m (b) from black locust tree

#### 4.4. Wytrzymałość na rozciąganie

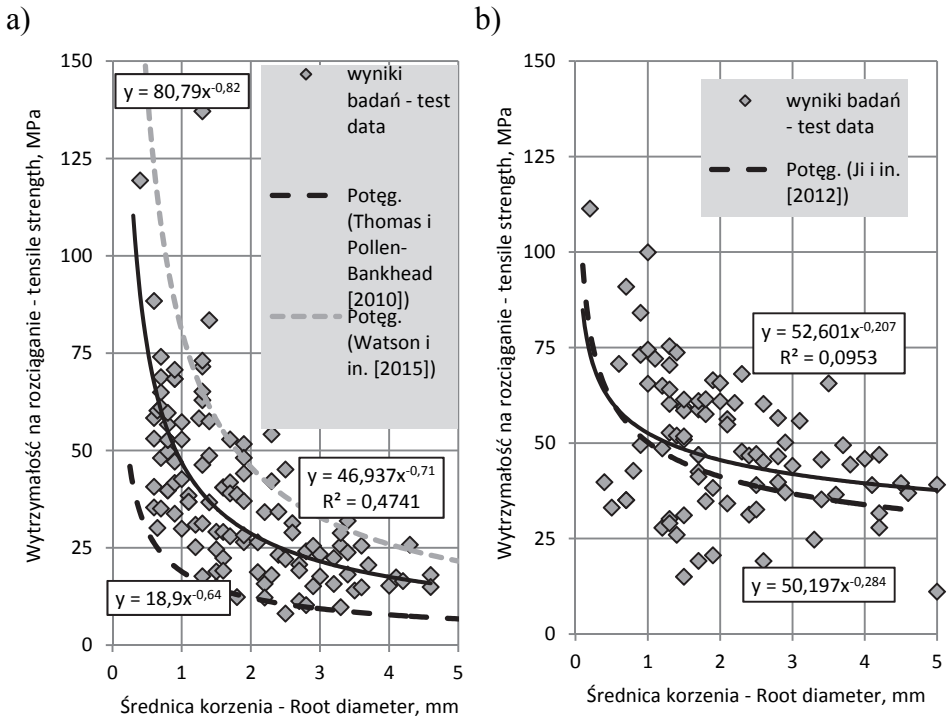
Na rysunku 7 przedstawiono zależność sił zrywającej korzenie od ich średnicy, a na rysunku 8 zależność wytrzymałości na rozciąganie korzeni od ich średnic obydwu gatunków drzew. Stwierdzono, że zależność siły zrywającej od średnicy korzeni jest w większym stopniu skorelowana ze średnicą korzeni niż wytrzymałość na rozciąganie, co jest często spotykane w literaturze (Preti & Giadrossich 2009, Abdi i in. 2010). Uzyskany zakres wartości wytrzymałości na rozciąganie mieścił się w bardzo szerokim przedziale, przy czym zauważalne było, że wartości tego parametru zmniejszały się wraz ze wzrostem średnicy korzenia, a zależności te były istotne statystycznie. W przypadku topoli czarnej średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie wyniosła 41,6 MPa (śred-

nia po odrzuceniu 5% wartości skrajnych – 37,3 MPa), odchylenie standardowe 33,5 MPa, a współczynnik zmienności wyniósł 80,4%. Natomiast średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie korzeni robinii akacjowej wyniosła 49,9 MPa (średnia po odrzuceniu 5% skrajnych – 49,3 MPa), odchylenie standardowe 18,44 MPa, a wartość współczynnika zmienności była wyraźnie mniejsza niż w przypadku topoli i wyniosła 36,9%. Analiza statystyczna na poziomie istotności 0,01 wykazała, że wytrzymałość na rozciąganie korzeni robinii akacjowej jest istotnie większa niż topoli czarnej.



**Rys. 7.** Zależność siły zrywającej od średnicy korzeni topoli czarnej (a) i robinii akacjowej (b)

**Fig. 7.** Tensile force vs root diameter obtained for black poplar (a) and black locust (b)



**Rys. 8.** Wytrzymałość na rozciąganie korzeni topoli czarnej (a) i robinii akacjowej (b)

**Fig. 8.** Tensile strength of root of black poplar tree (a) and black locust (b)

#### 4.5. Spójność pozorna

Wyniki badań względnej powierzchni korzeni w gruncie oraz wytrzymałości na rozciąganie zostały przeliczone za pomocą modeli Wu-Waldrona i modelu wiązkowego na wartości spójności pozornej (tab. 1). Na rysunku 9 przedstawiono wyniki obliczeń spójności pozornej określone modelem wiązkowym. Stwierdzono, że charakter zmian wartości spójności pozornej był taki sam jak w przypadku zmian powierzchni względnej korzeni.

Spójność pozorna zmniejszyła się wraz ze wzrostem głębokości do 0,55 m ppt, a następnie na głębokości 0,65 m ppt był widoczny przyrost jej wartości. Średnia wartość spójności pozornej dla korzeni topoli czarnej wyniosła 4,5 kPa (odchylenie standardowe 5,1 kPa), a dla robinii akacjowej była prawie dwukrotnie większa i wyniosła 8,7 kPa (odchylenie

nie standardowe 10,5 kPa). Wyniki analizy statystycznej na poziomie istotności 0,01 nie wykazały jednak istotnych różnic wartości spójności pozornej pomiędzy obydwoma gatunkami drzew. Podobne zależności stwierdzono analizując wartości spójności pozornej uzyskane w strefie powierzchniowej do głębokości 0,5 m ppt, natomiast przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$  spójność pozorna topoli czarnej była statystycznie istotnie mniejsza niż robinii akacjowej.

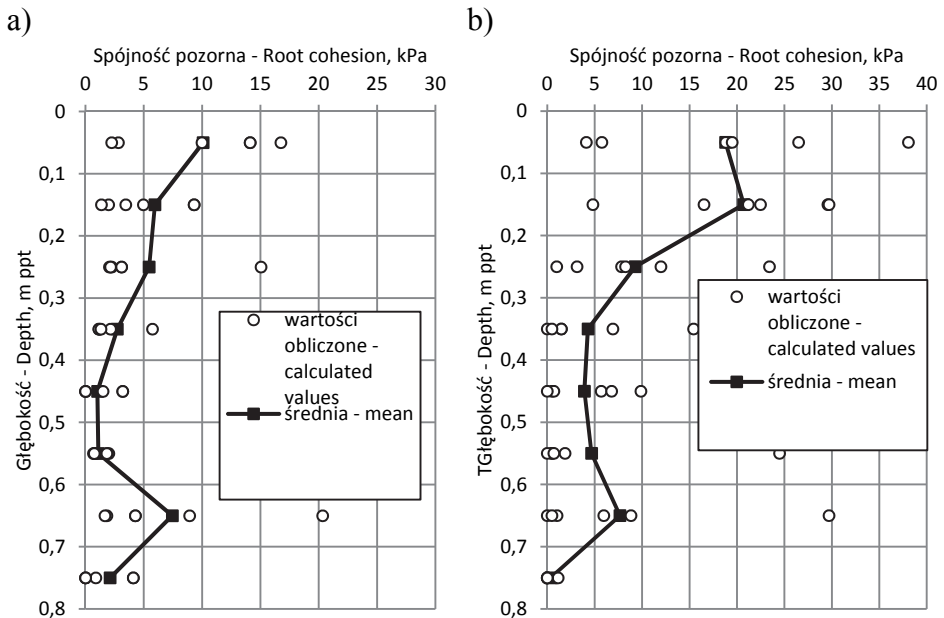
**Tabela 1.** Wyniki obliczeń spójności pozornej topoli czarnej i robinii akacjowej w zależności od głębokości oraz modelu obliczeniowego

**Table 1.** Values of root cohesion of black poplar tree and black locust determined according to Wu-Waldron and Fiber Bundle Model

Głębokość	model Wu-Waldron'a				Model wiązkowy			
	Średnia	Wartość maksymalna	Wartość minimalna	Odch. stand.	Średnia	Wartość maksymalna	Wartość minimalna	Odch. stand.
m ppt	kPa							
<b>Topola czarna</b>								
0,05	18,4	35,3	3,3	13,1	10,1	16,7	2,2	6,3
0,15	10,5	25,4	1,8	9,7	6,0	14,6	1,4	5,1
0,25	9,5	23,6	2,5	8,9	5,5	15,1	2,0	5,3
0,35	3,3	7,4	1,2	2,7	2,7	5,7	1,2	2,0
0,45	1,3	4,2	0,0	1,7	1,0	3,2	0,0	1,3
0,55	1,3	2,6	0,5	0,9	1,1	2,0	0,5	0,6
0,65	14,2	45,4	1,7	16,6	7,4	20,3	1,7	7,0
0,75	5,0	19,5	0,0	8,0	2,1	7,7	0,0	3,2
<b>Robinia akacjowa</b>								
0,05	31,5	57,9	5,7	20,4	18,8	38,1	4,1	12,8
0,15	34,8	49,7	8,2	16,5	20,7	29,7	4,8	9,3
0,25	16,1	44,1	1,0	15,3	9,3	23,4	1,0	8,0
0,35	8,0	31,4	0,0	12,3	4,3	15,4	0,0	6,0
0,45	4,1	10,4	0,0	4,3	3,9	9,9	0,0	4,1
0,55	8,0	44,7	0,0	18,0	4,7	24,5	0,0	9,7
0,65	10,8	37,2	0,0	15,0	7,7	29,7	0,0	11,3
0,75	0,4	1,4	0,0	0,7	0,4	1,2	0,0	0,6

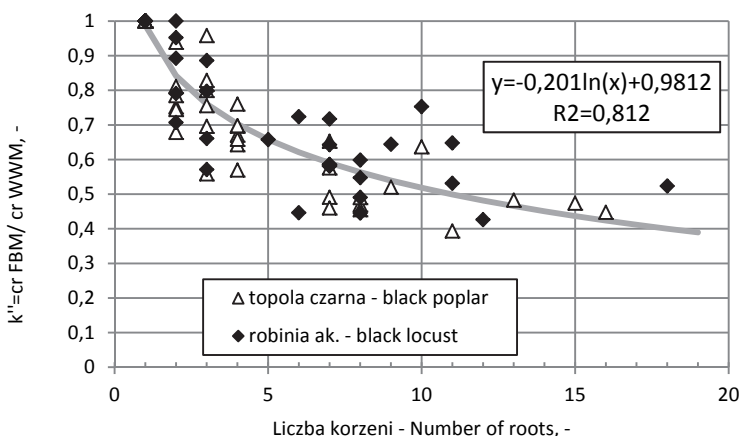


Porównując wyniki obliczeń spójności pozornej uzyskanych z zastosowaniem obu modeli obliczeniowych stwierdzono, że model Wu-Waldrona daje wyraźnie większe wartości spójności pozornej niż model wiązkowy. Stosunek spójności pozornej z obliczeń obydwojema modelami był tym większy im więcej korzeni występowało w rozpatrywanej części profilu gruntowego (rys. 10). Uzyskana zależność może być interpretowana jako wartości współczynnika korekcyjnego  $k''$  zaproponowanego przez Preti (2006). Otrzymana zależność jest podobna do uzyskanej przez Bischetti i in. (2009), którzy również w skrajnych przypadkach uzyskali wartości współczynnika  $k''$  zbliżone do 0,4.



**Rys. 9.** Wartości spójności pozornej topoli czarnej (a) i robinii akacjowej (b) określone według modelu wiązkowego

**Fig. 9.** Root cohesion values for black poplar tree (a) and black locust (b) obtained using Fiber Bundle Model



**Rys. 10.** Zależność wartości  $k''$  od liczby korzeni w profilu gruntowym  
**Fig. 10.** Values of  $k''$  factor as function of roots number

#### 4.6. Obliczenia stateczności

Wyniki obliczeń spójności pozornej otrzymane z modelu wiązkowego wykorzystano do określenia wpływu systemów korzeniowych obydwu gatunków roślin na stateczność skarpy wykopu drogowego. Wartości spójności pozornej obydwu gatunków drzew, a także zakres jej zmienności odpowiadały one parametrom uzyskanym z wykorzystaniem modelu wiązkowego, które zestawiono w tabeli 1 i. Założono również, że grunt skarpy wykopu stanowi piasek pylasty, czyli grunt analogiczny do tego, który stanowił siedlisko badanych drzew. Przyjęto, że ciężar objętościowy gruntu wynosi  $18 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ , wartości jego kąta tarcia wewnętrznego i spójności wynoszą odpowiednio  $29 \pm 1^\circ$  oraz  $1 \pm 1 \text{ kPa}$ .

Obliczenia wykazały, że obecność drzew na skarpie wykopu pozytywnie wpływa na poprawę warunków jej stateczności (tab. 2). W przypadku wariantu uwzględniającego uszkodzenie całej skarpy obecność korzeni obydwu gatunków drzew spowodowała zwiększenie współczynnika bezpieczeństwa średnio o 7%, a w wariacie z osuwiskiem w dolnej części skarpy średnio o 12%. Różnica ta była związana z zasięgiem płaszczyzny poślizgu, która w pierwszym przypadku przekraczała 1,0 m, a w drugim była mniejsza od tej wartości. Stwierdzono również, że wartości współczynnika bezpieczeństwa skarpy są ponad dwukrotnie większe dla skarpy zadrzewionej i według wytycznych amerykańskich

(U.S. Army Corps of Engineers 1999) świadczą o co najmniej dobrym poziomie bezpieczeństwa konstrukcji. Z kolei analizując wartości prawdopodobieństwa powstania osuwiska obejmującego całą skarpe jej bezpieczeństwo można scharakteryzować jako poniżej przeciętnej. Obliczenia nie wykazują wyraźnej różnicy pomiędzy gatunkami obydwu drzew, co stanowi potwierdzenie wyników analizy statystycznej przedstawionej wcześniej dla spójności pozornej gruntu.

**Tabela 2.** Zestawienie wyników obliczeń stateczności skarpy wykopu drogowego w zależności od rodzaju występujących drzew

**Table 2.** Slope stability results of slope in relation to its cover

Parametry	Rodzaj drzew na skarpie		
	Brak	Topola czarna	Robinia akacyjowa
<b><i>Osuwisko całej skarpy</i></b>			
Zakres wartości współczynnika bezpieczeństwa, [-]	0,89-1,25	0,99-1,31	0,99-1,30
Średni współczynnik bezpieczeństwa, [-]	1,08	1,16	1,15
Wskaźnik bezpieczeństwa [-] obliczony zgodnie z (5)	2,16	4,86	4,74
Prawdopodobieństwa wystąpienia osuwiska skarpy [%] obliczone zgodnie z (6)	1,499	0,003	0,009
<b><i>Osuwisko w dolnej części skarpy</i></b>			
Zakres wartości współczynnika bezpieczeństwa, [-]	0,92-1,41	1,07-1,53	1,07-1,55
Średni współczynnik bezpieczeństwa, [-]	1,17	1,32	1,31
Wskaźnik bezpieczeństwa [-] obliczony zgodnie z (5)	3,64	6,99	6,58
Prawdopodobieństwa wystąpienia osuwiska skarpy [%] obliczone zgodnie z (6)	0,138	0,000	0,000

## 5. Dyskusja wyników badań

Wyniki badań wykazały, że badane gatunki drzew charakteryzują się dużym rozrzutem wartości względnej powierzchni korzeni, który był większy w obrębie gatunku niż pomiędzy gatunkami. Pod względem statystycznym obydwie gatunki drzew charakteryzowały się podobnym rozwojem systemu korzeniowego. Względna powierzchnia korzeni wyniosła maksymalnie 0,3% (średnio 0,047%) w przypadku topoli czarnej oraz 0,14% (średnio 0,03%) w przypadku robinii akacjowej i są one stonkowo niewielkie w odniesieniu do wartości podawanej przez Bischetti i in. (2007, 2009) dla jodły pospolitej, modrzewia europejskiego, buka zwyczajnego, kasztana jadalnego oraz chmielograbu europejskiego, którzy uzyskali średnie wartości  $Ar/A = 0,07-0,36\%$ . Należy jednak podkreślić, że wartości powierzchni względnej podane w cytowanej pracy mieszczą się przeważnie w zakresie 0,09-0,15%, a badane gatunki roślin były znacznie starsze. Z kolei wartości powierzchni względnej korzeni uzyskane dla robinii akacjowej przez Ji i in. (2012) wyniosły maksymalnie 0,55%, średnio w całym profilu 0,15-0,19%. Należy jednak zwrócić uwagę, że autorzy prowadzili badania na drzewach 17-letnich, a więc znacznie starszych niż badane w niniejszej pracy, a pomiary względnej powierzchni korzeni dokonywane były w odległościach 0,25 i 0,5 m od drzewa, co jak wykazują wyniki badań Abernethy i Rutherford (2001) drzewa może mieć również istotny wpływ na wyniki pomiarów. Należy zauważyć również, że Ji i in. (2015) analizowali system korzeniowy tylko do głębokości 0,5 m ppt. twierdząc, że poniżej tej głębokości korzenie prawie nie występują. Z kolei badania Zhanga i in. (2014) prowadzone dla 5-letniej robinii akacjowej wykazały, że jej system korzeniowy sięga do głębokości co najmniej 1,0 m, przy czym w strefie do 0,4 m ppt występuje 65% ogółu korzeni, a poniżej głębokości 0,8 m zinventaryzowano tylko 4% korzeni. Zauważalne jest, że gęstość systemu korzeniowego w przypadku obydwu badanych gatunków jest największa w powierzchniowej części profilu i ma tendencję do zmniejszania się wraz z głębokością, ale wyróżniono również strefę w głębszej części profilu, gdzie następuje ponowny wzrost gęstości korzeni. Analizując wyniki prac Abernethy i Rutherford (2001), Bischetti i in. (2007, 2009), można zauważyć, że w głębszej części profilu glebowego występują strefy o stosunkowo wysokiej gęstości korzeni. Jak podają Abernethy i Ruther-

furd (2001) na pomiary powierzchni względnej korzeni duży wpływ ma obecność dużych korzeni i tutaj należy upatrywać przyczyn dużej zmienności wyników pomiarów. Z drugiej strony obecność zwiększonej ilości korzeni może wynikać z warunków siedliskowych związanych np. ze obecnością strefy gruntu o większej zasobności składników pokarmowych, większej porowatości lub większej wilgotności. Autorzy niniejszej pracy zaobserwowali i wykazali, że ten ostatni czynnik miał wpływ na zwiększoną ilość korzeni w głębszej strefie podłoża.

Badania oporu penetracji gruntu w pobliżu pni topoli i robinii akacjowej wykazały, że wraz z odległością od drzewa opór ten wzrasta. Uzyskana zależność jest odmienna od podawanej w pracach Osmana i Barakbah'a (2006, 2011), którzy wykazali, że obecność roślinności wpływa na zwiększenie oporów penetracji gruntu. Autorzy ci uzyskane zależności uzasadniali zwiększeniem siły wiązań pomiędzy gruntem, a korzeniami, które są tym większe im więcej korzeni występuje w gruncie. Niestety w pracach tych nie została opisana szczegółowa orientacja punktów badawczych względem drzewa. Z drugiej strony obserwując rozwój korzeni w gruncie, można zauważyć, że często korzenie powodują rozpulchnianie gruntu, które w powierzchniowej warstwie profilu gruntowego może prowadzić do jego rozluźnienia. Wydaje się, że zastosowanie penetrometru do badań efektu oddziaływań korzeni na opór penetracji gruntu wymaga dalszych prac badawczych.

Badania wytrzymałości na rozciąganie wykazały, że istnieje istotna zależność tego parametru od średnicy korzenia. Średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie w przypadku topoli (41,6 MPa) jest mniejsza w porównaniu do robinii akacjowej (49,9 MPa), niemniej znajduje się w połowie zakresu wytrzymałości podanych przez Thomas i Pollen-Bankhead (2010) oraz Watsona (2015) dla różnych rodzajów topoli (rys. 9a). Uzyskane wartości wytrzymałości na rozciąganie są podobne do wytrzymałości wierzby purpurowej i wierzby iwy, natomiast większe od wytrzymałości jodły zwyczajnej, jesionu i olszy zielonej (Bischetti i in. 2007). Z kolei wytrzymałość na rozciąganie robinii akacjowej uzyskana przez Ji i in. (2012) wyniosła 43,3 MPa, a więc była nieco mniejsza niż uzyskali Autorzy niniejszych badań. Różnica ta wynika z wielkości średnic rozciąganych korzeni jak również z różnicy wieku badanych korzeni. Wartości wytrzymałości na rozciąganie robinii akacjowej uzyskane z niniejszych badań są nieznacznie większe od rezultatów uzyskanych

przez Ji i in. (2012) (rys. 9b). Różnica ta może wynikać z dwóch powodów. Ogólnie wytrzymałość na rozciąganie korzeni zmniejsza się wraz ze wzrostem średnicy. W przeprowadzonych badaniach wyliczona średnia wytrzymałość na rozciąganie odpowiadała średnicy korzenia 2,15 mm, podczas gdy w pracy Ji i in. (2012) średnia wytrzymałość korzeni odpowiadała średnicy korzenia wynoszącej 2,6 mm. Ponadto jak wskazują Genet i in. (2007), młodsze korzenie posiadają zwykle większą zawartość celulozy, która wpływa na zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie.

Wyniki obliczeń spójności pozornej wykazały, że wartości tego parametru, pomimo młodego wieku badanych drzew, są stosunkowo wysokie (średnie wartości w przypowierzchniowej warstwie 0,05-0,15 m ppt. wynosiły w przypadku topoli czarnej i robinii akacjowej odpowiednio 9,0 oraz 19,8 kPa). Wartości te jednak były mniejsze od wartości podawanych przez Bischetti i in. (2009) dla wybranych gatunków drzew europejskich czy też Ji i in. (2012), którzy dla robinii akacjowej uzyskali maksymalne wartości spójności pozornej przekraczające 40 kPa, a przy głębokości 0,5 m ppt. większe niż 20 kPa. Biorąc pod uwagę wysokie wartości spójności pozornej nie dziwi fakt, że zastosowanie tego parametru do obliczeń stateczności powoduje zwiększenie współczynnika stateczności skarpy wykopu porośniętych drzewami (Ji i in. 2012, Genet i in. 2008, 2010). W przypadku analizowanej skarpy wykazano, że im mniejsza była bryła osuwiskowa tym większa jest jej stateczność. Prawdopodobnie ta wynika z faktu, że przy niezbyt głębokiej płaszczynie poślizgu większa jej część przebiega przez strefę zasięgu korzeni. Można się spodziewać, że w przypadku płytkich powierzchni poślizgu nieprzekraczających 0,5 m głębokości wartości współczynnika bezpieczeństwa byłyby jeszcze większe, jak chociażby pokazują wyniki analiz stateczności podanych przez Preti i Giadrossich (2009).

## **6. Podsumowanie**

Na podstawie analizy powierzchni względnej systemów korzeniowych topoli i robinii akacjowej pochodzących z 5-letnich plantacji, wyników badań wytrzymałości na zrywanie ich korzeni oraz analizy otrzymanych wyników obliczeń spójności pozornej i stateczności można ogólnie stwierdzić, że:

1. Wyniki badań potwierdzają dużą zmienność względnej powierzchni systemu korzeniowego drzew. Analiza statystyczna wykazała, że różnice powierzchni względnej systemu korzeniowego wewnątrz gatunkowe są istotne, natomiast nie wykazano istotnej różnicy wartości powierzchni względnej korzeni pomiędzy porównywanymi gatunkami.
2. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie wykazały stosunkowo dobrą zależność od średnicy korzeni. Statystycznie wytrzymałość na rozciąganie korzenie robinii akacjowej (49,9 MPa) jest większa niż topoli czarnej (41,6 MPa).
3. Wyniki obliczeń spójności pozornej wykazały, że średnie jej wartości dla obydwu drzew nie różnią się istotnie pod względem statystycznym, natomiast duży wpływ na wartości tego parametru ma zastosowany model obliczeniowy.
4. Wyniki obliczeń stateczności wskazują, że analizowane systemy korzeniowe pomimo młodego wieku drzew, wywierają pozytywny wpływ na stateczność skarpy. Przeprowadzona analiza statystyczna wyników badań nie pozwala jednak wskazać, którego gatunku drzew system korzeniowy będzie korzystniej wpływał na stateczność zbocza.

*Praca wykonana w ramach badań statutowych: DS-3322/KIWiG/2015*

*Autorzy składają również podziękowania pracownikom Zakładu Geomorfologii Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie za udostępnienie programu komputerowego do obliczeń stateczności.*

## **Literatura**

- Abdi, E., Majnounian, B., Genet, M., Rahimi, H. (2010). Quantifying the effects of root reinforcement of Persian Ironwood (*Parrotia persica*) on slope stability; a case study: Hillslope of Hyrcanian forests, northern Iran. *Ecological Engineering*, 36, 1409-1416.
- Abernethy, B., & Rutherford, I.D. (2001). The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes*, 15, 63-79.
- Adhikiri, A.R., Gautam, M.R., Yu, Z., Imada, S., Acharya, K. (2013). Estimation of root cohesion for desert species in the Lower Colorado riparian ecosystem and its potential for streambank stabilization. *Ecological Engineering*, 51, 33-44.

- Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P., Zocco, A. (2007). Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). *Plant and Soil*, 278, 11-22.
- Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Epis, T., Morlotti, E. (2009). Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant and Soil*, 324, 71-89.
- Böhm, W. (1979). *Methods of studying root systems*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- Docker, B.B. & Hubble, T.V.T. (2008). Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species. *Geomorphology*, 100, 401-418.
- Fijałkowska, D. & Styszko, L. (2011). Ciepło spalania biomasy wierzbowej. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection)*, 13, 875-889.
- Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S.B., Forcaud, T., Dumail, J-F., van Beek R. (2007). The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. Stokes et al. (eds.) *Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*, 3-11.
- Genet, M., Kokutse, N., Stokes, A., Forcaud, T., Cai, X., Ji, J., Mickovski, S. (2008). Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability. *Forest Ecology and Management*, 256, 1517-1526.
- Genet, M., Stokes, A., Fourcaud, T., Norris, J.E. (2010). The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest. *Ecological Engineering*, 36, 265-275.
- GEO-SLOPE 2010. (2007). *Stability modeling with SLOPE/W An Engineering Methodology (4th ed.)*. Alberta: GEO-SLOPE International Ltd.
- Ji, J., Kokutse, N., Genet, M., Fourcaud, T., Zhang, Z. (2012). Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability. A case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and *Arborvitae* (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China. *Catena*, 92, 139-154.
- Juliszewski, T., Kwaśniewski, D., Mudryk, K., Wróbel, M. (2012). Ocena wybranych parametrów biomasy pozyskanej z plantacji drzew szybkorosnących. *Inżynieria Rolnicza*, 2(136), 89-97.
- Kielbasa, P. (2011). Zintegrowana metoda oceny nakładów energetycznych na uprawę podstawową w aspekcie mozaikowości gleby. *Inżynieria Rolnicza*, XV, 3(128). Wyd. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej.
- Kujawa K. (2012). Znaczenie obecności robinii *Robinia pseudoacacia* w drzewostanie zadrzewień śródpolnych dla różnorodności i zagęszczenia populacji ptaków lęgowych. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, 14, 33(4), 62-73.



- Mickovski, S.B. & van Beek, L.P.H. (2009). Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate. *Plant and Soil*, 324, 43-56.
- Mao, Z., Saint-Andre, L., Genet, M., Mine, F-X., Jourdan, Ch., Rey, H., Courbaud, B., Stokes, A. (2012). Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models. *Ecological Engineering*, 45, 55-69.
- Osman, & N., Barakbah, S.S. (2006). Parameters to predict slope stability – Soil water and root profiles. *Ecological Engineering*, 28, 90-95.
- Osman, N., & Barakbah, S.S. (2011). The effect of plant succession on slope stability. *Ecological Engineering*, 37, 139-147.
- PN-88/B-04481. *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości.
- Pollen, N., Simon, A. (2005). Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research*, 41, W07025.
- Preti, F. (2006). On root reinforcement modeling. European Geosciences Union 2006. *Geophysical Research Abstracts*, 8, 04555.
- Preti, F., & Giadrossich, F. (2009). Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (*Spartium junceum* L.) *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 1713-1726.
- Rai, R., & Shrivastva, B.K. (2012). Large in situ shear test box for mine waste dump. *Journal of The Institution of Engineers (India). Series D.*, 93(1), 19-22.
- Stachowski, P. (2006). Kształtowanie środowiska rolniczego na terenach pogórnich Kopalni Węgla Brunatnego „Konin”. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection)*, 8, 279-297.
- Styszko, L., Fijałkowska, D., Sztyma, M. (2008). Obserwacje rozwoju wierzby energetycznej w 2007 roku. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection)*, 10, 425-432.
- Styszko L., Borzymowska A., Ignatowicz M. (2011). Wpływ zagęszczenia krzaków wierzby na odrastanie pędów w trzyletnim cyklu jej uprawy. *Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection)*, 13, 541-556.
- Thomas, R.E., & Pollen-Bankhead, N. (2010). Modeling root-reinforcement with a fiberbundle model and Monte Carlo simulation. *Ecological Engineering*, 36, 47-61.
- Tomanek, J. (1997). *Botanika leśna*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1999) *Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies, engineering and design*. Rep. No. 20314-1000, Dep. of Army, Washington, D.C.

- Węgorek, T., Kraszkiewicz, A. (2005). Dynamika wzrostu robinii akacjowej (*Robinia pseudacacia* L.) w zadrzewieniu śródpolnym na glebach lessowych. *Acta Agrophysica*, 5(1), 211-218.
- Waldron, L.J. (1977). The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Journal of the Soil Science Society of America*, 41, 843-849.
- Watson, A., McIvor, I., Douglas, G. (2015). Live root-wood tensile strength of *Populus × euramericana*, 'Veronese poplar'. *The New Zealand Poplar & Willow Research Trust* (<http://www.poplarandwillow.org.nz>), 1-8.
- Wiłun, Z. (2000). *Zarys geotechniki*. Warszawa: Wyd. Kom. i Łączn.
- Wu, T.H., McKinnell III, W.P., Swanston, D.N. (1979). Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, 16, 19-33.
- Zhang, Ch., Chen, L-H., Jiang, J. (2014). Vertical root distribution and root cohesion of typical tree species on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 6(5), 601-611.

## Quantifying Effect of Root-Reinforcement of Juvenile Trees of Black Poplar and Black Locust

### Abstract

Determination of lateral root-cohesion of black poplar (*Populus nigra* L.) and black locust (*Robinia pseudoaccacia* L.) root systems derived from 5 years-old plantation was the aim of the paper. In the framework of the research were carried out measurements of root area ratio using profile wall trench technique, penetration resistance tests near trees. In the framework of laboratory tests were done tensile strength tests of the roots of both species and were determined basic geotechnical properties of soils from vicinity of analyzed plants. In the next part of research were calculated values of root-cohesion using Wu-Waldron and Fiber Bundle Models, as well as were performed slope stability calculations in order to demonstrate positive influence of root-cohesion on factor of safety.

The measurements of root systems revealed that the plants are characterized by a large variation of root area ratio. Mean value of root area ration of black poplar and black locust were equal 0.045 and 0.03% respectively, however statistical analysis did not confirmed the significance of differences of this parameter between the analyzed species. The biggest values of root area ratio were determined in the superficial layer of soil profile limited to depth of 0.3 m below the terrain surface, but relatively high values of root area ratio were also determined at a depth of 0.65-0.75 m below ground level and were one associated with an increase of soil moisture content. Penetration tests of the soil near

the tree trunks of black poplar and black locust showed that increase of distance from the tree caused increase of penetration resistance. These results are in contrast to the penetration results reported in the literature.

Calculations of root-cohesion showed that the nature of changes in the value of this parameter is the same as in the case of root area ratio values. The values of root-cohesion are decreasing with increase to depth up to 0.55 m below the surface and at depth 0.65-0.75 m below the surface is visible the increase in the value of root cohesion. The mean value of root-cohesion of black poplar was 4.5 kPa, whereas in the case of black locust was almost twice higher (8.7 kPa). The results of the statistical analysis did not show a significant difference in the root-cohesion of the analyzed plant species. Comparison of root-cohesion value calculations obtained using both models revealed that model Wu-Waldron gives a significantly higher value of cohesion than the model bundle, and the difference of calculation results of both methods is the greater the more the roots occurs in the soil profile.

Probabilistic stability calculations carried out for the hypothetical slope showed that the presence of vegetation on the slope improves its stability. The average value of the safety factor on the slopes covered with two analyzed species plant was 6.5-12.8% higher than in case of non-vegetated slope. Values of reliability indexes obtained for vegetated slope were more than twice higher than for slope without vegetation. Calculations results didn't showed significant difference in the impact of the two species on slope stability.

## Streszczenie

Celem pracy było określenie wartości spójności pozornej gruntów (przyrostu wytrzymałości gruntu na ścinanie) związanej z obecnością w profilu systemów korzeniowych topoli czarnej (*Populus nigra*) oraz robinii akacjowej (*Robinia pseudoacacia* L.). Badania przeprowadzono dla drzew po 5 latach od ich zasadzenia. W ramach prac badawczych przeprowadzone zostały pomiary powierzchni względnej korzeni, wykonano badania wytrzymałości na rozciąganie korzeni, określono podstawowe właściwości fizyczne i mechaniczne gruntów występujących w pobliżu roślin, a w dalszej części pracy przeprowadzono obliczenia spójności pozornej z wykorzystaniem modelu Wu-Waldrona i modelu wiązkowego oraz przeprowadzono obliczenia stateczności celem wykazania pozytywnego wpływu korzeni badanych gatunków drzew na stateczność skarp.

Ogólnie stwierdzono, że badane drzewa charakteryzują się dużym zróżnicowaniem powierzchni względnej systemu korzeniowego, co było zwłaszcza widoczne w przypadku topoli czarnej. Wartości średniej powierzchni względnej korzeni ( $A_r/A$ ) w całym profilu wyniosły 0,045% w przypadku topoli czarnej i 0,03% dla robinii akacjowej, przy czym analiza statystyczna wykonana przy

poziomie istotności 0,01 nie potwierdziła istotności różnic tego parametru pomiędzy obydwoma gatunkami drzew. Wyróżniono dwie strefy zwiększonej gęstości systemu korzeniowego badanych gatunków. Pierwsza z nich występowała przy powierzchni terenu, ograniczonej do głębokości około 0,25 m ppt, natomiast druga strefa na głębokości 0,65 m ppt i była związana z obecnością gruntu o dużej wilgotności. Badania oporu penetracji gruntu w pobliżu pni topoli czarnej i robinii akacjowej wykazały, że wraz z odległością od drzewa opór ten wzrasta. Uzyskana zależność jest odmienna od podawanej w literaturze.

Wyniki obliczeń spójności pozornej wykazały, że charakter zmian wartości spójności pozornej był taki sam jak w przypadku zmian powierzchni względnej korzeni. Spójność pozorna zmniejszyła się wraz ze wzrostem głębokości do 0,55 m ppt, a na głębokości 0,65 m ppt był widoczny przyrost jej wartości. Średnia wartość spójności pozornej dla korzeni topoli czarnej wyniosła 4,5 kPa, a dla robinii akacjowej była prawie dwukrotnie większa i wyniosła 8,7 kPa. Wyniki analizy statystycznej na poziomie istotności 0,01 nie wykazały jednak istotnych różnic wartości spójności pozornej pomiędzy obydwoma gatunkami drzew. Porównując wyniki obliczeń spójności pozornej uzyskanych z zastosowaniem obu modeli obliczeniowych stwierdzono, że model Wu-Waldrona daje wyraźnie większe wartości spójności pozornej niż model wiązkowy. Stosunek spójności pozornej z obliczeń obydwoma modelami był tym większy im więcej korzeni występowało w rozpatrywanej części profilu gruntowego.

Obliczenia stateczności wykazały, że obecność drzew na skarpie wykopu pozytywnie wpływa na poprawę warunków jej stateczności. Średnie wartości współczynnika bezpieczeństwa dla zbocza pokrytego roślinnością były od 6,5 do 12,8% większe niż dla zbocza bez roślinności. Z kolei wartości współczynnika bezpieczeństwa skarpy są ponad dwukrotnie większe dla skarpy zadrzewionej. Obliczenia nie wykazują wyraźnej różnicy pomiędzy gatunkami obydwu drzew.

**Słowa kluczowe:**

spójność pozorna, stateczność zboczy, topola czarna, robinia akacjowa

**Keywords:**

root cohesion, slope stability, black poplar, black locust