

# NOWOCZESNE

---

# TECHNOLOGIE

---

# LINŻYNIERIA

---

Monografia  
pod redakcją naukową  
Anny Klamerus-Iwan

W ZRÓWNOWAŻONYM  
UŻYTKOWANIU LASU



Wydawnictwo  
Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie

Kraków 2020

Redaktor Naczelny Wydawnictwa  
Prof. dr hab. inż. Józef Bieniek

Redaktor Naukowy  
Dr hab. inż. Anna Klamerus-Iwan, prof. UR

Projekt okładki  
Monika Wojtaszek

Fotografie na okładce  
Dr inż. Janusz Gołąb  
Dr hab. inż. Paweł Tylek, prof. UR

Skład i łamanie  
Regina Wojtyłko

Opracowanie redakcyjne i korekta  
Ewelina Wójcikowska-Jakubiec, Angelika Ciszek

Wydano za zgodą Rektora Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie  
Copyright © Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2020

ISBN 978-83-66602-04-5

Publikacje Wydawnictwa UR w Krakowie można nabyć w siedzibie Wydawnictwa.  
Prowadzona jest również sprzedaż wysyłkowa.

Wydawnictwo UR w Krakowie  
al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków  
tel. (12) 662 51 51, 662 51 57  
e-mail: [wydawnictwo@ur.krakow.pl](mailto:wydawnictwo@ur.krakow.pl)  
[www.wydawnictwo.ur.krakow.pl](http://www.wydawnictwo.ur.krakow.pl)  
Ark. wyd. 28,5. Ark. druk. 29. Nakład 500 egz.

Druk i oprawa  
Wydawnictwo-Drukarnia Ekodruk s.c.  
ul. Wielicka 250, 30-663 Kraków

## Recenzenci

**Dr hab. inż. Monika Aniszewska** – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych

**Prof. dr hab. inż. Anna Barszcz** – Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej

**Prof. dr hab. inż. Andrzej Czerniak** – Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Leśny, Katedra Inżynierii Leśnej

**Dr hab. Janusz Czerepko** – Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Ekologii Lasu

**Dr hab. Małgorzata Kijowska-Strugała, prof. IGiPZ** – Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Zakład Badań Geośrodowiska, Stacja Badawcza w Szymbarku

**Dr inż. Arkadiusz Gendek** – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych

**Dr hab. inż. Witold Grzywiński, prof. UPP** – Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu

**Dr hab. inż. Anna Klamerus-Iwan, prof. UR** – Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej

**Dr hab. inż. Janusz Kocel, prof. IBL** – Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Zarządzania Zasobami Leśnymi

**Dr hab. Rafał Kozłowski, prof. UJK** – Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, Instytut Geografii i Nauk o Środowisku

**Prof. dr hab. inż. Antoni T. Miler** – Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Leśny, Katedra Inżynierii Leśnej

**Prof. dr hab. inż. Janusz Sowa** – Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej

**Dr hab. inż. Paweł Staniszewski** – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu

**Dr hab. Arkadiusz Tomczak, prof. UPP** – Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu

**Dr hab. inż. Paweł Tylek, prof. UR** – Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej



## Spis treści

|  |            |
|--|------------|
| Wprowadzenie .....   | 7          |
| <b>I. Aktualne zagadnienia użytkowania lasu.....</b>   | <b>9</b>   |
| Dariusz Kulak, Uszkodzenia sortymentów sosnowych pozyskiwanych za pomocą harwestera .....  | 11         |
| Krzysztof Leszczyński, Tomasz Rebizak, Ocena uciążliwości pracy wynikającej z ręcznego transportu drewna średniowymiarowego z wykorzystaniem różnych narzędzi pomocniczych .....   | 27         |
| Krzysztof Michalec, Radosław Wąsik, Analiza dokładności ułożenia stosów drewna średniowymiarowego.....   | 41         |
| Monika Barbara Gach, Możliwości pozyskania oraz wykorzystania na cele energetyczne biomasy zarastającej zbiorniki wodne. Studium przypadku: zbiornik wodny Tresna .....  | 53         |
| Jakub Ptak, Straty drewna w nadleśnictwach dorzecza rzeki Soły poniesione na skutek powodzi, które występowały w latach 1996–2011  | 71         |
| Arkadiusz Stańczykiewicz, Zastosowanie rejestratorów w badaniach efektywności technologii pozyskiwania drewna i ich wpływu na środowisko leśne .....   | 81         |
| Grzegorz Szewczyk, Obciążenia psychiczne pracą na stanowiskach roboczych w zautomatyzowanych procesach pozyskiwania drewna   | 95         |
| Radosław Wąsik, Krzysztof Michalec, Porównanie wilgotności stosowego drewna świerka pospolitego ( <i>Picea abies</i> (L.) H. Karst) oznaczanej metodą suszarkowo-wagową oraz przy użyciu wilgotnościomierza oporowego..... | 113        |
| <b>II. Aktualne zagadnienia inżynierii leśnej.....</b>   | <b>131</b> |
| Anna Drożdżik, Problematyka gospodarowania wodą w górskich obszarach leśnych.....  | 133        |
| Janusz Gołąb, Elżbieta Badach, Krzysztof Urban, Bogusław Radliński, Stanisław Małek, Grażyna Godzisz, Adrian Adamowicz, Rozkład wilgotności w gruncie przyległym do wylotu urządzeń odwadniających drogi leśne .....       | 159        |
| Janusz Gołąb, Gabriela Sołtysik, Grzegorz Zbieg, Fotogrametryczna inwentaryzacja powykonawcza odcinka drogi leśnej z zastosowaniem bezzałogowego statku powietrznego (BSP) .....   | 185        |

|   |            |
|---|------------|
| Anna Klamerus-Iwan, Czynniki wpływające na retencyjne właściwości elementów ekosystemów leśnych .....   | 209        |
| Ewa Słowik-Opoka, Materia organiczna w materiale zwietrzałym pozyskanym w wyniku ścierania cząstek rumowiska rzeczno-geologicznego pobranego z koryta potoku w małej leśnej zlewni górskiej .....   | 233        |
| Ewa Słowik-Opoka, Geneza powstawania żwirowo-piaszczystych form dennych wzdłuż ujściowego odcinka rzeki Raby – zagadnienia wybrane .....  | 253        |
| Rafał Starzak, Przemysław Huskiewicz, Przebudowa zbiornika akumulacji rumoszu na obiekt małej retencji górskiej – studium przypadku.....  | 277        |
| Rafał Starzak, Miłosz Polak, Wpływ szlaków i dróg leśnych na odpływ wody w zlewni górskiej.....   | 305        |
| <b>III. Aktualne zagadnienia mechanizacji leśnictwa .....</b>   | <b>337</b> |
| Mariusz Kormanek, Stanisław Małek, Jacek Banach, Grzegorz Durło, Automatyzacja procesu produkcji oraz kontrola parametrów sadzonek hodowanych w szkółkach kontenerowych.....  | 339        |
| Mariusz Kormanek, Systemy sterowania i kontroli pracy w nowoczesnych ciągnikach i maszynach rolniczych i leśnych .....  | 363        |
| Łukasz Mateusiak, Paweł Tylek, Mariusz Kormanek, Zdzisław Kaliniewicz, Zastosowanie pomiaru admitancji do określenia stanu fizjologicznego sadzonek buka pospolitego ( <i>Fagus sylvatica</i> L.) i dębu szypułkowego ( <i>Quercus robur</i> L.).....   | 383        |
| Danuta Owoc, Porównanie właściwości fizycznych wybranych odmian owoców orzecha włoskiego ( <i>Juglans regia</i> L.).....  | 397        |
| Krzysztof Słowiński, Eksploatacyjno-ekonomiczne badania piły do przycinania gałęzi Pronar GP200.....  | 411        |
| Krzysztof Słowiński, Udatność przesadzania jodły pospolitej ( <i>Abies alba</i> Mill.) w zależności od jej wysokości i wielkości bryły korzeniowej .....  | 423        |
| Paweł Tylek, Józef Walczyk, Tadeusz Juliszewski, Paweł Kielbasa, Zdzisław Kaliniewicz, Florian Adamczyk, Jan Szczepaniak, Ryszard Tadeusiewicz, Mirosław Jabłoński, Jakub Klocek, Adam Piłat, Łukasz Mateusiak, Mechanizacja i automatyzacja zabiegu przedsięwzięcia skaryfikacji żołądzi.....                      | 433        |
| Paweł Tylek, Józef Walczyk, Janusz M. Sowa, Grzegorz Szewczyk, Mariusz Kormanek, Marcin Pietrzykowski, Tadeusz Juliszewski, Paweł Kielbasa, Marek Szychta, Florian Adamczyk, Jan Szczepaniak, Tomasz Szulc, Ryszard Tadeusiewicz, Koncepcja automatycznej sadzarki do sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym..... | 451        |

## Wprowadzenie

*Bywa tak, że zmiany organizacyjne pociągają za sobą zmiany jakościowe. Przykładem jest ostatnia reorganizacja struktury Wydziału Leśnego Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, w rezultacie której połączono ze sobą szereg Zakładów działających w ramach Instytutów i utworzono pięć Katedr. W nowo powstałej Katedrze Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej skupiono prawie wszystkie dyscypliny techniczne Wydziału, tworząc duży zespół badawczy i dydaktyczny o charakterze interdyscyplinarnym. Jeżeli do tego dołożyć zmiany personalne w zarządzaniu jednostką oraz wdrożone do praktyki wymogi parametryzacji działalności jednostek badawczych, to mamy bezsprzecznie do czynienia z nową sytuacją funkcjonowania Katedry.*

*Monografia, którą przekazujemy czytelnikowi do rąk, to pierwsze wydanie drukiem referatów naukowych, prezentowanych przez pracowników nowej Katedry, początkujące – miejmy nadzieję – cykliczne publikacje naukowe, towarzyszące organizowanym szkoleniom, konferencjom i seminariom naukowym. Treść monografii obejmuje aktualne problemy naukowe, badawcze i badawczo-rozwojowe, które są podejmowane w jednostce, i zawiera wyniki niektórych zrealizowanych lub realizowanych grantów oraz badań własnych i zamawianych.*

*Mamy nadzieję, że artykuły opublikowane w monografii znajdą zainteresowanie czytelników, pobudzą do twórczych i owocnych dyskusji, a treści w nich zawarte będą służyły pogłębianiu wiedzy z zakresu użytkowania lasu, inżynierii i techniki leśnej.*

Darz Bór

Kraków, październik 2020 roku

(-) Prof. dr hab. inż. Janusz Sowa





## Aktualne zagadnienia użytkowania lasu



# Uszkodzenia sortymentów sosnowych pozyskiwanych za pomocą harwestera

Dariusz Kulak

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: dariuszkulak@urk.edu.pl

## Abstrakt

Pozyskiwanie drewna za pomocą maszyn wielooperacyjnych w Polsce w ostatnich latach staje się coraz popularniejsze. Szacuje się, że obecnie w ten sposób pozyskiwana jest już ponad 1/3 surowca drzewnego. Za takim rozwiązaniem przemawiają jego walory ergonomiczne, wydajnościowe i ekonomiczne. Do mankamentów maszynowego pozyskiwania drewna należy m.in. możliwość uszkodzania pozyskiwanego drewna, głównie za pomocą dwóch zespołów roboczych głowicy harwesterowej – okrzyszującego, w postaci noży, oraz zespołu posuwu składającego się z walców posuwowych, przemieszczających drewno przez głowicę obróbczą.

Badania terenowe wykonano w Nadleśnictwie Staszów, w drzewostanach sosnowych IV klasy wieku, w których pozyskiwano drewno za pomocą harwestera John Deere 1170E wyposażonego w standardową głowicę John Deere H414. Prace pozyskaniowe wykonywane były w czterech sezonach (porach roku) – wiosną, latem, jesienią oraz zimą. Pomiarom podlegało po 25 pięciometrowych kłód odziomkowych, uzyskanych w każdym z sezonów. Określono ich miąższość oraz wykonano cyfrowe fotografie, na podstawie których za pomocą programu ArcGIS obliczono powierzchnię zdarć kory, uwzględniając rozróżnienie na uszkodzenia spowodowane przez zespoły: okrzyszujący i posuwowy. Na wszystkich analizowanych kłodach stwierdzono występowanie zdarć kory powstałych wskutek pracy zespołów roboczych głowicy harwesterowej. Przeciętnie zespół okrzyszujący, niezależnie od sezonu wykonawstwa prac, powodował 5 zdarć kory na każdej kłodzie. Zespół posuwowy spowodował najwięcej (10) uszkodzeń na surowcu pozyskanym wiosną, istotnie statystycznie mniej na drewnie pozyskanym w okresie letnim i zimowym, kiedy to na każdej kłodzie powstawało przeciętnie 6–7 uszkodzeń. Zespół okrzyszujący latem powodował zdarcia kory o przeciętnie powierzchni blisko 500 cm<sup>2</sup>, znacząco większej od powierzchni kory uszkodzonej

na surowcu pozyskanym zimą, kiedy to przeciętna powierzchnia uszkodzeń wynosiła zaledwie ok. 150 cm<sup>2</sup>. Z kolei praca walców zespołu posuwowego w okresie zimowym skutkowałą powstaniem zdarć kory o przeciętnej powierzchni wynoszącej niecałe 200 cm<sup>2</sup>, co było wartością istotnie mniejszą od uszkodzeń występujących w pozostałych sezonach, cechujących się dużą zmiennością powierzchni uszkodzeń, w granicach 600–1400 cm<sup>2</sup>. Łącznie, procentowy udział kory zdartej przez obydwu zespoły robocze głowicy harwesterowej dla surowca pozyskanego zimą był najmniejszy, wynosił ok. 3% i istotnie różnił się od udziału stwierdzonego dla drewna pozyskanego w pozostałych porach roku, kiedy to zdarcia kory wystąpiły na ok. 10% powierzchni kłód.

W związku z tym, mając na uwadze ochronę pozyskiwanego drewna sosnowego przed możliwością jego infekcji przez grzyby siniznowe w miejscach, gdzie kora została zdarta podczas pozyskiwania kłód głowicą harwestera, oraz ograniczenie dalszego rozwoju sinizn w niskich temperaturach, należy zalecać maszynowe pozyskiwanie drewna sosnowego w okresie zimowym.

**Słowa kluczowe:** zdarcia kory, głowica harwestera, pora roku

## 1. Wstęp

Jeszcze do końca lat dziewięćdziesiątych XX wieku prace z zakresu pozyskiwania drewna wykazywały silną sezonowość – większość z nich realizowana była w okresie jesienno-zimowym. Prywatyzacja rynku usług leśnych, która nastąpiła po tej dekadzie, skutkowałą m.in. stopniowym zanikiem charakterystycznej sezonowości prac leśnych (Bluszkowska i Nurek 2010). Firmy zewnętrzne, zajmujące się usługowym wykonawstwem m.in. pozyskiwania i zrywki drewna, z oczywistych względów zainteresowane są tym, by prace realizowane były w miarę możliwości przez cały rok, bez okresów przestojów. Ponadto, od czasu prywatyzacji usług leśnych do chwili obecnej nastąpiły znaczące zmiany w zakresie ilości pozyskiwanego w polskich lasach surowca drzewnego. Jeszcze w 1990 roku ogółem pozyskano 18,5 mln m<sup>3</sup> drewna (GUS 2000), zaś w 2018 roku już 45,5 mln m<sup>3</sup> (GUS 2019). Rozmiar zadań gospodarczych wzrósł zatem w tym okresie blisko dwuipółkrotnie, co bez mechanizacji prac, szczególnie z zakresu pozyskiwania drewna, byłoby niemożliwe. Tradycyjne technologie ręczno-maszynowe, wykorzystujące pilarki spalinowe do ścinki, okrzesywania i manipulacji surowca drzewnego, cechują się bowiem relatywnie małą wydajnością. Ponadto brakuje chętnych do podjęcia trudnej, niebezpiecznej i słabo opłacanej pracy na stanowisku drwala – operatora pilarki (Długosiewicz i Grzebieniowski 2009). W zakresie usługowego wykonawstwa prac leśnych w ostatnich latach coraz bardziej widoczny jest trend odpływu pracowników do innych sektorów gospodarki, co skutkuje pogłębiającym się problemem braków kadrowych. Realizacja planów dotyczących ilości pozyski-



wanego drewna jest możliwa wyłącznie poprzez wykorzystanie specjalistycznych maszyn ścinkowo-okrzesująco-przerzynających, tzw. harwesterów. Jedną z ich cech charakterystycznych jest duża wydajność pracy, a przy dobrej organizacji pracy również niskie koszty jednostkowe pozyskiwania drewna (Szewczyk i Kulak 2013). Walory te powodują stały wzrost ilości drewna pozyskanego z użyciem maszyn wielooperacyjnych. Na początku lat dziewięćdziesiątych szacowano, że ok. 0,5% grubizny pozyskiwano za pomocą harwesterów (Więsik i Nurek 2002). W 2012 roku maszynowy model pozyskiwania drewna zastosowano do uzyskania ok. 10% drewna (Tomczak i in. 2012). Według najnowszych analiz (Bodył 2019) w Polsce w 2018 roku maszynowo pozyskano ponad 35% surowca drzewnego, przy czym są nadleśnictwa, głównie dotknięte wielkopowierzchniowymi kłękami spowodowanymi przez wiatr, pozyskujące w ten sposób nawet ponad 90% drewna.

Jednym z mankamentów maszynowego pozyskiwania drewna są uszkodzenia surowca powstałe na skutek działania zespołów roboczych głowicy harwesterowych. Do podstawowych elementów głowicy harwesterowej zalicza się zespoły: pozycjonujący, tnący, pomiarowy, posuwowy i okrzesujący (Sowa i in. 2013). Zespół okrzesujący składa się ze stałych i ruchomych noży okrzesujących, o kątach skrawania i przyłożenia dostosowanych do specyfiki dominującego gatunku pozyskiwanych drzew (Aniszewska i in. 2011). Jego praca oprócz odcinania gałęzi może powodować zdarcia kory, a nawet łyka i drewna, szczególnie w przypadku występowania krzywizn obrabianych sortymentów. Kolejnym zespołem głowicy harwestera mogącym uszkadzać obrabiane sortymenty jest zespół posuwowy, pozwalający na przemieszczanie surowca w głowicy obróbczej. Odpowiada on za siłę posuwu obrabianego drewna, która znacznie wpływa na jakość okrzesywania drewna. Im większa siła posuwu, tym okrzesywanie grubszych gałęzi charakterystycznych dla polskich sosen jest skuteczniejsze (Sowa i in. 2013). Głowice harwesterowe wyposażone są w 2 do 4 walców posuwowych, ich budowa i materiał, którym stykają się z drewnem (stal, guma), mają znaczący wpływ na uszkodzenia obrabianych sortymentów. Uszkodzenia drewna powodują powstawanie wad wtórnych podczas dłuższego przechowywania surowca w składnicy. Na drewnie w miejscach pozbawionych kory mogą się pojawić przebarwienia (sinizna, brunatnica itp.) wywołane wniknięciem grzybów patogenicznych. Często są niezauważalne gołym okiem, uwidaczniają się dopiero w trakcie obróbki drewna. Skutkiem tego może być obniżenie jakości surowca, powodujące zmniejszenie jego wartości handlowej (Żółciak 1997). Uszkodzenia pobocznic drewna powstałe w trakcie jego pozyskiwania za pomocą harwesterów pojawiły się w katalogu wad drewna w grupie uszkodzeń mechanicznych jako „uszkodzenia technologiczne” od stycznia 2020 roku (Warunki techniczne... 2019). Jednak pomiarowi podlega jedynie głębokość takich uszkodzeń poda-

wana w centymetrach [cm]. Uszkodzenia podlegają pomiarom, jeżeli ich skutkiem jest sinizna lub brunatnica. Do powstawania sinizny przyczynia się już samo usunięcie kory stanowiącej warstwę ochronną drewna przed infekcją i rozwojem grzybów powodujących tę wadę, które przenikają do wnętrza w miejscach przerzynki, okrzesywania, w strefach uszkodzeń pobocznic przez noże okrzyszujące czy rolki głowicy harwestera (Zarzyński 2003).

Celem pracy było określenie rozmiaru zdarć kory powstałych na surowcu sosnowym w procesie jego pozyskiwania przez poszczególne zespoły głowicy harwesterskiej oraz porównanie ich parametrów dla surowca uzyskanego w okresie wiosennym, letnim, jesiennym oraz zimowym. Zakres badań ograniczono do drzewostanów IV klasy wieku, w których drewno pozyskiwane było za pomocą harwestera John Deere 1170E wyposażonego w standardową głowicę wielooperacyjną H414.

## 2. Metodyka

Prace terenowe przeprowadzono na terenie Nadleśnictwa Staszów, w czterech oddziałach z dominującym udziałem sosny IV klasy wieku, w których wykonywano trzebież późną w wariacie maszynowym. Prace pozyskaniowe zrealizowane zostały za pomocą popularnego, dużego, sześciokołowego harwestera żrębowego – John Deere 1170E (tab. 1).

**Tabela 1.** Dane techniczne harwestera John Deere 1170E

| Parametr   | Wartość                        |
|--|--------------------------------|
| Masa [kg]  | 17900                          |
| Długość / szerokość / wysokość [mm]                      | 7080/2820/3655                 |
| Prześwit [mm]  | 630                            |
| Silnik (model / pojemność [cm <sup>3</sup> ] / moc [kW]) | Diesel Power Tech+ JD/6800/145 |
| Opony (przód // tył)                                     | 24,5" 710/40 // 34,0" 710/55   |
| Żuraw (model / zasięg [mm] / kąt obrotu [°])             | JD CH6/10000/220               |
| Prędkość jazdy [km/h]                                    | 0–25                           |

Nośnik harwestera wyposażony był w standardową głowicę John Deere typu H414 (tab. 2).

**Tabela 2.** Dane techniczne głowicy harwesterowej John Deere H414

|   |                    |
|---|--------------------|
| Szerokość maksymalna<br>[mm]                                      | 1520               |
| Wysokość bez rotatora<br>[mm]                                     | 1400               |
| Masa bez rotatora<br>[kg]   | 1030               |
| Maksymalna średnica ścinki<br>[mm]                                | 620                |
| Długość prowadnicy<br>[mm]  | 750                |
| Podziałka piły łańcuchowej<br>["]                                 | 0,404              |
| Prędkość piły łańcuchowej<br>[m/s]                                | 40                 |
| Liczba i typ walców posuwowych                                    | 4 walce stalowe    |
| Siła uciągu walców<br>[kN]  | 27                 |
| Maksymalna prędkość okrzesywania<br>[m/s]                         | 6                  |
| Maksymalne otwarcie walców<br>[mm]                                | 640                |
| Noże okrzesujące  | 4 ruchome, 2 stałe |
| Średnica okrzesywania<br>[mm]                                     | 430                |
| Maksymalne otwarcie górnych / dolnych noży<br>[mm]                | 610/660            |
| Ciśnienie robocze<br>[MPa]  | 28                 |
| Pompa hydrauliczna – wymagana wydajność<br>[dm <sup>3</sup> /min] | 200–280            |

Źródło: Sowa i in. 2013

Prace pozyskaniowe przeprowadzono w 4 turach: wiosną – w maju, przy temperaturze ok. 15°C, latem – w lipcu, przy temperaturze ok. 25°C, jesienią – w październiku, przy temperaturze ok. 10°C, oraz zimą – w grudniu, przy temperaturze ok. -10°C. Za pomocą harwestera wykonana została ścinka i okrzesywanie drzew z wyrobieniem kłód o długości 5 m. Bezpośrednio po zakończeniu prac pozyskaniowych, jeszcze na powierzchni zrębowej, dokonano pomiarów długości wyrobionego surowca (za pomocą taśmy, z dokładnością do 1 cm) oraz średnicy środkowej (przy użyciu średnicomierza, z dokładno-

ścią do 1 mm). Do pomiarów wykorzystano wyłącznie kłody odziomkowe, by uniknąć obserwacji uszkodzeń kory wynikających z usunięcia gałęzi w trakcie okrzesywania. Dla każdego z wariantów wykonano za pomocą aparatu cyfrowego po 5 zdjęć 25 losowo wybranych kłód. Fotografie wykonywano prostopadłe do powierzchni kłody, z odległości 1 m (ryc. 1).



Ryc. 1. Kłoda sosnowa z widocznymi uszkodzeniami od zespołu podającego głowicy (fot. K. Ryglewicz)

W ramach prac kameralnych na podstawie średnicy i długości kłód obliczono ich miąższość. Za pomocą programu ArcGIS dokonano również obróbki wykonanych fotografii. Powierzchnia uszkodzeń widocznych na zdjęciach została poddana wektoryzacji typu poligonowego. Na warstwie rastrowej wyrysowano poligony obrazujące kształt uszkodzeń. W kolejnym kroku, przeliczając piksele na  $\text{cm}^2$ , ustalono rzeczywistą powierzchnię uszkodzeń z podziałem na te powstałe w wyniku pracy zespołów podającego i okrzesywającego głowicy wielooperacyjnej. Uzyskane dane zestawiono w postaci bazy, która posłużyła do dalszych charakterystyk i testów statystycznych, wykonanych za pomocą programu Statistica (StatSoft Inc. 2014).

### 3. Wyniki

W trakcie prac terenowych pomiarom poddano 100 odziomkowych kłód sosnowych, pięciometrowej długości, o łącznej miąższości  $40,5 \text{ m}^3$ . Kłody pozyskiwane w poszczególnych sezonach cechowały się zbliżonymi wymiarami i miąższością (tab. 3).

Średnia średnica pozyskanych kłód odziomkowych wynosiła ok. 28–32 cm, zaś miąższość –  $0,32\text{--}0,39 \text{ m}^3$ .

Na całym analizowanym materiale badawczym w postaci kłód drewna wielko-wymiarowego stwierdzono uszkodzenia powstałe w procesie ich wyróbki (tab. 4).

**Tabela 3.** Podstawowe parametry pozyskanych kłód

| Sezon  | Średnica:                                | Mięższość:  |
|--------|--|---|
|        | średnia / minimalna / maksymalna<br>[cm] | średnia / minimalna / maksymalna<br>[m <sup>3</sup> ] |
| Wiosna | 28,4/21/51                               | 0,359/0,182/0,637                                     |
| Lato   | 29,5/22/34                               | 0,353/0,207/0,468                                     |
| Jesień | 31,8/24/39                               | 0,394/0,220/0,592                                     |
| Zima   | 27,8/19/34                               | 0,315/0,179/0,449                                     |

**Tabela 4.** Udział uszkodzonych kłód

| Sezon  | Uszkodzenia od zespołu<br>okrzesującego<br>[%] | Uszkodzenia od<br>zespołu posuwu<br>[%] | Łączne<br>uszkodzenia<br>[%] |
|--------|--|---|------------------------------|
| Wiosna | 80   | 100                                     | 100                          |
| Lato   | 96   | 100                                     | 100                          |
| Jesień | 72   | 100                                     | 100                          |
| Zima   | 80   | 96                                      | 100                          |

Najczęstszą przyczyną zdarć kory była praca zespołu posuwowego głowicy harwesterskiej. Wszystkie kłody pozyskiwane w okresie od wiosny do jesieni nosiły ślady uszkodzeń od rolek posuwowych. Jedyna kłoda bez takich uszkodzeń pozyskana została w okresie zimowym. Uszkodzenia spowodowane nożami okrzesującymi najczęściej występowały na surowcu pozyskanym latem, pojawiły się również na 80% kłód pozyskanych wiosną i zimą. Zdzieranie kory podczas pracy noży okrzesujących głowicy obróbczej było najmniej prawdopodobne przy pozyskiwaniu wykonanym jesienią.

Liczba zdarć kory spowodowanych przez zespoły robocze głowicy harwesterskiej jest cennym źródłem informacji, charakteryzującym wpływ procesu wyróbki sortymentów na poziom ich uszkodzeń. Test Shapiro-Wilka (tab. 5) wykazał, że zgodnością z rozkładem normalnym cechowały się jedynie rozkłady liczebności zdarć kory od zespołu okrzesującego dla sezonu wiosennego i letniego oraz od zespołu posuwu dla sezonu letniego. Dalsze charakterystyki tej zmiennej przeprowadzono zatem na podstawie statystyk i testów nieparametrycznych.

Jak wykazał test Kruskala-Wallisa ( $H = 6,304$ ,  $p = 0,098$ ), liczba uszkodzeń od zespołu okrzesującego stwierdzonych na jednej kłodzie nie różnicowała istotnie surowca pozyskanego w poszczególnych sezonach. Mediana liczby zdarć kory wynosiła 5 uszkodzeń, przy wartości minimalnej równej 1 i maksymalnej równej 23 szt. W przypadku uszkodzeń spowodowanych przez zespół

**Tabela 5.** Wyniki testowania zgodności liczby zdarć kory przypadających na 1 kłodę z rozkładem normalnym

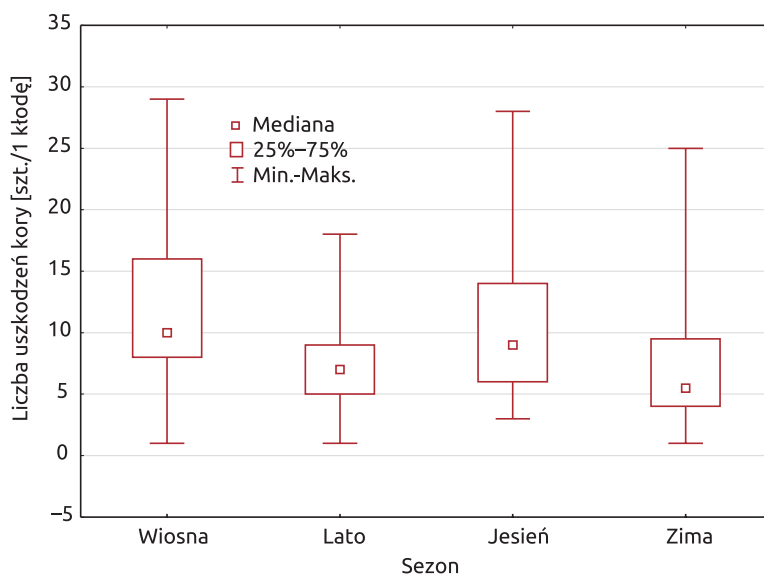
| Sezon  | Uszkodzenia od zespołu okrzesującego |                                 | Uszkodzenia od zespołu posuwu |                                 |
|--------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
|        | Wartość statystyki (W)               | Obliczony poziom istotności (p) | Wartość statystyki (W)        | Obliczony poziom istotności (p) |
| Wiosna | 0,934                                | 0,125                           | 0,899                         | 0,018                           |
| Lato   | 0,962                                | 0,498                           | 0,929                         | 0,086                           |
| Jesień | 0,882                                | 0,029                           | 0,837                         | 0,001                           |
| Zima   | 0,769                                | 0,000                           | 0,840                         | 0,001                           |

posuwu głowicy harwestera sezon wykonawstwa prac pozyskaniowych istotnie wpłynął na liczebność zdarć kory ( $H = 13,521$ ,  $p = 0,003$ ).

Za pomocą testu wielokrotnych porównań ustalono istotność różnic liczby uszkodzeń kory przypadających na 1 kłodę pomiędzy poszczególnymi sezonami. Liczba uszkodzeń po wiosennym pozyskiwaniu była najwyższa ( $me = 10$ ) i statystycznie istotnie różna od liczby uszkodzeń po pozyskaniu letnim ( $me = 7$ ) i zimowym ( $me = 5,5$ ). Pozyskanie w okresie jesiennym skutkowało powstaniem przeciętnej liczby uszkodzeń na sortymencie sosnowym ( $me = 9$ ), nieróżniącej się istotnie od liczby wad powstałych po pracach wykonanych w pozostałych sezonach (ryc. 2).

Przeciętna powierzchnia zdarć kory z jednej kłody cechowała się zgodnością z rozkładem normalnym wyłącznie w przypadku surowca pozyskiwanego latem i uszkodzeń od zespołu okrzesującego oraz surowca pozyskiwanego jesienią i uszkodzeń od zespołu posuwu (tab. 6). Do dalszych analiz tej zmiennej wykorzystano zatem statystyki nieparametryczne.

Test rang Kruskala-Wallisa wykazał, że zarówno uszkodzenia spowodowane przez zespół okrzesujący ( $H = 11,313$ ,  $p = 0,010$ ), jak i zespół posuwu ( $H = 31,638$ ,  $p = 0,010$ ) istotnie różniły się powierzchnią zdartej kory w zależności od sezonu wykonawstwa prac. Jak pokazał test wielokrotnych porównań, powierzchnia zdarć kory powstałych na skutek pracy zespołu okrzesującego wykazywała istotne statystycznie zróżnicowanie jedynie pomiędzy surowcem pozyskany latem, cechującym się największą powierzchnią zdarć ( $me = 498 \text{ cm}^2$ ), i pozyskany zimą, charakteryzującym się najmniejszą powierzchnią uszkodzeń kory ( $me = 155 \text{ cm}^2$ ) (ryc. 3). Drewno pozyskane w okresie wiosennym ( $me = 224 \text{ cm}^2$ ) i jesiennym ( $me = 198 \text{ cm}^2$ ) nie wykazywało istotnego zróżnicowania pod względem powierzchni uszkodzeń w stosunku do pozyskanego w pozostałych sezonach.

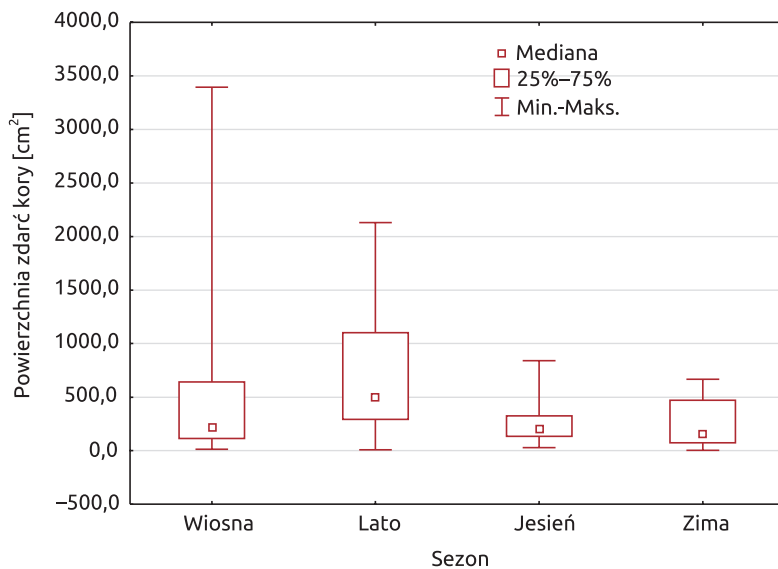


Ryc. 2. Statystyki opisowe liczby zdarzeń kory przypadających na 1 kłodę, spowodowanych pracą zespołu posuwu

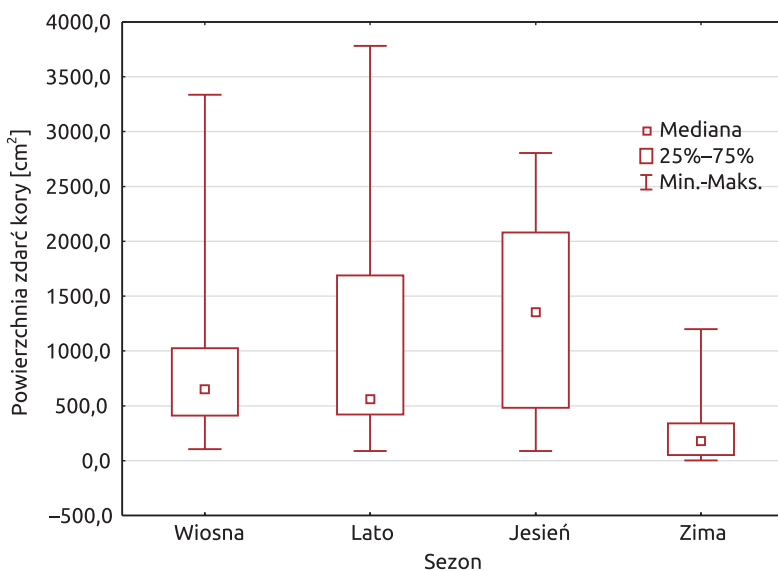
Tabela 6. Wyniki testowania zgodności powierzchni zdarzeń kory przypadających na 1 kłodę z rozkładem normalnym

| Sezon  | Uszkodzenia od zespołu okrzesującego |                                 | Uszkodzenia od zespołu posuwu |                                 |
|--------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
|        | Wartość statystyki (W)               | Obliczony poziom istotności (p) | Wartość statystyki (W)        | Obliczony poziom istotności (p) |
| Wiosna | 0,663                                | 0,000                           | 0,734                         | 0,000                           |
| Lato   | 0,919                                | 0,058                           | 0,813                         | 0,000                           |
| Jesień | 0,863                                | 0,013                           | 0,923                         | 0,060                           |
| Zima   | 0,866                                | 0,010                           | 0,767                         | 0,000                           |

Powierzchnia zdarzeń kory powstałych w wyniku pracy zespołu posuwu wykazywała istotne różnicowanie pomiędzy kłodami pozyskanymi zimą, cechującymi się najmniejszą powierzchnią uszkodzeń kory ( $me = 179 \text{ cm}^2$ ), i kłodami uzyskanymi w pozostałych sezonach – wiosennym ( $me = 650 \text{ cm}^2$ ), letnim ( $me = 562 \text{ cm}^2$ ) i jesiennym ( $me = 1355 \text{ cm}^2$ ) (ryc. 4). Jednocześnie drewno pozyskane w tych porach roku nie wykazywało istotnych różnic pomiędzy sobą pod względem powierzchni uszkodzeń.



**Ryc. 3.** Statystyki opisowe przeciętnej powierzchni zdarć kory spowodowanych pracą zespołu okrzyszującego



**Ryc. 4.** Statystyki opisowe przeciętnej powierzchni zdarć kory spowodowane pracą zespołu posuwu

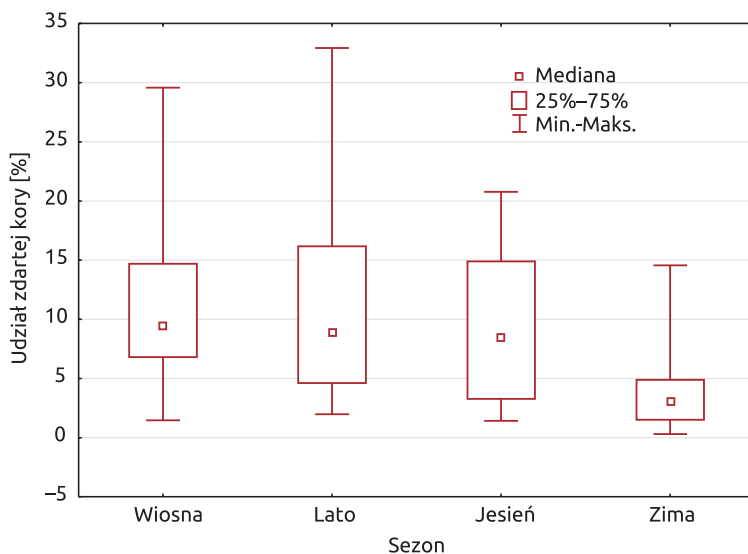


Sumaryczny udział uszkodzeń kory, powstałych w wyniku pracy zespołu okrzusującego i zespołu posuwu, w stosunku do całkowitej powierzchni kory, widocznej na wykonanych fotografiach, we wszystkich sezonach pozyskania cechował się rozkładami niezgodnymi z rozkładem normalnym (tab. 7). Zmienną tę poddano dalszej analizie za pomocą testów i charakterystyk nieparametrycznych.

**Tabela 7.** Wyniki testowania zgodności udziału procentowego łącznych zdarzeń kory z rozkładem normalnym

| Sezon  | Wartość statystyki (W) | Obliczony poziom istotności (p) |
|--------|------------------------|---------------------------------|
| Wiosna | 0,907                  | 0,026                           |
| Lato   | 0,818                  | 0,000                           |
| Jesień | 0,908                  | 0,027                           |
| Zima   | 0,821                  | 0,001                           |

Test Kruskala-Wallisa wykazał ( $H = 20,991$ ,  $p = 0,000$ ), że różnice pomiędzy udziałem procentowym zdarzeń kory powstałych podczas pozyskiwania drewna w analizowanych porach roku (sezonach) są istotne statystycznie. Za pomocą testu wielokrotnych porównań ustalono, iż statystycznie istotne różnice wystąpiły pomiędzy udziałem zdartej kory z surowca pozyskanego zimą, który cechował się najmniejszą liczbą uszkodzeń ( $me = 3,03\%$ ), i pozyskanego w pozostałych sezonach (ryc. 5). Odsetek uszkodzeń kory kłód uzyskanych



**Ryc. 5.** Statystyki opisowe udziału kory uszkodzonej przez zespoły okrzusujący oraz posuwowy głowicy harwestera

wiosną, latem oraz jesienią był na zbliżonym poziomie, wynoszącym odpowiednio (mediana): 9,45%, 8,86% oraz 8,54%. Surowiec pozyskany w tych sezonach nie wykazywał istotnego statystycznie zróżnicowania pod względem udziału uszkodzonej kory.

#### 4. Dyskusja

Pozyskiwany surowiec drzewny cechował się zbliżoną średnicą i miąższością, co pozwala przypuszczać, że charakteryzowała go również podobna grubość kory (Białobok i in. 1993). Do badań wykorzystano wyłącznie kłody odziomkowe, bez gałęzi, by nie uwzględniać odsłoneń drewna powstałych na skutek odcięcia gałęzi w ramach okrzesywania surowca. Ponadto uwzględniono wyłącznie proste kłody, aby uniknąć zdarć kory wynikłych z przesuwania głowicy przez krzywizny kłód. W całym doświadczeniu pozyskiwanie i wyróbka sortymentów drzewnych wykonane zostały za pomocą głowicy tego samego typu, zatem można przyjąć założenie, że czynnikiem decydującym o powstawaniu i wymiarach uszkodzeń kory był sezon wykonawstwa prac pozyskaniowych.

Głowica harwesterowa stanowi jeden z głównych podzespołów w wielooperacyjnych maszynach do pozyskiwania drewna. Jest ona agregatowana z maszyną bazową. Parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne głowicy harwesterowa mają wpływ na wydajność, jakość oraz dokładność obróbki drewna przy pozyskaniu (Sowa i in. 2013). Do uszkodzeń wyrabianego surowca dochodzi głównie na skutek pracy zespołów okrzesywającego i posuwowego głowicy. Jakość okrzesywania stanowi w warunkach polskich największy problem, co można wiązać z cechami morfologicznymi sosny rosnącej w naszym kraju. Najczęściej ma ona stosunkowo niewielką liczbę gałęzi, jednak o znacznej grubości, co powoduje większe opory przy ich odcinaniu od pnia. Dlatego właśnie w polskich warunkach bardzo duże znaczenie dla jakości okrzesywania ma właściwy kąt skrawania noża, niewielki kąt przyłożenia oraz duża siła posuwu walców posuwowych, która przekłada się na siłę okrzesywania (Mikleš 1995). Możliwość uzyskania właściwej siły posuwu walców zależy głównie od zapewnienia im wystarczająco dużej siły docisku do drewna oraz uzyskania znacznej powierzchni ich styku z drewnem (Aniszewska i in. 2011). Stalowe walce posuwowe, w jakie wyposażona była głowica John Deere H414 wykorzystana w przedstawionym doświadczeniu, najczęściej posiadają zęby umożliwiające uzyskanie zwiększonej siły posuwu. Zęby te jednocześnie mogą powodować zwiększone zdzieranie kory z wyrabianego surowca, a nawet przy napotkaniu większego oporu – np. podczas okrzesywania lub na krzywiznie – dodatkowo frezować korę lub drewno (Nuutinen i in. 2010). W tym kontekście zastosowana

głowica mogła powodować większe uszkodzenia wyrabianych sortymentów niż np. głowica wyposażona w gumowe walce posuwowe.

Analizowane w niniejszej pracy zagadnienie oceny rozmiaru zerwań kory przez głowicę harwestera ma duże znaczenie praktyczne. Wykazano (Lee i Gibbs 1996; Szweczyk i in. 2019), że drewno pozyskane głowicą harwesterową jest znacznie silniej porażone przez siniznę niż pozyskane pilarkami spalinyowymi. Występują ponadto zależności korelacyjne pomiędzy wielkością sinizny i ubytków kory. Dzieje się tak dlatego, że kora stanowi warstwę ochronną przed utratą wilgoci i wnikaniem grzybów (Karaszewski i in. 2016). Infekcje grzybami siniznowymi rozwijające się w korze są groźniejsze i rozleglejsze od tych, które obejmują czoła kłód w związku z większą ilością punktów wnikania grzybów (Uzunovic i Webber 1998). Drewno z wadami w postaci sinizny ma najczęściej mniejszą wartość rynkową niż pozbawione tej wady, co wiąże się z niemożnością jego odbiórki w wyższej klasie jakościowo-wymiarowej. Dla przykładu według normy europejskiej (EN 1927-2:2008 (E)) udziału sinizny nie ogranicza się wyłącznie w przypadku surowca najniższej klasy D, a w materiale najwyższych klas (A i B) ich obecność jest niedopuszczalna. Z tego względu liczne występowanie surowca dotkniętego sinizną może wpływać nawet na wynik finansowy gospodarstw leśnych.

Na możliwość powstawania zróżnicowanych powierzchniowo zdarć kory podczas operacji obróbczych głowicą harwesterową w różnych porach roku zwracało uwagę wielu badaczy (Hallonberg i in. 2004; Nuutinen i in. 2010). Według Karaszewskiego i in. (2018) sezon wykonania prac pozyskaniowych za pomocą harwestera w drzewostanach sosnowych wpływa na głębokość uszkodzeń powstałych podczas działań zespołu posuwowego. Praca w okresie zimowym i wiosennym powoduje uszkodzenia wyraźnie płytsze w stosunku do tych, powstałych w trakcie pozyskiwania w sezonie letnim. W niniejszej pracy wykazano, że z punktu widzenia ograniczania uszkodzeń kory najkorzystniejsze jest pozyskiwanie zimą. Należy się liczyć w tym okresie ze zdarciem przez głowicę obróbczą ok. 3% kory wyrabianych kłód. Prace prowadzone w pozostałych porach roku – wiosną, latem, jesienią – skutkują zbliżonymi poziomami zdarć kory, wynoszącymi niecałe 10%. Według Gierasimova i Selivestrova (2010) pozyskiwanie drewna sosnowego za pomocą harwestera w okresie zimowym uszkadza do 7% kory, czyli ponad 2 razy więcej niż stwierdzono w niniejszych badaniach. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że prace tych badaczy wykonane zostały inną głowicą obróbczą. Ten sam zespół autorów podaje, że pozyskiwanie w okresie letnim wiąże się ze zdarciem kory dochodzącymi do 9%, co daje wartość bardzo zbliżoną do wykazanej w przeprowadzonym i przedstawionym wyżej doświadczeniu. Udział zdartej kory w trakcie pozyskiwania drewna harwesterem jest cechą silnie zmienną. Wiąże się ją zarówno z gatunkiem wyrabianego surowca, jak i z budową rolek posuwu

głowicy wielooperacyjnej (Nuutinen i in. 2010). Kusiak i Śliwiński (2014) na podstawie obserwacji polskich drzewostanów po pozyskiwaniu maszynowym ocenili udział kłód z uszkodzoną korą nawet na ponad 50%, podczas gdy w niniejszym doświadczeniu obecność zdartej kory w badanym surowcu nie przekraczała maksymalnie 35% w sezonie letnim.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Pozyskiwanie i wyróbka drewna za pomocą głowicy harwesterowej powoduje zdarcia kory z obrabianych kłód. Wszystkie ze 100 analizowanych kłód nosiły takie uszkodzenia. Liczba zdarć kory spowodowanych pracą zespołu okrzęsującego nie różniła się istotnie w zależności od sezonu wykonawstwa prac. Odmienny trend zaobserwowano w przypadku zespołu posuwowego – dla surowca pozyskanego wiosną stwierdzono największą liczbę zdarć kory, istotnie większą niż na surowcu pozyskanym latem i zimą. Przeciętna powierzchnia zdarć kory powstałych na skutek pracy obydwu zespołów roboczych była istotnie mniejsza dla surowca pozyskanego zimą. Zespół okrzęsujący przyczynił się do powstania uszkodzeń o powierzchni istotnie większej na surowcu pozyskanym latem, zaś zespół posuwu spowodował uszkodzenia nieróżniące się znacząco powierzchnią w sezonach wiosennym, letnim i jesiennym. Należy zaznaczyć, że we wszystkich sezonach powierzchnia uszkodzeń spowodowanych przez zespół okrzęsujący była mniejsza od powierzchni uszkodzeń wywołanych pracą zespołu podającego. Łączny, procentowy udział kory zdartej przez obydwie zespoły robocze głowicy harwesterowej dla surowca pozyskanego zimą był najmniejszy (ok. 3% powierzchni kłód) i istotnie różny od udziału stwierdzonego dla drewna pozyskanego w pozostałych porach roku (ok. 10% powierzchni). Zatem, mając na względzie ochronę drewna przed uszkodzeniami spowodowanymi pracą elementów roboczych głowicy harwesterowej, należy cenniejszy surowiec pozyskiwać w sezonie zimowym. Mniejsze uszkodzenia kory oraz niższe temperatury panujące w tym okresie powinny znacząco obniżyć obecność sinizna na pozyskiwanym drewnie.

## Literatura

- Aniszewska M., Brzózko J., Skarżyski J. 2011. Harwestery do pozyskiwania drewna stosowane w polskich lasach. Część 2. Głowice harwesterowe. Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna, 2, 4–7.
- Białobok S., Boratynski A., Bugała W. Red. 1993. Biologia sosny zwyczajnej. PAN – Instytut Dendrologii, Sorus, Poznań–Kórnik.

- Bluszkowska U., Nurek T.** 2010. Badanie sezonowości prac leśnych. Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna, 5, 22–24.
- Bodył M.** 2019. Rozmiar pozyskania maszynowego w Polsce. Drwał, 166(3), 5–9.
- Długosiewicz L., Grzebieniowski W.** 2009. Porównanie wybranych technologii pozyskania drewna pod względem wydajności i kosztów. Inżynieria Rolnicza, 13, 7–13.
- EN 1927-2. 2008. Qualitative classification of softwood round timber – part 2: Pines.
- Gerasimov Y., Seliverstov A.** 2010. Industrial Round-Wood Losses Associated with Harvesting Systems in Russia. Croatian Journal of Forest Engineering, 31(2), 111–126.
- GUS. 2000. Mały Rocznik Statystyczny 2000. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
- GUS. 2019. Mały Rocznik Statystyczny Polski 2019. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
- Hallonberg U., Granlund P., Norden B.** 2004. Skördarnas matningssystem behöver utvecklas. Skogsforsk Resultat.
- Karaszewski Z., Łącka A., Mederski P.S., Bembenek M.** 2018. Impact of Season and Harvester Engine RPM on Pine Wood Damage from Feed Roller Spikes. Croatian Journal of Forest Engineering, 39, 183–191.
- Karaszewski Z., Łącka A., Mederski P.S., Noskowiak A., Bembenek M.** 2016. Damage Caused by Harvester Head Feed Rollers to Alder, Pine and Spruce. Drewno, 59(197), 77–88.
- Kusiak W., Śliwiński K.** 2014. Ocena jakości wyrabianych sortymentów drzewnych w technologii ręczno-maszynowej i maszynowej. Studia i Materiały CEPL w Rogowie, 39, 67–76.
- Lee K., Gibbs J.N.** 1996. An Investigation of the Influence of Harvesting Practice on the Development of Blue-Stain in Corsican Pine Logs. Forestry, 69(2), 137–141.
- Mikleš M.** 1995. Badania nad doborem geometrii noży do biernego okrzesywania drzew. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej, 10, 24–26.
- Nuutinen Y., Väätäinen K., Asikainen A., Prinz R., Heinonen J.** 2010. Operational Efficiency and Damage to Sawlogs by Feed Rollers of the Harvester Head. Silva Fennica, 44(1), 121–139.
- Sowa J.M., Gielarowiec K., Gaj-Gielarowiec D.** 2013. Charakterystyka i rozwój konstrukcji głowic harwesterowych do pozyskiwania drewna. Forestry Letters, 105, 57–76.
- StatSoft Inc. 2014. STATISTICA (Data Analysis Software System), version 12. www.statsoft.com.
- Szewczyk G., Kulak D.** 2013. Kosztocłonność pozyskania drewna harwesterem w drzewostanach przebudowywanych z zastosowaniem cięć częściowych. Sylwan, 157(4), 243–252.
- Szewczyk G., Jankowiak R., Mitka B., Bożek P., Bilański P., Kulak D., Barycza A., Kunys G.** 2019. Development of Blue Stain in Mechanically Harvested Scots Pine (*Pinus sylvestris*) Logs During Storage. Canadian Journal of Forest Research, 50(999), 42–50.
- Tomczak A., Jelonek T., Grzywiński W.** 2012. Pozyskiwanie drewna pilarką. Techniczne, ergonomiczne i organizacyjne aspekty pracy drwala. Oficyna Wydawnicza G&P, Poznań.

- Uzunovic A., Webber J.F.** 1998. Comparison of Bluestain Fungi Grown *in vitro* and in Freshly Cut Pine Billets. *European Journal of Forest Pathology*, 28(5), 323–334.
- Warunki techniczne – Wady drewna. Załącznik Nr 3 do Zarządzenia Nr 51 DGLP z dnia 30.09.2019.
- Więsik J., Nurek T.** 2002. Możliwości zastosowania harwesterów w Polsce. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 486, 245–252.
- Zarzyński P.** 2003 Barwice drewna. *Las Polski*, 13–14, 42–43.
- Żółciak A.** 1997. Występowanie grzybów na strzale sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w obrębie ran powstałych przy wykonaniu prac trzebieżowych. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa. Seria A*, 833, 85–105.

# Ocena uciążliwości pracy wynikającej z ręcznego transportu drewna średniowymiarowego z wykorzystaniem różnych narzędzi pomocniczych

Krzysztof Leszczyński, Tomasz Rebizak

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kottłataja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: rlleszcz@cyf-kr.edu.pl

## Abstrakt

Schorzenia układu mięśniowo-szkieletowego stanowią ok. 60% problemów zdrowotnych, z jakimi zmagają się ludność w Unii Europejskiej. W Polsce jest to druga przyczyna niezdolności do pracy (14,3%). Ręczną zrywkę drewna cechuje bardzo duża liczba ruchów roboczych (1 600–1 800 na normatywną zmianę roboczą), co przy konieczności długotrwałego utrzymywania ładunku wywołuje znaczne obciążenia dynamiczne i statyczne pracowników.

Celem pracy była ocena ręcznych prac transportowych podczas zabiegu czyszczeń późnych z pozyskaniem masy drewna (grubizny) poprzez określenie poziomu wysiłku fizycznego, jak i ryzyka związanego z obciążeniem układu ruchu. W analizach skoncentrowano się na czynności donoszenia do szlaku zrywkowego sortymentów drewna krótkiego o średnicy kilkunastu centymetrów i długości 1,25 m z wykorzystaniem narzędzi pomocniczych (hak, kleszcze).

Ocenę ryzyka i wartości rekomendowanej masy przenoszonego ładunku dokonano według wskazówek National Institute for Occupational Safety and Health (Waters i in. 1994). Produkcja ciepła oraz wskaźnik rezerwy tętna został określony zgodnie z międzynarodowymi standardami na podstawie przeprowadzonych pomiarów telemetrycznych częstości skurczów serca.

W doświadczeniu brało udział 2 mężczyzn w wieku 22 i 50 lat. Obserwacje przeprowadzono w 5 powtórzeniach. Pojedynczy cykl pomiarowy polegał na przemieszczeniu 20 wałków, tj. od 280 do 400 kg ładunku za pomocą haka lub kleszczy.

Uzyskane wyniki wskazują, że w trakcie pracy pracownicy wykorzystywali ok. 50–60% rezerwy tętna, co według Buchbergera (1984) stanowi wysiłek dopusz-



czalny tylko dla osób ze zdrowym układem krążenia. Nieznacznie niższe (ok. 3%) obciążenie zaobserwowano przy użyciu kleszczy o masie 930 g, niż przy użyciu znacznie lżejszego haka (495 g).

**Słowa kluczowe:** produkcja ciepła, ryzyko zawodowe, indeks podnoszenia

## 1. Wstęp

Badania aktywności ekonomicznej ludności Europy wykazały, że negatywne zmiany w układzie ruchu są najbardziej powszechnymi dolegliwościami związanymi z pracą zawodową. Zaburzenia układu mięśniowo-szkieletowego stanowią ok. 60% wszystkich problemów zdrowotnych nabytych w wyniku pracy zawodowej, które dotyczą ludność w Unii Europejskiej. Są także przyczyną 60% przypadków nieobecności zatrudnionego w miejscu pracy z powodu choroby, jak również w 60% przypadków odpowiadają za trwałą niezdolność ludzi do pracy (COM 2017).

Z danych Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa i Zdrowia w Pracy (Schneider i Irastorza 2010) wynika, że symptomy zaburzeń w obrębie układu mięśniowo-szkieletowego są najbardziej rozpowszechnionymi dolegliwościami. Jedna czwarta pracowników skarży się na bóle pleców, a 23% na bóle mięśni. Pracę w męczącej i niewygodnej pozycji wykonuje 46% osób, a ponad 33% przesuwa lub przenosi ciężkie ładunki.

W Polsce według danych Zakładu Ubezpieczeń Społecznych z 2017 roku (Karczewicz i Sikora 2018) choroby układu mięśniowo-szkieletowego stanowią drugą co do częstości występowania przyczynę trwałej niezdolności do pracy (14,3%). Dolegliwości te wpływają nie tylko na ogólny stan zdrowia i wydajność w pracy, ale również na jakość życia pracowników. Bardzo często poprzedzają rozpoznanie tzw. zespołów przeciążeniowych, które wpływają na ograniczenie sprawności fizycznej i stanowią w dzisiejszych czasach jeden z poważnych problemów w opiece medycznej nad pracownikami. Powstają one jako skutek zbyt dużych obciążeń fizycznych ponoszonych przez pracowników, które przekraczają wytrzymałość oraz wydolność czynnościową elementów narządu ruchu (Bugajska i in. 2011).

Z uwagi na złożoność problemu określenie konkretnego czynnika, który wywoływałby zaburzenia układu mięśniowo-szkieletowego, jest praktycznie niemożliwe. Dlatego zgodnie ze strategią Unii Europejskiej w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy (Schneider i Irastorza 2010) należałoby kompleksowo eliminować zagrożenia oraz oceniać i zmniejszać w jak największym stopniu związane z nimi ryzyko.

W praktyce do bardzo ważnych zadań pracodawcy należy ocena wielkości obciążenia pracą zatrudnionego prowadzona na etapie wykonywania poszcze-



gólnych czynności, jak również dostosowanie wielkości wysiłku do trwania całej zmiany roboczej. Wiedza o stopniu ciężkości pracy ma kluczowe znaczenie dla planowania zajęć. Odpowiednie wykorzystanie tych wiadomości może zminimalizować ryzyko wypadków przy pracy oraz wpłynąć na zmniejszenie urazów i chorób osób ją wykonujących.

Praca w leśnictwie należy do niezwykle trudnych, a zarazem niebezpiecznych, wymagających dużego, fizycznego obciążenia organizmu. Grzywiński (2005) wskazuje, że udział pracy bardzo ciężkiej wynosi 45%, a ciężkiej 37%. Nieodpowiednia technika pracy oraz nieznajomość podstawowych zasad bezpieczeństwa mogą mieć wiele następstw zdrowotnych, głównie w postaci urazów układu mięśniowo-szkieletowego, wpływających na mniejszą wydajność, absencję i trwałą niezdolność do pracy.

Ręczne prace transportowe obejmują wiele czynności, takich jak podnoszenie, przenoszenie, ciągnięcie i pchanie przedmiotów. Ich stałe wykonywanie może powodować wiele urazów mięśni oraz zmian zwyrodnieniowych stawów, które w pracach leśnych są skutkiem przeciążenia układu mięśniowo-szkieletowego, wynikającego z przenoszenia ciężarów o znacznej masie w nienaturalnych i wymuszonych pozycjach oraz związanego z nim dużego wysiłku fizycznego.

Największym zagrożeniem dla układu szkieletowo-mięśniowego są działania związane z przygotowaniem drewna do transportu, ręczna zrywka, układanie i załadunek drewna krótkiego oraz czynności z zakresu grodzienia upraw. Donoszenie i układanie wałków wymaga nierzadko pochylania tułowia, a ładunek cechuje brak dogodnego i pewnego chwytu. Sposobem na zmniejszenie uciążliwości podczas ręcznego transportu sortymentów krótkich jest zastosowanie urządzeń pomocniczych w postaci kleszczy lub haków. Eliminują one bezpośredni kontakt ręki pracownika ze śliskim i wilgotnym ładunkiem oraz poprawiają jakość chwytu m.in. poprzez wzdłużną osiową pracę nadgarstków. Ręczną zrywkę drewna charakteryzuje również bardzo duża liczba ruchów roboczych, wynosząca 1 600–1 800 na normatywną zmianę roboczą (zm. rob. 480 min), przy wykorzystaniu siły powyżej 100 N, co zdaniem Grzywińskiego (2003) należy uznać za znaczące obciążenie układu ruchowego pracownika.

W technologii pozyskiwania drewna udział drewna średniowymiarowego na cele przemysłowe wynosi ok. 50%, w tym drewna opałowego krótkiego nieco poniżej 10% masy uzyskiwanych sortymentów (GUS 2019). Często z uwagi na dość dużą niedostępność terenu, brak możliwości dojazdu maszyn czy małą intensywność zabiegów ładunki te muszą być transportowane ręcznie (donoszone) do szlaków zrywkowych. Wiąże się to ze znacznym wzrostem pracochłonności, ogromnym wysiłkiem fizycznym oraz ryzykiem przeciążenia układu ruchu.

Wielu autorów podkreśla (Pacholski 1986; Koradecka 1997), że elementem towarzyszącym ręcznym pracom transportowym jest duże obciążenie dynamiczne i statyczne. Znaczący wpływ na wielkość obciążenia mają: rodzaj

używanych narzędzi pomocniczych, zróżnicowanie terenu, predyspozycje, kondycja fizyczna i doświadczenie. Jednym z łatwo mierzalnych wskaźników świadczących jednocześnie o wysiłku fizycznym i możliwościach pracownika jest wskaźnik wykorzystania rezerwy tętna (WRT), określony jako udział (procentowy) częstości pulsu potrzebnego do wykonania pracy w stosunku do rezerwy tętna, czyli różnicy pomiędzy tętnem maksymalnym dla danej osoby a tętnem spoczynkowym. Generalnie wskaźnik ten wykorzystuje się do określenia poziomu wysiłku aerobowego, rzadziej do określenia granicznego wysiłku anaerobowego. Pomiar często wykonywany jest telemetrycznie. Łatwość wskazania wielkości obciążenia wynika ze zmian adaptacyjnych w układzie oddechowym, układzie krążenia oraz mechanizmów termoregulacji będących skutkiem wysiłku fizycznego.

Celem pracy była ocena ręcznych prac transportowych podczas zabiegu czyszczeń późnych z pozyskaniem masy drewna (grubizny) poprzez określenie poziomu obciążenia wynikającego z wysiłku fizycznego, jak i ryzyka związanego z przeciążeniem układu ruchu. W analizach skoncentrowano się na czynności donoszenia do szlaku zrywkowego sortymentów drewna krótkiego o średnicy kilkunastu centymetrów i długości 1,25 m z wykorzystaniem narzędzi pomocniczych (hak, kleszcze) w 2 wariantach odległości.

## 2. Metodyka i przedmiot badań

Pomiary przeprowadzono za pomocą urządzenia Polar RS800CX, które składało się z rejestratora w formie zegarka zakładanego na nadgarstek oraz nadajnika (opaski z elektrodami) umieszczonego na klatce piersiowej. Rejestrator został zaprogramowany do robienia jednego pomiaru na sekundę. W każdym powtórzeniu rejestrowano rodzaj wykonywanej pracy oraz czas jej trwania z dokładnością do 1 s. W celu wyeliminowania dużych błędów zapisywano również czas rozpoczęcia i zakończenia próby z dokładnością do 1 s. Informacje te pozwoliły wybrać odpowiedni fragment zapisu z ciągłego pomiaru tętna (BPM).

W celu wyeliminowania ewentualnego deficytu tlenowego, występującego podczas pierwszej fazy wzmożonej aktywności fizycznej, obserwacje poczyniono w trakcie wykonywania przez pracowników zabiegów trzebieżowych, podczas których przygotowywali (wyrabiali) oni m.in. drewno do wykonania operacji transportowych. Przyjęty sposób postępowania zapewnił wykonanie doświadczenia po osiągnięciu poziomu równowagi organizmu (*steady state*). Obserwacje prowadzono każdorazowo w pierwszej połowie dnia w godzinach od 9 do 11 po ok. półtoragodzinnej aktywności fizycznej pracownika w terenie. Zebrane w ten sposób dane pozwoliły na wyznaczenie średniej wartości tętna (Groborz i Juliszewski 2003) podczas efektywnej pracy. W trakcie cyklu

pomiarów terenowych, każdego dnia pracownicy tuż po porannym przebudzeniu, w miejscu zamieszkania określali w formie samobadania swoje tętno spoczynkowe w pozycji leżącej. Tętno maksymalne określono w sposób uproszony (EN-ISO 8996:2004) jako wartość 220 pomniejszoną o wiek osoby uczestniczącej w badaniu.

Doświadczenie zlokalizowano w osiemnastoletnim drzewostanie modrzewiowym (80%), rosnącym na siedlisku lasu wyżynnego (gleba brunatna, silnie świeża). Przeciętna pierśnica drzew stojących wynosiła 16 cm, a zasobność 65 m<sup>3</sup>/ha. Badania przeprowadzono podczas zabiegu czyszczeń późnych z pozyskaniem masy (grubizny drewna). Gleba była zadarniona, a drzewostan posadzony w bruzdach na gruntach porolnych.

Badanie przeprowadzono podczas podnoszenia, przenoszenia i układania wałków modrzewiowych o długości 1,25 m za pomocą narzędzi pomocniczych (ryc. 1, 2). Użyte kleszcze i hak, dedykowane ręcznym pracom transportowym w leśnictwie, zostały wykonane z wysokogatunkowej stali i wyposażone w ergonomiczne uchwyty zapobiegające wysuwaniu się narzędzi z dłoni podczas pracy.

Obserwacje przeprowadzono w 5 powtórzeniach przy przeniesieniu 20 wałków na odległość 5 i 10 m. Masę przenieszonego drewna określono w sposób pośredni, opierając się na gęstości drewna modrzewiowego po ścięciu wynoszącej 850 kg/m<sup>3</sup> (ITD 2020) i jego objętości. W celu ustalenia objętości wałków określono średnicę w połowie długości z dokładnością do 1 mm jako średnią z 2 prostopadłych pomiarów oraz długości wyrabianego surowca (1,25 m). Pracownik przenoszący ładunek poruszał się prostopadle do bruzd pozostałych po sadzeniu najkrótszą drogą do szlaku zrywkowego. W ciągu jednego dnia każda z osób wykonywała 5 powtórzeń jednego wariantu doświadczenia (odległość donoszenia, narzędzie pomocnicze). Średnia temperatura powietrza wynosiła -1°C.

Do wykonania doświadczenia typowano osoby o przeciętnej budowie ciała, posiadające minimum dwuletnie doświadczenie przy pracach leśnych, obecnie i w przeszłości bez nałogów, ograniczające spożycie używek, bez zdiagnozowanych chorób przewlekłych, w tym dolegliwości związanych z wiekiem i wykonywaną pracą, o dobrej kondycji fizycznej. Ostatecznie udało się wytypować 2 osoby chętne do udziału w doświadczeniu jako reprezentantów grup pracowników młodych i starszych: (a) P22 – wiek: 22 lata, wzrost: 176 cm, masa ciała: 72 kg, BMI: 23,2 kg/m<sup>2</sup>; (b) P50 – wiek: 50, wzrost: 172 cm, masa ciała: 80 kg, BMI: 27 kg/m<sup>2</sup>. Obydwaj uczestnicy badania zadeklarowali dobry stan zdrowia i nie spożywali produktów z zawartością kofeiny oraz alkoholu 2 tygodnie przed i w trakcie doświadczenia.

W celu określenia ilości wyprodukowanego ciepła podczas ręcznego przenoszenia wałków wykorzystano średnie wartości tętna (HR) oraz wzory i zalecenia według normy EN-ISO 8996:2004.



**Ryc. 1.** Ręczny transport drewna za pomocą kleszczy firmy EIA, masa 930 g (fot. T. Rebizak)



**Ryc. 2.** Ręczny transport drewna za pomocą haka firmy EIA, masa 495 g (fot. T. Rebizak)

Produkcję ciepła ( $MR$  – *metabolic rate*,  $W/m^2$ ) określono, przyjmując:

- dla mężczyzny w wieku 22 lat (P22):

$$MR_{P22} = 4,2 \cdot \text{Heart Rate} - 273,$$

- dla mężczyzny w wieku 50 lat (P50):

$$MR_{P50} = 4,9 \cdot \text{Heart Rate} - 288.$$

Następnie wartość produkcji ciepła ( $MR$ ,  $W/m^2$ ) pomnożono przez powierzchnię ciała pracowników określoną według wzoru DuBios'ów ( $S$ ), uzyskując wartość metabolizmu brutto:

$$S = 0,007184 \cdot L^{0,725} \cdot M^{0,425} \quad (1)$$

gdzie:

$S$  – powierzchnia ciała [ $m^2$ ],

$L$  – wzrost [ $cm$ ],

$M$  – masa ciała [ $kg$ ].

Uzyskane wartości pomniejszono o tzw. wartość podstawowej przemiany materii dla mężczyzn ( $PPM_m$ ) według wzoru Harrisa-Benedicta, uzyskując w rezultacie tzw. wartość netto wydatku energetycznego (Makowiec-Dąbrowska i in. 1999):

$$PPM_m = 66,5 + 13,75 \cdot M + 5,003 \cdot L - 6,775 \cdot W \quad (2)$$

gdzie:

$PPM_m$  – podstawowa przemiana materii dla mężczyzn [ $kcal/doba$ ],

$L$  – wzrost [ $cm$ ],

$M$  – masa ciała [ $kg$ ],

$W$  – wiek [ $lata$ ].

W celu określenia czasu przerw, odpoczynku od prac angażujących duże grupy mięśni, wykorzystano wzór Lehmana (Wieczorek 2014):

$$EZ = (E/4,2 - 1) \cdot 100 \quad (3)$$

gdzie:

$EZ$  – czas dodatkowego odpoczynku [%],

$E$  – wydatek energetyczny [ $kcal/min$ ],

4,2 – wielkość wydatku energetycznego przyjmowana jako granica trwałej sprawności fizycznej dla mężczyzn [ $kcal/min$ ].



W obliczeniach wykorzystano również poniższe zależności w celu konwersji jednostek:

$$1 \text{ kcal/min} = 4,1868 \text{ kJ/min},$$

$$1 \text{ Watt} = 0,8601 \text{ kcal/h}.$$

Podstawą do określenia poziomu ryzyka zawodowego była ustawa w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy ręcznych pracach transportowych (Dz.U. 2018, poz. 1139), która dopuszcza przenoszenie ładunku o masie 30 kg przy pracy stałej, jak również rekomendacje National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) (Waters i in. 1994). Metoda NIOSH służy do obliczania zalecanych wartości masy podnoszonych ciężarów [kg], wartości granicznej *RWL* (Recommended Weight Limit):

$$RWL = LC \cdot HM \cdot VM \cdot DM \cdot AM \cdot FM \cdot CM \quad (4)$$

gdzie:

- LC* – stała obciążenia [23 kg],
- HM* – współczynnik poziomy,
- VM* – współczynnik pionowy,
- DM* – współczynnik odległości,
- AM* – współczynnik asymetrii,
- FM* – współczynnik częstotliwości,
- CM* – współczynnik chwytu.

$$LI = LW/RWL \quad (5)$$

gdzie:

- LI* – indeks przenoszenia (Lifting Index),
- LW* – masa transportowanego ładunku (Load Weight).

Opracowanie statystyczne obejmowało określenie statystyk podstawowych (średnia, odchylenie standardowe) oraz przeprowadzenie analizy wariancji (ANOVA). Wykonano również porównanie wartości średnich i wariancji odpowiednio testem t-Studenta, testem *F* (Fishera), testem niezależności  $\chi^2$  Pearsona. Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu do obliczeń statystycznych Statistica 12 (StatSoft, Inc. 2014), przyjmując poziom istotności (błędu statystycznego)  $\alpha = 0,05$ .

### 3. Wyniki i dyskusja

W pojedynczej próbie przeprowadzonego doświadczenia pracownicy prze-transportowali od 324 do 352 kg ładunku drewna (tab. 1) przy przeciętnym czasie trwania jednego cyklu od ok. 7 (wariant 5 m) do ok. 10 min (wariant 10 m). W celu sprawdzenia jednorodności prób pod względem masy prze-transportowanego ładunku oraz intensywności pracy, wyrażonej czasem trwania cyklu, testowaniu statystycznemu poddano hipotezę o równości wartości średnich wymienionych cech. Wyniki analizy wariancji ANOVA wykazały brak istotnej różnicy zarówno pomiędzy czasem trwania czynności ( $F_{(1, 38)} = 0,002$ ;  $p = 0,9627$ ), jak i masą przenoszonego ładunku ( $F_{(1, 38)} = 0,091$ ;  $p = 0,7643$ ).

Zestawienie statystyk podstawowych wykazało, że w doświadczeniu przeciętne obciążenie pracownika P22 wyrażone wskaźnikiem rezerwy tętna wynosiło 59% i było o 9% większe niż pracownika P50 (ryc. 3), co formalnie potwierdziły testy statystyczne (ANOVA:  $F_{(1, 38)} = 92,502$ ;  $p = 0,000$ ). Analizy statystyczne w grupach czynności wykazały również nieznaczny, ale istotny statystycznie wpływ odległości transportowanego ładunku na wzrost obciążenia (ANOVA:  $F_{(1, 38)} = 0,001$ ,  $p = 0,023$ ). Analiza obciążenia (WRT) dla poszczególnych czynności wykonana za pomocą testu t-Studenta wykazała istotne statystycznie mniejsze obciążenie (zysk) przy zastosowaniu kleszczy, które wahało się w przypadku P50 od 2,8 punktu procentowego przy odległości transportowej 10 m ( $t_{(8)} = 2,646$ ;  $p = 0,015$ ) do 3,6 punktu procentowego przy odległości transportowej 5 m ( $t_{(8)} = 2,114$ ;  $p = 0,034$ ). W przypadku P22 zysk wynikający z użycia kleszczy był bardziej zróżnicowany, gdyż spadek obciążenia o 3,2 punktu procentowego w wariancie 5 m ( $t_{(8)} = 2,454$ ;  $p = 0,020$ ) był istotny statystycznie, natomiast różnica wynosząca 1,2 punktu w wariancie 10 m okazała się nieistotna ( $t_{(8)} = 0,667$ ,  $p = 0,262$ ). Buchberger (1984) wskazuje, że obciążenia pracą fizyczną rzędu 50–65% WRT należy określić jako duże i dopuszczalne tylko dla osób ze zdrowym układem krążenia.

Na podstawie zaprezentowanych wyników trudno jest jednoznacznie stwierdzić stały, istotny statystycznie wpływ odległości transportowej i narzędzi pomocniczych na obciążenie pracowników ( $Ch^2_{(2)} = 0,419$ ;  $p = 0,811$ ). Wydaje się, że omawiane zróżnicowanie należałoby bardziej wiązać z indywidualnymi cechami osób biorących udział w doświadczeniu, takimi jak objętość wyrzutowa serca, sprawność układu oddechowego, technika, doświadczenie, przystosowanie do pracy itp. (Koradecka 1997).

Zestawione w tabeli 2 wyniki wskazują na bardzo dużą produkcję ciepła badanych, wahającą się od 275 do 420 W/m<sup>2</sup>. Oznacza to również intensywne tempo wykonywanych czynności, graniczące z maksymalnym, co według EN-ISO8996:2004 pozwala zaliczyć omawiane prace do czwartej, najwyższej klasy obciążenia. Ponoszony przez pracujących wydatek energetyczny sytuuje

się powyżej granicy tzw. trwałej wydolności (Schlick i in. 2018) oznaczającej możliwość ciągłego, nieprzerwanego wysiłku w długim okresie czasu. Dlatego też po każdym cyklu pracy należałoby przewidzieć dodatkowy czas przerw odpoczynkowych, które w wyniku przeprowadzonych obliczeń według wzoru Lehmana (Wieczorek 2014) powinny wynosić od 6 do 10 min, w zależności od odległości transportowej. Oznacza to, że efektywny czas pracy do odpoczynku powinien być utrzymany w stosunku 1:1.

Krajowe wymagania dotyczące ręcznych prac transportowych (Dz.U. 2018, poz. 1139) przewidują, że masa przedmiotów podnoszonych i przenoszonych przez jednego pracownika nie może przekraczać dla mężczyzn 30 kg przy pracy stałej oraz 50 kg przy pracy dorywczej. W analizowanym przypadku przeciętna masa jednego ładunku wynosiła 16,7 kg, natomiast w najgorszym przypadku (średnia masa ładunku plus trzykrotna wartość odchylenia standardowego) – 23,9 kg.

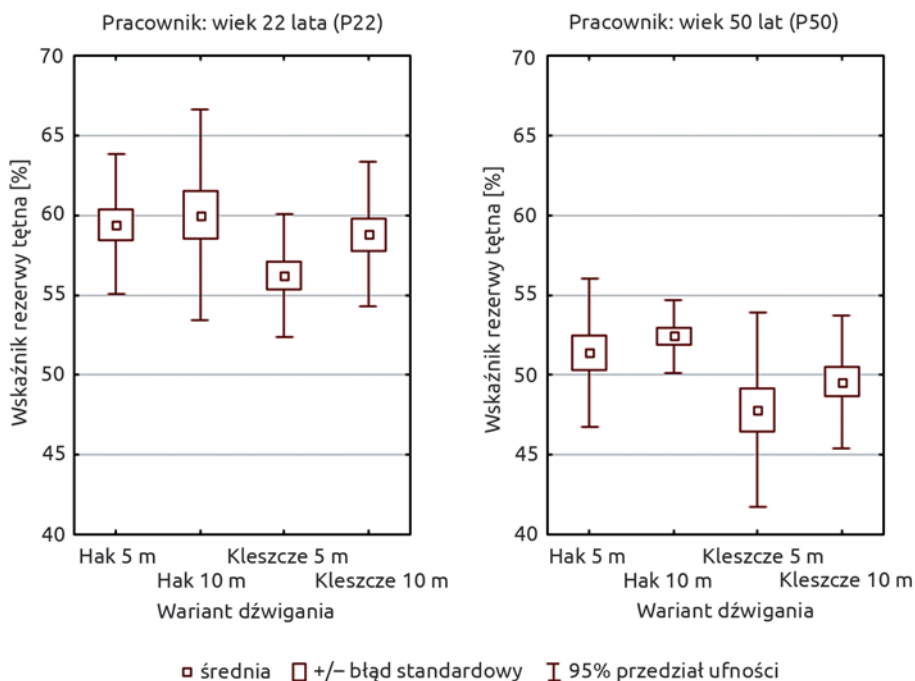
**Tabela 1.** Charakterystyka mas przenoszonego ładunku i czasu trwania transportu ręcznego w pojedynczej próbie (n = 5)

| Pracownik   | P22             |                 |                 |                  | P50             |                 |                 |                  |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Wariant   | Hak<br>5 m      | Hak<br>10 m     | Kleszcze<br>5 m | Kleszcze<br>10 m | Hak<br>5 m      | Hak<br>10 m     | Kleszcze<br>5 m | Kleszcze<br>10 m |
| Czas trwania,<br>min. średnia<br>(odchylenie<br>standardowe)  | 6,98<br>(0,14)  | 9,68<br>(0,20)  | 7,10<br>(0,26)  | 9,74<br>(0,32)   | 6,99<br>(0,15)  | 9,75<br>(0,29)  | 7,08<br>(0,26)  | 9,77<br>(0,18)   |
| Wymiary<br>transportowanego<br>ładunku [cm]:<br>średnica<br>środkowa<br>(odchylenie<br>standardowe) | 14,3<br>(5,12)  | 14,21<br>(5,30) | 14,21<br>(4,49) | 14,05<br>(4,85)  | 13,93<br>(3,51) | 14,04<br>(4,21) | 14,52<br>(3,06) | 14,00<br>(5,35)  |
| Masa<br>transportowanego<br>ładunku [kg]:<br>średnia<br>(odchylenie<br>standardowe)                 | 17,02<br>(2,19) | 16,86<br>(2,34) | 16,88<br>(1,68) | 16,48<br>(1,96)  | 16,20<br>(1,03) | 16,45<br>(1,48) | 17,59<br>(0,78) | 16,35<br>(2,39)  |
| Łączna masa<br>ładunku [kg]   | 340,3           | 337,3           | 337,6           | 329,7            | 324,0           | 328,9           | 351,8           | 326,9            |



**Tabela 2.** Wielkość produkcji ciepła (EN-ISO8996:2004) w wariantach ręcznych prac transportowych

| Osoba                                | P22     |          |              |               | P50     |          |              |               |
|--------------------------------------|---------|----------|--------------|---------------|---------|----------|--------------|---------------|
| Wariant                              | Hak 5 m | Hak 10 m | Kleszcze 5 m | Kleszcze 10 m | Hak 5 m | Hak 10 m | Kleszcze 5 m | Kleszcze 10 m |
| Produkcja ciepła [W/m <sup>2</sup> ] | 413,2   | 417,9    | 394,4        | 408,5         | 290,2   | 300      | 275,5        | 285,3         |
| Wydatek energetyczny netto [kJ/min]  | 41,16   | 41,69    | 39,05        | 40,64         | 28,34   | 29,46    | 26,65        | 27,77         |

**Ryc. 3.** Charakterystyka obciążenia w analizowanych wariantach prac ręcznych transportowych

Przeprowadzone obliczenia wartości rekomendowanej masy przenoszonego ładunku (*RWL*) według zaleceń NIOSH wskazują, że wartości rekomendowane nie powinny jednak przekraczać 20,6 kg przy pracach trwających ponad 2 godziny. Wykonując analizy symulacji różnych wariantów organizacji pracy, przy zachowaniu stałej częstotliwości podnoszenia (od 3 do 4 podnoszeń na

minutę), możemy wnioskować, że przy pracy trwającej do 2 godzin *RWL* wynosi 27 kg, a przy pracy trwającej nie dłużej niż 1 godzina *RWL* wynosi 28,6 kg.

Prezentowane wartości dowodzą również, że wskaźnik ryzyka określony dla mężczyzn, tzw. Lifting Index (*LI*), znacznie przekracza wartość 0,5 (ryzyko średnie, dopuszczalne warunkowo), a w przypadku analizy najgorszego przypadku – 1,0, co oznacza ryzyko duże, nieakceptowane ze względu na przekroczenie rekomendowanych przez NIOSH mas transportowanego ładunku (Waters i in. 1994). Kontynuując analizę najgorszego przypadku przy pracach trwających ponad 2 godziny ( $LI > 1,0$ ), należy podkreślić, że transport (zrywka drewna) powinien odbywać się zespołowo.

Ze względu na bardzo duży wydatek energetyczny (ponad 8400 kJ/zm. rob.) czas wykonywania tego typu prac powinien być ograniczony. Analizując wydatek energetyczny (tab. 2), możemy zauważyć, że ze względu na brak ekonomiki ruchów i swojego rodzaju rozrzutność w wykorzystaniu zasobów energetycznych pracownika młodszego (P22) czas pracy efektywnej nie powinien przekraczać 3 godzin. W przypadku pracownika starszego (P50) mniejszy wzrost wartości wydatku energii na transport ręczny pozwala na rekomendację pracy do 5 godzin na zmianę roboczą. Dane statystyczne wskazują jednak, że osoby starsze (50+) mają przeciętnie mniejszą o ok. 30% możliwość maksymalnego pochłaniania tlenu ( $VO_{2max}$ ) w porównaniu z pracownikami młodszymi (20–30 lat), a tym samym mniejszą wydolność organizmu. Dlatego też warto podkreślić (Schlick i in. 2018), że tempo i technika pracy powinna sprzyjać ekonomice ruchów roboczych w celu wykorzystania cech wrodzonych (konstytucyjnych: budowa ciała, płuca  $VO_{2max}$ ) i dyspozycyjnych (kondycja, zmęczenie).

W analizowanym przypadku nie stwierdzono przekroczenia maksymalnej dopuszczanej wartości 55 kg, m.in. przyjętej w 1967 roku przez Międzynarodową Organizację Pracy (ILO). Warto jednak podkreślić, że zalecane limity dotyczą specyficznej, predysponowanej ze względu na warunki fizyczne, przebytego treningu i zdobyte umiejętności grupy pracowników (Karwowski 2006), dlatego też wskazane jest podjęcie działań minimalizujących ryzyko urazów przy ręcznych pracach transportowych według ramowych (wymienionych wyżej) standardów ergonomicznych (Council Directive 90/269/ECC).

#### 4. Podsumowanie

Choroby układu mięśniowo-szkieletowego stanowią drugą co do częstości występowania przyczynę trwałej niezdolności do pracy w Polsce. Liczne doniesienia wskazują, że ponad 80% prac leśnych to prace ciężkie i bardzo ciężkie. W niniejszym artykule skoncentrowano się na określeniu poziomu obciążenia przy ręcznych pracach transportowych (zrywce ręcznej surowca w czyszcze-

niach późnych) przy zastosowaniu narzędzi pomocniczych (kleszcze, hak), opierając się na wskaźniku rezerwy tętna (WRT).

Uzyskane wyniki dowodzą, że ze względu na bardzo duży wydatek energetyczny należałoby przyjąć zasadę, iż stosunek efektywnego czasu pracy do odpoczynku wynosi minimum 1:1, a sumaryczny czas pracy powinien zostać ograniczony przez wprowadzenie różnych rozwiązań organizacyjnych. Zauważone mniejsze obciążenie pracowników, sięgające nawet do 3,6% wskaźnika rezerwy tętna, pozwala na rekomendację zastosowania kleszczy pomimo ich znacznej masy dochodzącej do 1 kg.

Narzędzia pomocnicze, w tym kleszcze, poprawiają jakość chwytu przez eliminację pracy małymi grupami mięśni (zgięcia, skręcenia dłoni), zmniejszają konieczność pochylania się pracownika, jak i wysokość podnoszenia ładunku. Jednak ze względu na szerokość ich rozwarcia mogą mieć w pojedynczych przypadkach ograniczone zastosowanie. Wady tej nie posiadają haki i przez to wydają się być bardziej uniwersalne. Ważny okazał się także sposób gospodarowania własnymi zasobami energetycznymi pracownika, który można poprawić m.in. przez zapewnienie dostępu do informacji (o ryzyku urazów), odpowiedni trening, korektę techniki podnoszenia, zastosowanie właściwych narzędzi pomocniczych, odzież roboczą, sprzęt ochronny, jak również – pominięty w niniejszej pracy – czynnik psychologiczny (motywację).

W analizowanym przypadku nie stwierdzono przekroczenia wartości dopuszczalnych, określonych w konwencjach Międzynarodowej Organizacji Pracy (International Labour Organization – ILO) i w rozwiązaniach krajowych. Jednak masowy problem przeciążenia układu ruchu, jak i rekomendacje NIOSH wskazują na potrzebę promowania rozwiązań prewencyjnych, bazujących m.in. na wartościach rekomendowanych obciążenia, kryteriach psychofizycznych, biomechanicznych i zapewnieniu odpowiednich warunków środowiska pracy.

## Literatura

- Buchberger J. 1984. Die Beurteilung von Arbeitsbeanspruchungen aufgrund der kontinuierlich registrierten Herzschlagfrequenz. Arbeitsärztlicher Dienst des BIGA, Bern. Arbeitsmedizinische Informationen, 12.
- Bugajska J., Żołnierczyk-Zreda D., Hildt-Ciupińska K. 2011. Profilaktyka dolegliwości mięśniowo-szkieletowych w kontekście psychospołecznych aspektów pracy. *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka*, 4, 12–15.
- Council Directive 90/269/EEC of 29 May 1990 on the Minimum Health and Safety Requirements for the Manual Handling of Loads Where There Is a Risk Particularly of Back Injury to Workers (fourth individual Directive within the meaning of Article 16 (1) of Directive 89/391/EEC).

- COM 2017. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Bezpieczniejsze i zdrowsze warunki pracy dla wszystkich – nowelizacja przepisów i polityki UE w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy. Bruksela, dnia 10.01.2017 r. 12/F1.
- Dz.U. 2018, poz. 1139. Obwieszczenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 11 maja 2018 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Społecznej w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy ręcznych pracach transportowych oraz innych pracach związanych z wysiłkiem fizycznym.
- EN-ISO 8996:2004. Ergonomics of the Thermal Environment — Determination of Metabolic Rate.
- Groborz A., Juliszewski T. 2003. Wstępna ocena obciążenia pracą kobiet podczas typowych prac w gospodarstwie domowym na wsi. *Inżynieria Rolnicza*, 11(53), 91–96.
- Grzywiński W. 2003. Wpływ zastosowanej techniki i technologii na poziom humanizacji pracy w leśnictwie. Praca doktorska, maszynopis, Katedra Użytkowania Lasu, Akademia Rolnicza w Poznaniu.
- Grzywiński W. 2005. Koszt energetyczny pracy w leśnictwie. *Zastosowania Ergonomii*, 1(3), 259–267.
- GUS 2019. Rocznik Statystyczny Leśnictwa. Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
- Instytut Technologii Drewna 2020. Modrzew (*Larix decidua* Mill.). <https://www.itd.poznan.pl/pl/vademecum/modrzew> (data dostępu: 20.01.2020).
- Karczewicz E., Sikora A. 2018. Absencja chorobowa w 2017 roku. ZUS – Departament Statystyki i Prognoz Aktualnych, Warszawa.
- Karwowski W. Red. 2006. *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*. Wyd. 2, CRC Taylor & Francis, Boca Radon, Floryda.
- Koradecka D. Red. 1997. *Bezpieczeństwo pracy i ergonomia*. Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa.
- Makowiec-Dąbrowska T., Rydwan-Włodarczyk Z., Koszada-Włodarczyk W., Józwiak Z. 1999. Koszt energetyczny pracy. Wytyczne dotyczące określania. Instytut Medycyny Pracy, Łódź.
- Pacholski L. Red. 1986. *Ergonomia*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Schlick Ch., Bruder R., Luczak H. 2018. *Arbeitswissenschaft*. Nowy Jork, Springer.
- Schneider E., Irastorza X. 2010. OSH in Figures: Work-Related Musculoskeletal Disorders in the EU – Facts and Figures. European Agency for Safety and Health at Work, Luxemburg, 12–15.
- StatSoft, Inc. 2014. STATISTICA (Data Analysis Software System), version 12, [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com) (data dostępu: 20.01.2020).
- Waters T.R., Putz-Anderson V., Garg A. 1994. Applications Manual for the Revised NIOSH Lifting Equation. National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, Ohio.
- Wieczorek S. 2014. *Ergonomia*. Tarbonus, Kraków–Tarnobrzeg.

# Analiza dokładności ułożenia stosów drewna średniowymiarowego

Krzysztof Michalec, Radosław Wąsik

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: krzysztof.michalec@urk.edu.pl

## Abstrakt

Celem niniejszej pracy było określenie dokładności ułożenia stosów wybranych grup surowca średniowymiarowego, z wykorzystaniem przeliczników zawartych w obowiązujących normach. Pomiarów stosów dokonano w 5 nadleśnictwach: Dębica, Kłobuck, Międzylesie, Rudy Raciborskie i Staszów. Łącznie pomierzono 243 stosy z różnych grup drewna średniowymiarowego, o różnych długościach wałków, różnych gatunków. Część stosów układana była ręcznie, a część maszynowo. Na każdym ze stosów wybrano fragment reprezentatywny dla całego stosu. W miejscu tym przy użyciu kredy wyznaczono kwadrat o bokach wielkości  $1 \times 1$  m. Następnie została w niego wrysowana przekątna, której zmierzono odcinki przecinające czoła wałków w stosie. Długości tych odcinków zsumowano i podzielono przez długość przekątnej kwadratu, tj. 1,41 m, uzyskując w ten sposób określoną wartość współczynnika ściśłości. Wartość tę porównywano ze współczynnikami zamiennymi dla drewna mierzonego w stosach. W niniejszych badaniach wykazano, że główny wpływ na dokładność ułożenia stosów ma sposób ich układania oraz (w mniejszym stopniu) grupa drewna. W przypadku stosów układanych maszynowo zaobserwowano większy udział stosów ułożonych prawidłowo (ok. 55%) niż wśród stosów ułożonych ręcznie (ok. 42%). Jednak stwierdzono w stosach ułożonych maszynowo również największy udział stosów ułożonych zbyt luźno – ok. 25%. Z kolei w przypadku stosów układanych ręcznie odnotowano, że drewno w ponad połowie z nich ułożone jest zbyt ściśle. Rozpatrując dokładność ułożenia stosów ze względu na grupę drewna, zauważono, że najmniej korzystnie pod tym względem wypadła grupa S4 (drewno opałowe). Stwierdzono w niej najmniej stosów ułożonych prawidłowo – tylko ok. 34% – i najwięcej stosów ułożonych zbyt luźno – ponad 25%.

**Słowa kluczowe:** sortymenty drewna, papierówka, opał, objętość stosu, miąższość stosu, współczynniki zamienne

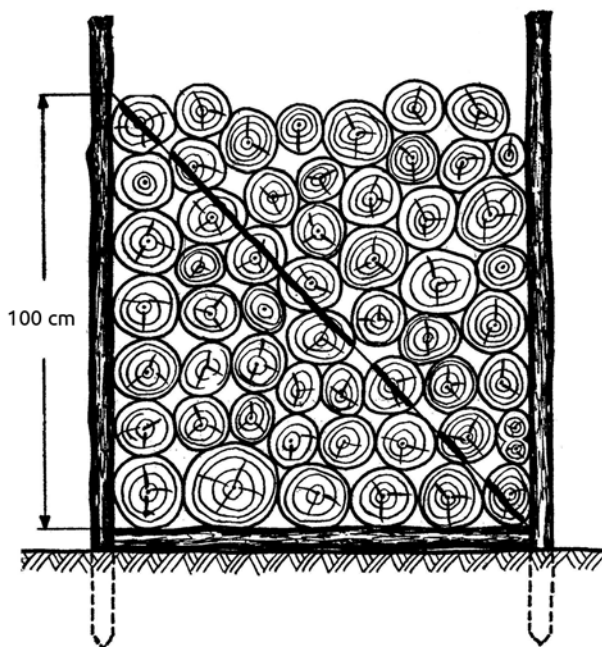
## 1. Wstęp

Pozyskanie drewna w ostatnim czasie każdego roku wzrasta (Leśnictwo 2019). W 2018 roku pozyskano łącznie 45 590 tys. m<sup>3</sup> drewna, z czego 26 476 tys. m<sup>3</sup> stanowiło drewno średniowymiarowe (58,07%). Drewno średniowymiarowe dzielone jest na 4 główne grupy: S1 (drewno średniowymiarowe dłużycowe), S2 (drewno średniowymiarowe do przerobu przemysłowego), S3 (żerdzie) i S4 (drewno opałowe). Spośród wymienionych kategorii drewno grup S2 i S4 układa się oraz mierzy w stosach. W celu określenia miąższości stosu konieczna jest znajomość jego objętości. Objętość stosu stanowi suma miąższości zawartych w nim wałków lub szczap oraz wolnych przestrzeni pomiędzy poszczególnymi sztukami. W warunkach terenowych objętość stosu wyznacza iloczyn pomierzonych wysokości, szerokości i długości danego stosu, wyrażony w metrach przestrzennych. Z kolei miąższość stosu jest to ilość drewna zawartego w objętości pomierzonego stosu. Za miąższość stosu przyjmuje się jego objętość skorygowaną o odpowiednie współczynniki zamienne zawarte w normach (PN-D-95000:2002). Zdarzają się jednak przypadki, że rzeczywista miąższość drewna w stosie odbiega od miąższości zawartej w dokumentach odbiorczych drewna (Adamczyk 2014). Do takich sytuacji dochodzi często w przypadku drewna grupy S4 (opał), w którego stosach nadmierne (dopuszczalne) krzywizny powodują powstawanie dużych, wolnych przestrzeni między wałkami. W takich przypadkach można sprawdzić dokładność ułożenia stosu, opierając się na metodzie opisanej przez Monkielewicz i Voelkela (1972) (ryc. 1). Polega ona na wyznaczeniu (na czole stosu) przekątnej kwadratu o boku 1 m i zsumowaniu odcinków przekątnej pokrywających się z czołami wałków. Tak uzyskaną wartość należy podzielić przez długość przekątnej. Autorzy zakładali, że jeżeli uzyskany współczynnik wynosił ok. 0,7, to stos był ułożony prawidłowo.

Rosnące obecnie zapotrzebowanie na drewno ze strony przedsiębiorstw przemysłu drzewnego wymusza wypracowanie szybkich i dokładnych metod jego pomiaru. W związku z tym w Lasach Państwowych testuje się obecnie fotooptyczne systemy pomiaru drewna, które być może w przyszłości zastąpią pracochłonne pomiary stosów (Majerowski i in. 2017; Grobelny i in. 2018; Harhura 2018).

Celem niniejszej pracy było określenie dokładności ułożenia stosów wybranych grup surowca średniowymiarowego, z wykorzystaniem przeliczników zamiennych, zawartych w obowiązujących normach.





Ryc. 1. Sprawdzenie ścisłości ułożenia stosu (źródło: Monkiewicz i Voelkel 1972)

## 2. Materiał i metodyka

Pomiarów stosów dokonano w 5 nadleśnictwach: Dębica, Kłobuck, Międzyzlesie, Rudy Raciborskie i Staszów. Łącznie pomierzono 243 stosy z różnych grup drewna średniowymiarowego (S2A, S2AP i S4), o różnych długościach wałków, różnych gatunków.

Głównymi cechami drewna grupy S2 są: średnica dolna do 35 cm, krzywizna do 8 cm/m, zgnilizna miękka niedopuszczalna. Z kolei drewno grupy S2AP charakteryzuje się nieograniczoną średnicą dolną, krzywizną do 12 cm/m i zgnilizną miękką dopuszczalną do 50% powierzchni czoł. Grupa S4 (opał) to drewno, w którym średnica dolna nie ma określonego limitu długości, krzywizna jednostronna i wielostronna jest dopuszczalna bez ograniczeń, a zgnilizna miękka może występować na 50% powierzchni czoł.

Część spośród analizowanych stosów układana była ręcznie, a część maszynowo. Na każdym ze stosów wybrano fragment reprezentatywny dla całego stosu. W miejscu tym przy użyciu kredy wyznaczono kwadrat o bokach 1 × 1 m. Następnie została w niego wrysowana przekątna, której zmierzono odcinki przecinające czoła wałków w stosie. Długości tych odcinków zsumowano i podzielono

przez długość przekątnej kwadratu, tj. 1,41 m, uzyskując w ten sposób określoną wartość współczynnika ścisłości. Wartość tę porównywano ze współczynnikami zamiennymi dla drewna mierzonego w stosach (PN-D-95000:2002). Za stos ułożony prawidłowo przyjęto odchyłkę  $\pm 0,05$  od wartości tabelarycznej. Jeżeli uzyskana wartość współczynnika ścisłości była większa niż przyjęta odchyłka, stos uznawano za ułożony zbyt ściśle, z kolei jeżeli uzyskana wartość była mniejsza niż przyjęta odchyłka, stos uznawano za zbyt luźny. Uzyskane wyniki zestawiono w programie Excel i przedstawiono w formie tabel i wykresów. Ze względu na to, że po zastosowaniu testu Shapiro-Wilka odrzucono hipotezę zerową o normalności rozkładu danych, do analizy istotności różnic wykorzystano test Kruskala-Wallisa oraz test wielokrotnych porównań średnich post-hoc (Kot i in. 2007).

### 3. Wyniki badań

W poniższych tabelach (tab. 1–5) przedstawiono uzyskane w poszczególnych nadleśnictwach średnie współczynniki ścisłości oraz inne charakterystyki statystyczne w zależności od gatunku drewna, grupy drewna średniowymiarowego oraz od długości wałków.

**Tabela 1.** Charakterystyki statystyczne pomiarów współczynnika ścisłości dla stosów w Nadleśnictwie Dębica i wartość współczynnika zamiennego dla badanych grup surowca

| Gatunek                    | So           | Brz          | Bk           | Db           | Gb           | Os           | Ol           | Kl           | Js           |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Grupa<br>Długość [m]       | S2A –<br>1,2 | S2A –<br>1,0 | S2A –<br>1,0 | S2A –<br>1,0 | S2A –<br>1,0 | S2A –<br>1,0 | S2A –<br>1,0 | S2A –<br>1,0 | S2A –<br>1,0 |
| Współczynnik<br>zamienny   | 0,65         | 0,65         | 0,70         | 0,65         | 0,70         | 0,65         | 0,65         | 0,65         | 0,65         |
| Średnia                    | <b>0,80</b>  | <b>0,80</b>  | <b>0,71</b>  | <b>0,74</b>  | <b>0,78</b>  | <b>0,73</b>  | <b>0,77</b>  | <b>0,75</b>  | <b>0,78</b>  |
| Min.                       | 0,73         | 0,73         | 0,65         | 0,68         | 0,70         | 0,63         | 0,68         | 0,71         | 0,72         |
| Max.                       | 0,88         | 0,91         | 0,81         | 0,85         | 0,85         | 0,81         | 0,93         | 0,79         | 0,84         |
| Odchylenie<br>standardowe  | 0,05         | 0,07         | 0,05         | 0,06         | 0,05         | 0,07         | 0,08         | 0,03         | 0,04         |
| Współczynnik<br>zmienności | 6,00         | 8,40         | 7,36         | 7,92         | 5,88         | 9,11         | 10,53        | 3,53         | 5,14         |

Objaśnienia: **kolor zielony** – współczynnik ścisłości podobny do współczynnika zamiennego, **kolor czerwony** – wartość współczynnika ścisłości niższa od wartości współczynnika zamiennego, **kolor niebieski** – wartość współczynnika ścisłości wyższa od współczynnika zamiennego; So – sosna, Brz – brzoza, Bk – buk, Db – dąb, Gb – grab, Os – osika, Ol – olcha, Kl – klon, Js – jesion, Md – modrzew, Św – świerk, Jd – jodła, Lp – lipa



**Tabela 2.** Charakterystyki statystyczne pomiarów współczynnika ścisłości dla stosów w Nadleśnictwie Kłobuck i wartość współczynnika zamiennego dla badanych grup surowca

| Gatunek                 | So           |               | Md           |               | Brz          |               | Bk           |               | Db           |               | Gb          | Os           |               |
|-------------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
|                         | S2A –<br>2,5 | S2AP –<br>2,5 | S2A –<br>2,5 | S2AP –<br>2,5 | S2A –<br>2,5 | S2AP –<br>2,5 | S2A –<br>2,5 | S2AP –<br>2,5 | S2A –<br>2,5 | S2AP –<br>2,5 |             | S2A –<br>2,5 | S2AP –<br>2,5 |
| Grupa Długość [m]       |              |               |              |               |              |               |              |               |              |               |             |              |               |
| Współczynnik zamienny   | 0,62         | 0,62          | 0,62         | 0,62          | 0,60         | 0,60          | 0,63         | 0,63          | 0,60         | 0,65          | 0,63        | 0,60         | 0,60          |
| Średnia                 | <b>0,72</b>  | <b>0,55</b>   | <b>0,64</b>  | <b>0,64</b>   | <b>0,67</b>  | <b>0,57</b>   | <b>0,56</b>  | <b>0,64</b>   | <b>0,61</b>  | <b>0,56</b>   | <b>0,36</b> | <b>0,59</b>  | <b>0,62</b>   |
| Min.                    | 0,56         | 0,41          | 0,52         | 0,50          | 0,51         | 0,39          | 0,53         | 0,55          | 0,57         | 0,42          | 0,36        | 0,59         | 0,56          |
| Max.                    | 0,83         | 0,88          | 0,82         | 0,76          | 0,82         | 0,70          | 0,58         | 0,81          | 0,65         | 0,70          | 0,36        | 0,59         | 0,74          |
| Odchylenie standardowe  | 0,08         | 0,14          | 0,10         | 0,09          | 0,08         | 0,10          | 0,03         | 0,08          | 0,03         | 0,14          | 0,00        | 0,00         | 0,06          |
| Współczynnik zmienności | 11,74        | 25,60         | 15,04        | 13,62         | 12,52        | 17,88         | 4,50         | 12,92         | 5,51         | 25,00         | 0,00        | 0,00         | 10,37         |

Objaśnienia: jak w tabeli 1

**Tabela 3.** Charakterystyki statystyczne pomiarów współczynnika ścisłości dla stosów w Nadleśnictwie Międzyzlesie i wartość współczynnika zamiennego dla badanych grup surowca

| Gatunek                    | Św           |             | Jd           | Brz         | Bk           |              |             | Lp          |
|----------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Grupa<br>Długość [m]       | S2A –<br>2,4 | S4 –<br>1,2 | S2A –<br>2,4 | S4 –<br>2,4 | S2A –<br>1,2 | S2A –<br>2,4 | S4 –<br>1,2 | S4 –<br>2,4 |
| Współczynnik<br>zamienny   | 0,67         | 0,70        | 0,67         | 0,65        | 0,70         | 0,63         | 0,65        | 0,65        |
| Średnia                    | <b>0,77</b>  | <b>0,78</b> | <b>0,78</b>  | <b>0,65</b> | <b>0,70</b>  | <b>0,84</b>  | <b>0,74</b> | <b>0,61</b> |
| Min.                       | 0,68         | 0,68        | 0,63         | 0,55        | 0,62         | 0,73         | 0,50        | 0,54        |
| Max.                       | 0,84         | 0,87        | 0,99         | 0,72        | 0,77         | 0,99         | 0,89        | 0,70        |
| Odchylenie<br>standardowe  | 0,06         | 0,06        | 0,12         | 0,06        | 0,06         | 0,09         | 0,13        | 0,06        |
| Współczynnik<br>zmienności | 8,13         | 7,78        | 14,97        | 8,57        | 8,16         | 11,17        | 17,77       | 9,53        |

Objaśnienia: jak w tabeli 1

**Tabela 4.** Charakterystyki statystyczne pomiarów współczynnika ścisłości dla stosów w Nadleśnictwie Rudy Raciborskie i wartość współczynnika zamiennego dla badanych grup surowca

| Gatunek                         | So          |             |             | Św          |             | Md          |             | Brz         |             | Db          |             | Ol          |             |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Grupa<br>Długość [m]            | S2A – 2,5   |             | S4 –<br>1,2 | S2A – 2,5   |             | S2A – 2,5   |             | S2A – 2,5   |             | S2A – 2,5   |             | S4 –<br>1,2 | S4 –<br>2,5 |
|                                 | P           | F           | P           | P           | F           | P           | F           | P           | F           | P           | F           | P           | P           |
| Współ-<br>czynnik<br>zamienny   | 0,62        | 0,62        | 0,65        | 0,67        | 0,67        | 0,62        | 0,62        | 0,60        | 0,60        | 0,60        | 0,60        | 0,65        | 0,65        |
| Średnia                         | <b>0,62</b> | <b>0,66</b> | <b>0,70</b> | <b>0,58</b> | <b>0,61</b> | <b>0,60</b> | <b>0,68</b> | <b>0,58</b> | <b>0,65</b> | <b>0,54</b> | <b>0,56</b> | <b>0,60</b> | <b>0,63</b> |
| Min.                            | 0,52        | 0,52        | 0,52        | 0,50        | 0,52        | 0,52        | 0,57        | 0,50        | 0,60        | 0,48        | 0,50        | 0,52        | 0,52        |
| Max.                            | 0,70        | 0,76        | 0,85        | 0,66        | 0,68        | 0,65        | 0,86        | 0,67        | 0,73        | 0,59        | 0,62        | 0,64        | 0,77        |
| Odchylenie<br>standardowe       | 0,07        | 0,08        | 0,11        | 0,06        | 0,07        | 0,04        | 0,10        | 0,06        | 0,05        | 0,04        | 0,05        | 0,04        | 0,09        |
| Współ-<br>czynnik<br>zmienności | 10,55       | 12,59       | 15,49       | 10,96       | 10,73       | 7,24        | 15,14       | 9,69        | 7,22        | 7,41        | 8,87        | 7,36        | 13,48       |

Objaśnienia: P – drewno układane przyczepą samozaładowczą, F – drewno układane forwarterem. Pozostałe objaśnienia jak w tabeli 1

**Tabela 5.** Charakterystyki statystyczne pomiarów współczynnika ścisłości dla stosów w Nadleśnictwie Staszów i wartość współczynnika zamiennego dla badanych grup surowca

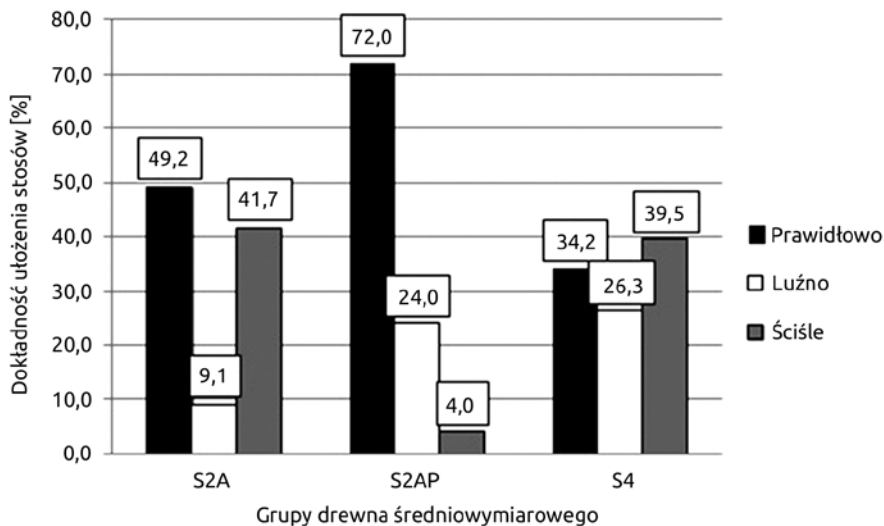
| Gatunek                    | So           |              | Brz          | Bk           | Db           | Gb           | Os           |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Grupa<br>Długość [m]       | S2A –<br>2,5 | S2A –<br>1,2 | S2A –<br>1,0 | S2A –<br>1,0 | S2A –<br>1,0 | S2A –<br>1,0 | S2A –<br>1,0 |
| Współczynnik<br>zamienny   | 0,62         | 0,65         | 0,65         | 0,70         | 0,65         | 0,70         | 0,65         |
| Średnia                    | <b>0,64</b>  | <b>0,68</b>  | <b>0,65</b>  | <b>0,72</b>  | <b>0,68</b>  | <b>0,73</b>  | <b>0,68</b>  |
| Min.                       | 0,57         | 0,65         | 0,62         | 0,68         | 0,62         | 0,67         | 0,63         |
| Max.                       | 0,72         | 0,70         | 0,71         | 0,79         | 0,74         | 0,80         | 0,71         |
| Odchylenie<br>standardowe  | 0,05         | 0,02         | 0,03         | 0,04         | 0,05         | 0,04         | 0,03         |
| Współczynnik<br>zmienności | 8,21         | 2,91         | 4,89         | 5,05         | 6,88         | 5,98         | 4,57         |

Objaśnienia: jak w tabeli 1

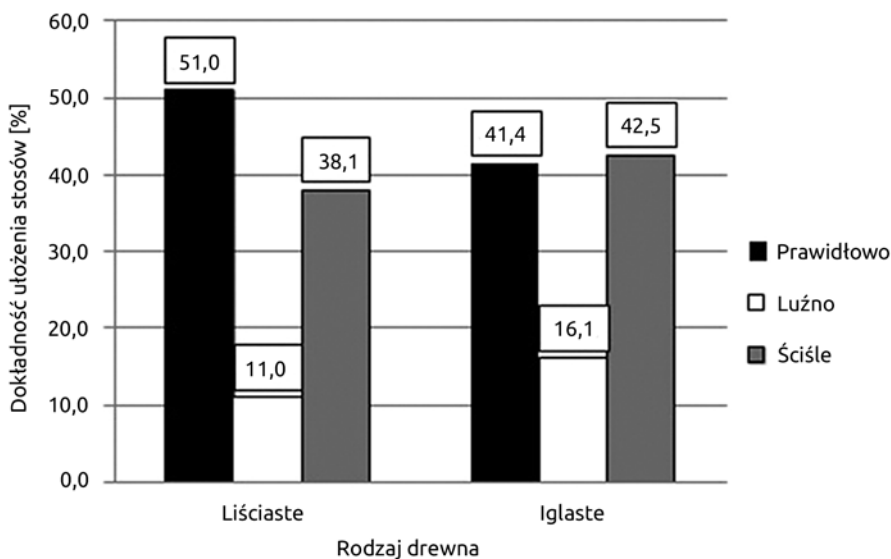
Analizując tabele (tab. 1–5) przedstawiające wyniki dla poszczególnych nadleśnictw, można stwierdzić, że gatunek drewna, grupa lub długość wałków nie wpływają znacząco na dokładność ułożenia stosów. Odnotowano, że zarówno drewno gatunków iglastych, jak i liściastych było ułożone w stosy prawidłowo, zbyt luźno lub zbyt ściśle. Podobne tendencje zauważono w przypadku grup drewna i długości wałków. Jedyny wpływ na dokładność ułożenia stosów miał sposób ich układania. W nadleśnictwach, w których prace te wykonywano ręcznie, stosy były układane prawidłowo lub zbyt ściśle (tab. 1, 3, 5). Z kolei tam, gdzie przyjęto maszynowy sposób, stosy ułożone były prawidłowo, zbyt ściśle, ale również zbyt luźno (tab. 2, 4). Zastosowane testy statystyczne nie dowiodły istotnych różnic między grupami danych w nadleśnictwach: Dębica, Międzyzlesie, Rudy Raciborskie i Staszów. Jedynie w Nadleśnictwie Kłobuck test Kruskala-Wallisa wykazał istotne różnice między współczynnikami ścisłości stosów dla poszczególnych grup drewna ( $H = 18,857$ ,  $p = 0,026$ ). Jednak po zastosowaniu testu wielokrotnych porównań post-hoc okazało się, że tylko współczynniki ścisłości dla drewna sosnowego grupy S2A i S2AP różnią się istotnie ( $p = 0,024$ ).

Uzyskane dane podzielono następnie według grup drewna średniowymiarowego (ryc. 2). W wyniku tego stwierdzono, że najwięcej stosów prawidłowo ułożonych wystąpiło w grupie S2AP, mniej w grupie S2A, a najmniej w grupie S4. Z kolei stosów ułożonych zbyt ściśle było najwięcej w grupie S2A i S4, a najmniej w grupie S2AP. Ok. 25% stosów ułożonych zbyt luźno stwierdzono w grupie S2AP i S4, natomiast poniżej 10% w grupie S2A.

Rodzaj drewna nie wpłynął znacząco na dokładność układania stosów (ryc. 3). Zarówno w przypadku drewna gatunków liściastych, jak i iglastych stwierdzono podobne ilości stosów ułożonych zbyt luźno i zbyt ściśle. Jedynie wśród stosów z drewna gatunków liściastych odnotowano o ok. 10% więcej ułożonych prawidłowo w stosunku do stosów z drewna gatunków iglastych.

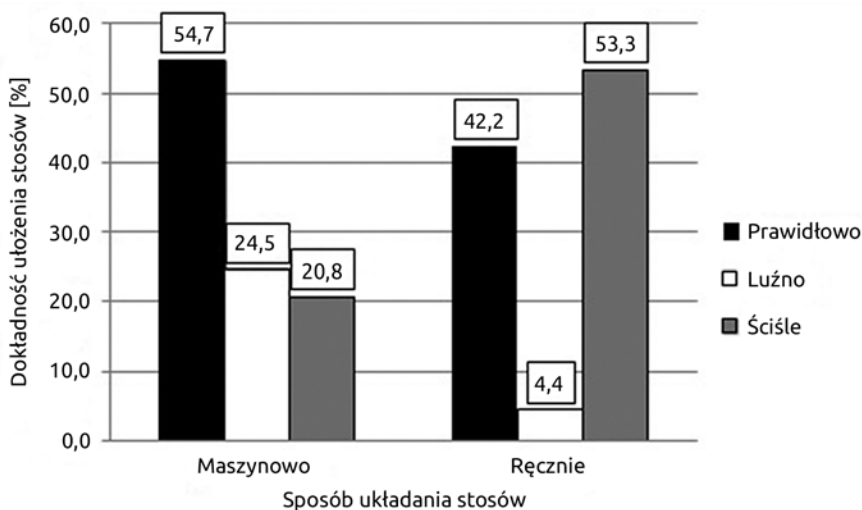


Ryc. 2. Dokładność ułożenia stosów w zależności od grupy drewna średniowymiarowego



Ryc. 3. Dokładność ułożenia stosów w zależności od rodzaju drewna

Analizując sposoby układania stosów: maszynowy lub ręczny, można zauważyć, że najwięcej stosów ułożonych prawidłowo (ponad 50%) wystąpiło przy zastosowaniu metody maszynowej (ryc. 4). Jednak duża część stosów (ok. 25%) ułożona była zbyt luźno, a także zbyt ściśle (ok. 20%). Przy użyciu ręcznego sposobu stwierdzono mniej stosów ułożonych prawidłowo (ok. 42%), natomiast niewiele stosów ułożonych zbyt luźno – ok. 4%. Niestety na skutek wykorzystania tej metody ponad połowa stosów ułożona była zbyt ściśle.



Ryc. 4. Dokładność ułożenia stosów w zależności od sposobu ich układania

#### 4. Dyskusja i wnioski

W niniejszych badaniach stwierdzono, że główny wpływ na dokładność ułożenia stosów ma sposób ich układania oraz (w mniejszym zakresie) grupa drewna. Większy udział stosów ułożonych prawidłowo (ok. 55%) stwierdzono w przypadku zastosowania metody maszynowej niż ręcznej (ok. 42%). Wykazano jednak również największy udział stosów ułożonych zbyt luźno przy użyciu sposobu mechanicznego – ok. 25%. Z kolei ponad połowa drewna rozmieszczonego ręcznie ułożona była zbyt ściśle. Wykonywanie tych prac ręcznie pozwala na dokładne dopasowanie wałków w stosie, co skutkuje często zbyt ścisłym ich ułożeniem. W rezultacie tego w stosach znajduje się więcej drewna niż przewidują współczynniki zamienne. Podobne wyniki z badań prowadzonych w Nadleśnictwie Rudy Raciborskie na terenach popożarowych przedstawili Sowa i Szewczyk (2018). Badając drewno sosnowe grupy S2A pozyskane pilarkami i układane ręcznie, uzyskali oni współczynniki przewyższające współczynniki zamienne (stosy ułożone zbyt ściśle), natomiast w przypadku drewna układanego mechanicznie

nie wykazali nieprawidłowości. Z kolei ułożenie w stosach drewna grupy S2AP, pozyskiwanego pilarkami i układanego ręcznie było prawidłowe, a pozyskiwanego i układanego maszynowo okazało się zbyt luźne. Przyczynami zbyt luźnego ułożenia stosów były w tym przypadku nie tylko krzywizny jednostronne i wielostronne, ale również jakość okrzesywania wałków, zwłaszcza z wierzchołkowych partii drzew, często dostateczna (zbyt wysokie sęki), co dodatkowo utrudniało odpowiednio ściśle rozmieszczenie drewna w stosach.

Rozpatrując dokładność ułożenia stosów ze względu na grupę drewna, wykazano, że najmniej korzystnie wypadła grupa S4. Stwierdzono w niej najmniej stosów ułożonych prawidłowo – zaledwie ok. 34% – i najwięcej stosów ułożonych zbyt luźno – ponad 25%. Wynikało to głównie z dopuszczalności wad i jakości okrzesywania. W grupie S4 krzywizny dopuszczalne są bez ograniczeń, natomiast w grupie S2A i S2AP krzywizny mają określone wymiary dopuszczalne (Warunki techniczne 2019 a). W grupie S2A jest to 8 cm/m, a w grupie S2AP – 12 cm/m. W przypadku krzywizn wielostronnych dopuszczalne są wymiary wynoszące połowę krzywizny jednostronnej. W grupach S2A i S2AP wymagane jest okrzesywanie dobre, a w grupie S4 – dostateczne. Okrzesywanie dobre to takie, po którym pozostają sęki o wysokości do 3 cm wysokości oraz jeden sęk wyższy na sztuce drewna (Warunki techniczne 2019 b). Z kolei okrzesywanie dostateczne to takie, po którym pozostają sęki do 5 cm wysokości i jeden sęk wyższy. Te dwie cechy powodują, że w stosach drewna z grupy S4 powstaje dużo wolnych przestrzeni i dokładność ich ułożenia jest gorsza.

Oczywiście analizując badane zagadnienie ze strony finansowej, pożądane jest prawidłowe ułożenie drewna w stosach. Wówczas wartość stosu drewna odpowiada ilości drewna w stosie. Z kolei jeżeli stos ułożony jest zbyt ściśle, to jego wartość jest zaniżona, ponieważ kupujący otrzymuje więcej drewna niż wskazuje na to wycena, co wiąże się ze stratą finansową sprzedającego. W przypadku stosów ułożonych zbyt luźno, występuje odwrotna sytuacja. Kupujący otrzymuje mniej drewna niż wskazuje na to wyceniona wartość stosu, z korzyścią dla sprzedającego. Takie przypadki kończą się często reklamacjami drewna i koniecznością kontroli ilości surowca w stosach.

W wyniku przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że:

1. Główny wpływ na dokładność ułożenia stosów ma sposób ich układania (ręczny lub maszynowy) oraz (w mniejszym zakresie) grupa drewna.
2. Gatunek drewna i długość wałków w stosach nie wpływają znacząco na dokładność ułożenia stosów.
3. Opisaną metodę sprawdzenia ściśłości ułożenia stosów można z powodzeniem wykorzystać do szybkiej kontroli dokładności ułożenia stosów drewna w terenie.

### *Źródło finansowania*

*Badania zostały sfinansowane z dotacji przyznanej przez MNiSW na działalność statutową.*

### Literatura

- Adamczyk P. 2014. Opał w kącie stoi... Głos Lasu, 10, 20–21.
- Grobelny D., Buźniak J., Szewczyk J. 2018. Aplikacja do pomiaru objętości drewna w stosach firmy Timbotech. Las Polski, 2, 12–15.
- Harhura J. 2018. Zmierzyć dokładniej. Gazeta Leśna, 2, 20–24.
- Kot S.M., Jakubowski J., Sokołowski A. 2007. Statystyka. Difin, Warszawa.
- Leśnictwo. 2019. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
- Majerowski T., Pranke W., Szmyra W. 2017. Oko w oko ze stosem. Głos Lasu, 11, 20–22.
- Monkielewicz L., Voelkel L. 1972. Użytkowanie lasu dla techników leśnych. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- PN-D-95000. 2002. Surowiec drzewny. Pomiar, obliczanie miąższości i cechowanie. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Sowa J.M., Szewczyk G. 2018. Cybernetyczne zasady prowadzenia cięć trzebieżowych w drzewostanach sosnowych wprowadzonych na tereny popożarowe. Sprawozdanie końcowe z tematu OR.271.3.6.2016. zleconego przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych, Warszawa.
- Warunki techniczne 2019 a. Warunki techniczne – Drewno średniowymiarowe. Załącznik Nr 9 do Zarządzenia Nr 51 DGLP z dnia 30.09.2019 r. Warszawa.
- Warunki techniczne 2019 b. Warunki techniczne – Zasady przygotowania do pomiaru, pomiar, obliczanie miąższości i cechowanie surowca drzewnego. Załącznik Nr 2 do Zarządzenia Nr 51 DGLP z dnia 30.09.2019 r. Warszawa.





# Możliwości pozyskania oraz wykorzystania na cele energetyczne biomasy zarastającej zbiorniki wodne. Studium przypadku: zbiornik wodny Tresna

Monika Barbara Gach

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kottłataja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-482 Kraków, e-mail: m.gach@urk.edu.pl

## Abstrakt

Tematem poruszonym w niniejszej pracy jest zagadnienie z zakresu odnawialnych źródeł energii, obejmujące problematykę technologii zbioru biomasy pozyskiwanej z roślin energetycznych, naturalnie porastających tereny okalające zbiorniki wodne. W artykule dokonano zwięzłej charakterystyki drzew, krzewów oraz roślinności zielonej i bylin o krótkim czasie produkcyjnym, rosnących na terenie zbiornika wodnego Tresna (Jeziora Żywieckiego), których części nadziemne mogą zostać wykorzystane do produkcji paliw stałych. W pracy dokonano przeglądu stanu wiedzy dotyczącej dostępnych technologii zbioru oraz cech konstrukcyjnych maszyn do pozyskiwania i przerobu materiału przeznaczanego do wytwarzania biopaliw.

**Słowa kluczowe:** tereny zalewowe, surowiec energetyczny, łągi wierzbowe, gatunki trawiaste

## 1. Wstęp

W Polsce mamy obecnie 140 sztucznych zbiorników wodnych, a jeziora zajmują powierzchnię 317 tys. ha. Sporą część terenów wokół, jak również obszar samych zbiorników wodnych porasta roślinność zielna, a wśród niej licznie występujące rośliny krótkiego cyklu, możliwe do wykorzystania w celach energetycznych. Rośliny bogate w związki celulozowe i ligninowe stanowią dobrą bazę do produkcji paliw ekologicznych, które mogą posłużyć do wytworzenia energii

elektrycznej oraz ciepłej (Lisowski i in. 2010). Polska, jako kraj członkowski, należący do Unii Europejskiej, musi dostosować się do obowiązujących zasad polityki energetycznej, co oznacza konieczność zwiększenia udziału produkcji energii z odnawialnych źródeł. Jedną z możliwości stanowi spalanie biopaliw pochodzących z biomasy. Przepisy wykorzystania surowców na cele energetyczne reguluje Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. (Juliszewski i in. 2012; Artyszak 2015; Jarosz 2017).

Do biomasy roślinnej możemy zaliczyć:

- części roślinne nieprzetworzone, w postaci ziarna zbóż, owoców i nasion oleistych, np. pestek słonecznika, oraz całych roślin,
- części roślinne w postaci przetworzonej lub rozdrobnionej, np. zrębki drzewne, wióry, korę, trociny, stanowiące często produkty uboczne obróbki surowca drzewnego,
- biomasę kompaktową, w skład której wchodzi m.in. pellet, brykiet oraz baloty (Stolarski i in. 2007; Artyszak 2015).

Największy udział surowcowy w produkcji biopaliw na rodzimym rynku mają produkty drzewne, w znacznej mierze pochodzące z tartaków oraz zakładów przetwórstwa drewna z odpadów poprodukcyjnych, jak również biomasa leśna, zebrana bezpośrednio z powierzchni objętych pozyskaniem drewna (cięcia pielęgnacyjne, przygodne, rębne). Technologia służąca do produkcji biopaliw pochodzenia drzewnego (pellet, brykiet) jest powszechnie dostępna i nieskomplikowana (Mudryk i Wróbel 2010; Juliszewski i in. 2012; Gołos i Kaliszewski 2013). Popyt na biopaliwa stale wciąż wzrasta, uzasadnione jest więc poszukiwanie alternatywnych źródeł bazy surowcowej (Juliszewski i in. 2012; Szubel i Goryl 2017).

Rosnące ceny energii elektrycznej oraz paliw kopalnych powodują wzrost zainteresowania stosowaniem biopaliw nisko przetworzonych w postaci np. zrębki drzewnej, której produkcja w dzisiejszych warunkach jest wysoce rentowna (Juliszewski i in. 2012; Antolak 2014; Szubel i Goryl 2017). Wymogi jakościowe dotyczące produkcji zrębki drzewnej są opisane w Załączniku 12 do Zarządzenia Nr 51 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 30.09.2019 r.

Stale wzrastające zapotrzebowanie na energię, intensywne działania ekologów skierowane na rozbudzanie świadomości społecznej dotyczącej obecnego stanu środowiska, w tym szczególnie zanieczyszczeń przez spalanie paliw kopalnych oraz produkcji nadmiernej ilości odpadów komunalnych, w połączeniu z krajowymi i unijnymi przepisami powodują, że coraz więcej uwagi poświęca się możliwościom pozyskania biomasy dla celów energetycznych, z przeznaczeniem na wytwarzanie biopaliw do stosowania głównie przez lokalne wspólnoty (Kowalczyk-Juško 2010).

Wykorzystywanie biomasy dynamicznie wzrasta. W 2010 r. udział biomasy roślinnej w produkcji energii elektrycznej na terenie naszego kraju w porównaniu z udziałem innych źródeł bioenergii (czystej energii) wynosił ponad 53%.

W pozostałych krajach Unii Europejskiej biomasa stanowi obecnie jeden z głównych zasobów czystej energii, służący do produkcji ciepła, energii elektrycznej oraz stosowany jako biopaliwo dla celów transportowych (Sala 2017).

Do głównych elementów oceny efektywności biomasy zalicza się czynniki ilościowe, w tym zwłaszcza produktywność mierzoną wielkością plonu w przeliczeniu na powierzchnię uprawową oraz aspekt jakościowy surowca (Roszkowski 2013).

Chęć wykorzystania biomasy roślinnej jako paliwa dla energetyki powoduje obligatoryjne badania nie tylko wartości opałowej pozyskanych surowców oraz zawartości wilgoci, ale przede wszystkim składu elementarnego, w tym udziałów siarki i chloru oraz metali alkalicznych (Król i in. 2010).

Jedną z ważniejszych kwestii dotyczących pozyskania biomasy jest możliwość mechanizacji prac związanych z pozyskaniem oraz przerobem zebranego materiału roślinnego (Lisowski i in. 2010; Artyszak 2015).

Technologie zbioru roślin są obecnie bardzo zróżnicowane. Na terenach wielkopowierzchniowych często zastosowanie mają maszyny użytkowane w gospodarce rolnej lub leśnej, wykorzystywane naprzemiennie w zależności od rodzaju pozyskiwanego materiału roślinnego (Dubas i Tomczyk 2005; Bocian i in. 2010; Lisowski i in. 2010). Obecnie często stosuje się podzespoły oraz całe maszyny specjalnie skonstruowane do prac na plantacjach energetycznych (Lisowski i in. 2010; Adamczyk i in. 2016). Poziom technologiczny oraz szczegółowa charakterystyka zespołów roboczych w znacznej mierze są uzależnione od powierzchni zajmowanej przez plantację roślinną, która w naszym kraju jest zmienna i waha się od kilku arów do kilkuset hektarów (Lisowski i in. 2010). Aktualna oferta maszyn do zbierania biomasy nie spełnia wszystkich możliwości pozyskania, np. biomasy z terenów wodno-błotnych.

## 2. Cel pracy i metody

Celem pracy było wyodrębnienie i oszacowanie potencjalnej bazy surowcowej, mogącej posłużyć do produkcji zielonej energii.

Na przykładzie wybranej bazy surowcowej dokonano oceny możliwości technologicznych pozyskania i przetworzenia materiału.

Podstawową metodą badawczą było studium bibliografii dotyczącej uprawy oraz możliwości wykorzystania grup roślinności na cele energetyczne. W pracy szczególnie wyróżniono gatunki drzewiaste, trawy i byliny naturalnie występujące na terenie Jeziora Żywieckiego, które mogą stanowić bazę do wieloletniego użytkowania w celach energetycznych. W artykule dokonano analizy istniejącej sieci technologicznej, możliwej do zastosowania w pozyskaniu i produkcji biopaliwa z plonu wymienionej w pracy roślinności.

### 3. Charakterystyka gatunków oraz zbiorowisk roślinnych okalających Jezioro Żywieckie, mogących stanowić bazę do produkcji biopaliw

Obecnie liczni autorzy prac naukowych wskazują, że istnieje baza wielu gatunków roślin, zwłaszcza wieloletnich, które można wykorzystać do produkcji biomasy energetycznej. Znaczący wpływ na lokalnie występującą grupę roślin wyróżnionych do produkcji biopaliwa mają warunki siedliskowe (Mola-Yudego 2010; Lisbeth i in. 2012; Mikó i in. 2013) oraz metody przetworzenia biomasy na energię (spalanie biomasy stałej, produkcja biogazu itp.), a także koszty związane transportem i przetworzeniem. Na podstawie badań przeprowadzonych na terenie Polski można stwierdzić, że plon suchej masy waha się od 8 do 24 t/ha. Praktyka pokazuje natomiast, że plony w warunkach produkcyjnych są najczęściej niższe i wynoszą od 6 do 12 t s.m./ha. „Potencjał biomasy roślin wieloletnich jest iloczynem powierzchni plantacji i jednostkowej wydajności. Natomiast wartość energetyczna plonu jest iloczynem jego masy i jednostkowej wartości energetycznej.” (Kowalczyk-Juśko 2010).

Jak podają w swojej pracy Małuszyńska i in. (2013), roślina przeznaczona na cele energetyczne powinna wykazywać następujące cechy: wieloletni wzmożony wzrost i rozwój, generatywny sposób rozmnażania, szybki wzrost na początku okresu wegetacyjnego oraz dużą zdolność krzewienia i rozgałęziania się, duży udział łądyg w części nadziemnej, małe wymagania siedliskowe, szybkie wysychanie roślin w okresie zimowym (zmniejszenie udziału wody w plonie podczas zbiorów), wysoką produkcję biomasy oraz dobre parametry jakościowe, związane z możliwością przetworzenia na biopaliwo.

Istotnym zbiorowiskiem roślinnym, z punktu widzenia produkcji biomasy energetycznej, występującym na terenie kaskady rzeki Soły są łągi wierzbowe, topolowe, olszowe i jesionowe (*Salicetum albo-fragilis*, *Populetum albae*, *Alnenion glutinoso-incanae*), olsy źródliskowe złożone głównie z takich gatunków, jak: wierzby, topole i olsze z domieszką innych gatunków liściastych oraz krzewów. Łączna powierzchnia wymienionych powyżej zbiorowisk w naszym kraju wynosi ok. 155 600 ha, natomiast szacowana powierzchnia zbiorowiska na terenie zbiornika wodnego Tresna wynosi ok. 200 ha. Ze względu na możliwości produkcji biopaliw stałych wartościową grupę stanowią również gatunki trawiaste z udziałem turzyc, trzcinników oraz bylin w postaci jeżyn. Tego typu zbiorowiska roślinne zajmują w Polsce obszar ok. 2 000 ha. Powierzchnia zbiorowiska na terenie zbiornika Tresna wynosi w przybliżeniu 4 ha. Na podstawie Raportu o oddziaływaniu na środowisko przedsięwzięcia pn. „Odmulenie zbiornika wodnego Tresna” z 2019 r. sporządzono spis roślin porastających tereny zbiornika Tresna w rejonie cofki rzeki Soły (ryc. 1). Wykaz roślin, które mogą posłużyć do produkcji biopaliw stałych, zamieszczono w tabeli 1. Wśród roślin wyróżniono 31 gatunków o zdrewniałym pniu, w tym głównie gatunki drzew i krzewów, oraz 48 gatunków bylin i roślin zielnych.

a)



b)



Ryc. 1. Obszar zlewni Soły porośnięty wierzwą w miejscu wpływu do zbiornika wodnego Tresna (fot. M.B. Gach)



**Tabela 1.** Wykaz roślinności o znaczącym potencjale do wykorzystania w celach energetycznych, porastającej tereny okalające zbiornik wodny Tresna

| Lp. | Nazwa łacińska                      | Nazwa polska         | Lp. | Nazwa łacińska                                    | Nazwa polska                |
|-----|-------------------------------------|----------------------|-----|---|-----------------------------|
| 1   | <i>Acer platanoides</i> L.          | klon pospolity       | 41  | <i>Carex hirta</i> L.                             | turzyca owłosiona           |
| 2   | <i>Acer pseudoplatanus</i> L.       | klon jawor           | 42  | <i>Carex remota</i> L.                            | turzyca rzadkokłosa         |
| 3   | <i>Acer saccharinum</i> L.          | klon srebrzysty      | 43  | <i>Chamaenerion palustre</i> Scop.                | wierzbówka nadrzeczna       |
| 4   | <i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn. | olsza czarna         | 44  | <i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P. Fuchs  | nerecznica krótkoostna      |
| 5   | <i>Alnus incana</i> (L.) Moench     | olsza szara          | 45  | <i>Epilobium ciliatum</i> Raf.                    | wierzbownica gruczołowata   |
| 6   | <i>Cerasus avium</i> (L.) Moench    | wiśnia ptasia        | 46  | <i>Epilobium hirsutum</i> L.                      | wierzbownica kosmata        |
| 7   | <i>Cornus sanguinea</i> L.          | dereń świdwa         | 47  | <i>Epilobium parviflorum</i> Schreb.              | wierzbownica drobnokwiatowa |
| 8   | <i>Corylus avellana</i> L.          | leszczyna pospolita  | 48  | <i>Festuca arundinacea</i> Schreb.                | kostrzewa trzcinowata       |
| 9   | <i>Crataegus monogyna</i> Jacq.     | głóg jednoszyjkowy   | 49  | <i>Festuca gigantea</i> (L.) Vill.                | kostrzewa olbrzymia         |
| 10  | <i>Frangula alnus</i> Mill.         | kruszyna pospolita   | 50  | <i>Festuca pratensis</i> Huds.                    | kostrzewa łąkowa            |
| 11  | <i>Fraxinus excelsior</i> L.        | jesion wyniosły      | 51  | <i>Ficaria verna</i> Huds.                        | ziarnopłon wiosenny         |
| 12  | <i>Juglans regia</i> L.             | orzech włoski        | 52  | <i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.            | wiązówka błotna             |
| 13  | <i>Padus avium</i> Mill.            | czereemcha zwyczajna | 53  | <i>Heracleum mantegazzianum</i> Sommier et Levier | barszcz Mantegazziego       |
| 14  | <i>Populus cfr 'NE 42'</i>          | topola cfr 'NE 42'   | 54  | <i>Heracleum sphondylium</i> L.                   | barszcz zwyczajny           |
| 15  | <i>Populus nigra</i> L.             | topola czarna        | 55  | <i>Holcus lanatus</i> L.                          | kłósówka wełnista           |
| 16  | <i>Populus tremula</i> L.           | topola osika         | 56  | <i>Humulus lupulus</i> L.                         | chmiel zwyczajny            |
| 17  | <i>Quercus robur</i> L.             | dąb szypułkowy       | 57  | <i>Juncus effusus</i> L.                          | sit rozpierzchły            |
| 18  | <i>Quercus rubra</i> L.             | dąb czerwonny        | 58  | <i>Juncus tenuis</i> Willd.                       | sit chudy                   |
| 19  | <i>Robinia pseudoacacia</i> L.      | robinia akacjowa     | 59  | <i>Juncus articulatus</i> L. em. K. Richt.        | sit członowaty              |

|    |  |  |                       |    |                                      |                       |
|----|--|--|-----------------------|----|--------------------------------------|-----------------------|
| 20 | <i>Salix alba</i> L.   |  | wierzba biała         | 60 | <i>Juncus bufonius</i> L.            | sit dwudzielny        |
| 21 | <i>Salix eleagnos</i> Scop.                                    |  | wierzba siwa          | 61 | <i>Juncus compressus</i> Jacq.       | sit ścięśniony        |
| 22 | <i>Salix fragilis</i> L.                                       |  | wierzba krucha        | 62 | <i>Juncus inflexus</i> L.            | sit siny              |
| 23 | <i>Salix purpurea</i> L.                                       |  | wierzba purpurowa     | 63 | <i>Leersia oryzoides</i> (L.) Sw.    | zamokrzyca ryżowa     |
| 24 | <i>Salix triandra</i> L.                                       |  | wierzba trójpręcikowa | 64 | <i>Lolium perenne</i> L.             | żylica trwała         |
| 25 | <i>Salix viminalis</i> L.                                      |  | wierzba wiciowa       | 65 | <i>Lolium multiflorum</i> Lam.       | żylica wielokwiatowa  |
| 26 | <i>Salix caprea</i> L.   |  | wierzba iwa           | 66 | <i>Lysimachia nummularia</i> L.      | tojeść rozestłana     |
| 27 | <i>Sambucus nigra</i> L.                                       |  | bez czarny            | 67 | <i>Lysimachia vulgaris</i> L.        | tojeść pospolita      |
| 28 | <i>Torillia japonica</i> (Houtt.) D.C.                         |  | kłobuczka japońska    | 68 | <i>Mentha ×verticillata</i> L.       | mięta okrągowa        |
| 29 | <i>Ulmus laevis</i> Pall.                                      |  | wiąz szypulkowy       | 69 | <i>Mentha longifolia</i> (L.) L.     | mięta długolistna     |
| 30 | <i>Ulmus minor</i> Mill. emend. Richens                        |  | wiąz pospolity        | 70 | <i>Poa annua</i> L.                  | wiechlina roczna      |
| 31 | <i>Viburnum opulus</i> L.                                      |  | kalina koralowa       | 71 | <i>Poa compressa</i> L.              | wiechlina spłaszczona |
| 32 | <i>Acorus calamus</i> L.                                       |  | tatarak zwyczajny     | 72 | <i>Poa pratensis</i> L.              | wiechlina łąkowa      |
| 33 | <i>Agrostis capillaris</i> L.                                  |  | miętlica pospolita    | 73 | <i>Poa trivialis</i> L.              | wiechlina zwyczajna   |
| 34 | <i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.                       |  | trybula leśna         | 74 | <i>Poa palustris</i> L.              | wiechlina błotna      |
| 35 | <i>Arctium lappa</i> L.  |  | łopian większy        | 75 | <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn | orlica pospolita      |
| 36 | <i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth                        |  | trzcinnik piaskowy    | 76 | <i>Rosa canina</i> L.                | róża dzika            |
| 37 | <i>Calamagrostis pseudophragmites</i> (Haller F.) Koeler       |  | trzcinnik szuwarowy   | 77 | <i>Rubus caesius</i> L.              | jeżyna popielica      |
| 38 | <i>Carex brizoides</i> L.                                      |  | turzyca drzączkowata  | 78 | <i>Rubus plicatus</i> Weihe et Nees  | jeżyna faldowana      |
| 39 | <i>Carex cuprina</i> (I. Sándor ex Heuff.) Nendtv. ex A. Kern. |  | turzyca niby-lisia    | 79 | <i>Urtica dioica</i> L.              | pokrzywa zwyczajna    |
| 40 | <i>Carex gracilis</i> Curtis                                   |  | turzyca zaostrzona    |    |                                      |                       |

## 4. Charakterystyka wyszczególnionych grup surowców energetycznych

Rośliny pogrupowano ze względu na rodzaj analizowanego surowca i na podstawie studium bibliografii określono wydajność pozyskania przypadającą na 1 ha. Wyodrębnionym grupom przyporządkowano średnią wartość opałową oraz zawartość popiołów. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Charakterystyka surowców energetycznych w zależności od rodzaju materiału

| Lp. | Rodzaj surowca | Wydajność pozyskania [t/ha/rok] | Popiół [kg i/kg p] | Wartość opałowa [MJ/kg] s.m. | Wartość energetyczna [GJ/ha] |
|-----|----------------|---------------------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1   | wierzba        | 15                              | 1,89               | 18,98                        | 274,89                       |
| 2   | topola         | 12                              | 1,81               | 18,67                        | 274,89                       |
| 3   | olsza          | 7,8                             | 1,67               | 17,97                        |                              |
| 4   | różowate       | 15                              | 2,65               | 18,75                        |                              |
| 5   | trzcinniki     | 17                              | 6,89               | 16,4                         |                              |
| 6   | trawy wysokie  | 17                              | 6,4                | 17                           | 217,6                        |

### 4.1. Wierzba (*Salix L.*)

Wierzba ma znaczący udział w gatunkach wykorzystywanych w celach energetycznych, występujących na terenie naszego kraju. Charakteryzuje się dużym przyrostem biomasy, sięgającym nawet 26 ton na ha/rok oraz wysoką wartością opałową, porównywalną z wartością niskiej jakości miazgi węglowej czy oleju opałowego. Wierzbę cechuje również łatwość oraz znaczna żywotność uprawy plantacyjnej (dochodząca do 30 lat). Do celów energetycznych najczęściej wykorzystuje się wierzbę wiciową, która jest gatunkiem odpornym na choroby. Do prawidłowego i szybkiego rozwoju potrzebuje zapewnienia odpowiedniej ilości wody. Wierzbę przeznaczoną do produkcji energetycznej uprawia się zwykle w formie krzewiastej w cyklu jedno-, dwu- lub trzyletnim. Zbiór odbywa się od grudnia do marca. Świeżo pobrane witki wierzbowe charakteryzują się znaczną wilgotnością, sięgającą nawet do 60%. Wysoka wilgotność świeżo zebranego materiału wymusza konieczność suszenia uzyskanego plonu. Na terenie zbiornika wodnego Tresna stwierdzono występowanie 7 gatunków wierzby: białej, siwej, kruchej, purpurowej, trójpręcikowej, wiciowej oraz iwy. Wierzba stanowi główny gatunek drzew porastających tereny wokół Jeziora Żywieckiego.



## 4.2. Topola (*Populus* L.)

Topola jest kolejnym gatunkiem o znaczącym udziale w roślinach wykorzystywanych do produkcji energii. Liczba odmian i mieszańców tego gatunku wynosząca ponad 100 świadczy o tym, że cieszy się on dużym zainteresowaniem w zakresie zastosowania do celów energetycznych i papierniczych. Topola do prawidłowego rozwoju i szybkiego wzrostu potrzebuje podłoża żyznych i zasobnych w wodę. Plantację topoli zakłada się głównie przy wykorzystaniu zrzesów w miesiącach wczesnowiosennych. Zbiór plonu na plantacjach energetycznych odbywa się w cyklach dwuletnim do nawet sześcioletniego. Pozyskanie plonu najczęściej trwa od grudnia do końca lutego.

## 4.3. Olsza (*Alnus* L.)

Olsza jest gatunkiem wykorzystywanym w energetyce przede wszystkim jako domieszka wzbogacająca, produkowana w postaci zrębków lub balotów, głównie w trakcie prowadzonych prac pozyskaniowych w leśnictwie. Jest gatunkiem pionierskim i cechuje się szybkim przyrostem. Drewno olszy spala się szybko i równomiernie, znalazło zastosowanie w produkcji węgla drzewnego.

## 4.4. Różowate

Różowate są pospolitymi roślinami na terenie naszego kraju. Rośliny z rodziny różowatych często występują w gęstych skupiskach na znacznych powierzchniach. Na szczególne wyróżnienie w tej grupie zasługuje róża wielokwiatowa. Roślina ta jest często uprawiana na plantacjach energetycznych. Różowate bujnie się rozrastają, wytwarzając dużą ilość długich pędów. Różowate posiadają długie systemy korzeniowe i z reguły są odporne na choroby. Zbiór roślin z tej rodziny przeznaczony na cele energetyczne rozpoczyna się pod koniec października i trwa do wiosny. Plantacje są długowieczne, czas eksploatacji może przekroczyć nawet 25 lat. Pozyskanie plonu odbywa się w cyklu dwuletnim.

## 4.5. Trzcinniki i trawy wysokie

Trawy i trzcinniki charakteryzują się krótkim, bo półrocznym i jednorocznym cyklem produkcyjnym. Rośliny te z reguły nie mają dużych wymagań siedliskowych, a ich żywotność plantacyjna sięga ok. 25 lat. Biomasa traw powinna być pozyskiwana maszynami przygotowującymi do bezpośredniego spalania, w postaci bel wielkogabarytowych o wysokim stopniu zgniotu.


## 5. Technologie zbioru i przetwórstwa biomasy

Wybór metody pozyskania jest jednym z ważniejszych aspektów pozyskiwania biomasy roślinnej. Szczególne znaczenie ma dobór elementów ścinających, zwłaszcza w przypadku biomasy pochodzącej z drzew i krzewów (ścinka pojedynczych sztuk, ścinka grupowa). Mniejszą wagę ma dobór elementów ścinających roślinność trawiastą, do pozyskiwania której wykorzystywane są maszyny stosowane do zbioru plonu zbóż. Na małych powierzchniach często praktykowany jest ręczno-maszynowy system pozyskania, w przypadku zadrzewień zastosowanie znajdują piły tarczowe na wysięgniku, piły spalinowe, kosiarki rotacyjne, a zebrany materiał, w zależności od ilości oraz rodzaju sortymentu, zostaje pakietowany, prasowany lub układany w stosy, a następnie transportowany do miejsca przeznaczenia. Na stosunkowo niewielkich obszarach wykorzystuje się maszyny o prostej budowie, których obsługa jest nieskomplikowana. W przypadku średnich oraz dużych powierzchni następuje wzrost mechanizacji prac aż do w pełni automatycznego systemu pozyskania (Trzepieciński i in. 2016). Znaczący wpływ na sposób zbioru oraz technologie wykorzystywane w trakcie pozyskania plonu ma również wcześniej obrany cykl produkcyjny – im krótszy cykl, tym forma technologii produkcyjnej jest bardziej zbliżona do tej stosowanej w rolnictwie do zbiorów zbóż i kukurydzy czy traw na cele paszowe. Technologie zbioru roślin w zależności od cyklu produkcyjnego przedstawiono w tabeli 3.

Do pozyskania gatunków drzewiastych o cyklu zbioru pięcioletnim lub dłuższym najczęściej wykorzystuje się maszyny stosowane w leśnictwie (maszyny trzebieżowe) i sadownictwie. Do zbioru roślin o cyklu jednorocznym i dwuletnim używa się zmodyfikowanych maszyn wykorzystywanych w rolnictwie, często wyposażonych w głowicę pakietującą lub rębak ścinający biomasę drzewną i jednocześnie rozdrabniający jej zrębki. Innym rozwiązaniem są maszyny do zbioru i balotowania całych roślin. Przy zbiorze jednoetapowym, w trakcie którego rozdrabnia się uzyskany materiał drzewny, można stosować zmodyfikowane kombajny do zbioru np. kukurydzy. Na małych powierzchniach zbiór plonów można wykonać w sposób ręczny, przy wykorzystaniu wykaszarek spalinowych.



Rozróżnia się dwie technologie maszynowego zbioru wierzby i gatunków krzewiastych. Zbiór jednoetapowy polega na pozyskaniu i przetworzeniu (rozdrobnieniu) materiału. Operacje te prowadzone są jednocześnie podczas przejazdu maszyny pozyskującej plon. Maszyny stosowane w jednoetapowym sposobie zbioru wyposażone są w przystawkę ścinającą w postaci pilarki tarczowej (Woodcat 1550) lub zestawu dwóch pilarek tarczowych (Class Jaguar HS2, New Holland FR9000), ewentualnie pilarki łańcuchowej (Bender 6WG) (Adamczyk i in. 2014; Stolarski i in. 2015).

Tabela 3. Technologie zbioru roślin i maszyny robocze

| Sposób zbioru    | Drzewa i krzewy krótkiego cyklu produkcyjnego (topola, wierzba, różne itp.)   | Trawy, trzcinniki i byliny wieloletnie (trzciny, pokrzywa, kostrzewa, tatarak itp.)   |
|------------------|---|---|
| cykl jednoroczny | sieczkarnie ciągnikowe rolnicze stosowane m.in. w trakcie zbioru kukurydzy  | sieczkarnie ciągnikowe rolnicze stosowane m.in. w trakcie zbioru kukurydzy  |
| Jednoetapowo     | <p>cykl dwu- do pięcioletni</p> <p>transport</p>  | <p>sieczkarnie ciągnikowe samojezdne lub doczepiane do ciągnika rolniczego, zaopatrzone w specjalną przyssawkę</p> <p>głównie w postaci zrebki sprzedawane w formie objętościowej, transportowane na przyczepach, w kontenerach, ciągnikami lub samochodami ciężarowymi</p> |
| Dwuetaapowo      | <p>ściananie w cyklu jednorocznym</p> <p>ściananie w cyklu dwu- do pięcioletnim</p> <p>ściananie w cyklu pięciodo trzydziesto-letnim</p>  | <p>przyczepy objętościowe transportowane ciągnikami lub samochodami ciężarowymi</p> <p>kosiarki rotacyjne (z kondycjonerem), ciągnikowe lub samojezdne</p>  |
|                  | <p>sekatory, wykaszarki spalinowe, kosiarki ciągnikowe z piłą tarczową, maszyny specjalne ścinające i wiążące lub przymujące, maszyny ścinająco-prasujące</p> <p>pilarki spalinowe, wykaszarki spalinowe, kosiarki ciągnikowe z piłą tarczową, maszyny specjalne ścinające i wiążące lub przymujące, maszyny ścinająco-prasujące</p> <p>maszyny stosowane w leśnictwie, głównie harwestery, oraz ciągniki z głowicą pakietującą</p> |   |
|                  |    |   |

(fot. M.B. Gach)

Tabela 3. cd.

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p>Sposób zbioru</p> <p>zbiór /<br/>prasowanie<br/>załadunek<br/>i rozładunek</p> | <p>Drzewa i krzewy krótkiego cyklu produkcyjnego (topoła, wierzba, róża itp.)</p>  <p>ładowarki typu HDS sparwane z ciągnikami, forwardery lub skidery chwytakowe, czasami załadunek ręczny</p> <p>(fot. M.B. Gach)</p> | <p>Trawy, trzcinniki i byliny wieloletnie (trzciny, pokrzywa, kostrzewa, tatarak itp.)</p> <p>prasy zwijające, łożkowe wielkogabarytowe, przyczepy zwijające, prasy do słomy i traw</p> <p>ładowarki czołowe lub chwytakowe do bel</p> |
| <p>Dwuetałowo</p> <p>transport</p> <p>przetwarzanie /<br/>rozdrabnianie</p>       | <p>przyczepy ciągnikowe lub samochody, przyczepy leśne</p> <p>rębaki do drewna, urządzenia zrzębkujące</p>  <p>(fot. M.B. Gach)</p>  | <p>przyczepy ciągnikowe lub samochody, przyczepy samozładowcze</p> <p>szarpacze do słomy, rozdrabniacze nożowe, rozdrabniacze do słomy</p>   |

Zbiór dwuetapowy polega na pozyskaniu całych części roślinnych, pobrane w ten sposób są poddawane procesowi sezonowania na pryzmach. Następnie po osiągnięciu odpowiedniej wilgotności materiał zostaje rozdrobniony przy użyciu rębarek. Metoda ta pozwala na zmniejszenie zużycia paliwa w przeliczeniu na tonę świeżych roślin (Adamczyk i in. 2014). Innowacyjne rozwiązanie w postaci maszyny do dwufazowego zbioru pędów wierzby zaproponował Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych (PIMR). Jest to urządzenie zagregowane z ciągnikiem rolniczym, zbierające pędy z dwóch rzędów o rozstawie 0,75 m. Zestaw tnący stanowią dwie piły tarczowe, zlokalizowane w przedniej części ramy na układzie równoległoboku posiadającego koło kopiujące, które utrzymuje stałą wysokość roboczą zestawu tnącego. Pozyskane pędy automatycznie transportowane są przez przenośnik do skrzyni ładunkowej (Adamczyk i in. 2014; Kapela i in. 2019).

Ciekawym rozwiązaniem jest zbiór wierzby, któremu jednocześnie towarzyszy jej prasowanie w formę okrągłych bel np. przy użyciu Biobalera WB 55. W celu umożliwienia długotrwałego przechowywania przygotowany w ten sposób materiał należy utrzymywać w warunkach chroniących przed opadami atmosferycznymi, np. pod zadaszeniem. Sezonowany w belach materiał po osiągnięciu odpowiednich parametrów wilgotnościowych poddaje się rozdrobnieniu w rozdrabniaczach nożowych.

Obecnie w Polsce do zbioru traw oraz innej roślinności zielonej stosuje się kosiarki rotacyjne oraz kombajny z prasami zwijającymi, balotującymi bele pod wysokim ciśnieniem. Pozyskaną biomasę przeznacza się na cele energetyczne lub ciepłne bezpośrednio bądź też po odpowiednim przetworzeniu (wysuszeniu, obróbce itp.).

Najczęściej wykorzystywanym biopaliwem w Polsce jest drewno opałowe w postaci kawałków drewna, spalanych w gospodarstwach domowych w kominach grzewczych. Drewno takie sprzedaje się najczęściej w metrach przestrzennych, w formie wałków opałowych, ułożonych w stosy.

Zrębki drzewne oraz biomasa sypka są zwykle spalane w kotłach automatycznych z systemem kontrolującym ilość i odstępy czasowe podawania do komory spalania. Zrębki drzewne w celu polepszenia właściwości energetycznych należy poddać procesowi suszenia.

W ostatnich latach zwiększyła się liczba zakładów zajmujących się przetwarzaniem biomasy na brykiety i pellety. Zagęszczając wsadowy materiał do postaci pelletów, uzyskuje się biopaliwo o bardzo dobrych właściwościach energetycznych, podobnie jak zrębki drzewne spalane w kotłach z podajnikiem. Pellet i brykiet poddawane są procesowi standaryzacji wymiarów i wilgotności. Pellet produkowany jest z materii roślinnej i ma najlepsze parametry pod względem kaloryczności. Pelletowanie odbywa się na linii technologicznej, w której substrat roślinny na skutek wysokiego ciśnienia w sposób ciągły ulega

kształtowaniu w procesie prasowania i, będącego jego następstwem, zagęszczania. Uzyskany materiał jest cięty na równe fragmenty i pakowany.

Baloty wytworzone ze sprasowanych traw oraz słomy są spalane w specjalnie skonstruowanych kotłach. Do ogrzania domu o powierzchni ok. 200 m<sup>2</sup> potrzeba ok. 8 ton balotów, co odpowiada plonowi z powierzchni ok. 3 ha. Odpowiednio dobranej technologii spalania biomasy powinna towarzyszyć analiza wpływu technologicznego przygotowania biomasy na sprawność energetyczną jednostek kotłowych i zużycie energii elektrycznej. Niestety obecnie znaczna ilość biomasy przeznaczonej do celów cieplnych ma niestabilną wilgotność, co przekłada się na niedoprecyzowaną wartość opałową, która z reguły jest niższa od wartości opałowej węgla. Skutkuje to spadkiem wydajności kotła i parametrów wytwarzanej energii.

Ważnym zagadnieniem dotyczącym metod pozyskiwania biomasy w krótkich cyklach jest również utrzymanie powierzchni produkcyjnej w możliwie najlepszej kondycji. W tym celu powierzchnie produkcyjne, podobnie jak pola w rolnictwie, powinny podlegać płodozmiansom. Każdą wieloletnią uprawę należy poddawać przemianie i odnowieniu lub przekształceniu w inny rodzaj uprawy. Zabieg ten pozwala na utrzymanie gleby w dobrej kondycji oraz przyczynia się do efektywnego obiegu związków oraz składników mineralnych w glebie, nie powodując jej zubożenia. Stosowanie płodozmienu jest również wskazane ze względów ekonomicznych i w znacznej mierze zależy od popytu na dany surowiec energetyczny. W przypadku tych prac wysokie koszty ponosi się na usuwaniu pozostałości po plonach głównie gatunków drzewiastych i krzewiastych (wierzba, robinia akacjowa, różowate). W celu dokładnego oczyszczenia powierzchni z poprzedniej bazy produkcyjnej należy stosować brony, glebogryzarki oraz karczowniki. Jak podają w opracowaniach liczni autorzy, im dłuższa możliwość produkcyjna z jednej bazy surowcowej, tym koszty jednostkowe uprzętnięcia powierzchni są mniejsze (Stolarski i in. 2008; Adamczyk i in. 2016).

## 6. Dyskusja

Jak podają liczni autorzy (Juliszewski i in. 2012; Artyszak 2015; Jarosz 2017), biomasa roślinna przeznaczona do celów energetycznych stanowi obecnie główne źródło energii odnawialnej wykorzystywanej w Polsce.

Popyt na biopaliwa stale wzrasta, dlatego uzasadnione jest poszukiwanie alternatywnych źródeł bazy surowcowej (Juliszewski i in. 2012; Szubel i Goryl 2017). W związku z tym stwierdzeniem bazę surowcową można poszerzyć o roślinność porastającą znaczne tereny obszarów wodnych i okołowodnych.

Roślinność przeznaczona na biomasę powinna wykazywać szczególne cechy jakościowe oraz charakteryzować się dużą wydajnością i stosunkowo niskimi



wymaganiami środowiskowymi (Małuszyńska i in. 2013). Zgodnie z tymi założeniami wyróżniono 79 gatunków roślin porastających teren zbiornika wodnego Tresna, spełniającymi podane kryteria i utworzono 6 grup surowcowych, które mogą stanowić bazę do pozyskania na cele energetyczne.

Dążąc do polepszenia wartości energetycznej biopaliwa roślinnego (Król i in. 2010; Roszkowski 2013), należy przeprowadzić analizy laboratoryjne składu elementarnego zebranego plonu oraz poddać go standaryzacji w celu dokonania normalizacji produkcji energetycznej.

Zgodnie z tym, co podają Lisowski i in. (2010), obecnie brakuje idealnych rozwiązań technologicznych w zakresie zbioru oraz przetwórstwa biomasy roślinnej. Większość praktykowanych metod pozyskania wiąże się z wykorzystaniem zmodyfikowanych (dostosowanych) urządzeń stosowanych w branży rolniczej i leśnej.

## 7. Wnioski

W tabeli 4 przedstawiono zalety i wady wykorzystania biomasy porastającej tereny wokół zbiorników wodnych. Tabela jest opracowaniem własnym, w którym odwołano się do licznych tez zawartych w cytowanej powyżej literaturze oraz do przemyśleń własnych autorki.

**Tabela 4.** Zalety i wady wykorzystania biomasy porastającej tereny wokół zbiorników wodnych

| Zalety i wady wykorzystania biomasy porastającej tereny wokół zbiorników wodnych                  |   |
|---|---|
| Zalety  | Wady  |
| brak konieczności poniesienia znacznych nakładów finansowych na założenie plantacji energetycznej | znaczna i niejednorodna wilgotność surowca (konieczne przygotowanie do dalszego przerobu) |
| znaczna ilość materiału stanowiącego bazę surowcową   | różne fazy rozwojowe oraz postać surowca mogącego służyć jako biomasa                     |
| duża różnorodność gatunkowa (sezonowość), ograniczenie monokultur                                 | niejednolita powierzchnia, czasowo zalewowa   |
| odporność materiału na patogeny   | płatowe (rozdrobnione) występowanie skupisk roślinności                                   |
| materiał dobrej jakości   | stosunkowo niska wartość energetyczna w porównaniu z surowcami kopalnymi                  |

Tabela 4. cd.

| Zalety i wady wykorzystania biomasy porastającej tereny wokół zbiorników wodnych |   |
|--|---|
| Zalety   | Wady  |
| szybki przyrost, żyzne podłoże (brak konieczności nawożenia i nawadniania)       | wysokie koszty pozyskania (konieczność inwestycji w specjalistyczny sprzęt służący do pozyskania) |
| zagospodarowanie nieużytków  | uzależnienie od sposobu zagospodarowania terenu przez lokalne władze                              |
| kontrola sukcesji roślinności  |   |
| rozwój terenu, przeciwdziałanie bezrobociu                                       |   |
| alternatywne wykorzystanie surowców na cele energetyczne                         |   |
| nieszkodliwość dla środowiska  |   |
| stały dostęp do bazy surowcowej  |   |
| ochrona gleby przed erozją i zachwaszczeniem                                     |   |

Źródło: opracowanie własne

1. Szacowanie zasobów biomasy roślinnej, która może być bazą do produkcji biopaliw, stanowi istotny problem praktyczny.
2. Jak podają w swoich pracach m.in. Juliszewski i in. (2012), Antolak (2014) oraz Szubel i Goryl (2017), produkcja paliw pochodzących z materii roślinnej obecnie jest uzasadniona ekonomicznie.
3. Zgodnie ze spostrzeżeniami Lisowskiego i in. (2010) koszty związane z pozyskaniem biomasy, w tym ceny maszyn, paliwa oraz innych składowych, są zmienne i powinny być uwzględnione przed przystąpieniem do prac pozyskaniowych.
4. Zwracając uwagę na szczególne właściwości roślin energetycznych, Małuszyńska i in. (2013) stwierdzili, że roślinność okalająca zbiorniki wodne może być zakwalifikowana do grupy alternatywnych, naturalnych surowców energetycznych i wykorzystana jako paliwo zastępujące materiał opałowy wytwarzany z surowców kopalnych oraz pochodzących z plantacji energetycznych.
5. W celu uzyskania lepszych parametrów energetycznych pozyskany materiał roślinny powinien zostać poddany procesowi suszenia oraz częściowej obróbki.



6. Zgodnie z informacjami zawartymi w tabeli 2 analizowane grupy materiałów wykazują zróżnicowane wartości energetyczne, najlepiej klasuje się drewno drzew i krzewów oraz materia pochodząca z roślin z rodziny różowatych.
7. Rośliny przeznaczone do celów energetycznych z reguły należy pozyskiwać po sezonie wegetacyjnym, w okresie od października do marca. Zebrany w tym przedziale czasowym materiał ma najmniejszy udział wody oraz ze względu na częściowy lub całkowity brak ulistnienia jest łatwiejszy w obróbce.
8. Istotnym aspektem prac pozyskaniowych, który wymaga uwzględnienia, jest dostosowanie parametrów urządzeń zbierających plon do panujących warunków, np. do różnorodnego materiału. Maszyna pracująca na powierzchniach okalających zbiorniki wodne powinna być technologicznie wielooperacyjna, z możliwością wymiany podzespołów tnących.

## Literatura

- Adamczyk F., Dach J., Szulc R., Janczak D., Lenarczyk J., Rzeźnik I., Rzeźnik W., Zbytek Z. Red. 2014. Kierunki rozwoju ekoenergetyki w polskim rolnictwie. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej w Krakowie, Kraków.
- Adamczyk F., Frąckowiak P., Juliszewski T., Kwaśniewski D., Pietrzykowski M., Szczepaniak J., Tylek P., Walczyk J., Woś B. 2016. Likwidacja plantacji wierzy energetycznej. Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, Poznań.
- Antolak M., Połucha I., Jaszczak A., Marks E. 2014. Plantacje drzew i krzewów szybko rosnących w krajobrazie Polski. Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego, 25, 71–80.
- Artyszak D. 2015. Rośliny energetyczne – charakterystyka podstawowych gatunków i ich wykorzystanie w polskiej energetyce. Materiały Konferencyjne z Konferencji „Nowoczesna Energetyka Europy Środkowo-Wschodniej”, Warszawa.
- Bocian P., Golec T., Rakowski J. Red. 2010. Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystania biomasy. Monografia. Instytut Energetyki, Warszawa.
- Dubas J.W., Tomczyk A. 2005. Zakładanie, pielęgnacja i ochrona plantacji wierzb energetycznych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r.
- Gołoś P., Kaliszewski A. Red. 2013. Biomasa leśna na cele energetyczne. Wydawnictwo Instytutu Badawczego Leśnictwa, Sękocin Stary.
- Jarosz Z. 2017. Potencjał energetyczny biomasy roślinnej i możliwości wykorzystania do celów energetycznych. Zeszyty Naukowe SGGW, 2, 81–92.
- Juliszewski T., Kwaśniewski D., Mudryk K., Wróbel M. 2012. Ocena wybranych parametrów biomasy pozyskanej z plantacji drzew szybko rosnących. Inżynieria Rolnicza, 2(136), 1, 89–97.
- Kapela D., Adamczyk F., Szaroleta M., Wąchalski G. 2019. Przegląd konstrukcji maszyn do zbioru wikliny. Technika Rolnicza, Ogrodnicza i Leśna, 2, 7–9.

- Kowalczyk-Juško A. 2010. Metodyka szacowania regionalnych zasobów biomasy na cele energetyczne. *Zeszyty Naukowe SGGW*, 85, 103–116.
- Król D., Łach J., Poskrobko S. 2010. O niektórych problemach związanych z wykorzystaniem biomasy nieleśnej w energetyce. *Energetyka i Ekologia*, 1, 53–62.
- Lisbeth S., Nord-Larsen T., Raulund-Rasmussen K. 2012. Biomass Production of Four Willow Clones Grown as Short Rotation Coppice on Two Soil Types in Denmark. *Biomass and Bioenergy*, 46(November), 664–672.
- Lisowski A., Chlebowski J., Klonowski J., Nowakowski T., Strużyk A., Sypuła M. 2010. Technologie zbioru roślin energetycznych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Małuszyńska I., Wodziński M., Małuszyński M.J. 2013. Wykorzystanie biomasy do celów energetycznych. Możliwości i ograniczenia. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 62, 487–497.
- Mikó P., Kovács G.P., Alexa L., Balla I., Póti P., Gyuricza Cs. 2013. Biomass Production of Energy Willow under Unfavourable Field Conditions. *Applied Ecology and Environmental Research*, 12(1), 1–11.
- Mola-Yudego B. 2010. Regional Potential Yields of Short Rotation Willow Plantations on Agricultural Land in Northern Europe. *Silva Fennica*, 44(1), 63–76.
- Mudryk K., Wróbel M. 2010. Maszyny i urządzenia. W: *Przetwarzanie Biomasy na cele energetyczne*. J. Frączek. Red. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków.
- Roszkowski A. 2013. Energia z biomasy – efektywność, sprawność i przydatność energetyczna. Cz. 1. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 1, 97–124.
- Sala K. 2017. Przemysłowe wykorzystanie biomasy w Polsce. Przesłanki i bariery. *Prace Komisji Geografii Przemysłu Polskiego Towarzystwa Geograficznego*, 31(4), 148–156.
- Stolarski M.J. 2004. Produkcja oraz pozyskiwanie biomasy z wieloletnich upraw roślin energetycznych. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 3, 47–56.
- Stolarski M., Kisiel R., Szczukowski S., Tworkowski J. 2008. Koszty likwidacji plantacji wierzby krzewiastej. *Roczniki Nauk Rolniczych, Seria G*, 94, 2, 172–177.
- Stolarski M.J., Krzyżaniak M., Szczukowski S., Tworkowski J., Grygutis J. 2015. Changes of the Quality of Willow Biomass as Renewable Energy Feedstock Harvested with Biobaler. *Journal of Elementology*, 20(3), 717–730. DOI: 10.5601/jelem.2014.19.3.769.
- Stolarski M.J., Szczudkowski S., Tworkowski J., Kwiatkowski J., Grzelczyk M. 2007. Charakterystyka wybranych biopaliw z biomasy stałej. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 4, 21–26.
- Szubel M., Goryl W. Red. 2017. *Drewno w energetyce*. Fundacja na rzecz Czystej Energii, Poznań.
- Tekst jednolity raportu o oddziaływaniu na środowisko przedsięwzięcia pn. „Odmulenie zbiornika wodnego Tresna”. 2019. Kielce.
- Trzepieciński T., Stachowicz F., Niemiec W., Kępa L., Dziurka M. 2016. Harvesting Machines for Willow Small-sizes Plantations in East-Central Europe. *Croatian Journal Forest Engineering*, 37, 1, 185–199.
- Załącznik 12 do Zarządzenia Nr 51 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 30.09.2019 r. w sprawie wprowadzenia warunków technicznych stosowanych w obrocie surowcem drzewnym w Państwowym Gospodarstwie Leśnym Lasy Państwowe.

# Straty drewna w nadleśnictwach dorzecza rzeki Soły poniesione na skutek powodzi, które występowały w latach 1996–2011

Jakub Ptak

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

## Abstrakt

Gwałtowne wezbrania wody mogą być przyczyną znacznych strat materialnych. W niniejszej pracy dokonano analizy gospodarczej strat drewna w celu określenia wartości pieniężnej utraconego surowca oraz zwrócono uwagę na problem osuwisk oraz powodzi na terenach nadleśnictw znajdujących się dorzeczu Soły. Powodzie spowodowane przez krótkotrwałe i intensywne opady deszczu występują w Karpatach prawie każdego roku. W pracy skupiono się na klęskach, które wystąpiły w latach 1996–2011 na obszarze dorzecza Soły znajdującym się na terenie nadleśnictw Jeleśnia, Węgierska Górka oraz Ujsoły. W podsumowaniu obliczono szacunkową wartość strat w surowcu, jaką poniosły nadleśnictwa.

**Słowa kluczowe:** zlewnia Soły, powódź, dąb czarny, Karpaty, osuwiska, straty finansowe

## 1. Wstęp

Karpaty są obszarem szczególnie narażonym na ruchy masowe. Według dotychczasowych badań występuje tam około 95% osuwisk zinwentaryzowanych dotąd na obszarze Polski (Poprawa i Rączkowski 2003)

Rzeka Soła, zaraz po Dunajcu, jest zaliczana do najbardziej nieprzewidywalnych rzek w Polsce, średni przepływ wody w niej wynosi 18,9 m<sup>3</sup>/s. Liczne rozgałęzienia rzeki oraz wysoka roczna suma opadów – na poziomie 750–1300 mm – pozwalały na tym terenie na rozwój osadnictwa oraz komunikacji i handlu np. drewnem przy wykorzystaniu spławu. Dorzecze Soły leży w regionie Karpat, w którym najczęściej występują tzw. powodzie błyskawiczne.

Powódź wywiera istotny wpływ na stan elementów przyrodniczych, głównie na ekosystemy wodne i obszary leśne. Powódź błyskawiczną można zdefiniować jako gwałtowną powódź śródlądową, która powstaje w rezultacie nawalnych opadów deszczu lub przerwania sztucznej zapory (Fiedler 2007). Powódź błyskawiczna oznacza nagłe zalanie określonej powierzchni, w krótkim czasie trwania opadów, na skutek wylania cieków wodnych. Rzekę Sołę charakteryzuje cykliczność występowania znacznych wezbrań i powodzi, których cykliczność określa się na 20 lat (powodzie katastrofalne) oraz 5 lat (powodzie i wezbrania normowane).

Gwałtowne wezbrania wód są ważnym czynnikiem powodującym znaczne straty gospodarcze na terenie zlewni rzeki Soły. Tereny dorzecza Soły są szczególnie narażone na tworzenie się osuwisk oraz zalania i szkody powodziowe. Główną przyczyną naturalną uruchamiającą osuwiska są zjawiska meteorologiczno-hydrologiczne, przede wszystkim intensywne lub długotrwałe opady deszczu połączone z powodzią i wzmożoną erozją boczną rzek oraz gwałtowne topnienie pokrywy śnieżnej wczesną wiosną. Materiał niesiony w trakcie wezbrań rzeki w znacznym stopniu akumuluje się na dnie Jeziora Żywieckiego z zaporą w Tresnej.

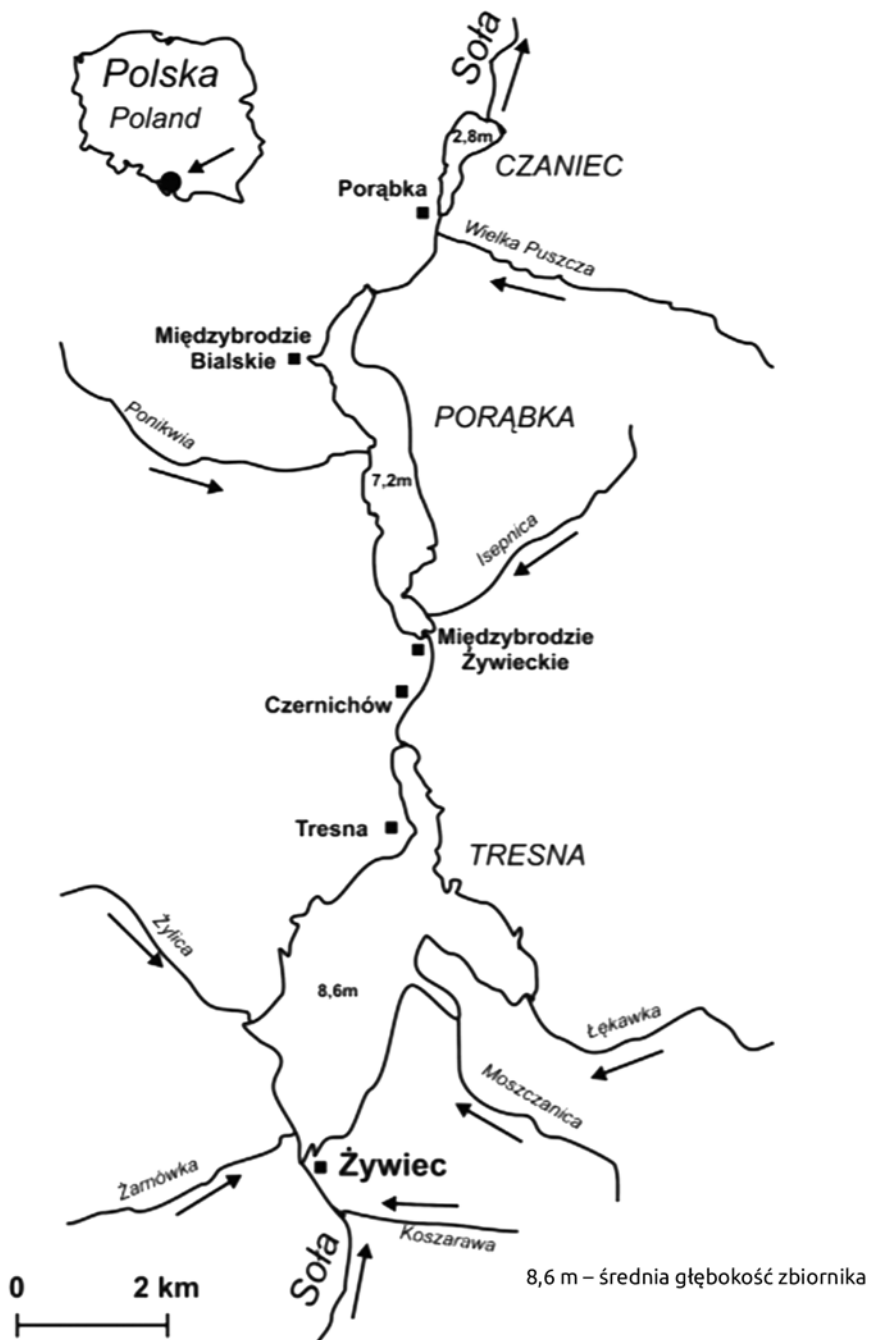
Skutki powodzi błyskawicznych są uzależnione od kilku czynników. Po pierwsze, większe nachylenie powoduje wyższy potencjał energii destrukcyjnej wody. Po drugie, niewłaściwe gospodarowanie wodami opadowymi prowadzi do wzrostu natężenia odpływu wód opadowych, a w konsekwencji do podtopień.

Celem niniejszej pracy jest próba określenia wartości pieniężnej utraconego drewna oraz zwrócenie uwagi na problem osuwisk i powodzi na terenach znajdujących się w dorzeczu Soły.

## 2. Materiały i metody

Beskid Żywiecki jest mezoregionem Beskidów Zachodnich stanowiących część Zewnętrznych Karpat Zachodnich (Kondracki 2002), a według regionalizacji przyrodniczo-leśnej Polski położony jest w Krainie Karpackiej, dzielnicy Beskidu Żywieckiego (Trampler i in. 1990; Zielony i Kliczkowska 2012).

Rzeka Soła zaczyna się jako połączenie kilku potoków górskich Beskidu Żywieckiego. Na mapach początek Soły zaznaczony jest w miejscowości Sól, gdzie do potoku Czerna wpada potok Solanka. Kierunek biegu Soły prowadzi prawie dokładnie z południa ku północy, zatem jest skierowany prostopadle do grzbietu Karpackiego (Pomianowski 1907). Długość rzeki wynosi 88,9 km, powierzchnia dorzecza 1,4 tys. km<sup>2</sup>. Przepływ średni: 14,9 m<sup>3</sup>/s (1956–90), w środku biegu (Żywiec); 20,20 przy ujściu (Oświęcim).



Ryc. 1. Szkic kaskady rzeki Soły (źródło: E. Jachniak i A. Jaguś 2013; www.pwn.pl)

Powodzie spowodowane przez krótkotrwałe i intensywne opady deszczu występują w Karpatach prawie w każdym roku (Gil 1998; Izmailow i in. 2004; Bryndal 2010; Bryndal i in. 2010; Ostrowski i in. 2012). Procesy erozyjne gleb górskich, prowadzące do osuwisk, uwarunkowane są trzema podstawowymi czynnikami, a mianowicie: opadami atmosferycznymi, nachyleniami powierzchni terenu oraz pokryciem jej przez roślinność (Czemerda i in. 1980). Ze względu na ich lokalny charakter, poświęca się im stosunkowo niewiele uwagi. Warto jednak podkreślić, że powodzie te są przyczyną strat gospodarczych PGLP. Pierwsza i zarazem jedyna rejestracja osuwisk w Polsce została przeprowadzona w latach 1968–1970 ([www.PG.gov.pl](http://www.PG.gov.pl)).

W niniejszej pracy analizowane będą dane uzyskane z trzech nadleśnictw, przez które przepływa rzeka Soła: Węgierska Górka, nadleśnictwo Jeleśnia oraz nadleśnictwo Ujsoły.

Dane do pracy zostały pozyskane bezpośrednio z dokumentów nadleśnictw. Część danych została przygotowana i przedstawiona podczas wystąpienia dr. inż. Kazimierza Szabli pod tytułem: „Ekonomiczne i społeczne konsekwencje klęsk żywiołowych w lasach na przykładzie Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Katowicach” na konferencji dotyczącej ekonomicznych i społecznych konsekwencji klęsk żywiołowych, która odbyła się w marcu 2016 roku.

### 3. Wyniki

Lasy Beskidu Żywieckiego cechują się małym zróżnicowaniem typów siedliskowych. Przeważający jest las mieszany górski LMG (55,1%) i las górski LG (25,6%), są to więc siedliska żyzne (tab. 1).

**Tabela 1.** Powierzchniowy udział [%] typów siedliskowych lasu w nadleśnictwach Beskidu Żywieckiego

|     | Węgierska Górka | Ujsoły | Jeleśnia |
|-----|-----------------|--------|----------|
| BWG | 4,1             | 0,2    | 5,8      |
| BMG | 7,5             | 2,6    | 14,0     |
| LMG | 66,8            | 72,7   | 39,0     |
| LG  | 21,5            | 24,4   | 40,8     |
| LŁG | –               | 0,1    | 0,4      |

BWG – bór wysokogórski, BMG – bór mieszany górski, LMG – las mieszany górski, LG – las górski, LŁG – las łęgowy górski, pozostałe gatunki występują sporadycznie

Źródło: opracowanie własne

Przeważający udział na tym terenie ma świerk (*Picea abies* (L.) (tab. 2), duży udział w lasach Beskidu Żywieckiego ma również jodła (*Abies alba* Mill.) oraz buk (*Fagus sylvatica* L.).

**Tabela 2.** Powierzchniowy udział [%] gatunków drzew w nadleśnictwach Beskidu Żywieckiego

|     | Węgierska Górką | Ujsoły | Jeleśnia |
|-----|-----------------|--------|----------|
| Św  | 39,8            | 74,2   | 62,2     |
| Jd  | 19,2            | 4,1    | 15,1     |
| Bk  | 37,9            | 19,7   | 2,03     |
| Md  | 2,1             | 0,6    | 0,7      |
| So  | 0,2             | 0,4    | 0,7      |
| Jw  | 0,0             | 0,9    | 0,4      |
| Js  | 0,0             | 0,1    | 0,1      |
| Brz | 0,0             | 0,0    | 0,1      |
| Ol  | 0,3             | 0,1    | 0,4      |

Św – świerk, Jd – jodła, Bk – buk, Md – modrzew, So – sosna, Jw – jawor, Js – jesion, Brz – brzoza, Ol – olcha

Źródło: opracowania własne

Według danych Państwowego Instytutu Geologicznego, w Karpatach powstaje 95% osuwisk zarejestrowanych w Polsce. Wagi temu dodaje również fakt, że teren ten stanowi tylko 6% całego kraju. Państwowy Instytut Geologiczny wskazuje, że jeżeli chodzi o zlewnię potoków górskich, to nawet do 70% stoków jest zajętych przez osuwiska. Powierzchnie lasów utraconych podczas największych powodzi ostatnich lat zebrano i przedstawiono w tabeli 3.

**Tabela 3.** Powierzchnia lasów zabrana przez osuwiska na przetomie lat 1996–2011 [ha]

|      | Węgierska Górką | Ujsoły | Jeleśnia |
|------|-----------------|--------|----------|
| 1996 | –               | 5,5    | 21,29    |
| 1997 | –               | 2,8    | 3,6      |
| 2001 | –               | –      | 4,0      |
| 2006 | –               | 1,5    | –        |
| 2010 | 0,2             | 1,5    | –        |
| 2011 | 0,3             | –      | –        |

Źródło: opracowania własne

Największa powódź ostatnich lat miała miejsce w roku 1996. W wyniku podmyć i osuwisk zniknęło wtedy 26,79 ha lasów. Całkowita powierzchnia terenu, utracona na skutek osuwisk w obrębach badanych nadleśnictw w latach 1996–2011, wynosi 54,69 ha.

Aby obliczyć miąższość drewna, które zostało zabrane podczas powodzi z nadleśnictw, pobrano dane odnośnie przeciętnej zasobności drzewostanów znajdujących się na analizowanych terenach. Prezentują się one następująco: nadleśnictwo Jeleśnia wykazuje przeciętną zasobność drzewostanów na poziomie 248m<sup>3</sup>/ha, nadleśnictwo Węgierska Górka wykazuje przeciętną zasobność drzewostanów na poziomie 103 m<sup>3</sup>/ha, nadleśnictwo Ujsoły natomiast wykazuje przeciętną zasobność drzewostanów na poziomie 316 m<sup>3</sup>/ha.

Poprzez przemnożenie przeciętnej zasobności drzewostanów na hektar dla danych nadleśnictw razem z powierzchnią terenów, jakie te nadleśnictwa utraciły na skutek powodzi, otrzymano miąższość utraconego drewna na poziomie 10787,02 m<sup>3</sup> (tab. 4)

**Tabela 4.** Miąższość drzewostanu utracona na skutek osuwisk w latach 1996–2011 [m<sup>3</sup>]

|      | Węgierska Górka | Ujsoły | Jeleśnia |
|------|-----------------|--------|----------|
| 1996 | –               | 1738   | 5279,92  |
| 1997 | –               | 884,8  | 892,8    |
| 2001 | –               | –      | 992,0    |
| 2006 | –               | 474    | –        |
| 2010 | 20,6            | 474    | –        |
| 2011 | 30,9            | –      | –        |

Źródło: opracowania własne

Dzięki pomnożeniu oszacowanej miąższości drewna utraconego przez nadleśnictwa na skutek osuwisk, które wystąpiły po powodziach w latach 1996–2011, przez średnią cenę drewna tartacznego dla danych lat, udało się oszacować wartość drewna utraconego przez nadleśnictwa. Średnia wartość drewna została pobrana z ogłoszeń Prezesa Głównego Urzędu Statystycznego dla danych lat i wynosiła kolejno:

- 1996 – 162,55 zł,
- 1997 – 162,41 zł,
- 2001 – 127,96 zł,
- 2006 – 131,36 zł,
- 2006 – 136,54 zł,
- 2010 – 136,54 zł,
- 2011 – 154,65 zł.



Całkowita wartość utraconego drewna wynosi 1690970,5 zł (tab. 5). Wartość tych strat zależy w dużej mierze od składu gatunkowego i wieku uszkodzonych drzewostanów.

**Tabela 5.** Wartość drewna utraconego w latach 1996–2011 [zł]

|      | Węgierska Górką | Ujsoły     | Jeleśnia   |
|------|-----------------|------------|------------|
| 1996 | –               | 282511,9   | 858250,996 |
| 1997 | –               | 143700,368 | 144999,648 |
| 2001 | –               | –          | 126936,32  |
| 2006 | –               | 62259,9    | –          |
| 2010 | 2812,724        | 64719,96   | –          |
| 2011 | 4778,685        | –          | –          |
| Suma | 7591,4          | 553192,1   | 1130187,0  |

Źródło: opracowanie własne

#### 4. Dyskusja i podsumowanie

Gospodarka leśna wielu krajów Europy od kilku lat boryka się z ciągle rosnącymi trudnościami ekonomicznymi. Są one skutkiem między innymi małego wzrostu, a nawet często stagnacji cen drewna, w połączeniu ze znacznym zwiększeniem nakładów gospodarki leśnej na realizację między innymi środowiskotwórczych oraz społecznych funkcji lasu (Adamowicz i Dyrz 2008; Adamowicz 2010; Adamowicz i in. 2015).

Nadleśnictwa wchodzące w skład PGL LP, realizujące gospodarkę leśną na terenach pokłęskowych, muszą liczyć się z koniecznością ponoszenia nadzwyczajnych kosztów będących następstwem szkód wywołanych powodzią i osuwiskami. Koszty te związane są bezpośrednio z utratą drzewostanów stojących, jak również degradacją gleby, na której drzewostan rósł, co w znaczący sposób utrudnia ponowne zalesienie terenu. Dodatkowe straty poniesiono w związku z uszkodzeniami infrastruktury leśnej i drogowej.

Drzewostany Beskidu Żywieckiego należą obecnie do najbardziej zagrożonych w Polsce na skutek osuwisk. Drewno zabrane przez wodę składa się w przyległych zbiornikach tj. Tresna (Jezioro Żywieckie). Znaczna część tych drzew możliwa jest nadal do pozyskania bezpośrednio ze zbiornika. Na dnie Jeziora Żywieckiego przeleguje drewno z dużo dłuższego okresu niż ostatnie 15 lat. Przeszkodą w pozyskaniu tego surowca jest brak opracowanej, skutecznej oraz taniej metody wyławiania drewna zalegającego na dnach jezior i rzek.

Opracowanie metody, a co za tym idzie pozyskanie tego surowca, niesłoby ze sobą znaczne korzyści majątkowe. Drewno przelegujące pod wodą jest szczególnie cenione za swoje walory kolorystyczne (np. dąb czarny), jak i właściwości fizykochemiczne. Aktualnie trwają prace nad opracowaniem metody pozyskania surowca. Znacznym ułatwieniem tego procesu może okazać się planowana przez dyrekcję Wód Polskich przebudowa i odmulenia zbiornika.

Proces ten może przynieść znaczne korzyści finansowe PGL LP. Ważnym problemem może się okazać określenie właściciela drewna przez poszczególne nadleśnictwa. Nie ma możliwości, aby bezpośrednio wskazać teren, z którego konkretnie pochodzi dane drewno. Część spławianego drewna pochodzi z terenów znacznie oddalonych od zbiornika. Problem jego własności powinien być bezspornie rozwiązany przed planowanym pozyskaniem tego surowca.

Warto zauważyć, że dzięki przelegiwaniu w wodzie drewno zatopione w jeziorze może uzyskać szczególne właściwości fizycznochemiczne, co w znaczącym stopniu może podnieść jego wartość rynkową. Surowiec ten często charakteryzuje się niepowtarzalnymi walorami artystycznymi. W przypadku kilkusetletniego zatopionego dębu, jego drewno (tzw. dąb czarny) jest uważane za jeden z towarów luksusowych, a jego wartość często waha się w granicach kilku tysięcy zł za 1 m<sup>3</sup>.

## 5. Stwierdzenia i wnioski

1. Osuwiska mają wpływ na gospodarkę leśną w rejonie dorzecza Soły. Powodują straty gospodarcze zarówno niszcząc las stojący, jak również poprzez wymycie gruntu uniemożliwiają prowadzenie dalszej gospodarki leśnej w tym miejscu.
2. Nadleśnictwa, na terenach których znajdują się osuwiska, ponoszą straty finansowe przyczyniające się do zmniejszenia ich przychodów finansowych.
3. Najwięcej terenu na skutek powodzi utraciło nadleśnictwo Jeleśnia – 26,79 ha najmniej nadleśnictwo Węgierska Górka – 0,5 ha.
4. Największe straty finansowe na skutek powodzi w latach 1996–2011 poniosło nadleśnictwo Jeleśnia, oszacowano je na 1 130 187 zł.
5. Najmniejsze straty finansowe na skutek powodzi w latach 1996–2011 poniosło nadleśnictwo Węgierska Górka, oszacowano je na 7 591,4 zł.
6. Istnieje problem z bezpośrednim oznaczeniem właściciela surowca zatopionego w jeziorze, co może powodować liczne konflikty ekonomiczne po wyłowieniu drewna z wody.
7. Opracowanie metody umożliwiającej pozyskanie zatopionego drewna niesłoby ze sobą znaczące korzyści materialne.

## Literatura

- Adamowicz K.** 2010. Cenowa elastyczność popytu na drewno na pierwotnym lokalnym rynku drzewnym w Polsce. *Sylwan*, 154(2), 130–138.
- Adamowicz K., Dyrz A.** 2008. An Attempt to Assess Price Elasticity of Demand for Pine Wood on the Primary Wood Market in the Bytnica Forest Division in the Years 1997–2005. *Acta Scientiarum Polonorum. Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 7(3), 5–13.
- Adamowicz K., Jaszczak R., Kuźmiński R., Łabędzki A., Łakomy P., Mazur A., Zientarski J.** 2015. An Attempt at Valuation of Wood from Dead Trees in Polish Forests. *Acta Scientiarum Polonorum. Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 14(1), 5–13. DOI: 10.17306/J.AFW.2015.1.1.
- Bryndał T.** 2010. Parametry hydrologiczne wezbrań spowodowanych krótkotrwałymi intensywnymi opadami deszczu w Polsce. *Annales UMCS, Kielce*.
- Bryndał T., Cabaj W., Gębica P., Krocak R.** 2010. Gwałtowne wezbrania spowodowane nawalnymi opadami deszczu w zlewni potoku Wątok (Pogórze Ciężkowickie). W: *Woda w badaniach geograficznych*. T. Ciupa, R. Suligowski. Red. Instytut Geografii Uniwersytetu Jana Kochanowskiego, Kielce, 307–319.
- Czemerda A., Hess M., Kostrakiewicz L.** 1980. Charakterystyka opadów atmosferycznych w polskich Karpatach. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 235, 85–92.
- Gil E.** 1998. Spływ wody i procesy geomorfologiczne w zlewniach fliszowych podczas gwałtownej ulewy w Szymbarku w dniu 7 czerwca 1985 roku. W: *Geomorfologiczny i sedymentologiczny zapis lokalnych ulew*. L. Starkel. Red. Dokumentacja Geograficzna, 11. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyńskiego PAN, Warszawa.
- Fiedler K.** Red. 2007. *Awarie i katastrofy zapór, zagrożenia, ich przyczyny i skutki oraz działania zapobiegające*. Wydawnictwo IMGW, Warszawa.
- Izmańłow B., Kamykowska M., Krzemień K.** 2004. Geomorfologiczna rola katastrofalnych wezbrań w transformacji. W: *Przyroda – Człowiek – Bóg*. B. Izmańłow. Red. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków.
- Jachniak E., Jaguś A.** 2013. Obniżanie trofii wód w systemach kaskadowych na przykładzie kaskady Soły. *Inżynieria Ekologiczna*, 32, 95–73.
- Kondracki J.** 1994. *Geografia Polski. Mezoregiony fizycznogeograficzne*. PWN, Warszawa.
- Kondracki J.** 2002. *Geografia regionalna Polski*. PWN, Warszawa.
- Ostrowski J., Czarnecka H., Glowacka B.** 2012. Nagłe powodzie lokalne (flash flood) w Polsce i skala ich zagrożeń. W: *Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo*. T. 3. Kłęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju. H. Lorenc. Red. Wydawnictwo IMGW-PIB, Warszawa.
- Pomianowski K.** 1907. *Siły wodne w Galicji*. 3, Związkowa Drukarnia we Lwowie, Lwów.
- Poprawa D., Rączkowski W.** 2003. Osuwiska Karpat. *Przegląd Geologiczny*, 51(8), 685–692.
- Trampler T., Kliczkowska A., Dmyterko E., Sierpińska A.** 1990. *Regionalizacja przyrodniczo-leśna na podstawach ekologiczno-fizjograficznych*. PWRiL, Warszawa.
- Zielony R., Kliczkowska A.** 2012. *Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.



# Zastosowanie rejestratorów w badaniach efektywności technologii pozyskiwania drewna i ich wpływu na środowisko leśne

Arkadiusz Stańczykiewicz

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kottłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, 31-120 Kraków,  
al. Mickiewicza 21, e-mail: arkadiusz.stanczykiewicz@urk.edu.pl

## Abstrakt

Rzetelne gromadzenie danych w trakcie badań terenowych jest procesem trudnym i wymagającym od osoby wykonującej tę pracę nieustannego skupienia uwagi, przede wszystkim w takich badaniach, podczas których mamy do czynienia z obserwacją nieustannie i szybko zmieniających się czynności lub operacji towarzyszących realizacji pracy. Ponadto niektóre zagadnienia badawcze wymagają gromadzenia danych w dwóch etapach, ponieważ mogą one dać najpełniejszą informację o poziomie uszkodzeń elementów środowiska leśnego dopiero po pozyskaniu informacji na temat ich ilości i jakości zarówno przed, jak i po zakończeniu procesu pozyskiwania drewna. Z tego względu doskonałym narzędziem wspomagającym proces gromadzenia danych są przenośne rejestratory wykorzystywane między innymi w gospodarce leśnej przez pracowników terenowych Lasów Państwowych od połowy lat dziewięćdziesiątych poprzedniego wieku. Pierwsza generacja tych sprzętów była oparta na systemie operacyjnym EPOC16, a druga na systemie Windows Embedded CE 6.0. Najnowsze egzemplarze działają już w oparciu o najpopularniejszy obecnie system Android.

**Słowa kluczowe:** mikrokomputery terenowe, aplikacje do rejestrowania danych, wydajność i czasochłonność pracy, uszkodzenia drzew, odnowień i gleby

## 1. Wprowadzenie

W ostatnim dziesięcioleciu, począwszy od roku 2009, pozyskiwano w Polsce rokrocznie ponad 30 mln m<sup>3</sup> grubizny, a w latach 2017–19 liczba pozyskanego drewna przekraczała już 40 mln m<sup>3</sup> (Sprawozdanie... 2018). Zdecydowana

większość surowca pozyskana została jeszcze technologiami ręczno-maszynowymi, w których operacje ścinki, okrzesywania i przerzynki drewna wykonuje się przy pomocy pilarek spalinowych. Jednak z uwagi na stale zmniejszającą się liczbę pracowników fizycznych chętnych do wykonywania tej ciężkiej pracy, prowadzonej często w niekorzystnych warunkach środowiska zewnętrznego, zaobserwowano w ostatnim pięcioleciu dynamiczny wzrost udziału drewna pozyskanego technologiami maszynowymi w całości pozyskania. Według aktualnych danych (Bodył 2019) udział drewna pozyskanego z wykorzystaniem maszyn wielooperacyjnych (przeważnie harwesterów) oraz zerwanego środkami nasiębiernymi (forwarderami) przekroczył 35%. Efektywność technologii maszynowych jest zdecydowanie wyższa od ręczno-maszynowych. Inny jest również wpływ ich zastosowania na elementy środowiska leśnego (pozostające drzewa i odnowienia oraz glebę). Celem niniejszego opracowania jest zaprezentowanie możliwości wykorzystania profesjonalnych rejestratorów terenowych na etapie gromadzenia informacji na temat:

- rzeczywistej struktury pracy w trakcie realizacji zadań gospodarczych na różnych stanowiskach pracy w ramach różnych technologii oraz
- skutków o charakterze ekologicznym zaistniałych w wyniku zastosowania wspomnianych technologii pracy.

## 2. Badania efektywności technologii pozyskiwania drewna

Aby uzyskać informacje na temat efektywności zastosowanych technologii pozyskiwania drewna oraz ich wpływu na środowisko leśne, konieczne jest prowadzenie przeważnie bardzo żmudnych i czasochłonnych badań terenowych. W przypadku badań efektywności wymagana jest niemal nieprzerwana obecność badaczy obserwujących realizację poszczególnych operacji. Natomiast w przypadku badań szkód powstających w trakcie pozyskiwania drewna najbardziej wiarygodne wyniki uzyskuje się po przeprowadzeniu dwukrotnej inwentaryzacji stanu środowiska leśnego – przed rozpoczęciem prac, a następnie po ich całkowitym zakończeniu. W obu tych przypadkach rejestrowana jest olbrzymia liczba danych, która dopiero w warunkach kameralnych może być odpowiednio przygotowana i przeanalizowana.

W badaniach efektywności technologii w warunkach terenowych prowadzi się przeważnie ciągły pomiar czasu trwania czynności metodą indywidualnej fotografii dnia roboczego (Szewczyk 2014). Rejestrowany w trakcie badań czas trwania poszczególnych czynności zaliczany jest do określonych kategorii przyjętych za BN-76/9195-01 w Krajowym Systemie Maszyn Leśnych (Szewczyk 2013) lub według klasyfikacji opracowanej w ramach programu IUFRO (Björheden i in. 1995). Jak podaje Szewczyk (2014) prowadzenie chro-

nometraży, przede wszystkim przy pomiarach szybkozmiennych czynności, wymaga dużej dokładności oraz zaangażowania wielu przeszkolonych osób (Nuutinen i in. 2008), dlatego od dawna poszukuje się metod optymalizowania takich pomiarów. W badaniach nad pracą związaną nie tylko z pozyskiwaniem, ale i zrywką drewna, jeszcze w ostatnim dziesięcioleciu stosowano stopery do zmierzenia czasu trwania poszczególnych operacji na różnych stanowiskach pracy, zarówno przy pozyskiwaniu ręczno-maszynowym pilarkami (Stempski i in. 2013) i zrywce nasiębniernej (Kormanek i Fischer 2018), jak i przy maszynowym wykorzystaniu harwesterów (Sadowski i in. 2014), a nawet przy usuwaniu skutków wiatrołomów (Stempski i Jabłoński 2015). Według Szewczyka (2014) szybki postęp w technikach pomiarowych odnotowano na przełomie XX i XXI wieku. Zaczęto wtedy wykorzystywać aplikacje komputerowe do pomiarów czasu. Zastosowano także techniki służące do rejestracji wideo, a nawet podjęto próby zautomatyzowania pomiarów czasu pracy maszyn wielooperacyjnych (Nuutinen 2013). W praktyce już od kilkunastu lat stosowane są komputery przenośne (Stampfer i in. 2010) lub rejestratory wykorzystywane w leśnictwie z zainstalowanymi programami do rejestracji czasu trwania czynności (Szewczyk 2010; Leszczyński 2011). Urządzenia zarówno z pierwszej, jak i drugiej grupy są profesjonalne, odporne na niekorzystne warunki otoczenia, w którym pracują (wysoka wilgotność, niskie lub wysokie temperatury powietrza, zapalenie) oraz odporne na uszkodzenia (ryc. 1).



Ryc. 1. Przenośne komputery i rejestratory danych produkcji austriackiej (źródło: [https://www.latschbacher.com/en/winforstpro-hardware/...](https://www.latschbacher.com/en/winforstpro-hardware/) – fot. Ch. Herzenberger)

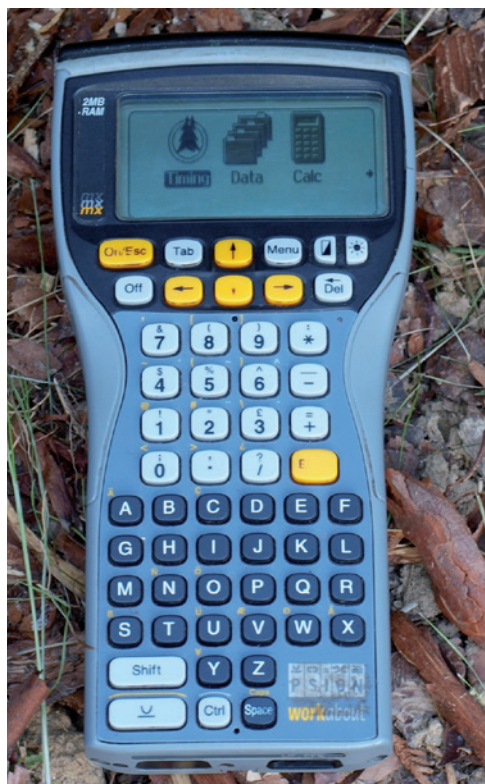


## 2.1. Rejestratory z systemem operacyjnym EPOC16

Przykładem rejestratora terenowego może być urządzenie przenośne marki PSION Workabout MX (ryc. 2), które wyposażone jest w monochromatyczny graficzny ekran ciekłokrystaliczny ze standardowym podświetleniem, umożliwiającą zapis do 39 znaków w 12 liniach i rozdzielczości  $240 \times 100$  punktów. Rejestrator sterowany jest przez 16-bitowy procesor NEC V30MX taktowany zegarem 27.684 MHz. Posiada wewnętrzną pamięć RAM 2MB oraz standardową 57-klawiszową klawiaturę alfanumeryczną oraz klasę szczelności IP54.

Tego typu rejestratory (używane powszechnie przez pracowników terenowych administracji LP w latach 1997–2007) wykorzystywano do pomiarów czasu pracy już w trakcie realizacji projektów badawczych dotyczących efektywności ręczno-maszynowych technologii pozyskiwania drewna z zakresu mechanizacji tzw. małej skali (Sowa i in. 2005) lub wykorzystania urządzeń agregowanych z ciągnikami uniwersalnymi (Sowa i in. 2009).

Pomiar czasu trwania czynności i operacji obróbczych notowany był elektronicznie, z wykorzystaniem zainstalowanego oryginalnego autorskiego oprogramowania TIMING 1.1 służącego do prowadzenia chronometraży (ryc. 3).



Ryc. 2. Terenowy rejestrator PSION Workabout MX z programem TIMING 1.1 do badań chronometrażowych zmian roboczych (fot. A. Stańczykiewicz)





Ryc. 3. Ekran rejestratora PSION z uruchomionym programem TIMING 1.1 przy pomiarze czasu okrzyszwania (fot. A. Stańczykiewicz)

Aplikacja umożliwia gromadzenie danych z dokładnością do 1 sekundy praktycznie na każdym wcześniej zdefiniowanym stanowisku pracy. Aby skutecznie wykorzystać możliwości aplikacji, osoba dokonująca pomiaru musi przeprowadzić kilkunastominutową obserwację możliwie jak największej liczby operacji dokonywanych przez konkretnego pracownika. Taki sposób postępowania umożliwia zdefiniowanie i przypisanie do konkretnych stanowisk pracy niemal wszystkich operacji, czynności, a nawet ruchów roboczych, które potencjalnie obserwować się będzie podczas wykonywania pracy. W przypadku wystąpienia w trakcie pomiaru różnych nieprzewidzianych wcześniej zdarzeń, istnieje możliwość odnotowania ich bez konieczności przerywania pomiarów. Ponadto w przypadku błędnego rozpoznania czynności, można zmienić ją na inną, prawidłową, bezpośrednio podczas prowadzenia obserwacji. Aplikacja umożliwia również rejestrowanie niezbędnych danych, które wymagane są do późniejszego określenia efektywności badanej technologii pracy. Mowa tutaj o parametrach pozyskanego lub transportowanego (zrywanego) drewna – jego długości, średnicy, liczbie poszczególnych sortymentów. Bezpośrednio po zakończonych pomiarach terenowych aplikacja umożliwia wygenerowanie raportu z konkretnego chronometrażu. Raport taki, po zaimportowaniu do komputera stacjonarnego i odpowiednim obrobieniu, jest wykorzystywany do określenia struktury czasu pracy oraz obliczenia wydajno-

ści i pracochłonności nie tylko na pojedynczym stanowisku pracy, ale również w całych technologiach obejmujących niejednokrotnie w przypadku pozyskiwania drewna pracę na dwóch, trzech, a nawet czterech stanowiskach pracy.

## 2.2. Rejestratory z systemem operacyjnym Windows Embedded CE 6.0

Kolejnym przykładem rejestratora wykorzystywanego przy badaniu pracy może być bardziej zaawansowana wersja urządzenia, również firmy PSION – Workabout Pro4 (ryc. 4), które wyposażono już w kolorowy ekran dotykowy 3,7" VGA o rozdzielczości 640×480 punktów. Rejestrator sterowany jest przez procesor Sitara™ AM37x ARM Cortex™-A8 taktowany zegarem 1 GHz. Posiada wewnętrzną pamięć RAM 512MB oraz standardową 55-klawiszową klawiaturę alfanumeryczną oraz klasę szczelności IP65.

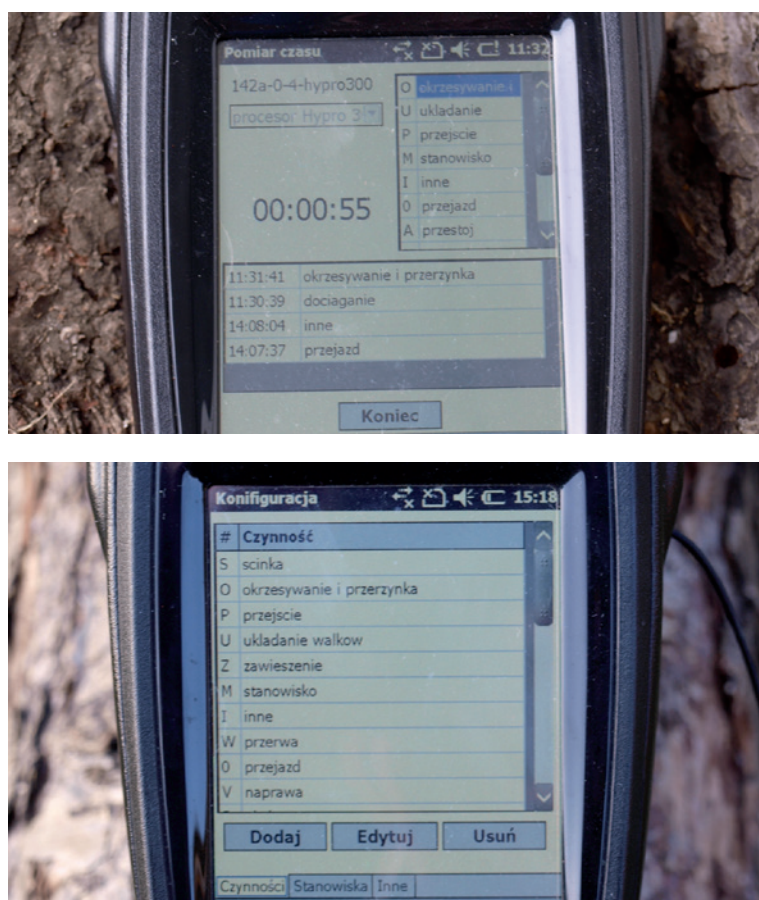
Takie rejestratory wprowadzono do stosowania przez pracowników terenowych administracji LP w latach 2007–2010, na skutek rosnącego zapotrzebowania na coraz wyższą wydajność i funkcjonalność tego typu sprzętu. Kilka egzemplarzy rejestratorów tej generacji z powodzeniem wykorzystano podczas realizowania kolejnego projektu badawczego związanego z prowadzeniem cięć



Ryc. 4. Terenowy rejestrator PSION Workabout Pro4 z programem TIMING 2 (z prawej) do badań chronometrażowych i migawkowych (fot. A. Stańczykiewicz)

pielęgnacyjnych w drzewostanach wzrastających na terenach popożarowych (Sowa i in. 2017).

Opierając się na doświadczeniach zebranych podczas realizacji wcześniejszych projektów, została opracowana kolejna wersja oprogramowania TIMING 2 służąca do gromadzenia danych z chronometraży. Oprócz funkcjonalności opisanych w przypadku poprzedniej wersji aplikacji (ryc. 5), druga wersja umożliwia gromadzenie danych nie tylko podczas obserwacji ciągłej, ale również podczas obserwacji migawkowych (Szewczyk 2013; Szewczyk i in. 2016). Polegają one na rejestracji poszczególnych czynności w ustalonych przez osobę dokonującą obserwacji odstępach czasowych, np. 60, 180 lub 300 sekund (ryc. 6). Na tej podstawie możliwe jest oszacowanie struktury czasu pracy z bardzo dużą, prze-



Ryc. 5. Ekran rejestratora w trakcie pomiaru czasu okrzyszwania i przeryzki (powyżej) oraz w trakcie konfiguracji czynności (poniżej) (fot. A. Stańczykiewicz)



Ryc. 6. Ekran konfiguracji pomiarów w trybie migawkowym (fot. A. Stańczykiewicz)

kraczącą 95%, dokładnością (Szewczyk 2013; Szewczyk i in. 2016) w porównaniu do struktury czasu pracy oszacowanej przez pomiar ciągły. Z kolei takie dane umożliwiają obliczenie wydajności na poszczególnych stanowiskach pracy, a następnie pracochłonności całych technologii.

Taka funkcjonalność umożliwia niemal jednoczesne gromadzenie danych dotyczących dwóch lub większej liczby stanowisk pracy tylko przez jedną osobę. W przypadku zbierania danych metodą chronometrażu takiej możliwości nie ma, ponieważ jedna osoba może realizować precyzyjny pomiar, obserwując pracę wyłącznie na jednym stanowisku.

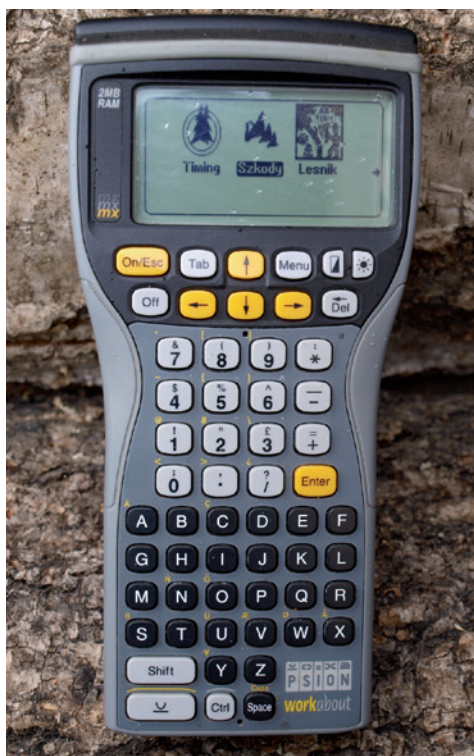
### 3. Badania wpływu technologii pozyskiwania drewna na środowisko leśne

Z punktu widzenia naukowego, najpełniejszą i najbardziej szczegółową informację na temat poziomu uszkodzeń elementów środowiska leśnego może przynieść jedynie dwukrotna inwentaryzacja w obrębie powierzchni doświadczalnych. Pierwszej z nich dokonuje się przed rozpoczęciem prac pozyskania i zrywki drewna. Na etapie zakładania powierzchni badawczych rejestrowane są wszystkie drzewa oraz ich wybrane cechy taksacyjne (pierśnica, wysokość) oraz drzewka z warstwy odnowienia w kilku klasach wysokości. Takie dane umożliwiają w konsekwencji oszacowanie poziomów szkód zarówno w nalicie, jak i w podroście. Po zakończeniu prac pozyskaniowych przeprowadzana



jest powtórna inwentaryzacja, podczas której rejestrowane są wszelkie zmiany liczby i stanu drzew, odnowień i gleby. Gromadzenie danych o drzewach, odnowieniach i glebie umożliwia m.in. rejestrator marki PSION Workabout MX, który wykorzystywano także w trakcie realizacji projektów badawczych dotyczących wpływu ręczno-maszynowych technologii pozyskiwania drewna na elementy środowiska leśnego (Stańczykiewicz i in. 2011, 2012, 2015a, 2015b) (ryc. 7). Dane źródłowe zgromadzone przy pomocy aplikacji SZKODY 1.1 w trakcie pierwszej inwentaryzacji umożliwiają odnalezienie powierzchni doświadczalnych oraz powtórny inwentaryzacje, w tym uszkodzeń powstałych na drzewach, w odnowieniach i w glebie (ryc. 8).

W przypadku warstwy drzew rejestrowane są wymiary i inne cechy zranień powstałych na pniach (wysokość położenia w stosunku do powierzchni gruntu, długość, szerokość, głębokość itp.). W przypadku warstwy odnowienia rejestrowane są uszkodzenia ujęte w kilka klas, począwszy od drzewek całkowicie zniszczonych, przez egzemplarze ze złamaniami, a skończywszy na drzewkach odchylonych od pionu (niejednokrotnie z naderwanymi systemami korzeniowymi) lub ze zderciami kory (Stańczykiewicz 2010, 2011, 2018). W przypadku uszkodzeń wierzchnich warstw gleby, aplikacja umożliwia zarejestrowanie



Ryc. 7. Terenowy rejestrator PSION Workabout MX z programem SZKODY 1.1 do badań uszkodzeń środowiska leśnego (fot. A. Stańczykiewicz)



Ryc. 8. Przykładowe ekrany inwentaryzacji uszkodzeń na drzewach (z lewej), w odnowieniu (w środku) i w glebie (z prawej) po zakończeniu prac pozyskaniowych (fot. A. Stańczykiewicz)

wymiarów liniowych zarówno dla kolejn spowodowanych przejazdami maszyn, jak i bruzd powstałych wskutek przemieszczania pozyskanego drewna – kłód i dłuźyc (na ryc. 8 oznaczonych literą Z), a także powierzchniowych uszkodzeń gleby, na przykład jej ubicia w wyniku przeprowadzenia zrywki konnej (na ryc. 8 oznaczonych literą U) (Kulak i in. 2012).

Analogicznie jak w przypadku badań efektywności pracy, aplikacja umożliwia wygenerowanie raportu z konkretnej powierzchni doświadczalnej bezpośrednio po zakończonych pomiarach terenowych podczas drugiej inwentaryzacji. Taki raport, po zaimportowaniu do komputera stacjonarnego i odpowiednim obrobieniu, jest wykorzystywany do określenia poziomów szkód w poszczególnych piętrach drzewostanu.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Przenośne rejestratory są urządzeniami, których powszechne zastosowanie może usprawnić proces gromadzenia coraz większej ilości danych, które można wykorzystać do prowadzenia wieloaspektowych analiz związanych

z procesem pracy i jego wpływem zarówno na człowieka, jak i na otaczające go środowisko. Ponadto dynamiczny rozwój programowania różnych urządzeń umożliwia wykorzystanie wiedzy i umiejętności programistów oraz doświadczenia badaczy do tworzenia na bieżąco aplikacji potrzebnych do gromadzenia różnego rodzaju danych, zarówno ilościowych, jak i jakościowych. Aplikacje te powinny być łatwe w obsłudze, intuicyjne, a jednocześnie powinny umożliwiać łatwą obróbkę danych po ich przetransferowaniu do komputerów stacjonarnych.

Na podstawie wielokrotnie prowadzonych badań terenowych z użyciem rejestratorów oraz obserwacji przeprowadzonych w trakcie tych badań można wysunąć kilka wniosków:

1. Zastosowanie rejestratorów terenowych umożliwia gromadzenie danych pomiarowych nawet w niekorzystnych warunkach atmosferycznych, które utrudniają rejestracje danych w raptularzach pisemnych. Ponadto dzięki rejestratorom możliwe jest prowadzenie nawet kilkugodzinnej, ale mniej męczącej obserwacji poszczególnych elementów układu człowiek–maszyna–środowisko, bez konieczności ciągłego ręcznego zapisywania jej efektów na papierze.
2. Dane zgromadzone w pamięci rejestratorów można w prosty sposób importować do pamięci komputerów stacjonarnych i tym samym znacznie skrócić czas lub całkowicie wyeliminować konieczność ręcznego wprowadzania danych. Przechowywane w zasobach danych sesje pomiarowe mogą być kilkakrotnie wykorzystywane do analiz, których celem może być potwierdzanie coraz to nowych hipotez badawczych, oczywiście w zakresie obejmującym pomierzone wielkości.
3. Należy jednak pamiętać, że rejestratory zasilane są energią z akumulatorów o określonej żywotności i przez to ograniczonej możliwości przechowywania danych w pamięci wewnętrznej. W przypadku całkowitego wyczerpania energii w bateriach podtrzymujących pamięć wewnętrzną w niektórych urządzeniach (starszego typu) może dojść do definitywnej utraty danych zebranych w terenie. Dlatego też jest konieczne tworzenie kopii zapasowych po zakończeniu każdej sesji pomiarowej i jak najszybsze przenoszenie ich do pamięci komputerów stacjonarnych bez względu na to, czy dana sesja związana była z badaniami efektywności technologii pozyskiwania drewna, czy z badaniami wpływu tych technologii na elementy środowiska leśnego.

W ostatnim czasie nastąpił rozwój elektronicznej mobilności w jednostkach administracyjnych Lasów Państwowych. Stopniowo wprowadza się najbardziej nowoczesne generacje sprzętu służącego do pracy w terenie – profesjonalne rejestratory dotykowe (typu smartfon), które mają zastąpić rejestratory z klawiaturami. Urządzenia te, oparte na systemie Android, mogą znaleźć

zastosowanie zarówno w badaniach efektywności pracy, jak i badaniach związanych z wpływem działań gospodarczych na środowisko leśne. Ich specyfikacje techniczne i zaawansowane klasy szczelności wskazują, że z powodzeniem można wykorzystać możliwości tych urządzeń do gromadzenia danych nawet w niekorzystnych warunkach atmosferycznych i terenowych. Ponadto, dzięki wyposażeniu w odpowiednie moduły, możliwa jest bieżąca bezprzewodowa transmisja zarejestrowanych danych i wygenerowanych raportów zarówno w obrębie sieci lokalnych (LAN), jak i rozległych sieci komputerowych (WAN) na bazie technologii GPS.

## Literatura

- Björheden R., Apel K., Shiba M., Thompson M.A. 1995. IUFRO forest work study nomenclature. Department of Operational Efficiency, Swedish University of Agricultural Science, Garpenberg.  
BN-76/9195-01. 1976. Maszyny rolnicze. Podział czasu pracy. Symbole i określenia. IBMER, Warszawa.
- Bodył M. 2019. Rozmiar pozyskania maszynowego w Polsce. Drwal, Pismo Przedsiębiorców Leśnych, 3, 5–9.
- Kormanek M., Fiszer M. 2018. Analysis of performance of short tree logging with farm tractor and logging trailer. *Agricultural Engineering*, 22(2), 29–38.
- Kulak D., Sowa J.M., Stańczykiewicz A., Szewczyk G. 2012. Damage to the surface layer of soil during timber harvesting using the equipment aggregated with farm tractors. *Acta Sci. Pol., Silv. Colendar. Rat. Ind. Lignar.* 11(2), 15–25.
- Leszczyński K. 2011. Ocena wybranych aspektów technologii pozyskiwania drewna. *Metodologia badań. Zesz. Nauk. UR w Krakowie*, 483, Rozprawy, 360.
- Nuutinen Y., Väättäinen K., Heinonen J., Asikainen A., Röser D. 2008. The accuracy of manually recorded time study data for harvester operation shown via simulator screen. *Silva Fennica*, 42(1), 63–72.
- Nuutinen Y. 2013. Possibilities to use automatic and manual timing in time studies on harvester operations. *Dissertationes Forestales*, 156. Finnish Society of Forest Science, Vantaa.
- Sadowski J., Moskalik T., Zastocki D. 2014. Efektywność pozyskiwania drewna harvesterem PONSSE Ergo w wybranych drzewostanach. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie* 16(39/2B), 126–132.
- Sowa J.M., Kulak D., Leszczyński K., Stańczykiewicz A., Szewczyk G. 2005. Opracowanie proekologicznej technologii pozyskiwania drewna w drzewostanach trzebieżowych ekonomicznie akceptowalnej przez wykonawców prac leśnych. Sprawozdanie końcowe z realizacji projektu badawczego nr P06L 002 23. Opracowano na Wydziale Leśnym AR w Krakowie.
- Sowa J.M., Szewczyk G., Kulak D., Stańczykiewicz A. 2009. Model kategoryzacji warunków pracy dla wybranych technologii pozyskiwania drewna w drzewostanach trze-



- bieżowych. Sprawozdanie końcowe z realizacji projektu badawczego nr N N309 4246 33. Opracowano na Wydziale Leśnym UR w Krakowie.
- Sowa J.M., Szewczyk G., Kulak D., Stańczykiewicz A.** 2017. Cybernetyczne zasady prowadzenia cięć trzebieżowych w drzewostanach sosnowych wprowadzonych na tereny popożarowe. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego nr OR.271.3.6.2016. Opracowano na Wydziale Leśnym UR w Krakowie.
- Sprawozdanie finansowo-gospodarcze za 2018 rok. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych w Warszawie.
- Stampfer K., Leitner T., Visser R.** 2010. Efficiency and ergonomic benefits of using radio controlled chockers in cable yarding. *Croatian J. Forest Engineer.*, 1, 1–10.
- Stańczykiewicz A.** 2010. Damage to trees and regeneration layer resulting from timber harvesting with the use of equipment aggregated with farm tractors in thinned mountain stands. W: FORMEC 2010. Padova, wydanie CD.
- Stańczykiewicz A.** 2011. Damage to trees and regeneration layer resulting from timber harvesting with the use equipment aggregated with farm tractors in thinned fir stands. W: *Technology and ergonomics in the service of modern forestry*. Wydawnictwo UR, Kraków, 253–268.
- Stańczykiewicz A.** 2018. Prawdopodobieństwo wystąpienia szkód w odnowieniach podokapowych wskutek pozyskiwania drewna oraz model ich szacowania. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie*, nr 541. Rozprawy, 418.
- Stańczykiewicz A., Sowa J.M., Leszczyński K., Kulak D., Szewczyk G.** 2011. Badania nad optymalizacją proekologicznej technologii trzebieży drzewostanów iglastych z zastosowaniem procesorów zagregowanych z ciągnikami rolniczymi. Sprawozdanie końcowe z realizacji projektu badawczego nr N N309 4235 33. Opracowano na Wydziale Leśnym UR w Krakowie.
- Stańczykiewicz A., Sowa J.M., Kulak D., Leszczyński K., Szewczyk G.** 2012. Damage to trees and regeneration layer resulting from timber harvesting with the use of equipment aggregated with farm tractors in thinned pine stands. *Acta Sci. Pol., Silv. Colendar. Rat. Ind. Lignar.*, 11(2), 37–51.
- Stańczykiewicz A., Sowa J.M., Kulak D., Leszczyński K., Szewczyk G.** 2015a. Uszkodzenia drzew i odnowienia w wyniku pozyskania drewna z użyciem urządzeń agregowanych z ciągnikami rolniczymi w trzebieżowych drzewostanach świerkowych. *Sylwan*, 159(3), 201–210.
- Stańczykiewicz A., Szewczyk G., Kulak D.** 2015b. Damage to advance growth resulting from timber harvesting during final cuttings. *Baltic Forestry*, 21(1), 144–151.
- Stempski W., Pilarek Z., Jabłoński K.** 2013. Analiza czasu czynności pomiarowych dłużyć w procesie pozyskiwania drewna pilarkami. *Forestry Letters* 106, 27–35.
- Stempski W., Jabłoński K.** 2015. Efektywność maszynowego pozyskiwania drewna z drzewostanu uszkodzonego przez wiatr. *Nauka Przyroda Technologie* 9, 3, #40. DOI: 10.17306/J.NPT.2015.3.40.
- Szewczyk G.** 2010. Czasochłonność zrywki konnej w drzewostanach trzebieżowych. *Sylwan*, 154(1), 52–63.

- Szewczyk G. 2013. Obserwacje migawkowe w pomiarach pracy przy pozyskiwaniu i zrywce drewna. W: Konferencja Katedr Jednoimiennych, Rogów, 9–11 lipca 2013.
- Szewczyk G. 2014. Model strukturalny dynamiki zmienności na wybranych stanowiskach roboczych w pozyskiwaniu i zrywce drewna. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie nr 522. Rozprawy, 399.
- Szewczyk G., Sowa J.M., Dvořák J., Kamiński K., Kulak D., Stańczykiewicz A. 2016. Analysis of accuracy of evaluating the structure of a harvester operator's workday by work sampling. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 37(2), 251–259.

# Obciążenia psychiczne pracą na stanowiskach roboczych w zautomatyzowanych procesach pozyskiwania drewna

Grzegorz Szewczyk

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: rlszewcz@cyf-kr.edu.pl

## Abstrakt

Stosowanie harwesterów o innych w porównaniu do stanowisk ręczno-maszynowych warunkach materialnych środowiska pracy, powiązane jest z pojawieniem się form zmęczenia ośrodkowego, wywołanego pracą umysłową, w tym zmęczenia psychicznego i stresu. Wysoki poziom obciążeń psychicznych w połączeniu z monotonią wykonywanych czynności, odizolowaniem od bodźców zewnętrznych i niezmiennością warunków środowiska pracy może spowodować uczucie znużenia, a w dalszej kolejności może generować zagrożenie wypadkowe. Zatem rozpoznanie natężenia takich obciążeń, szczególnie w trudnych warunkach, jest punktem wyjścia do projektowania bezpiecznych i wydajnych systemów technologicznych. W praktyce badawczej oceny stanowisk pracy w leśnictwie stosuje się kilka metod fizjologicznych w pomiarach zmęczenia – pomiar aktywności elektrodermalnej EDA, określenie aktywności sercowo-naczyniowej ECG, BVP, elektromiografię, monitoring częstotliwości i amplitudy oddechu RESP, pomiar temperatury TEMP oraz elektroencefalografię EEG. Duży koszt zakupu aparatury i skomplikowane procedury pomiarowe sprawiają, że przy pomiarach zmęczenia stosuje się również metody subiektywne. Stosowane w takich badaniach kwestionariusz japoński jest rodzajem badań sondażowych. Analizy ruchu gałek ocznych, eye-tracking, stosowane dotychczas w leśnictwie incydentalnie, dokumentują nie tylko efekt podejmowania pracy, czyli zmienną aktywność człowieka, ale opisują dodatkowo cały jej przebieg. Zmienna aktywność oczu stanowi swego rodzaju „zapis procesu pracy”, jako że jest ona ściśle z nim związana, powinna zatem dokładnie odwzorować zmienny stan psychiczny operatora. Wielokierunkowe dane uzyskiwane w toku takich badań pozwalają na pełniejsze wyjaśnienie widocznych prawidłowości i z tego względu są bardzo ciekawym, niedocenianym dotychczas w leśnictwie instrumentem badawczym.

**Słowa kluczowe:** pozyskiwanie drewna, harwester, ergonomia, eye-tracking

## 1. Wstęp

Relatywnie niska wydajność, częsty wysoki poziom zagrożeń środowiskowych, niekorzystne warunki środowiska pracy oraz brak wykwalifikowanych robotników leśnych sprawiają, że coraz częściej mechanizuje się procesy pozyskania i zrywki drewna. Maszyny wielooperacyjne są stosowane w leśnictwie światowym już od około pięćdziesięciu lat (Hakkila 1989; Moskalik 2002; Nordfeld i in. 2010). Powszechnie wykorzystuje się je w krajach skandynawskich, gdzie w ten sposób pozyskuje się ponad 90% ogólnej miąższości drewna. W krajach o zbliżonych do naszych warunkach prowadzenia gospodarki leśnej – Niemczech czy Czechach, udział harwesterów w ogólnym pozyskaniu drewna wynosi ok. 40%. Dynamiczny wzrost liczby harwesterów zanotowano również w Polsce. Nasycenie rynku maszynami wielooperacyjnymi i zmiany na naszym rynku pracy są tak duże, że aktualnie pozyskuje się tak ok. 35% grubizny (Moskalik i in. 2017). Liczba harwesterów w Polsce wzrosła od 2000 roku kilkunastokrotnie i wynosi ok. 530 (Mederski i in. 2016). Postęp techniczny sprawił, że harwestery mogą pracować nie tylko w mało zróżnicowanych drzewostanach o mniejszej zasobności, ale również w drzewostanach o zróżnicowanej strukturze i składzie gatunkowym, na powierzchniach pokłeskowych i na dużych spadkach terenu (ryc. 1–3) (Dürrstein i Stampfer 2000; Moskalik i Stampfer 2003; Frutig i in. 2007; Szewczyk 2011, 2014; Szewczyk i Stańczykiewicz 2012; Szewczyk i Kulak 2013; Szewczyk i in. 2014; Visser i Stampfer 2015; Szewczyk i in. 2020a).



Ryc. 1. Harwester Vimek pracujący na powierzchni trzebieżowej (fot. G. Szewczyk)



Ryc. 2. Harwester Timberjack podczas pracy w terenie o spadku 48% (fot. G. Szewczyk)



Ryc. 3. Harwester John Deere podczas pracy w terenie pokłęsowym (fot. G. Szewczyk)

Dynamicznie zachodzące zmiany w sposobie produkcji w leśnictwie wymagają pogłębionych analiz pracy, szczególnie w zakresie stosowania ściśle określonych procedur oceny i projektowania bezpieczniejszych, łatwiejszych i efektywniejszych sposobów pracy. Sposób wartościowania przykładowych



czynników składowych modelu produkcji drewna przedstawili Kühmaier i Stampfer (2012). Kryteriom wyboru technologii, m.in. wydajności energetycznej, stabilności gruntu, żywotności drzewostanu, wielkości zatrudnienia i bezpieczeństwu pracy, przyznano w wymienionych powyżej scenariuszach odpowiednią wagę procentową. W Polsce kompleksowy sposób oceny systemów technologicznych został opisany jako reguła  $3 \times E$  (ergonomia + ekologia + ekonomia) (Giefing 1995; Paschalis 1997). Sprzężenia zwrotne wymienionych czynników sprawiają, że optymalne rozwiązania są trudne do osiągnięcia. Jeśli chodzi o techniki pozyskiwania drewna wydaje się jednak, że najbliższe optimum są systemy zakładające wykorzystanie harwesterów, które wymagają jednak nadal przeprowadzania ocen ergonomicznych. Środowisko pracy w leśnictwie bada się od ponad 50 lat (Hellstrøm i Andersen 1972; Teljstedt 1974; Gardell 1976; Hansson 1990), w tym czasie charakter pracy zmienił się zasadniczo, od technologii ręczno-maszynowych do rozwiązań półautomatycznych (Axelsson i Pontén 1990; Sowa 2009; Ager 2014). Już w latach 90. XX w. Sullmann i Kirk (1998) badali poziom stresu u operatorów harwesterów, wykorzystując do tego wskaźnik obciążenia zadaniami NASA (NASA Task Load Index TLX). Presja czasu i obciążenia mentalne były tak duże, że odpowiadały symulowanym sytuacjom startu i lądowania pilotów samolotów F-16. Z tego względu interesującym aspektem do analiz jest badanie poziomu zmęczenia.

## 2. Zmęczenie w procesie pracy

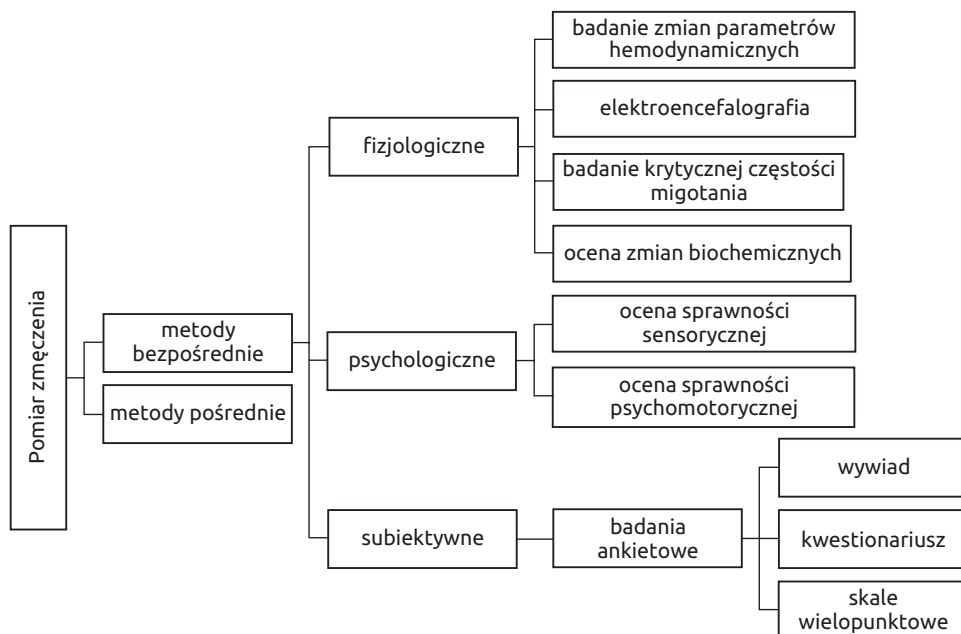
Zmęczenie jest stanem neurofizjologicznym organizmu rozwijającym się podczas wykonywania pracy umysłowej lub fizycznej (Grzywiński 2007). Zjawisko to jest procesem wielokierunkowym, a moment jego pojawienia się i dynamika rozwoju związane są z szeregiem czynników: rodzajem wysiłku i jego intensywnością, strukturą przerw w pracy, motywacją do wykonania zadania, stanem zdrowia, kondycją psychofizyczną, warunkami materialnymi środowiska pracy (Grandjean 1962). Jeszcze do niedawna prace z zakresu zagospodarowania drzewostanów i pozyskania drewna miały w większości charakter prac fizycznych, generujących zmęczenie obwodowe (mięśniowe). Po zakończeniu takiej pracy, w okresie restytucji, obserwuje się powrót parametrów fizjologicznych organizmu do stanu wyjściowego (Grandjean 1962). Wprowadzenie maszyn wielooperacyjnych i forwarderów o zupełnie innych charakterystykach stanowisk roboczych spowodowało pojawienie się form zmęczenia ośrodkowego wywołanego specyficzną pracą umysłową oraz obciążeniami psychicznymi, np. monotonią pracy i monotypią ruchów roboczych (Grzywiński i Hołota 2006). Odizolowanie od bodźców zewnętrz-

nych i niezmiennosc warunków środowiska pracy może spowodować uczucie znużenia (Wykowska 1994; Berger 2001). Dodatkowym problemem są zbyt długie zmiany robocze. Berger (2003) podaje, że 72% operatorów harwesterów pracuje od 50 do 60 godzin tygodniowo, 18% od 70 do 80 godzin tygodniowo, a tylko 9% 40 godzin tygodniowo, czyli zgodnie z obowiązującym standardem. Ogromna wydajność harwesterów wymusza na właścicielach firm leśnych dużą mobilność maszyn i sprawia, że konieczne jest kwaterowanie ponad 2/3 operatorów maszyn poza ich miejscem stałego zamieszkania. To również generuje dodatkowe napięcia psychiczne. Na przedstawione powyżej czynniki nakłada się duża zmienność warunków pracy w leśnictwie, która sprawia, że nawet na, wydawałoby się stabilnym, stanowisku operatora harwestera obserwuje się duże zróżnicowanie długości cykli pracy, czyli zmiany obciążeń (Szewczyk i in. 2014; Szewczyk i Sowa 2017).

Pojawiające się u operatorów harwesterów zmęczenie sprawia, że są wyczerpani, mają spowolnione reakcje, osłabione postrzeganie, pojawia się spadek motywacji i zaburzenia emocjonalne. W rezultacie obserwuje się mniejszą wydajność pracy oraz, co ważniejsze, zwiększa się zagrożenie wypadkami (Sullman i Gellerstedt 1997; Berger 2003). Obciążenia mogą być znacznie większe w trudnych warunkach pracy, np. przy pracy na dużym spadku terenu (Stampfer 1998) lub na powierzchniach pokłeskowych. W tej sytuacji pojawia się dodatkowo stres, który jest związany z zagrożeniem rejestrowanym przez zmysły. Rosner (1985) za Kozłowskim i Kaciubą określił stres jako „nadmierną reakcję organizmu na jakiegokolwiek obciążenie obejmujące zmiany neurohormonalne”. Następuje wtedy podwyższenie stężenia hormonów, glukoza i tłuszcz jako źródła energii są uwalniane przez hormon stresu i transportowane do mięśni, podwyższa się częstotliwość akcji serca i szybkość oddychania, natomiast obniżeniu ulegają obrona immunologiczna i trawienie (Berger 2003). Pomiar zmęczenia jest bardzo skomplikowany, ponieważ z reguły następuje koincydencja zmęczenia mięśniowego i psychicznego. Trudność skwantyfikowania napięcia psychicznego występującego jako bezpośredni składnik zmęczenia mięśniowego sprawia, że właśnie jego pomiar jest kluczowy w analizach pracy. Jego rozpoznanie jest punktem wyjścia w projektowaniu bezpiecznych i wydajnych technologii pracy (Rosner 1985; Heinimann 2007).

Pomiaru zmęczenia dokonuje się, analizując zmiany zachodzące w organizmie podczas wykonywania pracy (metody bezpośrednie) oraz badając efekty pracy – jej wydajności czy jakość produktów (metody pośrednie). Ergonomiczna ocena zmęczenia na stanowiskach roboczych w leśnictwie wykonywana jest na bazie bezpośrednich metod obiektywnych (pomiarowych) oraz subiektywnych (szacunkowych) (ryc. 4).





Ryc. 4. Metody badania zmęczenia (źródło: Grzywiński 2007)

## 2.1. Pomiar zmęczenia metodami subiektywnymi

Duży koszt zakupu aparatury i skomplikowane procedury pomiarowe sprawiają, że w pomiarach zmęczenia stosuje się metody subiektywne opierające się na swoistych badaniach sondażowych. Takie metody pomiaru umożliwiają dostęp do szerokiego, rozproszonego kręgu korespondentów w krótkim czasie, są anonimowe, standardowe, proste i powtarzalne. W efekcie minimalizowane są koszty ponoszone w związku z konstruowaniem bazy danych. O wartości badań ankietowych decyduje wiarygodność uzyskanych wyników, które mają związek ze sprawnością tworzenia narzędzi, rzetelnym zbieraniem danych oraz właściwą interpretacją wyników (Witaszek 2007). Istotnym warunkiem do osiągnięcia odpowiedniej dokładności badania jest wielkość próby. W analizach marketingowych wyniki uogólnić można dla całej populacji na podstawie próby 150 osób, co jest trudne do osiągnięcia w zindywidualizowanych warunkach pracy na stanowiskach roboczych w leśnictwie. Narzędziem pomiarowym stosowanym w metodzie ankietowej jest kwestionariusz, uzupełniany samodzielnie przez respondenta. Pytania zawarte w kwestionariuszu konstruowane są zgodnie z kluczem (Kaden 2008):

1. muszą być dostosowane do języka osób, które będą na nie odpowiadać, a także do ich wieku i wykształcenia;

2. nie mogą sugerować odpowiedzi i muszą być sformułowane dokładnie tak, by były jasne i jednoznaczne;
3. liczba pytań nie powinna przekraczać granic psychofizycznych wytrzymałości badanych, gdyż w wyniku zmęczenia respondenci mogą udzielać mało wiarygodnych odpowiedzi. Dlatego też pytania muszą dotyczyć jedynie spraw ważnych;
4. zaleca się stosowanie w pytaniach formy osobowej;
5. nie jest wskazane, aby pojedyncze pytanie zawierało się w więcej niż dwóch zdaniach.

Jedną z częściej stosowanych subiektywnych metod badawczych jest kwestionariusz japoński (*Japanese Fatigue Feeling Scale*) (Paluch 1985) (tabela 1).

**Tabela 1.** Kwestionariusz japoński

|                                      | zdecydowanie<br>nie | raczej<br>nie | trudno<br>powiedzieć | raczej<br>tak | zdecydowanie<br>tak |
|--------------------------------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------|---------------------|
| A – grupa pytań dotycząca aktywności |                     |               |                      |               |                     |
| Chciałbym się położyć                |                     |               |                      |               |                     |
| Czuję się senny                      |                     |               |                      |               |                     |
| Mam zamęt w głowie                   |                     |               |                      |               |                     |
| Mam zmęczone oczy                    |                     |               |                      |               |                     |
| Czuję się ociężały                   |                     |               |                      |               |                     |
| Czuję zmęczenie w nogach             |                     |               |                      |               |                     |
| Jestem niezręczny<br>w ruchach       |                     |               |                      |               |                     |
| Stojąc, czuję się niepewnie          |                     |               |                      |               |                     |
| Mam ociężałą głowę                   |                     |               |                      |               |                     |
| Ziewam                               |                     |               |                      |               |                     |
| B – grupa pytań dotycząca motywacji  |                     |               |                      |               |                     |
| Jestem zniecierpliwiony              |                     |               |                      |               |                     |
| Jestem niezdecydowany                |                     |               |                      |               |                     |
| Nie mogę skupić uwagi                |                     |               |                      |               |                     |
| Jestem zubożętniały                  |                     |               |                      |               |                     |
| Odczuwam powolność<br>w myśleniu     |                     |               |                      |               |                     |
| Czuję się roztargniony               |                     |               |                      |               |                     |

Tabela 1. cd.

|  | zdecydowanie<br>nie | raczej<br>nie | trudno<br>powiedzieć | raczej<br>tak | zdecydowanie<br>tak |
|--|---------------------|---------------|----------------------|---------------|---------------------|
| Moja uwaga jest rozproszona                    |                     |               |                      |               |                     |
| Odczuwam niepokój                              |                     |               |                      |               |                     |
| Mężczy mnie mówienie                           |                     |               |                      |               |                     |
| Jestem podenerwowany                           |                     |               |                      |               |                     |
| C – grupa pytań dotycząca zmęczenia fizycznego |                     |               |                      |               |                     |
| Mam zeszywniałe barki                          |                     |               |                      |               |                     |
| Drżą mi powieki                                |                     |               |                      |               |                     |
| Odczuwam drżenie kończyn                       |                     |               |                      |               |                     |
| Mam krótki oddech                              |                     |               |                      |               |                     |
| Odczuwam zawroty głowy                         |                     |               |                      |               |                     |
| Boli mnie głowa                                |                     |               |                      |               |                     |
| Mój głos staje się ochrypły                    |                     |               |                      |               |                     |
| Odczuwam pragnienie                            |                     |               |                      |               |                     |
| Odczuwam ból w plecach                         |                     |               |                      |               |                     |
| Czuję usztywnioną szyję                        |                     |               |                      |               |                     |

Źródło: Grzywiński 2007

Autoocena poziomu zmęczenia pracownika polega na wypełnieniu arkusza składającego się z 30 pytań związanych z jego samopoczuciem przed podjęciem zadań roboczych i po ich zakończeniu. Lista symptomów zmęczenia jest uszeregowana w trzech grupach: spadek aktywności (A), osłabiona motywacja (B), zmęczenie fizyczne (C). Skala ocen obejmuje pięć kategorii odczuć, zgodnych z ogólnie znanym systemem oceniania, co sprzyja obiektywizacji wyników: zdecydowanie nie (1), raczej nie (2), nie mogę się zdecydować (3), raczej tak (4), zdecydowanie tak (5). Procentowa przewaga punktów przyznanych w danej grupie symptomów zmęczenia pozwala na wyróżnienie typów zmęczenia związanego z pracą fizyczną (przewaga grupy C), umysłową (przewaga grupy B) i bliżej nieokreślonego rodzaju zmęczenia (przewaga grupy A).

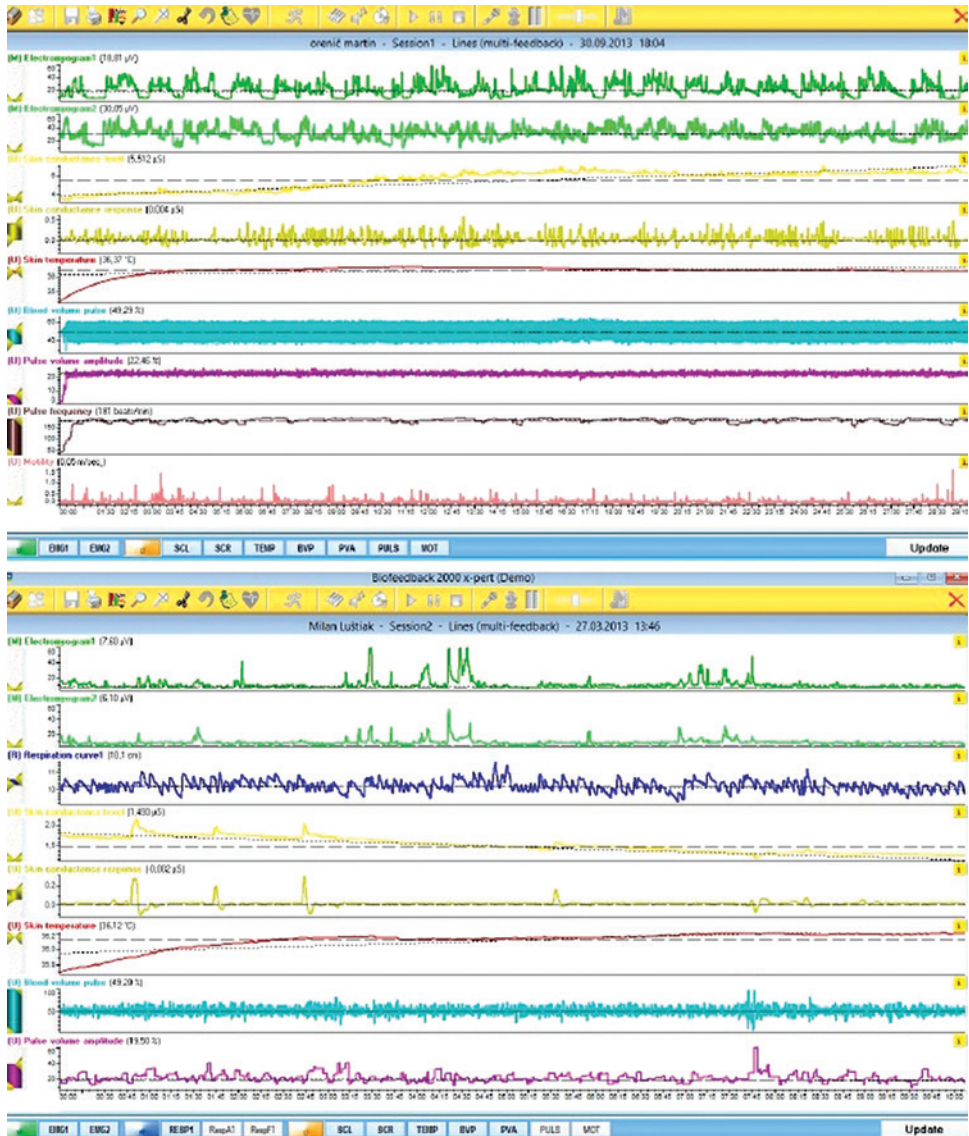
Ankiety zostały wykorzystane w badaniach nad wpływem zmęczenia powodowanego czynnikami pracy na liczbę wypadków oraz chorób układu mięśniowo-szkieletowego wśród pracowników leśnych (Lilley i in. 2002; Gallis 2006). W badaniach Skoniecznej i Grzywińskiego (2016) zastosowano kwestio-

nariusze do badania stresu zawodowego na stanowiskach pracy w Lasach Państwowych. Ocena zmęczenia operatorów harwesterów przeprowadzona przedstawioną powyżej metodą wskazuje na dominację obciążeń umysłowych (Grzywiński i Hołota 2006). Na wysoki poziom napięcia psychicznego nakłada się według tych autorów powtarzalność ruchów roboczych, odizolowanie od środowiska zewnętrznego oraz niezmiennosc stanowiska roboczego. Do podobnych wniosków doszli Sullman i Gellersted (1997) oraz Berger (2003), którzy, badając w ten sposób obciążenia psychiczne robotników leśnych, wskazali w przypadku operatora harwestera na przewagę wysiłku umysłowego z bardzo wysokim poziomem obciążeń psychicznych. Badania ankietowe, które przeprowadziła Berger (2003), wskazały ponadto na występowanie znaczących różnic w zmęczeniu operatorów rejestrowanym w różnych porach dnia roboczego. Autorka ta wskazała również istotny wpływ zmęczenia warunkami terenowymi, w jakich wykonywana jest praca oraz na presję czasu podczas pracy akordowej.

## 2.2. Pomiar zmęczenia metodami fizjologicznymi

Ograniczenia stosowania metod subiektywnych pomiaru obciążenia psychicznego polegają m.in. na trudności wniknięcia w problematykę badań, różnym zaangażowaniu uczuciowym respondentów w wypełnianie ankiety oraz braku możliwości uwzględnienia indywidualnych różnic pomiędzy respondentami. Wydaje się, że powinny być stosowane jako uzupełnienie metod pomiarowych. W praktyce badawczej oceny stanowisk pracy w leśnictwie stosuje się kilka metod fizjologicznych w pomiarach zmęczenia – pomiar aktywności elektrodermalnej EDA, określenie aktywności sercowo-naczyniowej ECG, BVP, elektromiografię, monitoring częstotliwości i amplitudy oddechu RESP, pomiar temperatury TEMP oraz elektroencefalografię EEG (Stampfer 1998; Filo 2014; Spinelli i in. 2015; Aalmo i in. 2016). W badaniach Jankowskiego i in. (2013) do opracowywania krzywych uczenia operatorów harwesterów wykorzystano Biofeedback 2000 x-pert. Metoda przedstawiona w przywołanej publikacji stanowi uzupełnienie tradycyjnych sposobów oceny sprawności działania robotników: analiz raportów produktywności, nagrań wideo i wynikających z nich danych na temat czasochłonności. Przeprowadzone pomiary dostarczyły m.in. danych o poziomie stresu w procesie uczenia się (ryc. 5).

W pracy Jankowskiego i in. (2017) opracowano modele określające czynniki obciążające układ sercowo-naczyniowy (częstotliwość akcji serca) operatora harwestera, które mogą być przyczyną zwiększenia ryzyka chorób sercowo-naczyniowych. Okazało się, że wzrost operatorów, typ maszyny, hałas, oświetlenie i wibracje całego ciała wyjaśniały około 72% podwyższonej zmienności rytmu serca.



Ryc. 5. Biofeedback zapisu pracy na symulatorze harwestera, u góry operator z minimalnym stażem, u dołu operator zaawansowany (źródło: Jankowski i in. 2013)

### 3. Możliwości zastosowania eye-trackingu w pomiarach zmęczenia

Praca operatora harwestera, obejmująca głównie komponent umysłowy, związana jest z rozpoznawaniem informacji wizualnych, ich segregowaniem i prowadzeniem nadzoru nad tymi, które są najbardziej istotne (Hansson 1990; Gellerstedt 2002). Praca operatora harwestera obejmuje między innymi ocenę warunków podłoża i określenie cech drzewostanu w powiązaniu z technologią pozyskiwania drewna (przebiegiem szlaków operacyjnych i lokalizacją składnic), wykrywanie zbliżających się ludzi i nadzorowanie sprzętu. Pomimo zastosowania całkowicie (częściowo) zautomatyzowanej procedury, operator harwestera powinien określić zarówno cechy drzew, jak i wizualnie zidentyfikować wady drewna. Zwiększenie liczby bodźców wzrokowych w maszynie jest wysoce prawdopodobne, chociaż rosnąca liczba danych związanych z pracą z zaawansowanym systemem komputerowym w nowoczesnych maszynach leśnych stwarza możliwości tworzenia systemów wspomaganie decyzji i automatyzacji procesów. Systemy wspomaganie decyzji korzystają głównie z graficznych interfejsów użytkownika, ponieważ w środowisku wibrującym i hałaśliwym problematyczne jest wykorzystanie sterowania dotykowego lub zaawansowanych bodźców słuchowych. W związku z tym dokładne zrozumienie zachowań wizualnych pracowników jest ważne dla rozwoju bezpiecznych, wydajnych maszyn leśnych i procedur pracy. Wiedza ta ma również duże znaczenie dla rozwoju programów szkoleniowych i przekazywania informacji między operatorami.

Historia analizy ruchów oczu rozpoczęła się w XIX wieku. W 1879 roku Louis Émile Javal ustalił, że czytanie nie wymaga dokładnego wodzenia oczami wzdłuż tekstu, jak wcześniej zakładano. Do tego procesu wystarczy seria krótkich momentów skupienia (fiksacji), pomiędzy którymi występują szybkie przemieszczenia gałek ocznych na kolejny obiekt (sakady). Kluczowe było sformułowanie przez Yarbusa (1967) tezy o występowaniu sprzężenia pomiędzy ruchami oczu i zainteresowaniem obserwatora pewnymi fragmentami sceny wizyjnej: „Zapisy ruchów oka wskazują, że obserwator zwraca szczególną uwagę tylko na pewne elementy występujące na zdjęciu. (...) Ruch oczu odzwierciedla procesy myślowe człowieka; dlatego też wnioski obserwatorów na temat myśli badanych towarzyszących badaniu danego bodźca mogą w pewnym zakresie opierać się na analizie ruchu gałek ocznych. Na podstawie tych zapisów łatwo jest ustalić, które elementy przyciągają spojrzenie obserwatora (i w konsekwencji skupiają jego myśli), w jakiej kolejności i jak często”. Analizy ruchu gałek ocznych (okulografia, *eye-tracking*), początkowo charakteryzujące tylko proces czytania, wykorzystywane są aktualnie w wielu dziedzinach wiedzy: psychologii rozwojowej, kognitywistyce, w systemach HCI (*Human Computer Interface*), w medycynie. Rozwinięciem badań kognitywistycznych, których przedmio-



tem jest percepcja przez człowieka widzianego przez niego obrazu, są analizy sposobu wykonania zadań w procesach pracy. Pozwalają one na uchwycenie błędów podczas wykonywania czynności roboczych, co jest związane bezpośrednio z poziomem wydajności i poziomem bezpieczeństwa. W takim zakresie badania eye-trackingowe są stosowane podczas szkoleń kierowców czy pilotów. W analizach pracy na stanowiskach roboczych w leśnictwie związanych z zagospodarowaniem lasu, pozyskaniem czy zrywką drewna metody takie stosowane były jedynie incydentalnie (Hägström i in. 2015).

W zmiennych warunkach pracy operatora harwestera mogą być zastosowane eye-trackery mobilne, np. Tobii Pro Glasses 2 (ryc. 6). Rejestrowane jest w nich odbicie światła podczerwonego od oka, następnie poddawane jest ono obróbce cyfrowej w czasie rzeczywistym, co pozwala na określenie punktów, na które patrzył operator. W badaniach Szewczyka i in. (2020 b) w analizach pracy operatorów harwestarów pracujących w terenie o różnym spadku wykorzystano właśnie taki sprzęt. Zasadniczym celem eye-trackingu jest określenie czasu trwania fiksacji i sakad oraz skonstruowanie map cieplnych i ścieżek skanowania wzrokiem sceny wizyjnej badanej osoby (Rayner 1998; Duchowski 2007).

Zaangażowanie ośrodków korowych mózgu w podejmowanie decyzji o sakkadowym przeniesieniu wzroku na tylko jeden – w danej chwili – punkt otoczenia wzrokowego umożliwia ocenę procesów decyzyjnych, które związane są z celową eksploracją otoczenia. Teoria „umysł-oko” Nielsena i Pernice (2010) łączy aktywność oczu z przebiegiem procesu poznawczego. W większości przypadków rodzaj ruchów oczu jest odzwierciedleniem systematycznego pobierania informacji z otoczenia, bazującego na interpretacji znaczenia napływających danych sensorycznych (Lindsay i Norman 1977). Zmienna liczba fiksacji zaobserwowana przez Szewczyka i in. (2020b) stanowi swego rodzaju „zapis procesu pracy”, a jako że jest ściśle z nim związana, powinna dokładnie odwzorować zmienny stan psychiczny operatora (Kanizsa 1976).



Ryc. 6. Eye-tracker Tobii Pro Glasses 2 (fot. G. Szewczyk)



Problemem w prostym przełożeniu dynamiki ruchów gałek ocznych na obciążenia psychiczne badanych osób jest wykorzystanie doświadczenia, które powinno „spłaszczać” obserwowaną zmienność aktywności oka. Jak podkreśla wielu autorów analizujących trajektorie ruchów sakkadycznych, istnieje seryjny komponent procesu przeglądania sceny wizyjnej, swoisty ślad pamięciowy, który sprawia, że w procesie analiz otoczenia wykorzystujemy nabyte wcześniej informacje (Yarbus 1967; Noton i Stark 1971 a, b). Z drugiej strony, ewentualnie występujące różnice w reakcjach pozwoliłyby, być może, opisać poziom napięcia psychicznego badanej osoby (operatora harwestera) pracującego np. w warunkach stresu. Tezy te znalazły potwierdzenie w analizach pracy operatorów harwesterów pracujących w łatwym i trudnym terenie (ryc. 7, 8). (Szewczyk i in. 2020 b).

Widoczne na rycinie 7 gazy plot z nielicznymi fiksacjami podczas okrzyszowania w łatwym terenie wskazują na wykorzystanie doświadczenia. Sytuacja zmienia się podczas wykonywania prac w trudnych warunkach, które wymagają dodatkowych „skanowań” sceny wizyjnej (ryc. 8). Analogiczna sytuacja obserwowana jest w trakcie przejazdów pomiędzy stanowiskami roboczymi. Znacznie większa liczba fiksacji jest łączona ze sprawnością przeszukiwania badanego obiektu (Goldberg i Kotval 1999), jego ważnością i zauważalnością w procesie skanowania wzrokiem (Poole i in. 2004).

Czas trwania fiksacji można powiązać z przetwarzaniem gromadzonych informacji (Rayner 1998). Dłuższy czas trwania fiksacji może zatem świadczyć o większej trudności w przetwarzaniu, dłuższym czasie porównania oglądanego elementu z jego reprezentacją pamięciową (Buswell 1935). Dłuższy czas trwania fiksacji wskazuje również na obszerniejsze przetwarzanie danych znajdujących się aktualnie w polu wzrokowym (Duchowski 2007). W pracy operatorów harwesterów w trudnych warunkach terenowych średnia długość trwania fiksacji (87 ms) była kilkukrotnie niższa od danych publikowanych przez innych autorów – ok. 260–330 ms (Rayner i Castelhana 2007). Uzyskane wyniki potwierdzają ogólną zasadę, że bardziej skomplikowane obrazy (z większą liczbą detali) determinują krótsze fiksacje (Molnar 1981; Duchowski 2007). W przypadku procesów poznawczych przebiegających z dużą zmiennością, czyli tak jak dla operatora harwestera, czas ten może być dłuższy, nawet do 1,5 s (Steinman 2004). Długie czasy trwania fiksacji mogą być związane z koniecznością pobierania dodatkowych informacji przy pracy w trudnym terenie. Zgodność sekwencji cykli aktywności oka i cykli pracy, widoczna zwłaszcza w trudnym terenie o dużym spadku, wskazuje na występowanie związku pomiędzy warunkami pracy i stopniem obciążenia psychicznego.



Ryc. 7. Gaze plot – okrzywanie harvesterem 1 sekcji na stoku o nachyleniu 9% (fot. G. Szewczyk)



Ryc. 8. Gaze plot – okrzywanie harvesterem 1 sekcji na stoku o nachyleniu 48% (fot. G. Szewczyk)

## Literatura

- Aalmo G.O., Magagnotti N., Spinelli R.** 2016. Forest Worker Sand Steep Terrain Winching: the Impact of Environmental and Anthropometric Parameters on Performance. *Croatian Journal of Forestry Engineering*, 37(1), 97–105.
- Ager B.** 2014. Skogsarbetetshumanisering och rationaliseringfrån 1900 och framåt. [Forestrylabors' humanization and rationalization from 1900 onwards]. [Monography] [PhD Thesis]. Luleå: Institutionen för International Journal of Forest Engineering 111. Downloaded by [SLU Library] at 02:08 22 September 2015. ekonomi, teknik och samhälle, Luleå Tekniska Universitet.
- Axelsson S-Å, Pontén B.** 1990. New Ergonomic Problems in Mechanized Logging Operations. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 5, 267–273.
- Berger C.** 2001. Endbericht zur Studie Stressbelastung in der hochmechanisierten Forstwirtschaft. Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, Wien.
- Berger C.** 2003. Mental Stress on Harvester Operators. *Atti del Convegno «Austro 2003: High-tech forest operations for mountainous terrain»*, 5–8 Ottobre 2003, Schaeogl, Austria.
- Buswell G.T.** 1935. *How People Look at Pictures*. Chicago, University of Chicago Press.
- Duchowski A.** 2007. *Eye Tracking Methodology. Theory and Practice*. Springer-Verlag, London.
- Dürstein H., Stampfer K.** 2000. Aktuelle Trends in der Forsttechnik. *Arbeit im Wald. Öster. Forstztg*, 5, 5–6.
- Filo P.** 2014. The Ergonomic Characteristics of Forwarders with Stationary and Rotating Cabs. W: *The Role of Forest Utilization and Ergonomics in Modern Forestry*. Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, 12–13.06.2014.
- Frutig F., Fahrni F., Stettler A., Egger A.** 2007. Mechanisierte Holzernte in Hanglagen. *Wald und Holz*, 4, 47–52.
- Gallis Ch.** 2006. Work-Related Prevalence of Musculoskeletal Symptoms Among Greek Forest Workers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(8), 731–736.
- Gardell B.** 1976. Technology, Alienation and Mental Health. Summary of a Social Psychological Study of Technology and the Worker. *Acta Sociologica*, 19, 83–93.
- Gellerstedt S.** 2002. Operation of the Single-Grip Harvester: Motor-Sensory and Cognitive Work. *International Journal of Forest Engineering*, 13, 35–47.
- Giefing D.F.** 1995. Badania nad opracowaniem proekologicznych procesów pozyskiwania drewna. W: *Model optymalnych dla środowiska procesów pozyskiwania drewna*. IBL Warszawa. 52–59.
- Goldberg J.H., Kotval X.P.** 1999. Computer Interface Evaluation Using Eye Movements: Methods and Constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24, 631–645.
- Grandjean E.** 1962. *Physiologische Arbeitsgestaltung. Leitfaden der Ergonomie*. OTT Verlag Thun.
- Grzywiński W.** 2007. *Ergonomia i ochrona pracy w leśnictwie*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, Poznań.

- Grzywiński W., Hołota R.** 2006. Subjective Assessment of the Fatigue of Forest Workers Based on Japanese Questionnaire. *Acta Scientiarum Polonorum*, (1), 27–37.
- Hägglström C., Englund M., Lindroos O.** 2015. Examining the Gaze Behaviors of Harvester Operators: an Eye-Tracking Study. *International Journal of Forest Engineering*, 26, 2, 96–113. <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2015.1075793>.
- Hakkila P.** 1989. Logging in Finland. *Acta Forestalia Fennica*, 207, 1–39.
- Hansson J.E.** 1990. Ergonomic Design of Large Forestry Machines. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 5, 255–266.
- Heinimann H.R.** 2007. Forest Operations Engineering and Management – The ways Behind and Ahead of a Scientific Discipline. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 28(1), 107–121.
- Hellström B., Andersen KL.** 1972. Vibration injuries in Norwegian forest workers. *British Journal of Industrial Medicine*, 29, 255–263.
- Jankovský M., Hnilica R., Dvořák J., Dado M., Natov P.** 2013. Utilization of Biofeedback Devices in Determination of Learning Curves of Harvester Operators. *Proceedings of ICERI 2013 Conference, 18th–20th November 2013, Seville, Spain*, 3703–3711.
- Jankovský M., Merganic J., Allman M., Ferencik M., Messingerova V.** 2017. The Cumulative Effects of Work-Related Factors Increase the Heartrate of Cabin Field Machine Operators. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2017.08.003>.
- Kaden J.R.** 2008. *Badania marketingowe*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Kanizsa G.** 1976. Subjective Contours. *Scientific American*, 234(4), 48–52, 138.
- Kühmaier M., Stampfer K.** 2012. Development of a Multi-Criteria Decision Support Tool for Energy Wood Supply Management. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 33 (2), 181–198.
- Lilley R., Feyer A. M., Kirk P., Gander P.** 2002. A Survey of Forest Workers in New Zealand: Do Hours of Work, Rest, and Recovery Play a Role in Accidents and Injury. *Journal of Safety Research*, 33(1), 53–71.
- Lindsay P.H., Norman D.A.** 1977. *Human Information Processing: an Introduction to Psychology*. Academic Press, New York, USA.
- Mederski P.S., Karaszewski Z., Rosińska M., Bembenek M.** 2016. Dynamika zmian liczby harwesterów w Polsce oraz czynniki determinujące ich występowanie. *Sylwan*, 160(10), 795–804.
- Molnar F.** 1981. About the Role of Visual Exploration in Aesthetics. W: *Advances in Intrinsic Motivation and Aesthetics*. H. Day. Red. Plenum Press, New York.
- Moskalik T.** 2002. Rozwój technik i technologii maszynowego pozyskiwania drewna. *Sylwan*, 10, 31–37.
- Moskalik T., Stampfer K.** 2003. Efektywność pracy harwestera Valmet 911 Snake w warunkach górskich. *Sylwan*, 4, 91–98.
- Moskalik T., Borz S.A., Dvořák J., Ferencik M., Glushkov S., Muiste P., Lazdiňš A., Styranivsky O.** 2017. Timber Harvesting Methods in Eastern European Countries: a Review. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 38(2), 231–241.



- Nielsen J., Pernice K.** 2010. *Eyetracking web usability*. Berkeley, New Riders.
- Nordfeld T., Bjorheden R., Thor M., Wästerlund I.** 2010. Changes in Technical Performance, Mechanical Availability and Prices of Machines Used in Forest Operations in Sweden from 1985 to 2010. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25(4), 382–389.
- Noton D., Stark L.** 1971a. Eye Movements and Visual Perception. *Scientific American*, 224, 34–43.
- Noton D., Stark L.** 1971b. Scanpaths in Saccadic Eye Movements While Viewing and Recognizing Patterns. *Vision Research*, 11, 929–942.
- Paluch R.** 1985. Ocena zmęczenia na podstawie subiektywnego odczucia – kwestionariusz japoński. *Bezpieczeństwo Pracy*, 7–8, 3–6.
- Paschalis P.** 1997. Kryteria zrównoważonej gospodarki leśnej w użytkowaniu lasu. *Postępy Techniki Rolniczej i Leśnej*, (62), 22–29.
- Poole A., Ball L.J., Phillips P.** 2004. In Search of Saliency: A response Time and Eye Movement Analysis of Bookmark Recognition. W: *People and Computers XVIII-Design for Life: Proceedings of HCI 2004*. S. Fincher, P. Markopolous, D. Moore, R. Ruddle. Red. Springer-Verlag Ltd., London.
- Rayner K.** 1998. Eye Movements in Reading and Information Processing: 20 Years of Research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372–422.
- Rayner K., Castelano M.S.** 2007. Eye Movements During Reading, Scene Perception, Visual Search, and While Looking at Print Advertisements. [https://www.researchgate.net/publication/228380912\\_Eye\\_movements\\_during\\_reading\\_scene\\_perception\\_visual\\_search\\_and\\_while\\_looking\\_at\\_print\\_advertisement](https://www.researchgate.net/publication/228380912_Eye_movements_during_reading_scene_perception_visual_search_and_while_looking_at_print_advertisement).
- Rosner J.** 1985. *Ergonomia*. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Skonieczna J., Grzywiński W.** 2016. Stres zawodowy na stanowiskach pracy w leśnictwie. Konferencja Katedr Jednoimiennych. Znaczenie użytkowania lasu w gospodarce leśnej XXI wieku. Puszczykowo. Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu.
- Sowa J.M.** 2009. Współczesne pożytki z lasu. *Leśnictwo w górach i regionach przemysłowych*. Monografia. Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków, 129–152.
- Spinelli R., Aalmo G.O., Magagnotti N.** 2015. The Effect of a Slack-Pulling Device in Reducing Operator Physiological Workload During Log Winching Operations. *Ergonomics*, 58(5), 781–790. DOI:10.1080/00140139.2014.983184.
- Stampfer K.** 1998: Stress and Strain Effects of Forest Work in Steep Terrain. Proceedings of the IUFRO/FAO Seminar on Forest Operations in Himalayan Forests with Special Consideration of Ergonomic and Socio-Economic Problems in Thimphu/Bhutan. H.R. Heinemann, J. Sessions. Red. Kassel University Press, Kassel, 113–119. <http://www.upress.de/abstracts/3-933146-12-7.html>.
- Steinman R.M.** 2004. *The Visual Neuro-Sciences*, 1339–1356.
- Sullman M., Gellerstedt S.** 1997. The Mental Workloads of Mechanized Harvesting. *New Zealand Forestry*, 11, 48.
- Sullman M., Kirk P.** 1998. Mental Work Load of Mechanised Processing with a Single Grip Harvester. *LIRO Report*, 23, 1–7.

- Szewczyk G. 2011. Variability of the Harvester Operation Time in Thinning and Windblow Areas. Monografia: Technika i Ergonomia w służbie współczesnego leśnictwa. Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków, 183–196.
- Szewczyk G. 2014. Model strukturalny dynamiki zmienności pracy na wybranych stanowiskach roboczych w pozyskiwaniu i zrywce drewna. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, 522. Rozprawy, 399, 1–174.
- Szewczyk G., Kulak D. 2013. Kosztocłonność pozyskania drewna harvesterem w drzewostanach przebudowywanych z zastosowaniem cięć częściowych. Sylwan, 4, 243–252.
- Szewczyk G., Sowa J.M. 2017. The Accuracy of Measurements in a Time Study of Harvester Operations. New Zealand Journal of Forestry Science, 47, 24. DOI 10.1186/s40490-017-0105-3.
- Szewczyk G., Stańczykiewicz A. 2012. Model szacowania pracochłonności pozyskiwania drewna w drzewostanach ze śniegołomami. Leśne Prace Badawcze, 73(2), 167–173.
- Szewczyk G., Sowa J.M., Grzebieniowski W., Kormanek M., Kulak D., Stańczykiewicz A. 2014. Sequencing of Harvester Work During Standard Cuttings and in Areas with Windbreaks. Silva Fennica, 48(4), 1–16. DOI:10.14214/sf.1159.
- Szewczyk G., Jankowiak R., Mitka B., Bożek P., Kulak D., Barycza A., Kunys G. 2020a. Development of Blue Stain in Mechanically Harvested scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood during storage. Canadian Journal of Forest Research, 50(1), 42–50. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0112>.
- Szewczyk G., Spinelli R., Magagnotti N., Tylek P., Sowa J.M., Rudy P., Gaj-Gielarowicz D. 2020b. The Mental Workload of Harvester Operators Working in Steep Terrain Conditions. Silva Fennica, 54(3), 1–18. <https://doi.org/10.14214/sf.10355>.
- Teljstedt H. 1974. Artificial Lighting in Forest Machine Operations: Ergonomic Aspects of Sight and Light. Studia Forestalia Suecica, 120.
- Visser R., Stampfer K. 2015. Expanding Ground-Based Harvesting Onto Steep Terrain: a Review. Croatian Journal of Forest Engineering, (36)2, 321–331.
- Witaszek Z. 2007. Miejsce i rola sondaży w badaniu opinii społecznej. Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, 4 (171), 141–162.
- Wykowska M. 1994. Ergonomia. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- Yarbus A.L. 1967. Eye Movements and Vision. Plenum Press, New York.

# Porównanie wilgotności stosowego drewna świerka pospolitego (*Picea abies* (L.) H. Karst) oznaczanej metodą suszarkowo-wagową oraz przy użyciu wilgotnościomierza oporowego

Radostław Wąsik, Krzysztof Michalec

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: radostlaw.wasik@urk.edu.pl, krzysztof.michalec@urk.edu.pl

## Abstrakt

W pracy porównano wyniki oznaczania wilgotności drewna za pomocą dwóch metod: suszarkowo-wagowej oraz przy użyciu wilgotnościomierza oporowego WRD-100. Materiał do badań stanowiło sezonowane półtora roku na otwartej przestrzeni okrągłe drewno świerkowe, sortymentu S4, ułożone w stos ciągły. W 3 różnych miejscach na szerokości stosu wyznaczono po 3 poziomy: dolny, środkowy i górny. Z każdego poziomu pobrano i oznaczono po 7 wałków o zróżnicowanych średnicach, łącznie 63 wałki. W odległości od ok. 5 do ok. 10 cm od jednego z czół wbito elektrodę młotkową wilgotnościomierza oporowego w drewno pobocznicą wałka i odczytano wynik. Następnie z miejsca pomiaru elektrodą młotkową pobrano z wałka krążek o grubości ok. 3–5 cm, który posłużył do oznaczenia w laboratorium wilgotności drewna metodą suszarkowo-wagową. Średnia wilgotność drewna oznaczona przy użyciu urządzenia WRD-100 wyniosła 22,6%, natomiast metodą suszarkowo-wagową – 21,9%. Zróżnicowanie wyników uzyskanych przy pomocy urządzenia WRD-100 było wyraźnie większe w porównaniu do metody suszarkowo-wagowej, przy czym zmienność wyników uzyskanych wilgotnościomierzem wzrastała wraz z wysokością poziomu pobrania próby w stosie. Wykazano bardzo wysoką korelację wilgotności drewna uzyskanych obiema metodami oraz nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic między nimi zarówno dla całości badanego materiału, jak i dla poszczególnych poziomów. Stwierdzono, że rozbieżność wyników uzyskanych obiema metodami była tym większa i tym częstsza, im wyżej położony w stosie był poziom, z którego pochodziło badane drewno. W przypadku poziomu górnego prawie u połowy badanych wałków różnice wilgotności drewna otrzymane obiema metodami przekraczały 5 punktów procentowych, co poddaje w wątpliwość stosowanie wilgotnościomierza oporowego



do określania wilgotności drewna złożonego w górnych warstwach stosów niezadaszonych. Uzyskane wyniki wilgotności drewna wałków złożonych w poziomie środkowym i dolnym badanego stosu potwierdzają pogląd, że półtoraroczny okres sezonowania drewna jest wystarczający, aby uzyskało ono wilgotność nieprzekraczającą 20%. W przypadku poziomego górnego wszystkie badane wałki charakteryzowały się wilgotnością drewna powyżej 20%, co w świetle zapisów uchwał antysmogowych nie pozwala na zastosowanie tego surowca jako drewna opałowego. Rozbieżności w wynikach uzyskanych obiema metodami wskazują na potrzebę przeprowadzenia szerszych analiz uwzględniających gatunek i postać drewna, jego wymiary oraz warunki sezonowania.

**Słowa kluczowe:** drewno stosowe, wilgotność, sezonowanie, dokładność pomiaru

## 1. Wstęp

W ostatnich latach udział biomasy w strukturze zużycia energii w gospodarstwach domowych w Polsce kształtuje się na stosunkowo stabilnym poziomie kilkunastu procent (Energia 2016, 2017, 2018). W wielu gospodarstwach domowych podstawowym biopaliwem stałym jest drewno kawałkowe. W 2018 roku pozyskano w polskich lasach ponad 5 mln metrów sześciennych drewna opałowego, z czego ponad 36% stanowiła grubizna iglasta. Obecnie w wielu województwach w Polsce obowiązują uchwały antysmogowe, które między innymi wprowadzają maksymalną, dopuszczalną wilgotność biomasy (w tym drewna) na poziomie 20% (Uchwała... 2017 a, b, c, d, e, f, g; 2018). Spośród metod określania wilgotności drewna najdokładniejszą, lecz czas- i energochłonną jest metoda suszarkowo-wagowa (Krzysik 1974). Najmniej kłopotliwa jest metoda elektrometryczna wykorzystująca zjawisko zmiennej oporności drewna w zależności od zmian jego wilgotności. Producenci wilgotnościomierzy oporowych zastrzegają jednak, że dokładność pomiaru wilgotności drewna takimi aparatami obarczona jest błędem, który jest większy dla wyższych wilgotności drewna (Tannenberg 2004). Celem niniejszych badań było porównanie wilgotności drewna świerkowego, oznaczonej metodą suszarkowo-wagową oraz przy użyciu wilgotnościomierza oporowego WRD-100. Dodatkowym celem było stworzenie modelu równania, które na bazie odczytu z wilgotnościomierza umożliwiłoby obliczenie bardziej precyzyjnego wyniku wilgotności drewna świerkowego.

## 2. Metodyka

Badania terenowe prowadzono w lipcu 2018 roku na składnicy drewna świerkowego sezonowanego tam od stycznia 2017 roku. Drewno w postaci sortymentu S4 (drewno opałowe) ułożone było na drewnianych legarach w stos

ciągły o długości kilkudziesięciu metrów i wysokości 3 m. W stosie wyznaczono 3 miejsca pomiarowe, odległe od siebie o około 40–50 m. W każdym z miejsc wyznaczono wałki w 3 poziomach: dolnym, środkowym i górnym. Wałki stanowiące poziom dolny oddzielone były od drewnianych legarów jedną warstwą wałków, wałki tworzące poziom środkowy położone były w środku wysokości stosu (ok 1,5 m od gruntu), zaś wchodzące w skład poziomu górnego stanowiły warstwę drugą od góry stosu.

Z każdego poziomu pobrano po 7 wałków o zróżnicowanych średnicach środkowych. Po odpowiednim ustawieniu układów kompensacyjnych wilgotnościomierza WRD-100, uwzględniających gatunek badanego drewna oraz jego temperaturę, w odległości od ok. 5 do 10 cm od jednego z czoł każdego wałka, w jego okorowaną pobocznice wbito elektrodę młotkową wilgotnościomierza z igłami o długości 1 cm. Elektrodę wbijano w taki sposób, aby zgodnie z instrukcją obsługi przepływ prądu między jej igłami (elektrodami) następował w kierunku prostopadłym do przebiegu włókien drzewnych. Na wyświetlaczu urządzenia uzyskiwano wilgotność drewna, którą wpisywano do raptularza terenowego. Wykorzystany w badaniach wilgotnościomierz posiadał aktualną legalizację. Po wykonaniu pomiaru wilgotnościomierzem od czoła, przy którym wykonano ten pomiar, przy pomocy pilarki łańcuchowej odcinano najpierw krążek o grubości ok. 5 cm, a następnie drugi krążek – tzw. próbny o grubości 3–5 cm, który zawierał na pobocznicę otwory po wbitych igłach elektrody młotkowej. Pierwszy z wymienionych krążków odcinano i odrzucano w celu uniknięcia wpływu na pomiar dużych wahań wilgotności drewna warstw położonych blisko czoła wałka, co związane jest z jego ekspozycją na zmienne warunki pogodowe. Należy bowiem mieć na uwadze, że transport wody, a zatem i wysychanie drewna przebiega najszybciej wzdłuż włókien, tj. w kierunku, w którym tkanka drzewna za życia drzewa przewodzi roztwory wodne. Odcięty krążek próbny opisywano numerem zgodnym z numeracją wyniku w raptularzu, następnie pakowano do plastikowej torby. Wszystkie pobrane w terenie krążki próbne przetransportowano do Laboratorium Katedry Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej Uniwersytetu Rolniczego im. H. Kołłątaja w Krakowie, gdzie prowadzono badania laboratoryjne, których celem było określenie wilgotności drewna krążków próbnych metodą suszarkowo-wagową (PN-77/D-04100). Bezpośrednio po wyjęciu z plastikowej torby z każdego krążka próbnego usuwano korę, następnie drewno krążka ważono na wadze laboratoryjnej RADWAG model APP 25.R2 z dokładnością 0,1 g. Po zważeniu krążki umieszczono w suszarce POL-EKO model SLW 400 STD i suszono w temperaturze  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$  do stanu absolutnie suchego, po czym ponownie ważono. Wilgotność drewna obliczano wg poniższego wzoru:

$$W = \frac{mw - mo}{mo} 100\% \quad (1)$$

gdzie:

$W$  – wilgotność bezwzględna drewna [%],

$mw$  – masa wilgotnego drewna krążka próbnego,

$mo$  – masa absolutnie suchego drewna krążka próbnego (PN-77/D-04100).

Uzyskane wyniki zestawiono w arkuszu kalkulacyjnym, obliczano średnie i współczynniki zmienności. Do analiz statystycznych zastosowano program Statistica v. 13 (TIBCO Software Inc. 2017), w którym wykorzystano następujące procedury:

- zgodność rozkładów zmiennych z rozkładem normalnym oceniano testem Shapiro-Wilka;
- w przypadku spełnienia kryterium normalności rozkładów, istotność różnic weryfikowano testem T (Studenta);
- gdy rozkład jednej lub obu zmiennych nie spełniał kryterium rozkładu normalnego, istotność różnic analizowano przy pomocy nieparametrycznego testu U (Manna-Whitneya);
- związki między danymi uzyskanymi przy użyciu obu zastosowanych metod obliczano, stosując współczynnik korelacji liniowej Pearsona;
- w analizach statystycznych przyjęto poziom istotności  $p = 0,05$ .

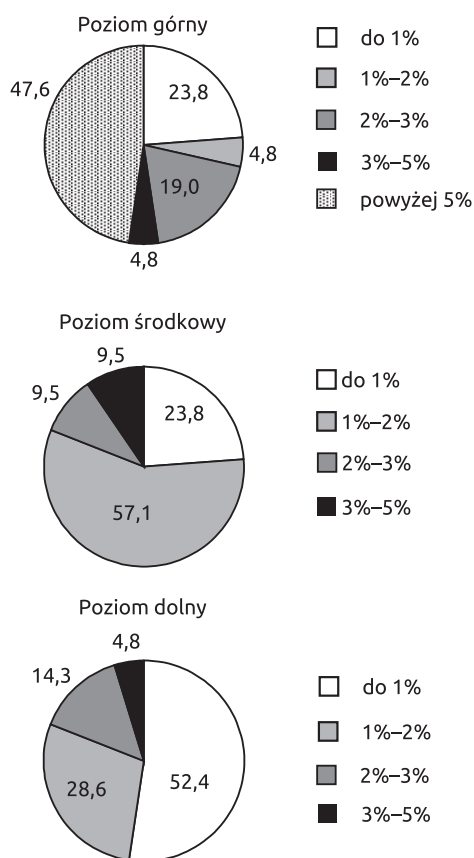
### 3. Wyniki

Ogółem dokonano pomiaru wilgotności 63 wałków, zbadano po 21 wałków z każdego poziomu stosu (dolny, środkowy, górny). Średnia wilgotność drewna mierzona przy pomocy wilgotnościomierza WRD 100 dla całości badanego materiału wyniosła 22,6%, a współczynnik zmienności w tej metodzie osiągnął 45,3%. W przypadku metody suszarkowo-wagowej wartości te wyniosły odpowiednio 21,9% oraz 26,8% (tab. 1). Najniższą, średnią wilgotnością charakteryzowało się drewno poziomu dolnego. Cecha ta mierzona przy pomocy wilgotnościomierza WRD-100 kształtowała się na poziomie 18,9%, natomiast badana metodą suszarkowo-wagową była o 0,1% niższa. Najwyższą wilgotność zanotowano w poziomie górnym, gdzie średnia mierzona wilgotnościomierzem osiągnęła 29,5%, natomiast metodą suszarkowo-wagową – 27,4%. Najmniejszą zmienność wyników, tak dla metody suszarkowo-wagowej, jak i dla urządzenia WRD-100 zanotowano dla poziomu dolnego, dla którego współczynniki zmienności osiągnęły odpowiednio 6,3% oraz 9,6%. Największe zróżnicowanie stwierdzono dla poziomu górnego, gdzie współczynniki zmienności wyniosły odpowiednio: 27,2% oraz 52,2% (tab. 1). W każdym z poziomów zróżnicowanie wyników było wyższe przy zastosowaniu wilgotnościomierza WRD-100. Z ryciny 1 wynika, że największe

**Tabela 1.** Średnie wilgotności drewna mierzone dwiema porównywanymi metodami

| Poziom stosu | Rodzaj statystyki  | Metoda suszarkowo-wagowa | WRD-100 |
|--------------|--------------------|--------------------------|---------|
| górnny       | średnia [%]        | 27,4                     | 29,5    |
|              | V <sup>1</sup> [%] | 27,2                     | 52,2    |
| środkowy     | średnia [%]        | 19,6                     | 19,2    |
|              | V <sup>1</sup> [%] | 8,6                      | 12,2    |
| dolny        | średnia [%]        | 18,8                     | 18,9    |
|              | V <sup>1</sup> [%] | 6,3                      | 9,6     |
| ogółem       | średnia [%]        | 21,9                     | 22,6    |
|              | V <sup>2</sup> [%] | 26,8                     | 45,3    |

Objaśnienia: V<sup>1</sup> – współczynnik zmienności obliczony dla danych uzyskanych z 21 wałków poziomu, V<sup>2</sup> – współczynnik zmienności obliczony dla całości danych, tj. 63 wałków



**Ryc. 1.** Udział wałków z poszczególnych poziomów stosu w przedziałach rozbieżności wyników wilgotności drewna uzyskanej obiema metodami

rozbieżności między wynikami uzyskanymi obiema metodami wystąpiły w przypadku poziomu górnego. U niecałych bowiem 24% badanych wałków z tego poziomu różnice wskazań nie przekroczyły 1 p.p. (punkt procentowy), natomiast aż u ponad 47% przekroczyły 5 p.p. Najwyższa odnotowana różnica wyniosła 34,8 p.p.

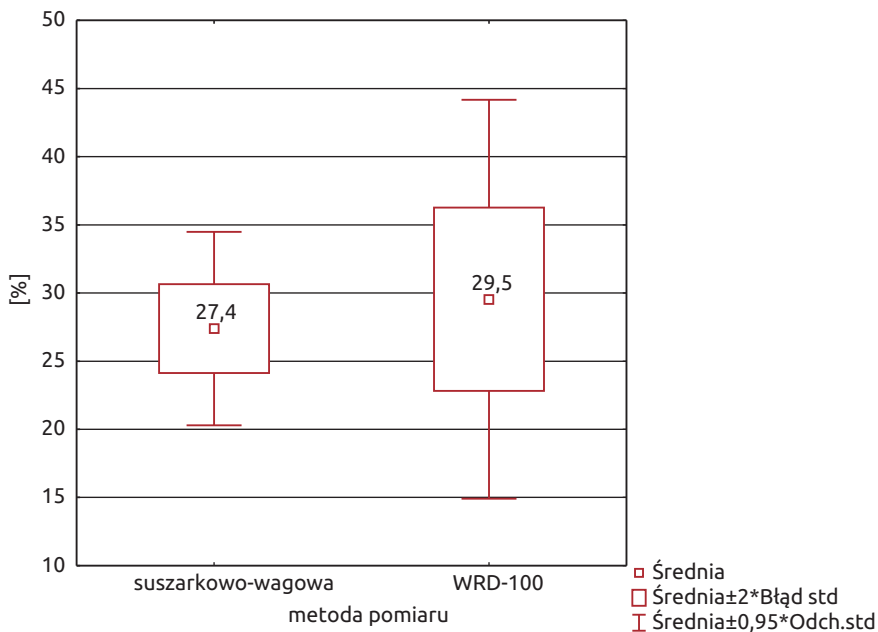
Podobnie jak w poziomie górnym, tak również w środkowym u niecałych 24% wałków różnice wskazań nie przekroczyły 1 p.p., u ponad 57% wyniosły one między 1 a 2 p.p., natomiast u niecałych 10% zawarły się w przedziale od 3 do 5 p.p. W poziomie dolnym u ponad 52% wałków analizowane różnice nie przekroczyły 1 p.p., natomiast u niecałych 5% zawarły się w przedziale od 3 do 5 p.p. Nie stwierdzono ani jednego wałka w warstwie środkowej i dolnej stosu, dla którego różnica wskazań wilgotności drewna między obiema analizowanymi metodami przekraczałyby 5 p.p.

Z tabeli 2 wynika, że rozkłady wilgotności drewna w poziomach dolnym i środkowym były zgodne z rozkładem normalnym dla obu metod pomiarowych. W przypadku poziomu górnego rozkłady wilgotności uzyskanych zarówno metodą suszarkowo-wagową, jak i przy użyciu wilgotnościomierza WRD-100, były niezgodne z rozkładem normalnym. Nie stwierdzono istotnych różnic w wilgotności drewna określanej obiema metodami dla wałków zarówno z poziomu górnego (test U:  $p = 0,279$ , ryc. 2), środkowego (test T:  $p = 0,554$ , ryc. 3), jak i dolnego (test T:  $p = 0,846$ , ryc. 4).

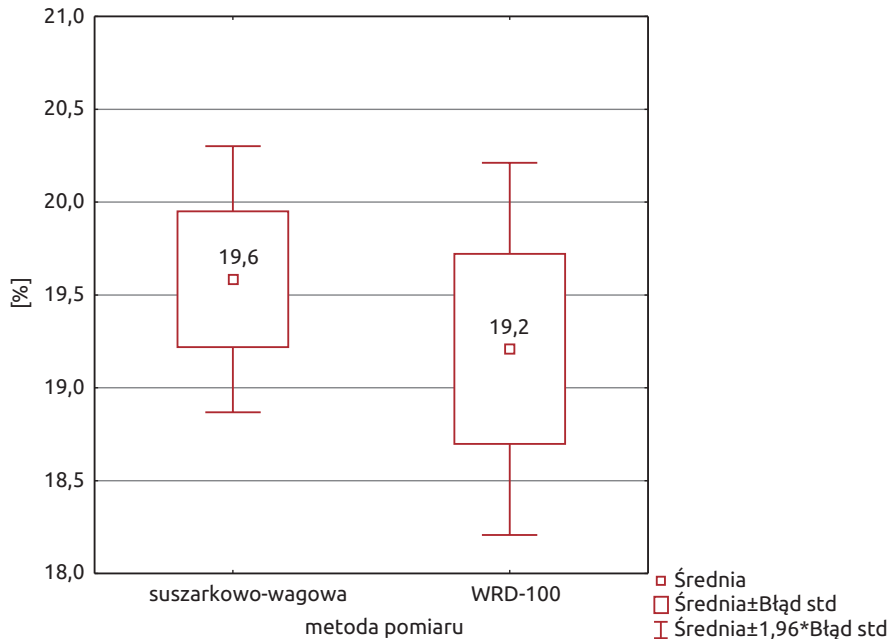
**Tabela 2.** Wyniki testu Shapiro-Wilka dla analizowanych wilgotności w trzech warstwach stosu

| Poziom / Metoda               | N  | W     | p     |
|-------------------------------|----|-------|-------|
| górnym / suszarkowo-wagowa    | 21 | 0,706 | 0,000 |
| górnym / WRD-100              | 21 | 0,693 | 0,000 |
| środkowym / suszarkowo-wagowa | 21 | 0,914 | 0,067 |
| środkowym / WRD-100           | 21 | 0,970 | 0,728 |
| dolnym / suszarkowo-wagowa    | 21 | 0,986 | 0,982 |
| dolnym / WRD-100              | 21 | 0,931 | 0,142 |
| OGÓŁEM                        |    |       |       |
| metoda suszarkowo-wagowa      | 63 | 0,675 | 0,000 |
| WRD-100                       | 63 | 0,525 | 0,000 |

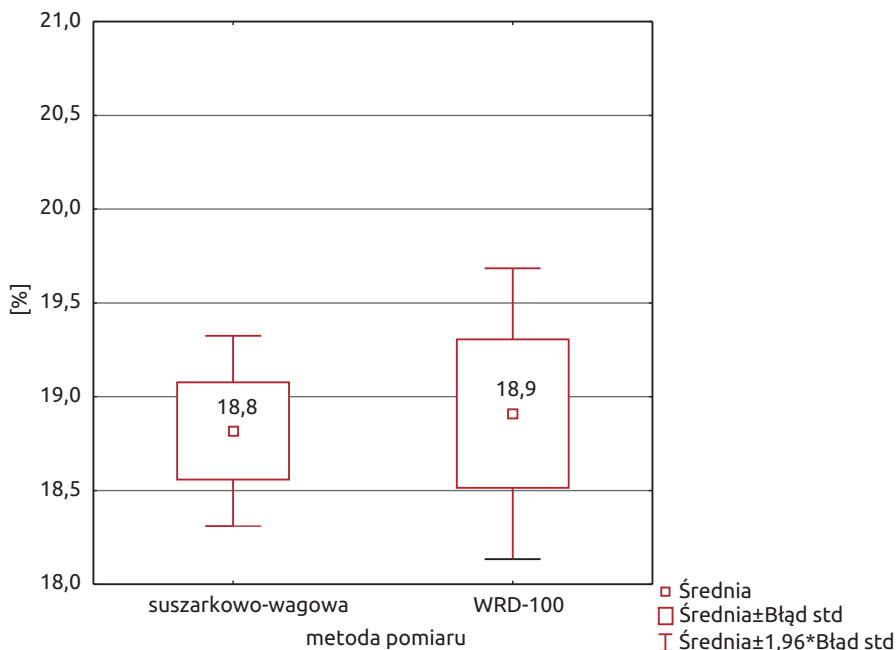
Objaśnienia: N – liczba zmiennych, W – wartość krytyczna testu, p – poziom istotności



Ryc. 2. Wilgotność drewna wałków z poziomu górnego, określana dwiema metodami pomiaru



Ryc. 3. Wilgotność drewna wałków z poziomu środkowego, określana dwiema metodami pomiaru



**Ryc. 4.** Wilgotność drewna wałków z poziomu dolnego, określana dwiema metodami pomiaru

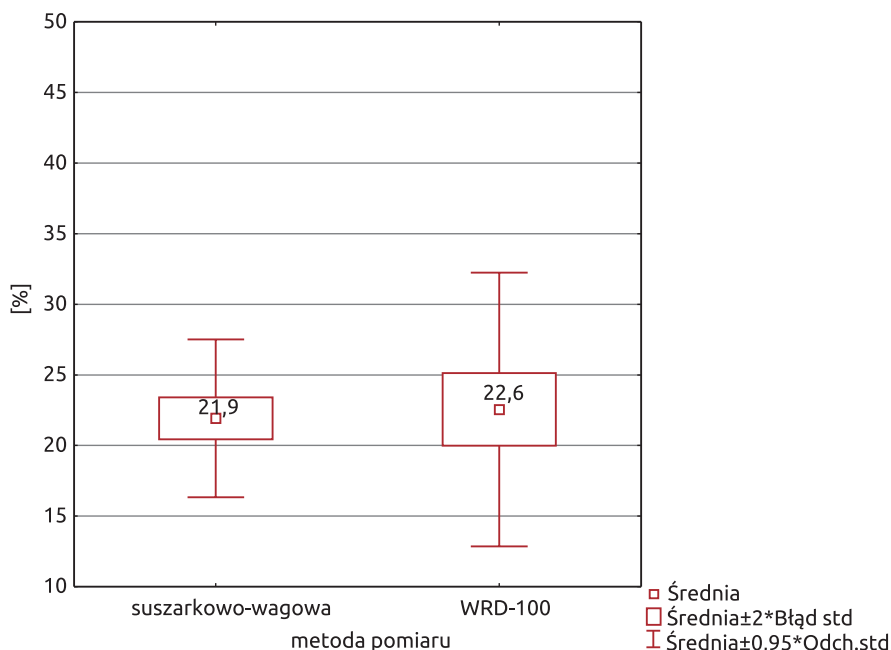
Z tabeli 2 wynika, że biorąc pod uwagę całość danych, rozkłady wilgotności drewna uzyskane obiema metodami są niezgodne z rozkładem normalnym. Analiza statystyczna wykazała natomiast, że widoczne między nimi na rycinie 5 różnice wartości średnich nie są statystycznie istotne (test U:  $p = 0,488$ ).

Spośród wszystkich 63 badanych wałków u 33 sztuk (52,4%) pomiar wilgotności drewna wilgotnościomierzem WRD-100 wykazał, że wartość mierzonej cechy nie przekroczyła 20,0%. W przypadku 8 sztuk (ok. 13%) wilgotność drewna określona metodą suszarkowo-wagową była wyższa od 20%. Z kolei u 30 badanych wałków (47,6%) wilgotnościomierz wskazał wynik powyżej 20%, natomiast metoda suszarkowo-wagowa wykazała, że u 7 z nich (11,1%) wartość cechy nie przekraczała 20%.

Z tabeli 3 wynika, że dla grupy wałków, których wilgotność wskazana przyrządem WRD-100 nie przekraczała 20%, rozkład wartości cechy uzyskany przy pomocy wilgotnościomierza był zgodny, natomiast uzyskanych metodą suszarkowo-wagową – niezgodny z rozkładem normalnym. Przeprowadzony następnie test U (Manna-Whitneya) nie wykazał istotnych różnic w wilgotności drewna między obiema metodami ( $p = 0,053$ ; ryc. 6). W przypadku wałków, dla których wilgotnościomierz wskazał wilgotność drewna powyżej



20%, rozkłady cechy dla obu metod były niezgodne z rozkładem normalnym, a przeprowadzony test U również nie wykazał, aby różnice wilgotności uzyskane obiema metodami były statystycznie istotne ( $p = 0,620$ ; ryc. 7).

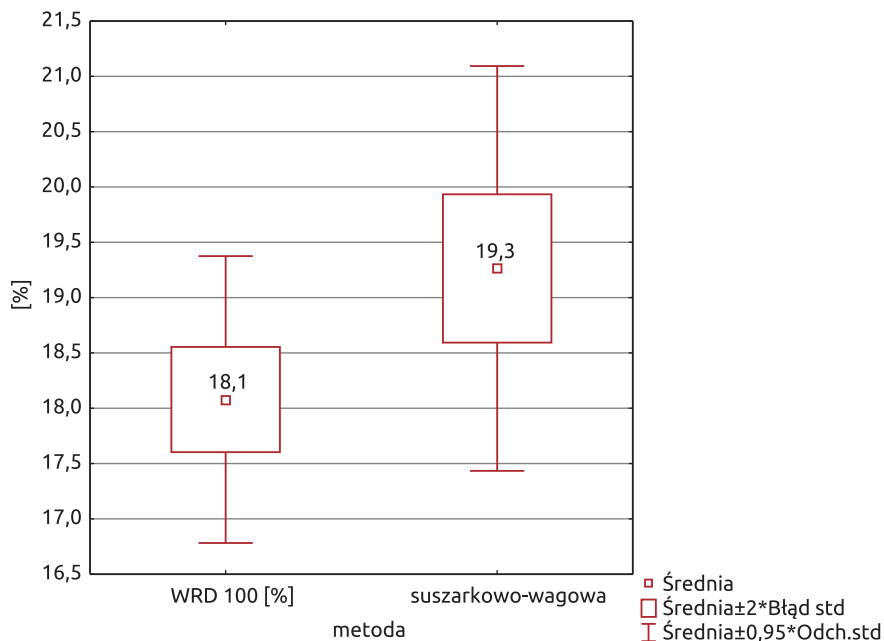


Ryc. 5. Wilgotność drewna wszystkich mierzonych wałków, określana dwiema metodami pomiaru

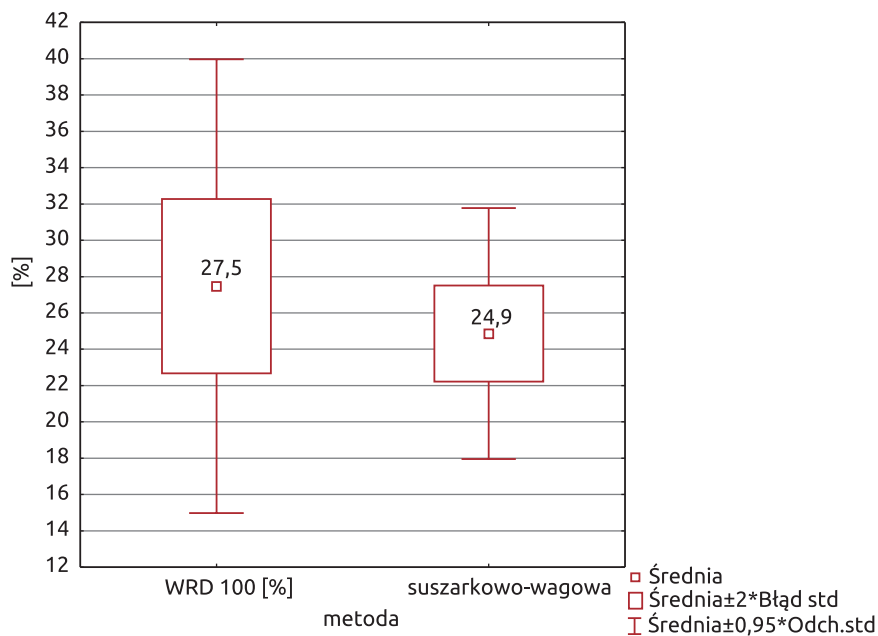
Tabela 3. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla analizowanych wilgotności w zależności od wskazań wilgotnościomierza WRD-100

| Metoda  | N  | W     | p     |
|---|----|-------|-------|
| wilgotność drewna mierzona przyrządem WRD-100 – do 20%      |    |       |       |
| suszarkowo-wagowa   | 33 | 0,869 | 0,001 |
| WRD-100   | 33 | 0,940 | 0,066 |
| wilgotność drewna mierzona przyrządem WRD-100 – powyżej 20% |    |       |       |
| suszarkowo-wagowa   | 30 | 0,735 | 0,000 |
| WRD-100   | 30 | 0,561 | 0,000 |

Objaśnienia: jak w tabeli 2



Ryc. 6. Wilgotność drewna wałków określana dwiema metodami przy wskazaniach WRD-100 do 20%



Ryc. 7. Wilgotność drewna wałków określana dwiema metodami przy wskazaniach WRD-100 powyżej 20%

Biorąc pod uwagę wyniki uzyskane metodą suszarkowo-wagową w poszczególnych poziomach stosu, w najniższym z nich tylko u niecałych 15% wałków (3 sztuki z 21) stwierdzono wilgotność drewna wyższą od 20%, w poziomie środkowym taką wilgotność stwierdzono u 1/3 (33,3%), natomiast w górnym – u wszystkich (100%) wałków z tego poziomu (ryc. 8).

Obliczony współczynnik korelacji Pearsona między wartościami wilgotności drewna odczytanymi z wilgotnościomierza WRD-100, a uzyskanymi metodą suszarkowo-wagową dla całości badanego materiału, tj. dla 63 par zmiennych, wyniósł 0,813 i był statystycznie istotny.



**Ryc. 8.** Udział wałków z poszczególnych poziomów stosu w przedziałach wilgotności drewna do 20% i powyżej 20% (oznaczonych metodą suszarkowo-wagową)

## 4. Dyskusja

Zawartość wody w drewnie jest jedną z najważniejszych cech decydujących o jego wielu właściwościach zarówno fizycznych, jak i mechanicznych. W drewnie można wyróżnić 3 rodzaje wody. Konstytucyjna, zwana także chemicznie związaną, wchodzi w skład związków budujących drewno, związana (adhezyjna, koloidalna) wysycza ściany komórkowe w drewnie i może być wymieniana w postaci pary wodnej z otaczającym powietrzem, zaś woda wolna jako ciecz wypełnia przestrzeń wewnątrz komórek. Zmiany wilgotności drewna, zwłaszcza w zakresie wody związanej, powodują zmiany jego właściwości fizycznych i mechanicznych, istotnych z punktu widzenia użytkowania drewna. Obniżenie zawartości wody związanej powoduje kurczenie się drewna, co prowadzi do powstawania w surowcu pęknięć desorpcyjnych, stanowiących jego wadę. Jednakże zmniejszenie wilgotności polepsza właściwości mechaniczne drewna, co określane jest jako tzw. wzmocnienie desorpcyjne (Szymański i in. 2013). Zawartość wody w drewnie wpływa także na jego właściwości cieplne, w tym również na wartość opałową. Większa ilość wody w spalonym drewnie powoduje obniżenie tej wartości, gdyż odparowanie wody z drewna pochłania część energii spalania. Przykładowo z 1 kg drewna świerkowego o wilgotności 50% można uzyskać w trakcie spalania o 1 kWh mniej energii w porównaniu do drewna o wilgotności 25% (Mirowski 2008). Zatem istotną kwestią jest określenie wilgotności spalanego drewna.

Spośród metod pomiaru wilgotności drewna wyróżnia się metody bezpośrednie, do których zaliczana jest metoda suszarkowo-wagowa oraz metody pośrednie, wśród których najczęściej wykorzystywana jest metoda elektrometryczna. Ta ostatnia wykorzystuje wpływ stopnia uwilgotnienia drewna na oporność przepływającego przez nie prądu elektrycznego (wilgotnościomierze rezystancyjne) bądź na pojemność kondensatora, którego stała dielektryczna zmienia się wraz ze zmianą wilgotności drewna. Najczęściej stosowane w praktyce są wilgotnościomierze rezystancyjne (oporowe), gdyż są niewielkich rozmiarów oraz umożliwiają szybki i nieskomplikowany pomiar wilgotności drewna, również w warunkach terenowych. Wadą takich przyrządów jest ograniczony zakres wilgotności, dla którego uzyskuje się stosunkowo dokładny wynik pomiaru. Największą dokładność urządzenia te uzyskują dla zakresu wilgotności odpowiadającego wodzie związanej w drewnie, a ściślej dla przedziału od 6% do 28%. Dolna granica tego przedziału (6%) wynika z trudności badania rezystancji powyżej 50 GΩ. Taką opornością charakteryzuje się drewno o wilgotności 6%, a jak podają producenci wilgotnościomierzy rezystancyjnych, badanie wyższych oporności wymaga stosowania specjalnych metod i materiałów, co jest możliwe tylko w warunkach laboratoryjnych. Natomiast po uzyskaniu przez drewno

wilgotności wyższej niż 28% (30%), tj. po przekroczeniu punktu nasycenia włókien, rezystancja zmienia się w niewielkim stopniu, co w sposób istotny pogarsza dokładność wyników (Tannenberg 2004). Poza wilgotnością na oporność drewna przy przepływie prądu elektrycznego ma wpływ także jego gatunek oraz temperatura. Jak podają producenci wilgotnościomierzy rezystancyjnych, w przypadku europejskich gatunków drzew nieuwzględnienie gatunku drewna przy pomiarze wilgotności w zakresie między 6% a 30% może powodować niewielką pomyłkę. Ocenia się ją na ok. 1,5% przy wilgotności drewna 25%. Większy błąd można popełnić, nie uwzględniając w trakcie pomiaru temperatury drewna. Jeśli na przykład w temperaturze 20°C drewno wykazuje wilgotność 20%, to w przypadku stosowania przyrządu bez kompensacji temperatury, przy takiej samej zawartości wody, pomiar w temperaturze 0°C wykaże wilgotność 24,5%, a w temperaturze 50°C – 15% (Tannenberg 2004; Tannenberg i Tannenberg 2011).

W prezentowanych w niniejszej pracy badaniach porównano wyniki pomiarów wilgotności drewna świerkowego, które uzyskano dwiema metodami, tj. z zastosowaniem metody suszarkowo-wagowej oraz przy pomocy wilgotnościomierza oporowego WRD-100. Przyjęto, że wyniki uzyskane metodą suszarkowo-wagową odzwierciedlają rzeczywistą zawartość wody w drewnie. Średnia wilgotność badanego drewna świerkowego mierzona wilgotnościomierzem WRD-100 wyniosła 22,6%, natomiast metodą suszarkowo-wagową – 21,9%. Różnica wyniosła zatem tylko 0,7 p.p. i nie była statystycznie istotna. Wyraźnie większym zróżnicowaniem charakteryzowały się wyniki uzyskane przy pomocy wilgotnościomierza, dla których współczynnik zmienności wyniósł 45,3%. W przypadku metody suszarkowo-wagowej wartość ta była prawie dwukrotnie niższa i osiągnęła 26,8%. Również analiza wilgotności wałków z poszczególnych poziomów stosu (dolny, środkowy i górny) wykazała w każdym z poziomów większe zróżnicowanie w wynikach uzyskanych przy zastosowaniu wilgotnościomierza. Największą zmienność dla obu metod odnotowano w poziomie górnym, przy czym wartość współczynnika zmienności dla metody suszarkowo-wagowej była niemal dwukrotnie niższa w porównaniu do urządzenia WRD-100. Również różnice wartości w wynikach uzyskanych obiema metodami były najwyższe w przypadku poziomu górnego. Niemal u połowy badanych wałków z tego poziomu różnica ta przekraczała 5 p.p. W poziomie środkowym rozbieżności były już wyraźnie mniejsze, natomiast najmniejsze zanotowano w poziomie dolnym, gdzie u ponad połowy badanych wałków różnica wyników nie przekraczała 1 p.p., a tylko u nieco ponad 19% była wyższa od 2 p.p., z czego tylko u niecałych 5% – wyższa od 5.5 p.p. Wydaje się, że przyczyn dużych rozbieżności w wynikach w poziomie górnym należy upatrywać w nierównomiernym rozkładzie wilgotności w drewnie wałków, zwłaszcza na obwodzie ich pobocznic. Wprawdzie

testy statystyczne przeprowadzone dla wałków z poszczególnych poziomów nie wykazały, aby różnice wilgotności drewna mierzone obiema metodami były statystycznie istotne, jednakże z powyższej analizy wynika, że dokładność pomiaru przy użyciu wilgotnościomierza oporowego maleje wraz z wysokością miejsca w stosie, w którym pomiar ten był wykonany. Stwierdzenie takie należałoby jednak potwierdzić podobnymi badaniami przeprowadzonymi dla stosów o innej wysokości. Wydaje się, że również istotne znaczenie mogą mieć warunki składowania drewna. W prezentowanych badaniach surowiec świerkowy był złożony w stosie niezadaszonym, a zatem był narażony na opady. Znalazło to odzwierciedlenie w średnich wilgotnościach drewna uzyskanych dla poszczególnych poziomów. Drewno wałków położonych w poziomie górnym miało w przypadku metody suszarkowo-wagowej średnio kilka, zaś przy pomiarze wilgotnościomierzem – ponad 10 p. p. większą wilgotność w porównaniu do wałków z poziomu środkowego. Biorąc pod uwagę możliwość wykorzystania składowanego surowca na cele opałowe, istotny jest fakt, że u wszystkich wałków z poziomu górnego, 1/3 ze środkowego oraz ok. 14% z dolnego, wilgotność drewna mierzona metodą suszarkowo-wagową przekraczała wartość 20%. Rozpatrując wynik uzyskany dla poziomu górnego, w którym wilgotność drewna każdego badanego wałka przekraczała 20%, w świetle uchwał antysmogowych przyjętych przez niektóre samorządy gmin w Polsce, należałoby poddać drewno dodatkowemu sezonowaniu w miejscu zadaszonym. Na podstawie obserwacji przeprowadzonych w terenie szacuje się, że taką podwyższoną wilgotnością może charakteryzować się drewno wałków ułożonych w górnych warstwach stosu stanowiących około 1/5 (20%) jego wysokości. Jednocześnie uwzględniając obecność w środkowych i dolnych warstwach stosu wałków o wilgotności drewna przekraczającej dopuszczalny poziom 20%, w celu ustalenia średniej wilgotności drewna w stosie należałoby pobrać próbę z różnych jego wysokości, wyłączając warstwy górne, o których wcześniej wspomniano.

Badany surowiec świerkowy był sezonowany w stosie przez okres 18 miesięcy. Uwzględniając średnie wilgotności drewna wałków ze środkowych i dolnych poziomów stosu, których wartości nie przekraczały 20%, można założyć, że półtoraroczny okres sezonowania drewna świerkowego jest wystarczający, aby uzyskało ono wilgotność dopuszczającą jego zastosowanie jako źródła opału, zgodnie z zapisami zawartymi w uchwałach antysmogowych. Potwierdza to spostrzeżenia Mirowskiego (2008), który podaje, że długość okresu sezonowania drewna w celu uzyskania jego wilgotności poniżej 20% wynosi 18 miesięcy. Jednocześnie wspomniany autor nadmienia, że najniższa wilgotność, jaką można uzyskać, sezonując drewno, wynosi około 18%. Znalazło to potwierdzenie w wynikach niniejszego opracowania, bowiem minimalne wartości cechy uzyskane dla pojedynczych wałków z poziomów dolnych trzech miejsc

pomiaru w stosie, wahały się w większości między 17 a 18%. Tylko w jednym przypadku wilgotność drewna z wałka wyniosła 16,4%.

Obliczony współczynnik korelacji pomiędzy wynikami wilgotności drewna, uzyskanymi przy pomocy wilgotnościomierza oraz metody suszarkowo-wagowej był dodatni i statystycznie istotny, a jego wartość dowodzi, że siła korelacji między zmiennymi jest wysoka. Biorąc jednocześnie pod uwagę wyniki analiz statystycznych, wskazujące na brak istotnych różnic w wynikach pomiarów wilgotności drewna uzyskanych obiema metodami, można potwierdzić przydatność metody elektrometrycznej opartej na pomiarze rezystancji drewna do określania jego wilgotności. Należy jednak mieć na uwadze, że rozbieżności w wynikach obu metod są tym większe, im wyżej położone w stosie jest badane drewno.

Osobny problem, którego nie analizowano w niniejszym opracowaniu, stanowi kwestia reprezentatywności miejsca pomiaru wilgotności drewna z wałka. W prezentowanych badaniach określano wilgotność drewna położonego w odległości od ok. 5 cm do ok. 10 cm od jednego z czoł. Uzyskane wartości mogą nie odzwierciedlać wilgotności drewna całego wałka. Jak podaje bowiem Tomczak z zespołem (2018), różnice między wilgotnością drewna mierzoną blisko czoła wałka i w połowie jego długości mogą sięgać nawet kilkunastu procent. Spowodowane jest to takimi czynnikami, jak powierzchnia czoł i poboczniczy drewna, zależnymi od jego średnicy i długości, a także zmiennością warunków atmosferycznych. Budowa anatomiczna drewna powoduje, że przemieszczanie się wody w surowcu odbywa się głównie wzdłuż włókien, a zatem w kierunku zgodnym z transportem roztworów wodnych za życia drzewa. W wyniku tego intensywna wymiana wody między surowcem drzewnym a otaczającym go powietrzem następuje głównie przez przekrój poprzeczny. W pozostałych dwóch kierunkach anatomicznych, tj. promieniomym i stycznym wymiana ta również zachodzi, ale w znacznie mniejszym stopniu. Powoduje to powstanie różnic w wilgotności drewna w zależności od odległości od czoła danego sortymentu. Należy przypuszczać, że dłuższe sortymenty drzewne będą charakteryzowały się większym gradientem wilgotności w kierunku wzdłuż włókien niż sortymenty krótsze. Ustalenie wilgotności drewna całego wałka przysparza zatem problemów natury metodycznej. Wydaje się, że w celu uzyskania wyniku jak najbardziej zbliżonego do wartości rzeczywistej wilgotności drewna wskazane byłoby wykonanie dla pojedynczej badanej sztuki surowca kilku pomiarów w różnych odległościach od jej czoł. Prezentowane badania wskazują bowiem, że prawie u 1/4 badanych wałków doszło do takich rozbieżności w wynikach między wilgotnościomierzem a metodą suszarkowo-wagową, które w świetle treści uchwał antyśmogowych mogłyby mieć konsekwencje w postaci błędnego zakwalifikowania drewna surowca jako nadającego bądź nienadającego się do spalania. Otwartą kwestią



pozostaje natomiast sposób obliczenia wspomnianej powyżej wartości średniej wilgotności sztuki drewna, bowiem wyliczenie średniej arytmetycznej może być obarczone dużym błędem. Problem ten powinien być podjęty w pracach badawczych uwzględniających zarówno gatunek drewna i wymiary surowca drzewnego, jak również jego postać, tj. drewno okrągłe oraz łupane (Warunki techniczne 2020).

## 5. Stwierdzenia i wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej wilgotności drewna świerka pospolitego (*Picea abies* (L.) H. Karst) oznaczanej metodą suszarkowo-wagową oraz przy użyciu wilgotnościomierza oporowego można przedstawić następujące stwierdzenia i wnioski:

1. Większe zróżnicowanie wyników uzyskano w przypadku wilgotnościomierza oporowego, przy czym zmienność ta wzrastała wraz z wysokością warstwy drewna w stosie.
2. Największe rozbieżności między wynikami otrzymanymi obiema metodami stwierdzono dla drewna z górnego poziomu stosu, gdzie uzyskiwało ono wyższe wartości wilgotności. Na poziomie tym prawie dla połowy badanych wałków wilgotność drewna wskazana wilgotnościomierzem oporowym różniła się więcej niż 5 p. p. w porównaniu z wynikiem uzyskanym metodą suszarkowo-wagową. Poddaje to wątpliwość stosowanie metody elektrometrycznej do oceny wilgotności drewna surowca złożonego w górnych warstwach stosów niezadaszonych.
3. Brak istotnych statystycznie różnic w wilgotności drewna mierzonego przy użyciu wilgotnościomierza oporowego i określanego metodą suszarkowo-wagową oraz wysoka, dodatnia i statystycznie istotna korelacja wyników otrzymanych obiema metodami potwierdza przydatność zastosowanego w badaniach urządzenia do określania wilgotności drewna, z wyjątkiem surowca złożonego w górnych warstwach stosów niezadaszonych.
4. Wilgotność drewna wszystkich badanych wałków z poziomu górnego analizowanego stosu po 18 miesiącach sezonowania przekraczała wartość 20%, co w świetle zapisów uchwał antysmogowych wyklucza obecnie ten surowiec jako drewno opałowe. Z powyższego wynika wniosek, że aby drewno to spełniało kryterium maksymalnej dopuszczalnej wilgotności, należałoby je dodatkowo sezonować, najlepiej pod zadaszeniem.
5. Uzyskane wyniki badań wilgotności drewna wałków złożonych w poziomach środkowym i dolnym badanego stosu niezadaszonego potwierdzają pogląd, że półtoraroczny okres sezonowania drewna jest wystarczający, aby uzyskało ono wilgotność nie wyższą od 20%.

6. W związku z wykazanymi rozbieżnościami w wynikach, wskazane byłoby przeprowadzenie szerszych badań porównawczych wilgotności drewna, określanej jako łatwa do zastosowania w warunkach terenowych metodą elektrometryczną oraz stosowaną w warunkach laboratoryjnych metodą suszarkowo-wagową. Powinny one uwzględniać gatunek i postać drewna, warunki jego sezonowania (stosy zadaszony i niezadaszony), a także wymiary sortymentów, głównie średnicę drewna.

### Źródło finansowania

*Badania zostały sfinansowane z dotacji przyznanej przez MNiSW na działalność statutową.*

### Literatura

- Energia. 2016. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa. <https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5485/1/4/1/energia2016.pdf> (dostęp: 16.12.2019).
- Energia. 2017. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa. [https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5485/1/5/1/energia\\_2017.pdf](https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5485/1/5/1/energia_2017.pdf) (dostęp: 16.12.2019).
- Energia. 2018. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa. [https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5485/1/6/1/energia\\_2018.pdf](https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5485/1/6/1/energia_2018.pdf) (dostęp: 16.12.2019).
- Krzysik F. 1974. Nauka o Drewnie. PWN, Warszawa.
- Mirowski A. 2008. Kotły spalające i zgazowujące drewno. Akademia firmy Viessmann, Mysłowice. [http://schematy.info/pliki/ROZWIAZANIA\\_DO\\_WIEKSZYCH\\_OBIEKTOW/01\\_ROZWIAZANIA\\_DO\\_W\\_OBIEKTOW\\_PDF/100\\_KOTLY\\_NA\\_BIOMASE/110\\_Poradniki/PF-Kotly\\_na\\_drewno\\_2008.pdf](http://schematy.info/pliki/ROZWIAZANIA_DO_WIEKSZYCH_OBIEKTOW/01_ROZWIAZANIA_DO_W_OBIEKTOW_PDF/100_KOTLY_NA_BIOMASE/110_Poradniki/PF-Kotly_na_drewno_2008.pdf) (dostęp: 02.12.2019).
- PN-77/D-04100 1978. Drewno – Oznaczanie wilgotności. Wydawnictwa Normalizacyjne, Warszawa
- Szymański M., Pazdrowski W., Szykowny T., Nawrot M. 2013. Wzmocnienie desorpcyjne jako podstawa oceny jakości drewna dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) i dębu burgundzkiego (*Quercus cerris* L.). Sylwan, 157(11), 811–813.
- Tannenberg K. 2004. Wilgotnościomierze elektroniczne do drewna. Przemysł Drzewny, 12, 8–11.
- Tannenberg K., Tannenberg G. 2011. Pomiar wilgotności drewna wilgotnościomierzami pojemnościowymi. Pomiary Automatyka Kontrola (PAK), 57(2), 161–164.
- TIBCO Software Inc. 2017. Statistica (data analysis software system), version 13. <http://statistica.io>.
- Tomczak A., Kupis M., Jelonek T., Grzywiński W. 2018. Zmiany wilgotności średniowymiarowego surowca sosnowego podczas magazynowania w okresie wiosenno-letnim. Interdyscyplinarność Użytkowania Lasu – Konferencja Katedr Jednoimiennych 2018, Krynica-Zdrój, Streszczenia, 42.

- Uchwała Nr XLI/1405/17 Sejmiku Województwa Dolnośląskiego. 2017 a. Dziennik Urzędowy Województwa Dolnośląskiego. Poz. 5153. <http://bip.umwd.dolnyslask.pl/plik.php?id=1123027&wer=1> (dostęp: 16.12.2019).
- Uchwała Nr XLIV/548/17 Sejmiku Województwa Łódzkiego. 2017 b. Dziennik Urzędowy Województwa Łódzkiego. Poz. 4549. [http://dziennik.lodzkie.eu/WDU\\_E/2017/4549/akt.pdf%20](http://dziennik.lodzkie.eu/WDU_E/2017/4549/akt.pdf%20) (dostęp: 16.12.2019).
- Uchwała Nr XXXII/452/17 Sejmiku Województwa Małopolskiego. 2017 c. Dziennik Urzędowy Województwa Małopolskiego. Poz. 787. [http://edziennik.malopolska.uw.gov.pl/WDU\\_K/2017/787/akt.pdf](http://edziennik.malopolska.uw.gov.pl/WDU_K/2017/787/akt.pdf) (dostęp: 16.12.2019).
- Uchwała Nr 162/17 Sejmiku Województwa Mazowieckiego. 2017 d. Dziennik Urzędowy Województwa Mazowieckiego. Poz. 9600. [http://www.edziennik.mazowieckie.pl/WDU\\_W/2017/9600/akt.pdf](http://www.edziennik.mazowieckie.pl/WDU_W/2017/9600/akt.pdf) (dostęp: 16.12.2019).
- Uchwała Nr XXXII/367/2017 Sejmiku Województwa Opolskiego. 2017 e. Dziennik Urzędowy Województwa Opolskiego. Poz. 2488. [http://g.ekspert.infor.pl/p/\\_dane/akty\\_pdf/U74/2017/177/2488.pdf#zoom=90](http://g.ekspert.infor.pl/p/_dane/akty_pdf/U74/2017/177/2488.pdf#zoom=90) (dostęp: 16.12.2019).
- Uchwała Nr V/36/1/2017 Sejmiku Województwa Śląskiego. 2017 f. Dziennik Urzędowy Województwa Śląskiego. Poz. 2924. [http://g.ekspert.infor.pl/p/\\_dane/akty\\_pdf/U85/2017/66/2624.pdf#zoom=90](http://g.ekspert.infor.pl/p/_dane/akty_pdf/U85/2017/66/2624.pdf#zoom=90) (dostęp: 16.12.2019).
- Uchwała Nr XXXIX/941/17 Sejmiku Województwa Wielkopolskiego. 2017 g. Dziennik Urzędowy Województwa Wielkopolskiego. Poz. 8807. [http://g.ekspert.infor.pl/p/\\_dane/akty\\_pdf/U84/2017/245/8807.pdf#zoom=90](http://g.ekspert.infor.pl/p/_dane/akty_pdf/U84/2017/245/8807.pdf#zoom=90) (dostęp: 16.12.2019).
- Uchwała Nr LII/869/18 Sejmiku Województwa Podkarpackiego. 2018. Dziennik Urzędowy Województwa Podkarpackiego. Poz. 2498. [https://edziennik.rzeszow.uw.gov.pl/WDU\\_R/2018/2498/akt.pdf](https://edziennik.rzeszow.uw.gov.pl/WDU_R/2018/2498/akt.pdf) (dostęp: 16.12.2019).
- Warunki techniczne. 2020. Podział, terminologia i symbole stosowane w obrocie surowcem drzewnym. Załącznik Nr 1 do Zarządzenia Nr 51 DGLP z dnia 30.09.2019 r. [http://drewno.zilp.lasy.gov.pl/drewno/Normy/1.\\_podzia\\_terminologia\\_i\\_symbole.pdf](http://drewno.zilp.lasy.gov.pl/drewno/Normy/1._podzia_terminologia_i_symbole.pdf) (dostęp: 13.02.2020).



Aktualne zagadnienia inżynierii leśnej



# Problematyka gospodarowania wodą w górskich obszarach leśnych

Anna Drożdżik

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: anna.drozdzik@urk.edu.pl

## Abstrakt

Gospodarka wodna, zwłaszcza w obecnych czasach, zmusza do szerokiego spojrzenia na zagadnienia kształtowania się zasobów wodnych i poszukiwania przyczyn ich stanu. Postrzeganie małej zasobności Polski w wodę i problemów z tego wynikających tylko przez pryzmat niedostatecznej ilości opadów jest w XXI w. myśleniem anachronicznym. Problematyka gospodarowania wodą wymaga interdyscyplinarnego podejścia i nie może ograniczać się do prostego pojmowania zjawisk zachodzących w otaczającym nas świecie. Złożone i skomplikowane zależności między poszczególnymi elementami środowiska oraz obecność wielu niewiadomych, które ciągle jeszcze wymagają zbadania, sprawiają, że niczego nie można interpretować w sposób jednoznaczny czy podchodzić schematycznie do problemów będących w istocie wynikiem współdziałania wielu zmiennych. Już sama ekstrapolacja wyników czy zastosowanie metody analogii powinny zakładać wystąpienie błędów. Wnioski nie mogą więc być uznawane za bezwzględnie wiarygodne i generalizowane. W przyrodzie aksjomaty odnoszą się bowiem do jednostek, a reakcja zbiorowości zawsze dotyczy pewnego zakresu wartości. Ponadto badacze ciągle podkreślają indywidualny charakter funkcjonowania danego układu ekologicznego w ekosystemie. Problemy te dotyczą niewątpliwie gospodarki wodnej, zależnej od zdarzeń o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia. Zaistnienie zjawisk meteorologicznych i hydrologicznych oraz dalszy ich przebieg uwarunkowane są wieloma czynnikami, których współdziałanie również jest przewidywalne tylko w ograniczonym stopniu.

Rozwój wiedzy oraz technologii w każdej niemalże dziedzinie życia pozwala poszukiwać nowych i udoskonalać istniejące sposoby gospodarowania zasobami wodnymi. Nowatorskie rozwiązania bazują na wiedzy o geoekosystemie zlewni i mechanizmach krążenia wody. Znajomość procesów i ich dynamiki pozwala kształtować przestrzeń

w sposób zapewniający zrównoważone i trwałe użytkowanie środowiska jako całości. Największy wpływ na funkcjonowanie ekosystemu ma działalność człowieka. Gospodarka wodna stanowi obszar, w którym wpływy antropogeniczne są szczególnie widoczne. Oczywistym jest, że potrzeba łączenia realizacji zadań z wielu dyscyplin – m.in. gospodarki wodnej i leśnej – może także generować problemy. Osiągnięcie korzyści w jednej dziedzinie wiąże się zazwyczaj z koniecznością poniesienia strat albo ograniczonych zysków na innej płaszczyźnie. Łączenie zrównoważonego prowadzenia działań w wielu obszarach gospodarki wymaga dogłębnej wiedzy, która da podstawy do wdrażania szczegółowych rozwiązań technologicznych.

W artykule poruszono kwestie mające z punktu widzenia realizacji zadań gospodarki wodnej strategiczne znaczenie. Opisywane czynniki pozostają pod wpływem zarówno naturalnych warunków środowiskowych, jak i antropopresji. Ponadto wskazano regulacje prawne dotyczące sposobu realizacji gospodarki leśnej, gwarantujące utrzymanie dobrego stanu zasobów wodnych.

**Słowa kluczowe:** gospodarka wodna, gospodarka leśna, zasoby wód, infiltracja, retencja

## 1. Wstęp

Lasy stanowią obszary strategiczne z punktu widzenia gospodarki wodnej. Woda w lesie wykorzystywana jest przez roślinność tworzącą ekosystem leśny (Suliński 1995, 1998), ale także przez człowieka w prowadzonej gospodarce wodnej. Jest więc potrzebna do prawidłowego wzrostu i rozwoju samego lasu, jak również do formowania zasobów wodnych eksploatowanych następnie gospodarczo.

Bezpośrednie użytkowanie lasu wiąże się z pozyskiwaniem surowca drzewnego (użytkowanie główne) oraz nieдрzewnych produktów lasu (użytkowanie uboczne). Wszelkie działania gospodarcze koncentrują się więc w głównej mierze na produkcyjnych funkcjach lasu. Las jako forma użytkowania terenu wpływa na poszczególne komponenty środowiska, a oddziaływanie to jest następstwem poziomego i pionowego zasięgu w zajmowanej przestrzeni oraz stopnia jej wypełnienia (Suliński 1995; Juchheim i in. 2017). Las powoduje więc zmiany m.in. w temperaturze, prędkości wiatru, przenikaniu promieniowania słonecznego oraz, najistotniejszej z punktu widzenia gospodarki wodnej, ilości wody pochodzącej z opadów atmosferycznych. Pamiętać należy również o ogromnym znaczeniu pośredniego oddziaływania lasu na geosystem zlewni. Stopień modyfikującego krążenie wody w środowisku wpływu lasu ma wielkie znaczenie dla zasobów wodnych zarówno w czasie ich tworzenia się, jak i podczas ich eksploatacji. Z istniejących zasobów wodnych może korzystać człowiek, ale tylko w stopniu zależnym od ich rozmiaru i zdolności odnawiania się.



W Polsce obszarem o istotnym potencjale tworzenia zasobów wodnych są Karpaty. Z uwagi na procentowy udział lasów w pokryciu terenu powstają tu warunki znacznie ograniczające spływ powierzchniowy i sprzyjające infiltracji wód. Zlewnie rzek karpaccich stanowią 1/3 dorzecza górnej Wisły, a 95% objętości wód odpływa z nich do Wisły (Ziemońska 1973). Nierównomierność przepływów w rzekach karpaccich wynika z niskiej retencyjności fliszu karpacciego. Obserwuje się zwiększanie przepływów maksymalnych (wezbraniowych) oraz zmniejszanie przepływów niżówkowych (Ziemońska 1973; Jokiel i Bartnik 2012; Tomaszewski 2012; Bryndal 2014). Klimat, ukształtowanie terenu, budowa geologiczna (mało przepuszczalne podłoże) są przyczynami spływowego charakteru obiegu wody. Lokalnie występują obszary o dobrych warunkach do infiltracji i retencji, wykazujące infiltracyjny lub infiltracyjno-spływowy typ obiegu wody. Najistotniejszą składową krążenia wody jest odpływ, którego objętość zmienia się w czasie w szerokich granicach (Ziemońska 1973; Brykała 2009). Środowiskowe uwarunkowania obszaru Karpat, czyli duże wysokości bezwzględne, nachylenia i spadki, rozczłonkowanie obszaru, mała przepuszczalność podłoża, wysokie opady i niskie temperatury, przyczyniają się do szybkiego odpływu wód opadowych (Ziemońska 1973; Ribolzi i in. 2018), a retencyjność fliszu karpacciego nie jest wysoka z powodu płytkiego krążenia wody (Niedzielski 1974; Słupik 1981). Zasoby dyspozycyjne Karpat i całej Polski nie są więc duże.

Celem artykułu jest poznanie aspektów problematyki gospodarowania wodą w górskich obszarach leśnych, omawianych najczęściej w literaturze z perspektywy wielokierunkowego użytkowania lasu.

## 2. Bilans zasobów wodnych zlewni

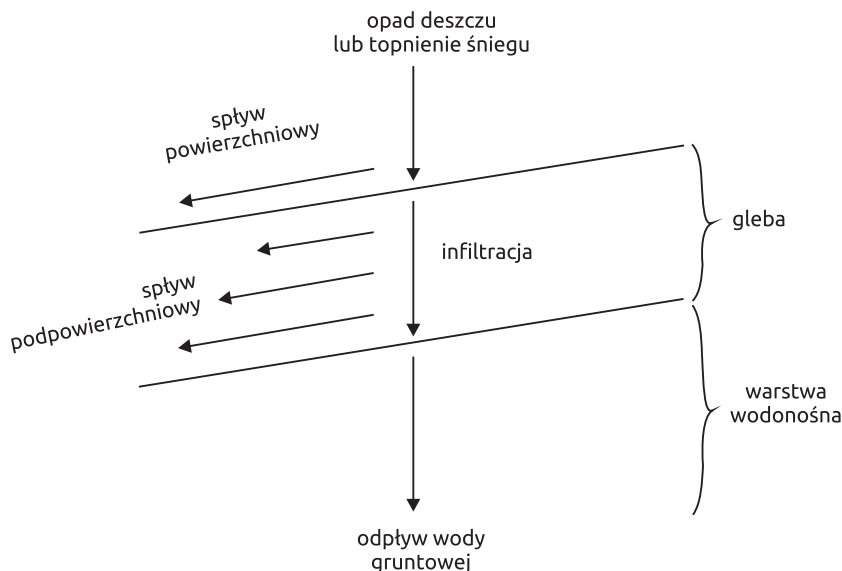
Zasoby wodne Polski w porównaniu z zasobami wodnymi innych krajów Europy pozostają na niskim poziomie i odznaczają się dużą zmiennością czasowo-przestrzenną (Jokiel i in. 2017). Duże przestrzenne zróżnicowanie obiegu wody ujawnia się nawet w obrębie konkretnego stoku pojedynczej zlewni (Słupik 1981). W związku z coraz częstszym występowaniem nieprzewidywalnych i ekstremalnych zjawisk meteorologicznych, a także zmieniającymi się potrzebami gospodarczymi składowe bilansu wodnego wykazują nie tylko dużą zmienność, ale również losowość.

Równanie bilansu wodnego jest liczbowym ujęciem obiegu wody w konkretnym miejscu i czasie, charakteryzującym zasoby wodne danego obszaru (Bajkiewicz-Grabowska i Mikulski 2007). Bilansowanie dotyczy wartości średnich poszczególnych składników równania bilansowego z okresu co najmniej 10 lat (Rogoż 2007). Poszczególne składowe obiegu wody obejmują jej przychody

(opady docierające do zlewni) oraz rozchody (ubytki wody w postaci odpływu i parowania terenowego), a także zmiany retencji (Pociask-Karteczka 2003). Przychody zasilają zlewnię w wody opadów atmosferycznych. Opady pozostają składową niezależną bilansu, cechując się jednocześnie dużą zmiennością czasowo-przestrzenną i losowością. Pozostałe elementy równania zależą w największym stopniu właśnie od wysokości opadów. Rozchód, czyli ubytek wody opadowej, jest warunkowany przez aktualny zapas wody w poszczególnych częściach geoekosystemu, a jego ilościowa charakterystyka kształtuje się pod wpływem czynników środowiskowo-gospodarczych. Parowanie terenowe obejmuje parowanie z powierzchni ziemi, rzek i jezior, transpirację (czyli parowanie fizjologiczne), intercepcję (parowanie z powierzchni biotycznej i abiotycznej) oraz parowanie podziemne (Rogoż 2007). Odpływ wody wiąże się z kolei ze spływem po powierzchni gruntu zgodnie z nachyleniem terenu, a także z infiltracją pozwalającą na zasilanie poziomów wodonośnych wód podziemnych. Znaczna objętość wody, zanim zasilą odbiornik, jest czasowo retencjonowana (Czetwertyński 1958; Bajkiewicz-Grabowska i Mikulski 2007; Jokiel i in. 2017). Wszelkie procesy hydrologiczne w zlewni w swym przebiegu odpowiadają nieliniowym systemom dynamicznym (Somorowska 2006).

Naturalny bilans wodny przedstawia ilościowo obieg wody w danym miejscu i czasie. Jeśli oprócz warunków przyrodniczych (opadów, odpływu, parowania, retencji) uwzględnia on także gospodarkę człowieka, czyli pobór wód, wówczas mówi się o bilansie sztucznym – tzw. wodnogospodarczym. Bilans wodnogospodarczy stanowi zestawienie zasobów wodnych konkretnej zlewni z potrzebami wodnymi użytkowników przy zachowaniu gwarancji czasowej, ilościowej i jakościowej (Ciepielowski 1995; Pusłowska-Tyszewska i in. 2017). Wiedza ta pozwala na określenie wielkości zasobów dyspozycyjnych i gwarantowanych.

Transformacja opadu w odpływ w terenach górskich zachodzi na stokach (Słupik 1981; Maciaszek 1996). Rozdział wód opadowych na składowe odpływu przedstawia ryc. 1. Obieg wody na stokach Karpat fliszowych polega na transformacji opadów w odpływ i ewapotranspirację. Odpływ następuje spływem powierzchniowym lub w wyniku infiltracji zachodzi odpływ podpowierzchniowy i gruntowy. Część wody opadowej powiększa wilgotność gleby albo podlega ewapotranspiracji (Bajkiewicz-Grabowska i Mikulski 2007; Bochenek 2016; Jokiel i in. 2017). Opad, który przekształca się w spływ powierzchniowy, nazywany jest opadem efektywnym lub skutecznym (Lambor 1971; Kołodziejczyk 2016).



Ryc. 1. Odpływ wody ze stoku (źródło: Raszewski i in. 2005)

### 3. Leśne zagospodarowanie zlewni

Zalesienie zlewni karpackich waha się w granicach od 0 do nawet 97% (Ziemońska 1973; Soja 2002). Wpływ lasu polegający na modyfikacji bilansu wodnego uwidacznia się zwłaszcza w składowych fazy ubytków. Następuje regulacja odpływu polegająca na zwiększeniu odpływów podczas niżówek i niskich odpływów sezonu letniego oraz zmniejszeniu objętości wezbrań i gwałtowności ich pojawiania się, a także wydłużeniu czasu opadania fal wezbraniowych. Las powoduje także wolniejsze tajanie pokrywy śnieżnej, przez co ogranicza sptyw powierzchniowy, umożliwiając wodom roztopowym zasilenie wód gruntowych, dzięki czemu następuje zwiększanie retencji podziemnej. Obserwuje się również płytsze w porównaniu z otwartą przestrzenią zamarzanie gruntu. Ponadto zauważa się mniejsze parowanie bezpośrednio z gleby, zwłaszcza w porównaniu z terenami użytkowanymi rolniczo. Oddziaływanie na ubytki wody wynika ze zdolności intercepcyjnej drzewostanów, a także retencyjnego oddziaływania ściółki oraz gleb leśnych. Miesięczne sumy opadu w lesie są mniejsze o 3–50 mm niż w terenie otwartym (Słupik 1981; Klamerus-Iwan i Szymański 2017). Powierzchnia leśna posiada większą niż inny rodzaj pokrycia terenu zdolność zatrzymywania wody. Las stwarza warunki do transformacji opadów w odpływ podziemny, wydłużając dystans i czas, jaki muszą przebyć wody opadowe, aby dotrzeć do gleby, oraz zwiększając zdolności infiltracyjne

poziomów glebowych. Obszary leśne określa się więc jako niesterowalny zbiornik retencyjny (Janusz i in. 2011). Między wystąpieniem opadów a odpływem istnieje czasowa zależność polegająca na opóźnieniu reakcji zlewni. Czas opóźnienia wyznacza okres od wystąpienia opadów w dorzeczu do momentu rozpoczęcia przyboru wody w profilu zamykającym dorzecze (Lambor 1971; Krajewski i Banasik 2013). Czynniki warunkujące sposób odpływu ze zlewni i ewentualne wystąpienie spływu powierzchniowego zależą od stopnia homogeniczności zlewni, są w związku z tym często bardzo zmienne w jej granicach. Oprócz czynników pogodowych (głównie opadów) i stanu gruntu (głównie aktualnej wilgotności) na spływ powierzchniowy występujący na powierzchniach heterogenicznych wpływają także warunki terenowe (Słupik 1981; Ribolzi i in. 2018). Spływ powierzchniowy występuje w lesie sporadycznie po ekstremalnych opadach, a jego wystąpienie zależy od właściwości ściółki i gleby leśnej (Jokiel i in. 2017). Faza przyrostów jest również modyfikowana przez roślinność leśną, która oddziałuje na ilość i częstotliwość opadów m.in. przez zmniejszanie amplitudy temperatur powietrza czy ograniczanie ilości opadów docierających do gleby.

Użytkowanie lasu stwarza z kolei ograniczenia dla infiltracji wód opadowych i kształtowania się zasobów wodnych. Najbardziej ekstremalną formą ingerencji człowieka w geosystem zlewni jest całkowite wylesienie pewnej powierzchni. Zasady hodowli lasu wskazują, gdzie nie powinno się stosować rębni zupełnych, oraz wyszczególniają sytuacje, w których są one dopuszczalne (Haze 2012). Ilościowe zmiany obiegu wody związane z leśnym użytkowaniem terenu polegają również na stwarzaniu dogodnych warunków do szybkiego odpływu wód opadowych przez budowanie infrastruktury wywozowej dla pozyskiwanego drewna. Szlaki zrywkowe oraz komunikacyjne są w zlewni zalesionej elementem niekorzystnie wpływającym na krążenie wody. W czasie opadów umożliwiają formowanie się spływu skoncentrowanego (liniowego), który powoduje natychmiastową dostawę wody do koryta cieku, mimo oddziaływania roślinności leśnej ograniczającego spływ powierzchniowy rozproszony (Słupik 1981; Martínez-Zavala i in. 2008). Racjonalna gospodarka leśna powinna więc być prowadzona w sposób uwzględniający konieczność spowolnienia odpływu wody na stokach (Słupik 1981; Affek 2019).

Struktura odpływu zależy nie tylko od samej lesistości, ale także od rozmieszczenia kompleksów leśnych na obszarze zlewni. Dla tworzących się zasobów wodnych optymalne jest całkowite zalesienie zlewni, czego jednak nie można osiągnąć w praktyce. Z punktu widzenia racjonalnej gospodarki wodnej za najbardziej właściwe należy uznać zalesienie górnych i źródłowych części zlewni w pobliżu wododziałów, które pozwala na spowalnianie spływu i ogranicza szybki przybór wód wezbraniowych oraz zwiększa możliwość retencjonowania wody w gruncie (Miler 2013). Położenie lasów w dolnych

częściach zlewni i wzdłuż cieków nie daje już możliwości kształtowania optymalnej struktury odpływu (Białkiewicz i in. 1976; Pierzgałski 2012). Znany jest również pogląd, że znaczenie stopnia lesistości dla transformacji opadu w odpływ nie jest jednoznaczne. Wartość graniczna opadu, powyżej której wpływ lasu zanika, jest niemożliwa do określenia, ponieważ odpływ zależy w dużej mierze od wilgotności gruntu przed wystąpieniem opadu (Słupik 1981; Szymkiewicz i in. 2014; Książczyński 2015). Zapas wody w strefie aeracji i saturacji jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na obieg wody w zlewni (Somorowska 2006).

#### 4. Lasy ochronne

Ochronne funkcje lasu są kształtowane ukierunkowanymi działaniami gospodarki leśnej i znajdują liczne uzasadnienia w aktach prawnych (m.in. w Ustawie z dnia 28 września 1991 r. o lasach, Ustawie z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska, Ustawie z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne, Ustawie z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody, Ustawie z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie). Zasady hodowli lasu (§ 6 ZHL za: Haze 2012) wyróżniają dla lasów następujące kategorie ochronności: glebochronne, wodochronne, uszkodzone przez oddziaływanie przemysłu, cenne fragmenty rodzimej przyrody, stałe powierzchnie badawcze i doświadczalne, drzewostany nasienne, ostoje zwierząt, lasy w granicach administracyjnych miast i w odległości do 10 km od granic administracyjnych miast o liczbie mieszkańców ponad 50 tys., uzdrowiskowe, o szczególnym znaczeniu dla obronności i bezpieczeństwa (Haze 2012). W lasach gospodarczych, zlokalizowanych na obszarach o ekstremalnych warunkach do wzrostu, gospodarka leśna powinna uwzględniać funkcje ochronne i być dostosowana do stanu i potrzeb środowiska (§ 28 ZHL za: Haze 2012). Cały rozdział 1. części III Zasad hodowli lasu jest poświęcony kształtowaniu zasobów wodnych (§ 67 ZHL za: Haze 2012). Podkreślone zostało tutaj znaczenie stabilnych warunków wodnych dla trwałości i rozwoju ekosystemu leśnego jako całości. Ponadto zaznaczono, że gospodarka wodna w lasach ma na celu utrzymywanie poszczególnych komponentów ekosystemu leśnego w stanie zapewniającym pełnienie funkcji wodochronnych, a ingerencja w środowisko wodne lasu może być podyktowana tylko próbą naprawy, utrzymania lub polepszenia samych stosunków wodnych (Haze 2012).

Według danych z 2018 r. lasy o charakterze ochronnym stanowią 53,7% całkowitej powierzchni leśnej Lasów Państwowych (LP) (z rezerwatami 55,1%). Wśród funkcji ochronnych zdecydowanie dominują wodochronne (21,8%). W lasach uznanych za ochronne na dalszy plan schodzą funkcje produk-

cyjne, a gospodarkę leśną prowadzi się w sposób zmodyfikowany (DGLP 2019). W każdym przypadku uznania lasów za ochronne zachodzi potrzeba dostosowywania działań gospodarczych do celów ochronnych, które mają być realizowane. Zasadnicze działania „proochronne” w lasach są stosowane na każdym etapie gospodarowania (urządzania lasu, jego hodowli oraz pozyskania surowca), a polegają m.in. na dostosowaniu składu gatunkowego do siedliska i pełnionych funkcji, utrzymywaniu dobrego stanu zdrowotnego oraz sanitarnego, podwyższeniu wieku rębności, ograniczeniu rębni zupełnych, prowadzeniu wszelkich działań z perspektywą utrzymania trwałości lasu.

## 5. Wodochronne funkcje lasu

Roślinność drzewiasta odgrywa rolę ochronną, łagodząc oddziaływanie antropogeniczne na ilościową i jakościową strukturę obiegu wody, a wodneregulacyjna funkcja lasów wynika zarówno z ich naturalnych właściwości, jak i z racjonalnie prowadzonej gospodarki leśnej (Tyszka 1995). Z uwagi na duże spadki, niewielką miąższość gleb oraz wysokie sumy opadów tereny górskie powinny być zalesione w co najmniej 50% w celu ich zabezpieczenia przed erozją wodną (Miler 2013). W obliczu ekonomicznego wymiaru strat powodziowych zaczyna dominować pogląd, że drzewa rosnące są trzykrotnie więcej warte niż ścięte (Brown 2003). Wymierna wartość pozaprodukcyjnych funkcji lasu (m.in. wodochronnych), mimo że bardzo duża i bezsporna, jest jednak trudna do określenia. Ze względu na dzisiejsze uwarunkowania środowiskowe w działalności gospodarczej człowieka, woda w lasach może mieć większe znaczenie niż sam surowiec drzewny (Jokiel i in. 2017), dlatego pozaprodukcyjny aspekt gospodarki leśnej jest coraz częściej dostrzegany i doceniany.

Wodochronne znaczenie lasów polega na jego korzystnym oddziaływaniu na strukturę odpływu wody ze zlewni (Tyszka 1995; Somorowska 2006). Powszechnie znany jest fakt pozytywnego wpływu lasu na czasowo-przestrzenny rozkład odpływu wody ze zlewni leśnych, tzn. podnoszenia odpływów niżówkowych i obniżania kulminacji (Liberacki i Szafranski 2008). Można zauważyć także zmniejszenie nierównomierności przepływów, czyli amplitudy między minimalnymi i maksymalnymi przepływami (Słupik 1981; Stasik i in. 2007; Ouyang i in. 2013). Wraz ze wzrostem zasobności (miąższości) drzewostanu powiększa się jego pojemność wodna, czyli zdolność do magazynowania wody (Lesiński i Suliński 1982). Większa lesistość zlewni powoduje wzrost odpływów minimalnych i zwiększenie udziału odpływu z półroczna letniego w odpływie rocznym. Zmniejsza się przy tym współczynnik zmienności odpływu (Tyszka 1995). W przypadku wezbrań zmniejsza się objętość i obniża



punkt kulminacyjny fali wezbraniowej, z jednoczesnym wydłużeniem jej trwania (Słupik 1981; Tyszka 1995; Miler 2008). Zmniejszenie przepływów maksymalnych i jednocześnie wydłużenie czasu trwania wezbrania podczas opadów rozlewnych na obszarach górskich spowodowane są wystąpieniem odpływu podpowierzchniowego, zachodzącego na pograniczu luźnej oraz słabo przepuszczalnej warstwy gruntu (Bochenek 2016; Jokiel i in. 2017). Znaczenie lasu dla wielkości odpływu uwidacznia się najwyraźniej w zlewniach o małej powierzchni ze względu na mniejszą powierzchnię retencyjną obszarów zalewowych (Jokiel i in. 2017).

Głębokość poziomu zwierciadła wody gruntowej pod drzewostanem jest większa niż pod powierzchnią zrębu, co wynika z braku transpiracji oraz intercepcji (Włoczewski 1968; Jaworski 2018). Stopień osłonięcia gruntu (struktura wiekowa i gatunkowa drzewostanu, zrąb lub uprawa) jest zmienny w czasie i przestrzeni, co z kolei wpływa na zmienność zdolności retencyjnych oraz strukturę odpływu ze zlewni (Jokiel i in. 2017).

## 6. Ochrona gleby przed erozją wodną

Spływ powierzchniowy niszczący wierzchnią warstwę gleby zależy od warunków topograficznych, wilgotnościowych i glebowych (Gutry-Korycka i in. 2003). Erozja wodna gleb wynika z ukształtowania powierzchni (spadku, długości i wystawy zbocza), objętości wody jako czynnika powodującego wypłukiwanie cząstek gleby (wysokości i natężenia opadów, grubości i rozkładu pokrywy śnieżnej oraz tempa jej tajania), rodzaju i gęstości pokrywy roślinnej, sposobu użytkowania gruntów łącznie ze stosowanymi zabiegami gospodarczymi. Erozja gleb zależy również od właściwości samego środowiska glebowego, w szczególności od pojemności wodnej i wodoprzepuszczalności, składu mechanicznego, stopnia agregacji i podatności na rozdrobnienie (Bac 1962; Brodowski i Rejman 2004). Średni roczny ubytek gleby z obszaru Polski tworzy warstewkę o grubości 2 mm, przy czym lokalnie ubytki te mogą być wielokrotnie większe (Bac 1962). Rola roślinności w zapobieganiu lub ograniczaniu spływu powierzchniowego polega na intercepcyjnym przechwytywaniu części opadu, rozpraszaniu energii spadających kropeł deszczu, zapobieganiu dyspersji i kolmatacji powierzchni gleby, polepszaniu struktury gleby, umożliwianiu infiltracji wokół korzeni, hamowaniu wody płynącej po powierzchni i rozdzielaniu płynących strużek przez nadziemne części roślin (Słupik 1981). Ponadto roślinność leśna dzięki systemowi korzeniowemu wiąże glebę, chroniąc ją przed erozją wodną. Oddziaływanie ochronne dotyczy gleb na obszarach zalesionych, ale również na niezalesionych terenach przyległych (Bac 1962). Siła uderzeń kropeł deszczu jest zmniejszana dzięki ochronnej roli runa i podszytu. Z kolei ściółka hamuje



splływ powierzchniowy, tworząc lepsze warunki do wsiąkania wód (Bac 1962; Pierzgałski 2008).

Pod wpływem erozji wodnej zmienia się morfologia gleb. W składzie granulometrycznym zwiększa się zawartość frakcji kamienistej i żwirowej, ponieważ woda wypłukuje frakcje najdrobniejsze (pył i il). W wyniku wypłukiwania poziomy próchniczne są pozbawiane materii organicznej, co prowadzi do powierzchniowego zaskorupiania, zwiększania gęstości gleby oraz pogarszania właściwości wodno-powietrznych. Razem z cząstkami mineralnymi gleby erodowane są składniki pokarmowe (makroelementy: N, P, K, Mg, Ca, i mikroelementy: Mn, Cu, Zn i in.) (Paluszek 2010). Próchnica glebowa stanowi 70–80% substancji organicznych występujących w glebie i warunkuje w głównej mierze jej żyzność. Dzięki strukturze koloidalnej jest zdolna do zatrzymywania wody w ilościach kilkakrotnie przewyższających swą masę oraz znacznie bardziej intensywnego sorbowania składników pokarmowych niż części mineralne, stając się przez to bogatym rezerwuarem substancji potrzebnych roślinom do wzrostu i rozwoju (Pałosz 2009).

Woda spływająca po powierzchni terenu oraz infiltrująca w głąb gruntu zmienia swój skład chemiczny zależnie od rodzaju związków, którymi się nasyca. Wymiana kationów między wodą i glebą zależy od stanu równowagi składu jonowego wody z zespołem adsorpcyjnym gleby (Kowal 1977). Z gleby mogą być wyługowywane zarówno jony soli mineralnych, jak i związki organiczne. Wody opadowe, zwłaszcza tworzące splływ powierzchniowy, wzbogacają się w duże ilości zawiesin i cząstek koloidalnych (głównie krzemionki i związków humusowych). W wodzie przesiąkającej w głąb gruntu zwiększa się wraz z głębokością zawartość dwutlenku węgla, przy jednoczesnym zmniejszaniu ilości tlenu. Zawartość tlenu w wodach podziemnych jest bliska 0, natomiast wody powierzchniowe cechują się różnym stopniem nasycenia, a przy intensywnej fotosyntezie obserwowane są nawet przesycenia wody tlenem. Dwutlenek w wodach powierzchniowych występuje w małych ilościach, utrzymując je w stanie równowagi węglanowo-wapniowej (Kowal 1977; Pawlicka 2000).

## 7. Kwestia uszkodzeń i zanieczyszczenia gleby

Działalność gospodarza człowieka prowadzi do zmiany warunków infiltracji, powoduje przekształcenie warunków formowania się odpływu i zmianę struktury gleby. Prace pozyskaniowe w użytkowaniu lasu generują duże szkody zwłaszcza w odniesieniu do drzew i pokrywy glebowej (Suwała 1999; Kulak i in. 2013). Polegają one na mechanicznym uszkodzeniu drzew pozostających w drzewostanie, natomiast szkody glebowe mają zarówno

charakter mechaniczny (odkształcenie, zagęszczenie i utwardzenie prowadzące do zmniejszenia powierzchni chłonnej), jak i chemiczny (zanieczyszczenie substancjami stosowanymi podczas eksploatacji maszyn i urządzeń). Uszkodzenia mechaniczne oprócz powodowania zmian warunków infiltracji na skutek zagęszczenia gruntu, prowadzą do powstawania dodatkowych dróg spływu powierzchniowego w wyżłobieniach i koleinach, czyli zagęszczenia sieci drenującej przez tworzenie szlaków zrywkowych i dróg wywozowych (Słupik 1981; Jokiel i in. 2017).

W celu ograniczenia negatywnych wpływów prac pozyskaniowych podejmowane są wielokierunkowe wysiłki dążące do doskonalenia technologii i urządzeń oraz samego wykonawstwa robót (Kulak i in. 2013). Zabezpieczenia w budowie maszyn czy możliwość stosowania bioolei chronią przed skażeniem gleby, ale nie eliminują ryzyka. Uszkodzenia mechaniczne można również ograniczyć do pewnego stopnia przez zastosowanie odpowiedniej technologii prac pozyskaniowych. Optymalne rozwiązania podczas ich prowadzenia (sieć szlaków operacyjnych, metoda zrywki drewna, wykorzystywane maszyny) pozwolą więc zminimalizować, ale nigdy wyeliminować szkody w ekosystemie leśnym. Kwestię tę dodatkowo komplikuje przyjęcie wielofunkcyjnego modelu gospodarki leśnej, opartego na podstawach ekologicznych, który wiąże się z budową, strukturą i dynamiką drzewostanów wzorowaną na lasach pierwotnych (Sugiero 2008; Kulak i in. 2013).

Leśnictwo wielofunkcyjne realizuje idee zrównoważonego rozwoju poprzez łączenie funkcji gospodarczych, środowiskowych (ochronnych) i społecznych. Zrównoważony rozwój społeczno-gospodarczy to szeroko propagowany obecnie nurt mający swoje źródła właśnie w leśnictwie. Pierwotnie oznaczał sposób gospodarowania polegający tylko na takim uszczuplaniu zasobów surowca drzewnego, który zapewni jego odbudowanie bez naruszenia równowagi w ekosystemie i przy zachowaniu trwałości lasu oraz ciągłości jego użytkowania (Paschalis-Jakubowicz 2011). Produkcja drewna przy jednoczesnej ochronie różnorodności biologicznej i procesów przyrodniczych może być efektywnie prowadzona wyłącznie w dużych kompleksach leśnych (o powierzchniach co najmniej kilkudziesięciu kilometrów kwadratowych). Funkcje realizowane w ramach gospodarki wielofunkcyjnej pozostają w ekonomicznej sprzeczności względem siebie. Funkcja produkcyjna generuje dochody, natomiast funkcje ochronne wiążą się z kosztami pokrywanymi ze środków uzyskanych ze sprzedaży drewna (Holeksa i Mirek 2019).

## 8. Infiltracja

Z punktu widzenia tworzenia się zasobów wodnych infiltracja pozostaje kluczowym zjawiskiem cyklu hydrologicznego. Wsiąkanie wody opadowej warunkuje bowiem tworzenie się retencji gruntowej. Oczywiście jest stwierdzenie, że w pierwszej kolejności infiltracja zależy od wielkości opadów, ale to właśnie sposób użytkowania przestrzeni determinuje jej wielkościową charakterystykę i ramy czasowe. Infiltracja zależy ponadto od przepuszczalności gruntów i skał, morfologii terenu, temperatury i niedosytu wilgotności powietrza, pokrycia szatą roślinną, nasycenia wodą środowiska gruntowo-skalnego, przemarzania gruntu, działalności człowieka.

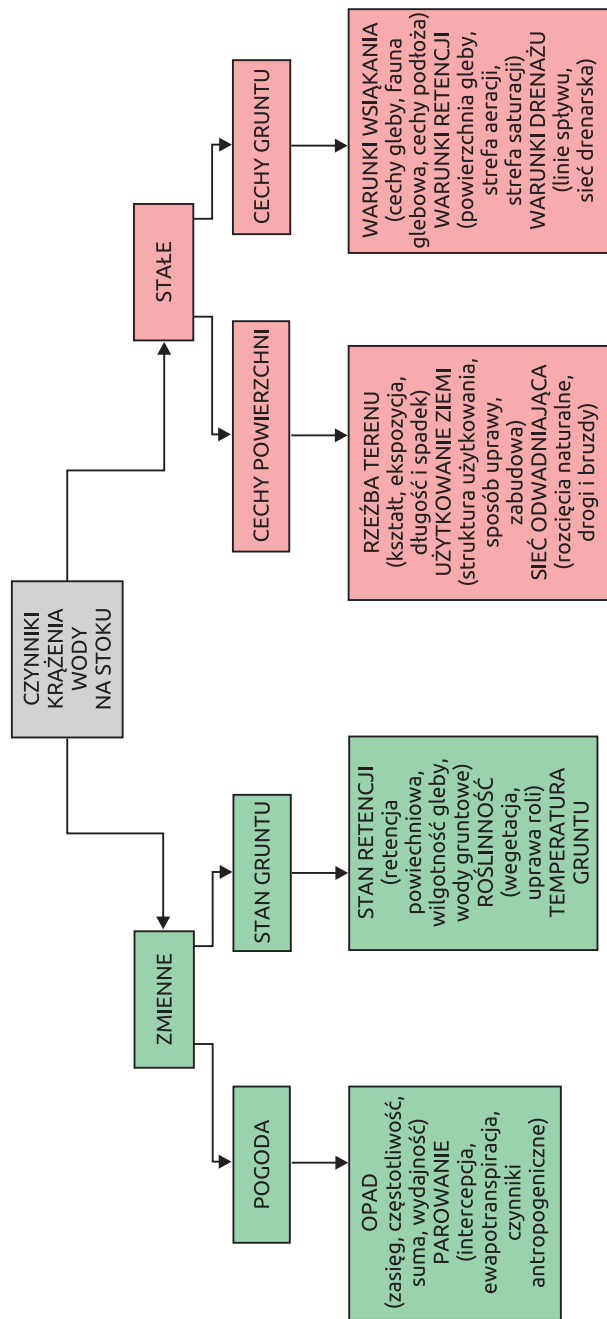
Warunki do infiltracji wód kształtowane są przez przepuszczalność utworów glebowych oraz stopień ich nasycenia wodą. Wraz z głębokością przesiąkania zachodzi stopniowa strata wody na spływ śródglebowy, retencję glebową oraz ewapotranspirację i tylko część wsiąkającej wody dociera do strefy saturacji (Słupik 1981; Bochenek 2002). W polskich warunkach infiltracja stanowi 16–20% opadów (Miler 2013), w Europie – 16–27% (Czetwertyński 1958), w Europie Środkowej – do 30% (Somorowska 2006). Wysoka przepuszczalność gleb leśnych (dużo wyższa niż gleb ornich czy użytków zielonych) wynika z korzystniejszej struktury wyrażonej stosunkiem porowatości powietrznej do kapilarnej, ponieważ system korzeniowy roślinności leśnej spulchnia cały profil glebowy. Drzewostany liściaste infiltrują ok. 70%, a iglaste nawet do 80% opadów (Grajewski i in. 2013). W miarę wzrostu głębokości przepuszczalność gleby maleje, a znaczenie użytkowania ziemi poniżej strefy korzenienia się roślin zanika na korzyść budowy pokryw zwietrzelinowych i litologii podłoża. Na stokach przepuszczalność gleb jest mniejsza niż w dnach dolin, roślinie natomiast ze wzrostem zawartości szkieletu i próchnicy (Słupik 1981; Bochenek 2016). Zdolność infiltracyjna jest więc zróżnicowana w czasie i przestrzeni (Friesen 2020).

Przeptyw notowany w danym przekroju hydrometrycznym rzeki odnosi się do całej zlewni (Słupik 1981), co wynika z infiltracyjnej teorii Hortona wyjaśniającej przebieg ogółu procesów hydrologicznych w obrębie zlewni (Gutry-Korycka i in. 2003). Pojemność infiltracyjna gleby decyduje o losie opadów atmosferycznych. W zależności od natężenia i czasu trwania opadu woda wsiąka w grunt i jako odpływ wody gruntowej dociera do cieku albo też spływa po stoku jako odpływ powierzchniowy. Odpływ powierzchniowy w bezpośrednim sąsiedztwie cieku związany jest z czasowo wykształcającą się i powiększającą od podstawy zbocza w kierunku wododziału strefą saturacji (Gutry-Korycka i in. 2003). Akumulacja infiltrującej wody powoduje wystąpienie spływu podpowierzchniowego (zwanego też śródglebowym czy kontaktowym) w miejscu kontaktu warstw o różnej przepuszczalności

(Słupik 1981; Bochenek 2002). Ważną kwestią jest brak równomierności w formowaniu się spływu powierzchniowego na całym obszarze zlewni, który wynika z lokalnego zróżnicowania warunków, w tym zróżnicowania aktualnego uwilgotnienia gruntów. Z rodzajem zasilania ciekę wiąże się czas reakcji zlewni na opad. Do szybkiej reakcji widocznej w korycie ciekę dochodzi na skutek wystąpienia spływu powierzchniowego i podpowierzchniowego, reakcja opóźniona wynika z zasilania wyłącznie odpływem gruntowym (Gutry-Korycka i in. 2003).

Woda wsiąka w grunt pod wpływem siły ciężkości do momentu kontaktu z warstwą nieprzepuszczalną i zasila wody podziemne (Friesen 2020). Warstwa ta stanowi barierę, powyżej której woda wypełnia wszystkie wolne przestrzenie i tworzy strefę nasyconą gruntu, zwaną strefą saturacji. Woda ta zwana jest wodą gruntową, a powierzchnia ograniczająca tę strefę od góry – zwierciadłem wody gruntowej. Powyżej znajduje się strefa nienasycona, wypełniona wodą, powietrzem, parą wodną i innymi gazami, zwana strefą aeracji (Dębski 1955). Aktualna retencja, czyli stan uwilgotnienia gleby, jest więc czasowo i przestrzennie zróżnicowana, waha się od wartości odpowiadających punktowi wędnięcia roślin do pełnej pojemności wodnej (Somorowska 2006). Stan wysokiego uwilgotnienia determinuje poziomy przepływ wody w gruncie, niskie uwilgotnienie wiąże się z kolei z pionowym przepływem wody (Somorowska 2006).

W terenach górskich, odznaczających się dużymi spadkami terenu, spływ powierzchniowy powstaje bardzo szybko po opadach i woda opadowa ma ograniczoną możliwość zasilania wód gruntowych. Infiltracji o wiele bardziej sprzyjają obszary równinne (Rogoż 2007) oraz roślinność hamująca odpływ powierzchniowy. Zjawisko to jest szczególnie ważne w terenach górskich, gdzie powstanie spływu powierzchniowego następuje niemal natychmiastowo. Na górskich obszarach leśnych największe znaczenie przypisuje się odpływowi podpowierzchniowemu, na co wskazuje objętość poszczególnych składowych na hydrogramie odpływu (Gutry-Korycka i in. 2003). Las ze względu na piętrowość budowy oraz stopień wypełnienia przestrzeni jest formą pokrycia terenu o największym wpływie na rozdział objętości wody opadowej. Przechwytuje opad (intercepcja), który następnie podlega parowaniu (ewaporacja) bądź spływa po powierzchni roślin i dociera do gleby. Następnie woda, spływając po powierzchni terenu, albo infiltruje i zasila wody podziemne, skąd jest pobierana do procesów fizjologicznych roślin (transpiracja), albo podlega odpływowi gruntowemu. Czynniki warunkujące krążenie wody na stokach górskich przedstawia rycina 2.



Ryc. 2. Czynniki warunkujące krążenie wody na stoku (źródło: Stupik 1981)

## 9. Retencja wodna

Retencja polega na czasowym zatrzymaniu wody spływającej do cieków. Obejmuje gromadzenie wody, kształtowanie zasobów i utrzymywanie ich w danym miejscu przez określony czas. Zdolność retencyjna gruntu jest zmienna w czasie, gdyż zależy od aktualnej wilgotności gruntu, stanu retencji powierzchniowej i aktualnej zdolności infiltracyjnej. Uwzględnia potencjalną możliwość retencji terenowej (powierzchniowej) razem z intercepcją oraz retencją gruntową (Czetwertyński 1958; Lambor 1971; Ciepeliowski i in. 2001; Grajewski i in. 2013). Retencja dotyczy zarówno biotycznych, jak i abiotycznych czynników przestrzeni, a także wiąże się z naturalnymi właściwościami środowiska przyrodniczego oraz celowymi i ukierunkowanymi działaniami technicznymi i nietechnicznymi. Może przybierać następujące formy: krajobrazową (siedliskową), glebową, powierzchniową, podziemną. Retencja ekosystemu leśnego jest trudna do ilościowego zdefiniowania, a także kontrolowania i regulowania. Zdolność gromadzenia wody przez środowisko leśne podlega tak wielu czynnikom, często o charakterze losowym, że działalność człowieka może jedynie wspierać możliwości retencyjne i poprawiać je w dłuższym horyzoncie czasowym. Duże znaczenie ma zwłaszcza odpowiednie zagospodarowanie i użytkowanie całej zlewni oraz terenów bezpośrednio przyległych do koryta cieku (Mioduszewski 2008).

Zwiększanie retencyjności zalesionych zlewni jest priorytetem działań Lasów Państwowych. W latach 2007–2015 w ramach III priorytetu Programu Operacyjnego „Infrastruktura i Środowisko” (POIiŚ) (zaplanowanego na lata 2007–2013) Lasy Państwowe realizowały 2 programy dotyczące retencji w lasach, mające na celu próbę realizacji działań w zakresie retencji z jednoczesną ochroną przed negatywnymi skutkami powierzchniowego spływu wód. Prowadzono równocześnie 2 projekty na obszarach o odmiennej topografii – na nizinach i w górach. Projekt dotyczący małej retencji nizinnej dał ostatecznie wynik 3 644 zrealizowanych obiektów i retencjonowanie ponad 42 mln m<sup>3</sup> wody (ponad 10 mln m<sup>3</sup> więcej niż zakładano). W ramach projektu małej retencji górskiej zrealizowano odpowiednio 3 553 obiekty i zretencjonowano ponad 1,5 mln m<sup>3</sup> wody, co również przewyższyło wartości pierwotnie planowane (CKPŚ).

Lasy Państwowe utrzymują politykę zwiększania retencji na obszarach, którymi zarządzają. Projekty przewidziane do realizacji w latach 2016–2022 podzielono analogicznie: „Kompleksowy projekt adaptacji lasów i leśnictwa do zmian klimatu – mała retencja oraz przeciwdziałanie erozji wodnej na terenach nizinnych”, „Kompleksowy projekt adaptacji lasów i leśnictwa do zmian klimatu – mała retencja oraz przeciwdziałanie erozji wodnej na terenach górskich”. Celem programów jest kontynuacja i monitoring działań przeprowadzonych w ramach POIiŚ 2007–2013. Założono wykonanie komplekso-

wych zabiegów przyrodniczo-technicznych przyjaznych środowisku, obiektów i budowli o prostej konstrukcji utworzonych z naturalnych materiałów. Projekty mają zapewnić wzmocnienie odporności na zmiany klimatyczne w nizinnych i górskich ekosystemach leśnych przez kształtowanie i rozwój systemu małej retencji i przeciwdziałanie erozji wodnej. Przyjęto, że dzięki podjętym działaniom zretencjonowanych zostanie 2,1 mln m<sup>3</sup> wody na nizinach i 400 tys. m<sup>3</sup> wody w górach (CKPŚ-LP 2016). Programy rozwoju małej retencji polegają na planowaniu oraz wdrażaniu kompleksowych działań, które uwzględniają aspekty środowiskowe i gospodarcze (Miler 2013). Las jest niesterownym zbiornikiem retencyjnym, a tzw. mała retencja to nie tylko małe zbiorniki wodne, z którymi często się ją utożsamia, ale wszystkie działania powodujące wydłużenie drogi i czasu migracji wody w zlewni (Ciepielowski i in. 2001; Miler 2008; Jokiel i in. 2017).

Infiltracja i retencja oraz kształtujące się dzięki nim zasoby wód podziemnych zależne od budowy geologicznej decydują o zasilaniu podziemnym, będącym stałą składową odpływu (Ziemońska 1973). Ograniczona budową geologiczną zdolność podłoża do przyjmowania wód opadowych i przewodzenia ich w głąb powoduje znaczny odpływ bezpośredni (szybki), odpowiada także za małe zasoby wód podziemnych w Karpatach (Ziemońska 1973). Niekorzystną z punktu widzenia obiegu wody budowę geologiczną podłoża można niwelować sposobem zagospodarowania terenu. Utrzymywanie trwałej pokrywy leśnej na takim obszarze przyczynia się do poprawy zdolności retencyjnych w zlewni i transformacji opadów w odpływ śródpokrywowy czy podziemny, a tym samym służy zapobieganiu szybkiej reakcji zlewni na opady.

## 10. Jakość wody

Zanieczyszczenie wód, podobnie jak ich niedobór, jest obecnie powszechnym problemem. Za substancje szkodliwe uznaje się zarówno te, które naturalnie nie wchodzi w skład danego ekosystemu, jak i te powszechnie występujące, ale dostarczane w ponadnormatywnych ilościach (Kajak 2001). Stopień zanieczyszczenia niejednokrotnie czyni je niezdatnymi do picia. Zdarza się również, że koszty uzdatniania wody powodują eliminację ujęcia ze względów ekonomicznych. Zanieczyszczenia pochodzą nie tylko z bezpośrednich zrzutów (źródła punktowych), ale również dostają się z wodami spływającymi z powierzchni całej zlewni (źródła obszarowe). Nawet obszary pozbawione potencjalnych źródeł zanieczyszczeń mogą otrzymywać je z opadów przez depozycję mokrą zanieczyszczeń atmosferycznych, w tym również zanieczyszczeń atmosferycznych transgranicznych. Monitorowane i badane wskaźniki podzielić można na następujące grupy parametrów: elementy biologiczne, parametry stanu



fizycznego, warunki tlenowe i zanieczyszczenia organiczne, zasolenie, zakwaszenie, substancje biogenne, specyficzne zanieczyszczenia syntetyczne i niesyntetyczne, substancje priorytetowe, wskaźniki mikrobiologiczne i inne (WIOŚ w Katowicach). Organizmami wskaźnikowymi (bioindykatorami) najczęściej stosowanymi w ocenie stanu jakości wód rzecznych (wykorzystywanymi w 2/3 systemów kontroli jakości wody) są makrobezkręgowce bentosowe zasiedlające osady dennie (Gorzela i Kornijów 2004).

W wodach powierzchniowych w sposób naturalny przebiega proces ich samooczyszczania polegający na kompleksowym współdziałaniu czynników fizykochemicznych i biologicznych. Właściwy etap samooczyszczania obejmuje rozkład materii organicznej przy czynnym udziale mikroorganizmów wodnych, czyli biodegradację. Na samooczyszczanie składają się również procesy poprzedzające, takie jak rozcieńczanie, sedymentacja i adsorpcja zanieczyszczeń. Procesy samooczyszczania najintensywniej przebiegają w wodach płynących. W zbiornikach wód stojących mechanizm ich działania jest ten sam, ale cechuje się znacznie mniejszą intensywnością, przez co zanieczyszczenia ulegają w większym stopniu kumulacji w osadach dennych. Dynamicznie zachodzące przemiany powodują wykształcenie się stref odznaczających się malejącym stopniem zanieczyszczenia, a zmianom chemizmu wód odpowiadają jednoczesne strefowe zmiany w biocenozach określane jako system saprobowy. Malejący stopień zanieczyszczenia kolejnych stref (poli-, mezo-, oligosaprobowej) wiąże się z zasiedlaniem ich przez określone zespoły organizmów (Paluch 1973; Kajak 2001; Gorzela i Kornijów 2004). W czasie procesu samooczyszczania zachodzi utlenianie związków organicznych przez mikroorganizmy. Warunki tlenowe panujące w wodzie podlegają dynamicznym zmianom, a relacje pomiędzy procesami dostarczania i zużywania tlenu określa bilans tlenowy (Biedka i Dzienis 2009). W neutralizacji zanieczyszczeń organicznych najważniejszą rolę odgrywają bakterie dzięki swej aktywności fizjologicznej. Szybkość mineralizacji materii organicznej zależy od tempa przebiegu reakcji biochemicznych warunkowanego aktywnością enzymatyczną (Paluch 1973). Substancje toksyczne zawarte w dopływających zanieczyszczeniach mogą hamować, a nawet wstrzymywać samooczyszczanie z powodu zatrucia i obumierania mikroorganizmów (Kajak 2001).

Zabiegi chroniące przed migracją substancji biogennych oraz ich dopływem do rzek muszą być podejmowane na obszarze całej zlewni. Kontrolować należy zarówno źródła obszarowe, jak i znacznie łatwiejsze do identyfikacji źródła punktowe (Kasza 2009). Ilość zanieczyszczeń pochodzących ze źródeł rozproszonych zależy *de facto* od sposobu użytkowania terenu, rozumianego jako intensywność antropopresji, a działania ochronne muszą odpowiadać konkretnym warunkom terenowym, tj. cechom fizjograficznym i glebowym oraz stosunkom hydrologicznym (Kasza 2009). Ograniczenie oddziaływa-

nia najbardziej kłopotliwych, obszarowych źródeł zanieczyszczenia polega w głównej mierze na dostosowaniu dawek nawozowych do rzeczywistych potrzeb roślin, a dzięki temu zapobieganiu nadmiernej chemizacji środowiska (Kasza 2009). Tanim i prostym w realizacji zadaniem jest tworzenie naturalnych barier biogeochemicznych. Zabiegi o takim charakterze powinny dotyczyć zarówno obszarów łądu graniczącego z wodami (ciekami i wodami stojącymi), jak i gruntów w obrębie zlewni podlegających intensywnej antropresji, gdzie mogłyby hamować erozję oraz migrację wyerodowanego materiału i zanieczyszczeń.

Ponadto Departament Zasobów Wodnych Ministerstwa Środowiska przygotował opracowanie pt. „Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich” (Bojarski i in. 2005). Opisano w nim działania, które powinno się wdrażać, dążąc do osiągnięcia celów środowiskowych dla wód powierzchniowych, określonych w Ramowej Dyrektywie Wodnej Unii Europejskiej (Dyrektywa 2000/60/WE). Autorzy dokumentu stworzyli ramy koncepcyjne, służące osiągnięciu i utrzymaniu dobrego stanu rzek i potoków, bez konkretnych i szczegółowych rozwiązań wykonawczych. Podkreślili jednocześnie konieczność opracowywania indywidualnych i dedykowanych projektów przez interdyscyplinarne zespoły (Bojarski i in. 2005; Wyżga i in. 2008).

## 11. Ujmowanie wód na obszarach leśnych

Rola lasu jako filtru oczyszczającego wody powierzchniowe oraz opadowe jest stwierdzona i niekwestionowana (Miler 2013). Roślinność leśna skutecznie oczyszcza powietrze atmosferyczne, zaś pojemność sorpcyjna biomasy i gleby leśnej pozwala wycofać z obiegu pierwiastki (głównie biogeny), przez co pozytywnie wpływa na jakość tworzących się zasobów wodnych. Właściwości te sprawiają, że obszary zasilania zasobów wód podziemnych oraz bezpośrednio otaczające ujęcia wód powierzchniowych i podziemnych powinno się utrzymywać jako zalesione (Tyszka 1995), z zachowaniem ich nadrzędnej funkcji ochronnej. Zgodnie z Ustawą o lasach, trwale zrównoważona gospodarka leśna ma na celu m.in. ochronę wód powierzchniowych i głębinowych, retencję zlewni, w szczególności na obszarach wododziałów i na obszarach zasilania zbiorników wód podziemnych (art. 7), a właściciel lasu jest zobowiązany do ochrony gleb i wód leśnych (art. 9). Za lasy ochronne uznaje się m.in. lasy chroniące zasoby wód powierzchniowych i podziemnych, regulujące stosunki hydrologiczne w zlewni oraz na obszarach wododziałów (art. 15) (Ustawa z dnia 28 września 1991 r. o lasach).

Ujęcie wody powierzchniowej to obiekt lub urządzenie służące do poboru wody z cieką (zbiornika) wraz z rurociągami prowadzącymi wodę do studni

zbiorczej lub pompowni (Budziło i Wieczysty 2007). Na obszarach górskich odpływ wody z miejsc jej ujmowania następuje przeważnie grawitacyjnie (Budziło i Wieczysty 2007; Polok-Kowalska 2009). Na terenie Polski najczęściej spotykane są ujęcia brzegowe, nurtowe, progowe, zatokowe oraz drenażowe. Sposób ujmowania wody, czyli wybór rodzaju ujęcia wody, zależy od kształtu przekroju poprzecznego koryta rzeki, napełnienia wody w korycie, ekstremalnych przepływów, ilości ujmowanej wody, warunków geologicznych i ekonomicznych (Budziło i Wieczysty 2007). Na obszarach górskich cieki charakteryzują się zmiennym napełnieniem (stanami wody) i przepływem, zmiennością prędkości przepływu, zmiennością ilości i rodzaju transportowanego rumowiska towarzyszącego płynącej wodzie (przy czym zmienność transportu rumowiska unoszonego jest wielokrotnie większa niż zmienność odpływu wody) (Budziło i Wieczysty 2007). O lokalizacji ujęcia w danym przekroju powinna decydować gwarancja zapewnienia stabilności linii brzegowej i głębokości wystarczającej nawet podczas niskich stanów wody. Z uwagi na możliwość pojawienia się problemów eksploatacyjnych ważne jest również zabezpieczenie ujęcia przed zamulaniem (Budziło i Wieczysty 2007). Na potokach górskich i podgórskich w praktyce najlepiej funkcjonują ujęcia progowe oraz drenażowe (czasem zwane infiltracyjno-poddennymi). Ujęcia progowe przyczyniają się dodatkowo do hamowania erozji dennej. Techniczne kwestie ujęcia dostosowywane są indywidualnie w każdym przypadku, zależnie od wymaganej wydajności oraz warunków hydrogeologicznych (Budziło i Wieczysty 2007; Polok-Kowalska 2009).

## 12. Prawne uregulowania ochrony zasobów wodnych

Art. 50 Ustawy z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne mówi, że wody jako integralna część środowiska oraz siedlisko dla organizmów podlegają ochronie, niezależnie od tego, czyją stanowią własność. Art. 51 wyjaśnia z kolei, że objęcie ochroną wód podyktowane jest dążeniami do osiągnięcia celów środowiskowych dla jednolitych części wód powierzchniowych, jednolitych części wód podziemnych oraz obszarów chronionych, a także poprawy jakości wód oraz stosunków biologicznych w środowisku wodnym i na terenach podmokłych. Art. 54 Ustawy uszczegóławia, na czym polega ochrona wód powierzchniowych przed zanieczyszczeniami. Wskazuje na ograniczenie emisji do wód zanieczyszczeń ze źródeł punktowych i obszarowych (Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne).

Art. 120 do 142 zawierają szczegółowe przepisy ochrony ujęć wody oraz zbiorników wód śródlądowych. Wyznaczanie stref i obszarów ochronnych wiąże się z wprowadzeniem zakazów, nakazów oraz ograniczeń w zakresie

użytkowania gruntów i korzystania z wód. Strefa ochronna może obejmować teren ochrony bezpośredniej i pośredniej lub wyłącznie teren ochrony bezpośredniej. Każde ujęcie wody jest objęte ustanawianą z urzędu strefą ochrony bezpośredniej, w której dopuszcza się jedynie użytkowanie gruntów związane z eksploatacją ujęcia wody. Realizacja zadania zbiorowego zaopatrzenia w wodę wymaga przeprowadzania analizy ryzyka zagrożeń zdrowotnych dla ujęć wody dostarczających więcej niż 10 m<sup>3</sup> na dobę lub zaopatrujących więcej niż 50 osób, a także ujęć indywidualnych dostarczających do 10 m<sup>3</sup> na dobę zaopatrujących do 50 osób, gdy spożywcze przeznaczenie wiąże się z działalnością handlową, usługową, przemysłową lub do budynków użyteczności publicznej. Należy zaznaczyć, że strefa ochronna ujęcia wody z potoku górskiego lub z górnego biegu rzeki może obejmować całą zlewnię cieku powyżej ujęcia wody (art. 124, ust. 3). Teren ochrony bezpośredniej ustanawia właściwy organ Wód Polskich w drodze decyzji, zaś teren ochrony bezpośredniej i pośredniej ustanawia wojewoda w drodze aktu prawa miejscowego, który podlega uzgodnieniu z Wodami Polskimi (Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne).

Przeznaczona dla ludności woda do spożycia powinna odznaczać się właściwościami gwarantującymi bezpieczeństwo zdrowotne (Kowal 1977; Jekel 2008). Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 7 grudnia 2017 r. zawiera szczegółowe wymagania bakteriologiczne, fizykochemiczne oraz organoleptyczne dotyczące jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r.). Rozporządzenia Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z 29 sierpnia 2019 r. zawiera natomiast wymagania, które powinny spełniać wody powierzchniowe, wykorzystywane przez ludność do spożycia z podziałem na 3 kategorie jakości – A1, A2, A3 – w zależności od stężeń poszczególnych substancji, różnicujące wody pod względem procesów, jakim powinno się je poddać podczas uzdatniania. W załączniku Nr 1 Rozporządzenia wskazano dopuszczalne dla danej kategorii jakości wód wartości graniczne wskaźników jakości wody (Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 29 sierpnia 2019 r.).

### 13. Podsumowanie

Gospodarka leśna, obejmująca wszelkie działania związane z urządzeniem, hodowlą i użytkowaniem lasu, musi umożliwiać tworzenie się optymalnych pod względem ilościowym i jakościowym zasobów wodnych. Globalne zmiany klimatyczne oraz nasilona antropopresja mają odzwierciedlenie w stanie zasobów wodnych, co w Polsce jako kraju o małych rezerwach przypadających na mieszkańca w ciągu roku widać szczególnie wyraźnie.

Adaptacja bilansu wodnego w skali makro-, mezo- i mikroregionów do nowo powstających uwarunkowań polega na zmianach ilościowych poszczególnych składowych równania cyklu hydrologicznego. Przeobrażenia te jednak nie są tak łatwo zauważalne, jak zmiany w czasie trwania poszczególnych etapów krążenia wody po jednostkowym epizodzie opadowym. Zwiększa się losowość występowania samych opadów, a ich czas trwania i nasilenie nabierają cech ekstremalności. W związku z tym w relacjach między poszczególnymi składowymi fazy ubytków również dochodzi do zachwiania. Woda zbyt szybko dociera do cieków i formuje przepływ wezbraniowy, nie zasilając przez to zasobów wód podziemnych. Wymusza to więc poszukiwanie sposobów racjonalnego gospodarowania zasobami wodnymi, zapewniającego ich trwałość. Gospodarka wodna jest silnie powiązana z leśnym zagospodarowaniem obszaru, co wynika nie tylko z oddziaływania samej roślinności, ale i z prowadzonej gospodarki leśnej. Rozwiązania powinny być wdrażane systemowo, jednak ich efekty są zależne od tzw. dobrych praktyk stosowanych przez każdego z indywidualnych użytkowników wód.

Obszary leśne w sposób znaczący modyfikują obieg wody w przyrodzie, przy czym wielu badaczy podkreśla ich pozytywny wpływ na strukturę bilansu wodnego. Łączne oddziaływanie wielu czynników modyfikowane lokalnymi warunkami może wielokierunkowo wpływać na obieg wody w zlewni. Istotne znaczenie dla obiegu wody ma topografia zlewni, dlatego obszar Karpat jest w kręgu szczególnych zainteresowań głównie z uwagi na wysokie zasilanie opadami i jednocześnie wysoki stopień lesistości, które stwarzają warunki do kształtowania zasobów wodnych, optymalnych pod względem ilościowym i jakościowym.

Przegląd piśmiennictwa dotyczącego mechanizmów krążenia wody w ekosystemie leśnym oraz znaczenia warunków, w jakich się ono odbywa, pozwolił na sformułowanie następujących wniosków:

1. Integralność poszczególnych komponentów środowiska przyrodniczego, polegająca na współtworzeniu skomplikowanych geosystemów, wymusza kompleksowe podejście do gospodarowania wszystkimi zasobami środowiska.
2. Lasy, szczególnie duże i zwarte kompleksy leśne, w sposób naturalny regulują obieg wody. Przeciwdziałają szybkiemu spływowi wód opadowych i erozji gleby, a także tworzą warunki do zasilania i kształtowania zasobów wód podziemnych o optymalnej jakości.
3. Użytkowanie lasu oznacza antropopresję, a jej charakter decyduje o stopniu modyfikacji obiegu wody oraz ilościowym i jakościowym stanie zasobów wodnych.
4. Wpływ użytkowania lasu na gospodarkę wodną ma zasadnicze znaczenie szczególnie w fazie tworzenia się zasobów wodnych.

5. Priorytetowym celem gospodarki leśnej jest i będzie pozyskiwanie surowca drzewnego. Konieczna jest więc optymalizacja działań z zakresu produkcyjnych funkcji lasu, która pozwoli na równoczesne spełnianie funkcji środowiskotwórczych i ochronnych.

## Literatura

- Affek A.N. 2019. Wpływ gospodarki leśnej na terenach górskich na wybrane elementy środowiska – aktualny stan wiedzy. *Przegląd Geograficzny*, 91, 1, 63–81.
- Bac S. 1962. *Leśne melioracje wodne*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Bajkiewicz-Grabowska E., Mikulski Z. 2007. *Hydrologia ogólna*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Białkiewicz F., Kucharska K., Tyszka J. 1976. Rola lasu w użytecznym obiegu wody w środowisku przyrodniczym. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa*, 513–514, 115–126.
- Biedka P., Dzienis L. 2009. Modelowanie zmian stężenia tlenu rozpuszczonego w wodach jezior. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 11, 849–860.
- Bochenek W. 2002. Ocena możliwości retencyjnych pokryw glebowo-zwietrzelinowych na stoku pogórskim. *Regionalny Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 3, 103–107.
- Bochenek W. 2016. Zmienność wskaźnika zagrożenia suszą w pokrywach glebowo-zwietrzelinowych pogórskiego stoku fliszowego na Stacji Badawczej IGIPZ PAN w Szymbarku w latach 2000–2015. *Acta Agrophysica*, 23(3), 319–330.
- Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyźga B., Zalewski J. 2005. *Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich*. Ministerstwo Środowiska, Departament Zasobów Wodnych, Warszawa.
- Brodowski R., Rejman J. 2004. Określenie wpływu wilgotności i stanu powierzchni gleby wytworzonej z piasku gliniastego na spływ powierzchniowy i zmyw gleby. *Acta Agrophysica*, 4(3), 619–624.
- Brown L.R. 2003. *Gospodarka ekologiczna na miarę Ziemi*. Wydawnictwo Książka i Wiedza, Warszawa.
- Brykała D. 2009. *Przestrzenne i czasowe różnicowanie odpływu rzecznoego w dorzeczu Skrzy Lewej*. IGIPZ PAN, Warszawa.
- Bryndał T. 2014. *Identyfikacja małych zlewni podatnych na formowanie gwałtownych wezbrań w Karpatach Polskich*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego, Kraków.
- Budziło B., Wiczysty A. 2007. *Projektowanie ujęć wody powierzchniowej*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Ciepielowski A. Red. 1995. *Metodyka zagospodarowania zasobów wodnych w małych zlewniach rzecznych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Ciepielowski A., Laskowski R., Stolarek A. 2001. Ocena stanu retencji zlewni leśnych. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, Seria A*, 4(923), 5–22.



- CKPŚ. <http://www.ckps.lasy.gov.pl/projekty-lp> (dostęp: 10.02.2020 r.).
- CKPŚ-LP. 2016. Podręcznik wdrażania projektu – Wytyczne do realizacji zadań i obiektów małej retencji i przeciwdziałania erozji wodnej. Cz. I. Zakres rzeczowy. Lasy Państwowe, Centrum Koordynacji Projektów Środowiskowych, Warszawa.
- Czertwertyński E. 1958. Hydrologia. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- Dębski K. 1955. Hydrologia kontynentalna. Cz. I. Hydrometria. Wydawnictwa Komunikacyjne, Warszawa.
- DGLP. 2019. Lasy Państwowe w liczbach 2018. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. (Dz.U. UE L z dnia 22 grudnia 2000 r.).
- Friesen J. 2020. Flow Pathways of Throughfall and Stemflow Through the Subsurface. W: Precipitation Partitioning by Vegetation – a Global Synthesis. Red. J.T. Van Stan II, E. Gutmann, J. Friesen. Springer Nature Switzerland AG, Szwajcaria, 215–227.
- Gorzel M., Kornijów R. 2004. Biologiczne metody oceny jakości wód rzecznych. Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych, 53, 2(263), 183–191.
- Grajewski S., Miler A.T., Krysztofiak-Kaniewska A. 2013. Zmiany stanów wód gruntowych w Puszczy Zielonka w okresie 1970–2009. Rocznik Ochrona Środowiska, 15, 1594–1611.
- Gutry-Korycka M., Nowicka B., Soczyńska U. Red. 2003. Rola retencji zlewni w kształtowaniu wezbrań opadowych. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Haze M. Red. 2012. Zasady hodowli lasu. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Holeksa J., Mirek Z. 2019. Wielofunkcyjna gospodarka leśna – mit czy rzeczywistość? Referat z sesji naukowej pt.: „Wielofunkcyjna gospodarka leśna wobec oczekiwań przemysłu drzewnego i ochrony przyrody”. 119 Zjazd PTL, Darłówko, 12–14.09.2019.
- Janusz E., Jędryka S., Kopec D., Miler A.T. 2011. Woda dla lasu – las dla wody, na przykładzie Nadleśnictwa Kolumna. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 1, 275–288.
- Jaworski A. 2018. Hodowla lasu. T. 1. Sposoby zagospodarowania, odnawianie lasu, przebudowa i przemiana drzewostanów. Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Jekel M. 2008. Wymagania stawiane wodzie do picia oraz procesom jej uzdatniania. W: Podstawy i technologie uzdatniania wody. T. 1. R. Gimbel, M. Jekel, R. Liessfeld. Red. Wydawnictwo Projprzem-EKO, Bydgoszcz.
- Jokiel P., Bartnik A. 2012. Geografia wezbrań i powodzi rzecznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Jokiel P., Marszałewski W., Pociask-Karteczka J. Red. 2017. Hydrologia Polski. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Juchheim J., Ammer C., Schall P., Seidel D. 2017. Canopy Space Filling Rather Than Conventional Measures of Structural Diversity Explains Productivity of Beech Stands. Forest Ecology and Management, 395, 19–26.



- Kajak Z. 2001. Hydrobiologia-limnologia. Ekosystemy wód śródlądowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kasza H. 2009. Zbiorniki zaporowe: znaczenie – eutrofizacja – ochrona. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała.
- Klamerus-Iwan A., Szymański W. 2017. Przestrzenno-czasowe zróżnicowanie pojemności wodnej koron drzew leśnych na przykładzie buka zwyczajnego. *Sylwan*, 161(2), 142–148.
- Kołodziejczyk K. 2016. Analiza wpływu wielkości uszczelnienia terenu na hydrogram odpływu ze zlewni. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 15(4), 103–114.
- Kowal A.L. 1977. Technologia wody. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- Krajewski A., Banasik K. 2013. Czas reakcji zlewni zurbanizowanej na opady wywołujące wezbrania. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, 12(4), 135–146.
- Książczyński K.W. 2015. Ocena wpływu zmian klimatycznych i suszy atmosferycznej na wilgotność gleb. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 1/1, 33–45.
- Kulak D., Stańczykiewicz A., Szewczyk G., Kobiałka P. 2013. Wpływ zrywki drewna z użyciem ciągników typu skider na uszkodzenia gleby w górskich drzewostanach jodłowo-bukowych. *Forestry Letters*, 105, 35–46.
- Lambor J. 1971. Hydrologia inżynierska. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- Lesiński J.A., Suliński J. 1982. Lasy wodochronne i klimatochronne Puszczy Niepołomickiej. *Studia Ośrodka Dokumentacji Fizjograficznej*, 10, 251–267.
- Liberacki D., Szafranski C. 2008. Odpływ z małych zlewni o różnym stopniu lesistości. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 532, 143–151.
- Maciaszek W. 1996. Gleby leśne Karpat fliszowych; zróżnicowanie, zagrożenia. *Sylwan*, 4, 41–51.
- Martínez-Zavala L., Jordán-López A., Bellinfante N. 2008. Seasonal Variability of Runoff and Soil Loss on Forest Road Backslopes under Simulated Rainfall. *Catena*, 74, 1, 73–79.
- Miler A.T. 2008. Las i woda. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 10, 2(18), 24–32.
- Miler A.T. 2013. Kompleksowa metodyka oceny stosunków wodnych w lasach. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań.
- Mioduszewski W. 2008. Mała retencja w lasach elementem kształtowania i ochrony zasobów wodnych. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 10, 2(18), 33–48.
- Niedzielski H. 1974. Wodochłonność skał fliszowych w wybranych rejonach Karpat. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, XLIV, 1, 115–139.
- Ouyang Y., Leininger T.D., Moran M. 2013. Impacts of Reforestation upon Sediment Load and Water Outflow in the Lower Yazoo River Watershed, Mississippi. *Ecological Engineering*, 61, Part A, 394–406.
- Paluch J. Red. 1973. Mikrobiologia wód. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Paluszek J. 2010. Zmiany pokrywy glebowej pod wpływem erozji. *Prace i Studia Geograficzne*, 45, 279–294.

- Pałosz T.** 2009. Rolnicze i środowiskowe znaczenie próchnicy glebowej i metodyka jej bilansu. *Rocznik Ochrony Środowiska*, 11(1), 329–338.
- Paschalis-Jakubowicz P.** 2011. Teoretyczne podstawy i realizacja idei zrównoważonego rozwoju w leśnictwie. *Problemy Ekorozwoju*, 6, 2, 101–106.
- Pawlicka D.** 2000. Zawartość wybranych gazów (tlenu i dwutlenku węgla) w wodach opadowych oraz podziemnych strefy aeracji i saturacji na przykładzie stacji hydrogeologicznej w Granicy (Kampinoski Park Narodowy). *Przegląd Geologiczny*, 48, 11, 1000–1004.
- Pierzgalski E.** 2008. Relacje między lasem a wodą – przegląd problemów. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 10, 2(18), 13–23.
- Pierzgalski E.** 2012. Gospodarowanie wodą w obszarach leśnych. Referat wygłoszony na Forum Debaty Publicznej zorganizowanej przez Kancelarię Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej 30 listopada 2011 r. *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie*, 1, 7–9.
- Pociask-Karteczka J. Red.** 2003. *Zlewnia. Właściwości i procesy*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków.
- Polok-Kowalska A.** 2009. Zespólone ujęcia wody z uwzględnieniem kryteriów techniczno-ekonomiczno-niezawodnościowych oraz ochrony ichtiofauny. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, praca doktorska.
- Pusłowska-Tyszewska D., Tyszewski S., Duda R., Kiejzik-Głowińska M., Treichel W., Nawalny M.** 2017. Bilans wodnogospodarczy wód powierzchniowych. W: Środowiskowe aspekty udostępniania gazu ze skał łupkowych. T. 1. Gospodarka wodą. D. Pusłowska-Tyszewska, S. Tyszewski. Red. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 46–78.
- Raszewski Z., Winnicki I., Zieliński J.** 2005. Wybrane zagadnienia z hydrauliki i hydrologii. Wydawnictwo BEL Studio, Warszawa.
- Ribolzi O., Lacombe G., Pierret A., Robain H., Sounyafong P., Rouw A., Souleuth B., Mouche E., Huon S., Silvera N., Latxachak K.O., Sengtaheuanghoung O., Valentin C.** 2018. Interacting Land Use and Soil Surface Dynamics Control Groundwater Outflow in a Montane Catchment of the Lower Mekong Basin. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 268, 90–102.
- Rogoż M.** 2007. *Dynamika wód podziemnych*. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 29 sierpnia 2019 r. w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać wody powierzchniowe wykorzystywane do zaopatrzenia ludności w wodę przeznaczoną do spożycia przez ludzi (Dz. U. 2019, poz. 1747).
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz. U. 2017, poz. 2294).
- Słupik J.** 1981. Rola stoku w kształtowaniu odpływu w Karpatach fliszowych. *Prace Geograficzne*, 142, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Soja R.** 2002. Hydrologiczne aspekty antropopresji w polskich Karpatach. *Prace Geograficzne*, 186, IGiPZ PAN, Warszawa.

- Somorowska U. 2006. Wpływ stanu retencji podziemnej na proces odpływu w zlewni nizinnej. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Stasik R., Szafranski C., Korytowski M., Liberacki D. 2007. Zmienność przepływów w ciekach małych zlewni nizinnych o zróżnicowanym zasilaniu i stopniu lesistości na tle warunków meteorologicznych. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumietus*, 6(1), 15–25.
- Sugiero D. 2008. Struktura i dynamika litej buczyny bieszczadzkiej w strefie regla dolnego na tle cyklu rozwojowego lasu pierwotnego. *Roczniki Bieszczadzkie*, 16, 77–94.
- Suliński J. 1995. Czynniki różnicujące wartości składowych bilansu wodnego drzewostanów zagospodarowanych zrębowo. *Sylwan*, 139(11), 49–65.
- Suliński J. 1998. Spojrzenie na wybrane zagadnienia kształtowania się stosunków wodnych w lesie w nawiązaniu do Zasad Hodowli Lasu i Instrukcji Urządzania Lasu. Materiały z sympozjum PTL i SGGW: Rola planu inżynierskiego zagospodarowania lasu w wielofunkcyjnej zrównoważonej gospodarce leśnej. Fundacja Rozwoju SGGW, Warszawa, 62–74.
- Suwała M. 1999. Uszkodzenia drzew i gleby przy pozyskiwaniu drewna w późnych trzebieżach drzewostanów sosnowych. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa, Seria A*, 873, Warszawa.
- Szymkiewicz A., Sikora Z., Ossowski R., Tisler W. 2014. Właściwości retencyjne, przewodność hydrauliczna i naprężenia efektywne w gruntach nienasyconych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 5, 445–452.
- Tomaszewski E. 2012. Wieloletnia i sezonowa dynamika niżówek w rzekach środkowej Polski. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Tysza J. 1995. Rola i miejsce lasu w kształtowaniu stosunków wodnych w zlewni rzecznej. *Sylwan*, 139(11), 67–80.
- Ustawa z dnia 28 września 1991 r. o lasach (Dz. U. 1991 Nr 101, poz. 444 z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. 2001 Nr 62, poz. 627 ze zm.).
- Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody (Dz. U. 2004 Nr 92, poz. 880 ze zm.).
- Ustawa z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie (Dz. U. 2007 Nr 75, poz. 493 ze zm.).
- Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne (Dz. U. 2017, poz. 1566 z późn. zm.).
- WIOŚ w Katowicach. [http://www.katowice.wios.gov.pl/index.php?tekst=monitoring/info\\_rmacje/stan2016/i](http://www.katowice.wios.gov.pl/index.php?tekst=monitoring/info_rmacje/stan2016/i) (dostęp: 22.02.2020 r.).
- Włoczewski T. 1968. Ogólna hodowla lasu. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Wyźga B., Bojarski A., Jeleński J., Zalewski J. 2008. Zagrożenie dla zrównoważonego stanu środowiska cieków karpackich i proponowane działania zaradcze. W: Stan środowiska rzek południowej Polski i możliwości jego poprawy – wybrane aspekty. B. Wyźga. Red. Instytut Ochrony Przyrody PAN, 121–133.
- Ziemońska Z. 1973. Stosunki wodne w polskich Karpatach Zachodnich. *Prace Geograficzne*, 103, IG PAN, Wrocław.

# Rozkład wilgotności w gruncie przyległym do wylotu urządzeń odwadniających drogi leśne

Janusz Gołąb<sup>1</sup>, Elżbieta Badach<sup>2</sup>, Krzysztof Urban<sup>3</sup>,  
Bogusław Radliński<sup>4</sup>, Stanisław Matek<sup>5</sup>, Grażyna Godzisz<sup>6</sup>,  
Adrian Adamowicz<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków, e-mail: janusz.golab@urk.edu.pl

<sup>2</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Statystyki i Polityki Społecznej, al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

<sup>3</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Leśny Zakład Doświadczalny, ul. Ludowa 10, 33-380 Krynica-Zdrój

<sup>4</sup> Roztoczański Park Narodowy, Stacja Bazowa Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, ul. Biały Stup 16, 22-470 Zwierzyniec

<sup>5</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Ekologii i Hodowli Lasu, al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

<sup>6</sup> Dyplomanci

## Abstrakt

Powierzchniowy spływ wody stanowi naturalną część obiegu wody w przyrodzie, ale z punktu widzenia człowieka jest zjawiskiem niepożądanym. Najpoważniejsze w skutkach jest jego działanie erozyjne oraz skrócenie i przyspieszenie obiegu wody. W środowisku leśnym spływ powierzchniowy powstaje w zasadzie tylko na drogach, szlakach zrywkowych i składnicach, czyli na płaszczyznach o zmienionych przez człowieka właściwościach pokrywy gruntu – nawierzchniach. Zastosowane urządzenia odwadniające system komunikacyjny kierują zebraną wodę w postaci skoncentrowanych strug na stok, co może powodować powstanie poważnych liniowych szkód erozyjnych lub nawet lokalnych osuwisk. Celem podjętych badań było określenie przestrzennego rozkładu wilgotności gruntu w obszarze za wylotem urządzeń odwadniających drogi leśne w różnych warunkach podłoża gruntowego, również w kontekście zmian wybranych cech gruntu, mających wpływ na możliwości powstawania lokalnych osuwisk.

Do badań wyznaczono tereny badawcze o zróżnicowanych cechach geologicznych i morfologicznych – Gorce, Beskid Sądecki i Roztocze. W każdym z terenów zastosowano identyczną metodykę wyznaczania miejsc badań i prowadzenia pomiarów. Jedyną różnicą dotyczyła zmiany metody oznaczania wilgotności gruntu na Roztoczu z suszarkowo-wagowej na FDR (Frequency Domain Reflectometry), co pozwoliło również na wykonanie większej liczby powtórzeń. W każdym terenie wybrano drogę stokową z elementami odwadniającymi korpus i nawierzchnię drogi – przepusty i wodospusty różnej konstrukcji. Za wylotami tych urządzeń mierzono cechy terenu, gruntu i wilgotności gruntu w ustalonym porządku przestrzennym i w różnych stanach opadowych.

Uzyskane wyniki przestrzennego rozkładu wilgotności gruntu posiadają pewną grupę cech wspólnych oraz zróżnicowanie związane z odrębnością terenów badań. Statystyczna analiza danych, przeprowadzona w postaci analizy wariancji z takimi samymi hipotezami w celu otrzymania wyników z każdego terenu, wskazuje często na statystyczną istotność różnic średnich wilgotności w sesjach pomiarowych i obiektach oraz na istotność różnic średnich wilgotności pogrupowanych ze względu na głębokość pomiaru. Prawie nigdzie nie wykazano statystycznie istotnych różnic w średnich wilgotnościach pogrupowanych ze względu na usytuowanie miejsc pomiaru w stosunku do linii ścieku wody za wylotem z urządzeń odwadniających oraz w stosunku do krawędzi pobocza drogi. Te ostatnie zależności były oczekiwane i są widoczne w analizie opisowej średnich, ale nie stwierdzono istotności statystycznej.

**Słowa kluczowe:** Gorce, Beskid Sądecki, Roztocze, drogi stokowe, obiekty odwadniające, teren za wylotem, uwilgotnienie gruntu

## 1. Wstęp

Zlewnie leśne charakteryzują się bardzo dużą zdolnością pochłaniania wody opadowej ze względu na charakter pokrycia powierzchni i strukturę gruntu. Spływ powierzchniowy w tych naturalnych i niezakłóconych warunkach pojawia się bardzo rzadko, w przypadkach występowania płytkiego profilu gruntowego, przesycenia pojemności po ekstremalnych opadach lub gwałtowniejszych roztopach wiosennych. Zlewnie zagospodarowane posiadają na swoim terenie sieci drogowe udostępniające drzewostany, które są niezbędne do prowadzenia gospodarki leśnej czy też zadań z zakresu ochrony przyrody (Czerniak 2013). Niestety przebieg dróg zmienia naturalne kierunki spływu wody po stokach poprzez jej kumulację w rowach i innych urządzeniach odwadniających korpus i nawierzchnię. Nagromadzona woda dalej wypływa na stok, ale w odsunięciu od kilkunastu do kilkuset metrów, a zdarza się, że dzieje się to w innej mikrozlewni. Zmienia to warunki zasilania konkretnych potoków, zwłaszcza w ich górnych częściach (Wemple i Jones 2003; Gołąb i in. 2006; Gołąb 2011). Ten skumulowany odpływ wody z przepustów i wodospu-

stów powoduje również zagrożenie erozyjne niżej położonych stoków. Może to doprowadzić do rozcięć liniowych powierzchni gruntu lub nawet osuwisk. O zagrożeniach tego typu piszą Zydroń i Cholewa (2014) w sytuacjach dużych zmian konsystencji gruntu, spowodowanych wysyceniem pojemności wodnej profilu (ekstremalne opady, roztopy) i przekroczeniem lokalnych warunków stabilności stoku.

W opisywanym wyżej kontekście interesujące wydają się badania przestrzennego rozkładu wilgotności gruntu w obszarach, na które skierowano odpływ wody z urządzeń odwadniających drogi, ponieważ w gruntach fliszowych o większej zawartości części pylastych i ilastych, a także tych o zmniejszonej filtracji mogą powstawać osuwiska właśnie w miejscach lokalizacji obiektów odwadniających (Bardel 2012).

Badania innych autorów, opisywane jako przestrzenny rozkład wilgotności gleb rolniczych (Usowicz i Usowicz 2004; Rutkowski i in. 2007), wykonywane były przy użyciu podobnych metod pomiaru wilgotności – konduktometrycznej i TDR (Time Domain Reflectometry) oraz interpolacji metodą krigingu (interpolacja geostatystyczna). Jednak realizowano je na terenach upraw rolniczych, w zewnętrznych i płytkich poziomach gleby, w większej siatce geometrycznej oraz, co ważne, w innych celach naukowych.

Celem badań w niniejszej pracy było porównanie przestrzennego rozkładu wilgotności gruntu w obszarze za wylotem urządzeń odwadniających drogi leśne oraz ocena związanego z tym zagrożenia występowania lokalnych osuwisk.

## 2. Materiał i metody

### 2.1. Teren badań

Badania prowadzono w 4 lokalizacjach o różnej charakterystyce geologicznej, tj. Gorcach, Beskidzie Sądeckim oraz Roztoczu. W tej ostatniej lokalizacji wyznaczono 2 powierzchnie: jedną na podłożu marglistym, drugą na podłożu piaszczystym. W celu rozróżnienia przywoływanych w dalszej części pracy danych i obiektów, numer każdego oznaczenia danych bądź obiektów będzie rozpoczynał się od oznaczenia terenu badań, odpowiednio: Gorce – G, Beskid Sądecki – BS, Roztocze (margle) – RM, Roztocze (piaski) – RP.

W Gorcach i Beskidzie Sądeckim do badań wybrano po 4 obiekty odwadniające, znajdujące się na tych samych drogach leśnych, rozmieszczone w odległościach od kilkunastu do kilkuset metrów od siebie, zaś na Roztoczu po 2 obiekty również usytuowane w podobnych odległościach.

### 2.1.1. Gorce

Badania wykonano w północno-zachodniej części Gorczańskiego Parku Narodowego, w Obwodzie Ochronnym Suhora, przy drodze stokowej w początkowej części ścieżki edukacyjnej „Na Turbaczyk”. Wybrane obiekty badawcze leżą w pasie regla dolnego, na wysokościach ok. 700–800 m n.p.m.

Pod względem geologicznym w obszarze tym występują utwory fliszowe, złożone z piaskowców, zlepieńców i łupków płaszczowiny magurskiej. Na bazie tych utworów w przewadze wytworzyły się gleby brunatne z dużą zawartością frakcji szkieletowej. Wyżej położone obszary Gorców są podatne na działanie erozji, o czym świadczą głębokie rozcięcia dolin i stoki o znacznych spadkach. Odpływ wody z terenu objętego badaniami skierowany jest na północ, odbywa się przez potoki: Porębiankę i Koninkę. Klimat ma charakter typowo górski, z wyróżniającymi się piętrami klimatycznymi. Sumy roczne opadów wahają się granicach od 800 do 1 250 mm. Średnie roczne temperatury w piętrach klimatycznych osiągają odpowiednio: +6°C, +4°C i +3°C (Kondracki 2011; <http://gorczanski-park.pl>). W obszarze badań dominuje bór jodłowo-świerkowy z domieszką buka. Sieć dróg leśnych w dolnych partiach stoków i w dolinach jest dobrze rozwinięta.

Wyniki podstawowych pomiarów i opisy każdego z 4 wybranych na tym obszarze obiektów (2 przepusty i 2 wodospusty) oraz samego terenu przedstawiono w ujęciu tabelarycznym (tab. 1).

**Tabela 1.** Charakterystyka obiektów badawczych zlokalizowanych w Gorcach

| Obiekt<br>Parametr / Cecha                              | Przepust 1<br>G-P1            | Przepust 2<br>G-P2            | Wodospust 1<br>G-W1     | Wodospust 2<br>G-W2      |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Długość<br>[m]  | 4,75                          | 5,50                          | 5,65                    | 5,70                     |
| Kąt skrzyżowania<br>osi obiektu z osią<br>jezdni<br>[°] | 74                            | 61                            | 31                      | 56                       |
| Materiał  | beton, rura<br>prefabrykowana | beton, rura<br>prefabrykowana | drewno<br>(jedna żerdź) | drewno<br>(trzy żerdzie) |
| Światło<br>[m]  | 0,30                          | 0,30                          | –                       | 0,14                     |
| Wylot   | nieumocniony                  | nieumocniony                  | nieumocniony            | nieumocniony             |
| Podłużny spadek<br>obiektu<br>[%]                       | 11,5                          | 9,5                           | 4,0                     | 4,5                      |



Tabela 1. cd.

| Obiekt<br>Parametr / Cecha                | Przepust 1<br>G-P1   | Przepust 2<br>G-P2 | Wodospust 1<br>G-W1 | Wodospust 2<br>G-W2 |
|---|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Podłużny spadek<br>jezdni<br>[%]          | 14,0                 | 13,0               | 5,5                 | 5,5                 |
| Poprzeczny spadek<br>jezdni<br>[%]        | 4,0<br>doskokowy     | 5,0<br>doskokowy   | 2,5<br>doskokowy    | 3,0<br>doskokowy    |
| Średni spadek<br>terenu za wylotem<br>[%] | 49,5                 | 58,8               | 72,2                | 59,4                |
| Szerokość jezdni<br>[m]                   | 3,00                 | 3,70               | 2,60                | 3,05                |
| Szerokość pobocza<br>[m]                  | 0,40                 | 0,80               | 0,50                | 0,95                |
| Nawierzchnia                              | gruntowa profilowana |                    |                     |                     |
| Szerokość rowu<br>przystokowego<br>[m]    | 0,80                 | 0,70               | –                   | 0,90                |
| Głębokość rowu<br>przystokowego<br>[m]    | 0,30                 | 0,25               | –                   | 0,20                |

### 2.1.2. Beskid Sądecki

Badania zlokalizowano w południowo-wschodniej części Leśnego Zakładu Doświadczalnego Krynica-Zdrój Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, w leśnictwie Tylicz, przy drodze leśnej łączącej drogę publiczną Tylicz-Muszynka i dolinę potoku Pusta. Wybrane obiekty leżą w pasie regla dolnego, na wysokościach ok. 720–800 m n.p.m. Geologicznie jest to obszar fliszowy, zbudowany z piaskowców i zwietrzliny płaszczowiny magurskiej. Dominują gleby brunatne kwaśne z okruchami szkieletu glebowego. Najczęściej występującym typem siedliskowym lasu jest las górski świeży. Średnia roczna suma opadów wynosi ok. 1 000 mm (najwyższe sumy dobowe obserwuje się od czerwca do sierpnia, najniższe od listopada do marca). Średnia roczna temperatura osiąga wartość +5,3°C (waha się w granicach od +3,8°C do +6,8°C) (Kondracki 2011; <http://lzdokrynica.ur.krakow.pl>). W obszarze objętym pomiarem leśność wynosi ok. 56%, w drzewostanie dominują następujące gatunki: jodła – ok. 41%, buk – ok. 22%, świerk – ok. 18%, sosna – ok. 11%. Sieć dróg leśnych jest dobrze rozwinięta.

Wyniki pomiarów i opisy każdego z 4 wybranych na tym obszarze obiektów (4 wodospusty) oraz terenu przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Charakterystyka obiektów badawczych zlokalizowanych w Beskidzie Sądeckim

| Obiekt<br>Parametr / Cecha                           | Wodospust 1<br>BS-W1 | Wodospust 2<br>BS-W2 | Wodospust 3<br>BS-W3 | Wodospust 4<br>BS-W4 |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Długość<br>[m]                                       | 4,40                 | 5,95                 | 6,05                 | 4,05                 |
| Kąt skrzyżowania osi<br>obiektu z osią jezdni<br>[°] | 60                   | 60                   | 58                   | 88                   |
| Materiał   | żerdzie<br>drewniane | tarcica              | tarcica              | żerdzie<br>drewniane |
| Światło<br>[m]                                       | 0,07                 | 0,10                 | 0,10                 | 0,08                 |
| Wylot  | nieumocniony         | nieumocniony         | nieumocniony         | nieumocniony         |
| Podłużny spadek<br>obiektu<br>[%]                    | 4,5                  | 7,0                  | 8,5                  | 5,0                  |
| Podłużny spadek<br>jezdni<br>[%]                     | 7,5                  | 5,5                  | 11,0                 | 9,5                  |
| Poprzeczny spadek<br>jezdni<br>[%]                   | 4,5<br>odstokowy     | 5,0<br>odstokowy     | 3,0<br>odstokowy     | 4,0<br>dostokowy     |
| Średni spadek terenu<br>za wylotem<br>[%]            | 43,0                 | 30,0                 | 30,0                 | 24,0                 |
| Szerokość jezdni<br>[m]                              | 2,70                 | 3,20                 | 2,30                 | 2,60                 |
| Szerokość pobocza<br>[m]                             | 0,60                 | 0,50                 | 0,80                 | 0,40                 |
| Nawierzchnia   | gruntowa profilowana |                      |                      |                      |
| Szerokość rowu<br>przystokowego<br>[m]               | –                    | 1,20                 | 1,10                 | –                    |
| Głębokość rowu<br>przystokowego<br>[m]               | –                    | 0,35                 | 0,35                 | –                    |

### 2.1.3. Roztocze

Badania (na podłożu marglistym) zlokalizowano w północnej części Roztoczańskiego Parku Narodowego (RPN), w Obwodzie Ochronnym Jarugi, przy drodze leśnej o nazwie zwyczajowej „Kozłowa Droga”, na granicy oddziałów 54. i 36. Miejsce, w którym przeprowadzano badania na podłożu piaszczystym, położone jest również w Obwodzie Ochronnym Jarugi, w oddziale 36a, przy drodze noszącej nazwę potoczną „Szlingiertowska”. Leżące w stosunkowo bliskiej odległości od siebie obszary potraktowano oddzielnie na podstawie dostępnych w RPN opisów glebowych (Chodorowski i in. 2000). Obydwa obszary leżą na zbliżonej wysokości ok. 240–250 m n.p.m. (<http://roztoczan-skipn.pl/pl>).

W budowie geologicznej obszaru badań (blok północno-wschodni Żurawnica–Kosobudy, część wschodnia) występują opoki i opoki margliste dolnego mastrychtu. Na glinach, zwietrzelinach pokrywających utwory kredowe, wytworzyły się gleby typu rędziny i gleby brunatne (Brzezińska-Wójcik i Harasimiuk 2013; Dębicki i in. 2013). Ukształtowanie terenu jest urozmaicone, z miejscowo dużymi deniwelacjami, jednak w obszarze badań teren ma charakter lekko faliisty, bez dużych spadków (Brzezińska-Wójcik i Hnatiuk 2015).

Sieć wodna w RPN cechuje się niewielką gęstością i obejmuje w części zlewnie rzek: Wieprz i Tanew. Dostępne dane wskazują na ważną cechę miejscowego systemu hydrologicznego, którą jest duża zasobność wód podziemnych związana ze znaczną przepuszczalnością gruntów piaszczystych i pyłowych oraz sporą pojemnością wodną w podłożu skalnym. Dość obfite opady – średnia roczna suma sięga 736 mm – retencjonowane są w gruncie, co przekłada się na niewielką gęstość systemu rzecznoego oraz obecność suchych dolin i wąwozów (Bartoszewski i Michalczyk 2012, 2013).

Na terenie Roztocza obserwuje się przesilenie wpływu klimatu oceanicznego i kontynentalnego. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi 7,9°C, średnia roczna amplituda temperatury powietrza – 21,4°C, średnia liczba dni z pokrywą śnieżną – 71, długość okresu wegetacyjnego – 216 dni (Kondracki 2011).

Sieć dróg leśnych cechuje się nieregularnością. Duża część dróg posiada nawierzchnię gruntową, często jest tylko wyprofilowana bez zagęszczenia, zaś urządzenia odwadniające koronę drogi typu wodospustów zainstalowane są na nielicznych odcinkach dróg, ze względu na ich przeważnie niewielkie spadki podłużne (tab. 3).

**Tabela 3.** Charakterystyka obiektów badawczych zlokalizowanych na Roztoczu, na terenie o podłożu marglistym i piaszczystym

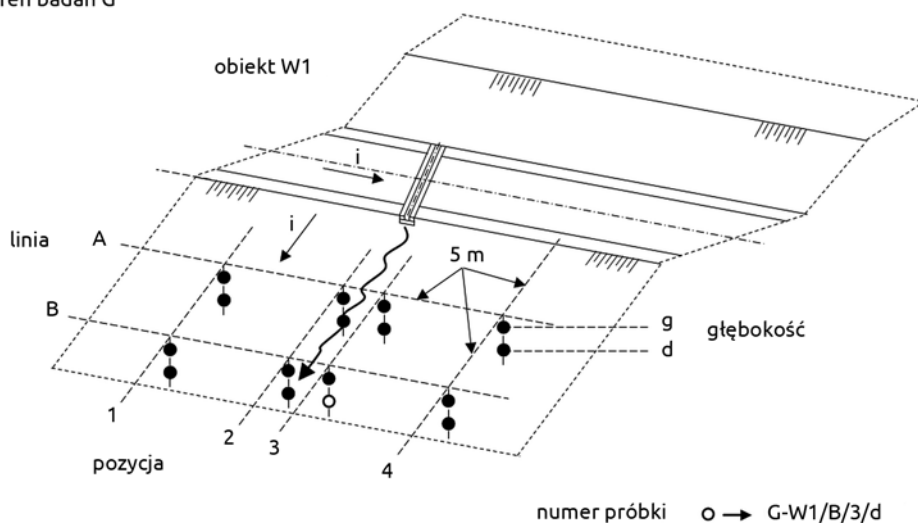
| Obiekt<br>Parametr / Cecha                              | Wodospust 1<br>RM-W1                   | Wodospust 2<br>RM-W2            | Wodospust 3<br>RP-W3   | Wodospust 4<br>RP-W4   |
|---|--|---------------------------------|--|--|
| Długość<br>[m]  | 5,15                                   | 5,65                            | 6,40   | 6,90   |
| Kąt skrzyżowania<br>osi obiektu z osią<br>jezdni<br>[°] | 46                                     | 50                              | 50   | 50   |
| Materiał  | drewno<br>(pojedyncza<br>żerdź)        | drewno<br>(pojedyncza<br>żerdź) | drewno<br>(pojedyncza<br>żerdź)  | drewno<br>(pojedyncza<br>żerdź)  |
| Światło<br>[m]  | -                                      | -                               | -  | -  |
| Wylot   | nieumocniony                           | nieumocniony                    | nieumocniony   | nieumocniony   |
| Podłużny spadek<br>obiektu<br>[%]                       | 7,5                                    | 7,5                             | 4,3  | 3,2  |
| Podłużny spadek<br>jezdni<br>[%]                        | 8,0                                    | 6,0                             | 3,2  | 3,0  |
| Poprzeczny<br>spadek jezdni<br>[%]                      | 4,0<br>odstokowy                       | 6,0<br>odstokowy                | powyżej<br>wodospustu:<br>odstokowy 5,1<br>poniżej<br>wodospustu:<br>dostokowy 1,2 | powyżej<br>wodospustu:<br>odstokowy 5,0<br>poniżej<br>wodospustu:<br>dostokowy 3,8 |
| Średni spadek<br>terenu za wylotem<br>[%]               | 8,0                                    | 13,0                            | 4,9  | 8,3  |
| Szerokość jezdni<br>[m]                                 | 3,20                                   | 2,70                            | 3,30   | 3,40   |
| Szerokość<br>pobocza<br>[m]                             | 0,80                                   | 0,60                            | 0,50   | 0,50   |
| Nawierzchnia  | gruntowa profilowana, bez zagęszczenia |                                 |  |  |

## 2.2. Metodyka

W ramach prac terenowych przy każdym z wyznaczonych obiektów odwadniania drogi wyznaczono punkty pomiaru wilgotności gruntu według tego samego schematu (ryc. 1). Po wytyczeniu linii odpływu wody z obiektu wyznaczono umowną linię „A”, usytuowaną 5 m poniżej krawędzi pobocza (mierząc po stoku), i linię „B” znajdującą się 5 m poniżej linii „A”. Równoległe do linii spływu wody za wylotem wyznaczono 2 linie, nazywane dalej pozycjami numer 2 oraz 3. Pozycje o numerach 1 i 4 usytuowano na zewnątrz, w odległości 5 m w stosunku do pozycji 2 i 3. W celu porównania danych uzyskiwanych na wszystkich terenach numery pozycji uzależniono od spadku niwelety – pozycja numer 1 zawsze leżała po stronie najwyższych rzędnych, a pozycja numer 4 po stronie najniższych rzędnych. Na bazie tak rozplanowanej siatki wilgotność mierzono na 2 poziomach głębokości:  $g = 20$  cm i  $d = \text{ok. } 60$  cm (bez nadkładu organicznego). W Gorcach i Beskidzie Sądeckim w węzłach tej siatki pobierano próbki do określenia wilgotności w laboratorium metodą suszarkowo-wagową, zaś na Roztoczu na cały okres badań montowano w tychże węzłach na odpowiedniej głębokości rurki plastikowe, do których wsuwano sondę FDR (Frequency Domain Reflectometry) (Minet i in. 2010; Instrukcja obsługi. Sonda ML3 ThetaProbe).

W Gorcach i Beskidzie Sądeckim wykonano po 3 serie pomiaru wilgotności gruntu w różnych warunkach opadowych (sumy opadów w ciągu kilku dni

teren badań G



Ryc. 1. Schemat miejsc pobierania próbek gruntu (lub pomiaru wilgotności *in situ*) i ich numeracja

poprzedzających pomiar), a na Roztoczu po 6. Tabele wyników tych pomiarów i sum opadów zawarto w sprawozdaniach z badań: Gołąb 2015, Gołąb i Urban 2016, Gołąb i Godzisz 2017, Gołąb i Adamowicz 2018.

Prace kameralne polegały na analizie przestrzennego rozkładu wilgotności gruntu, gdzie do wykreślenia izolinii zastosowano metodę krigingu, korzystając z programu Surfer v. 9.

Przedmiotem analizy statystycznej zebranego materiału – osobnej dla każdego terenu badań – było przetestowanie hipotezy, że przestrzenny rozkład wilgotności gruntu za wylotem urządzeń odwadniających drogi leśnej nie zależy od położenia miejsca badania wilgotności względem wylotu urządzenia, a w szczególności od: 1) linii spływu wody z urządzenia odwadniającego (pozycja), 2) krawędzi pobocza (linia), 3) głębokości w profilu (głębokość).

### 3. Wyniki

#### 3.1. Zróznicowanie wilgotności gruntu

W poniższych tabelach dotyczących poszczególnych terenów badań zamieszczono średnie wartości wilgotności aktualnej próbek gruntu w różnych układach.

**Tabela 4.** Wilgotności średnie (wilgotność wagowa [%]) dla układów opisowej analizy danych w obszarze badawczym Gorce

| Obiekt |         | Sesja I | Sesja II | Sesja III | Średnia | $\Delta_{\max} w$ |
|--------|---------|---------|----------|-----------|---------|-------------------|
| G-P1   | średnia | 26,08   | 23,69    | 27,41     | 25,72   | 3,72              |
|        | A       | 24,82   | 23,24    | 26,61     | 24,89   | 3,37              |
|        | B       | 27,34   | 24,14    | 28,21     | 26,56   | 4,07              |
|        | 1       | 28,16   | 27,04    | 26,01     | 27,07   | 2,15              |
|        | 2       | 26,71   | 23,35    | 24,98     | 25,01   | 3,36              |
|        | 3       | 25,23   | 23,91    | 33,12     | 27,42   | 9,22              |
|        | 4       | 24,22   | 20,46    | 25,51     | 23,40   | 5,06              |
|        | g       | 29,80   | 25,98    | 29,56     | 28,45   | 3,82              |
|        | d       | 22,35   | 21,39    | 25,25     | 23,00   | 3,86              |
| G-P2   | średnia | 30,82   | 28,21    | 27,17     | 28,73   | 3,65              |
|        | A       | 27,57   | 28,51    | 26,97     | 27,68   | 1,54              |
|        | B       | 34,07   | 27,91    | 27,37     | 29,78   | 6,70              |

Tabela 4. cd.

| Obiekt            |         | Sesja I | Sesja II | Sesja III | Średnia | $\Delta_{\max} w$ |
|-------------------|---------|---------|----------|-----------|---------|-------------------|
|                   | 1       | 24,94   | 23,84    | 23,49     | 24,09   | 1,45              |
|                   | 2       | 32,78   | 27,14    | 25,62     | 28,52   | 7,16              |
|                   | 3       | 39,58   | 34,90    | 30,49     | 34,99   | 9,10              |
|                   | 4       | 25,96   | 26,96    | 29,08     | 27,33   | 3,12              |
|                   | g       | 35,76   | 32,29    | 29,11     | 32,38   | 6,65              |
|                   | d       | 25,88   | 24,13    | 25,24     | 25,08   | 1,75              |
|                   |         |         |          |           |         |                   |
| G-W1              | średnia | 25,06   | 23,93    | 26,07     | 25,02   | 2,14              |
|                   | A       | 26,31   | 23,51    | 26,48     | 25,43   | 2,98              |
|                   | B       | 23,81   | 24,35    | 25,66     | 24,61   | 1,85              |
|                   | 1       | 27,24   | 27,71    | 26,39     | 27,11   | 1,32              |
|                   | 2       | 24,06   | 23,24    | 26,09     | 24,47   | 2,85              |
|                   | 3       | 25,68   | 22,18    | 25,75     | 24,54   | 3,56              |
|                   | 4       | 23,26   | 22,58    | 26,06     | 23,97   | 3,48              |
|                   | g       | 29,84   | 26,02    | 29,91     | 28,59   | 3,89              |
|                   | d       | 20,28   | 21,84    | 22,24     | 21,45   | 1,96              |
|                   |         |         |          |           |         |                   |
| G-W2              | średnia | 28,09   | 31,12    | 32,40     | 30,54   | 4,32              |
|                   | A       | 25,91   | 28,69    | 28,54     | 27,71   | 2,78              |
|                   | B       | 30,26   | 33,55    | 36,26     | 33,36   | 6,00              |
|                   | 1       | 27,85   | 34,33    | 39,90     | 34,03   | 12,05             |
|                   | 2       | 30,24   | 31,96    | 29,91     | 30,71   | 2,05              |
|                   | 3       | 28,72   | 32,47    | 31,46     | 30,88   | 3,76              |
|                   | 4       | 25,53   | 25,73    | 28,33     | 26,53   | 2,80              |
|                   | g       | 31,82   | 35,37    | 35,81     | 34,33   | 3,98              |
|                   | d       | 24,35   | 26,88    | 29,00     | 26,74   | 4,65              |
|                   |         |         |          |           |         |                   |
| Średnie dla sesji |         | 27,51   | 26,74    | 28,26     |         |                   |



**Tabela 5.** Wilgotności średnie (wilgotność wagowa [%]) dla układów opisowej analizy danych w obszarze badawczym Beskid Sądecki

| Obiekt |                | Sesja I | Sesja II | Sesja III | Średnia | $\Delta_{\max w}$ |
|--------|----------------|---------|----------|-----------|---------|-------------------|
| BS-W1  | <b>średnia</b> | 23,20   | 22,27    | 29,48     | 24,98   | 7,22              |
|        | A              | 23,90   | 25,26    | 32,41     | 27,19   | 8,51              |
|        | B              | 22,49   | 19,27    | 26,55     | 22,77   | 7,28              |
|        | 1              | 25,89   | 21,78    | 27,06     | 24,91   | 5,28              |
|        | 2              | 24,56   | 24,73    | 34,05     | 27,78   | 9,48              |
|        | 3              | 20,56   | 23,38    | 29,87     | 24,60   | 9,31              |
|        | 4              | 21,77   | 19,17    | 26,95     | 22,63   | 7,78              |
|        | g              | 28,90   | 26,55    | 34,02     | 29,82   | 7,47              |
|        | d              | 17,49   | 17,99    | 24,95     | 20,14   | 7,46              |
|        |                |         |          |           |         |                   |
| BS-W2  | <b>średnia</b> | 28,41   | 25,85    | 27,63     | 27,30   | 2,56              |
|        | A              | 29,97   | 25,61    | 29,67     | 28,42   | 4,36              |
|        | B              | 26,85   | 26,09    | 25,58     | 26,18   | 1,27              |
|        | 1              | 25,98   | 22,68    | 27,86     | 25,51   | 5,18              |
|        | 2              | 29,54   | 29,12    | 31,67     | 30,11   | 2,55              |
|        | 3              | 29,00   | 26,32    | 25,56     | 26,96   | 3,44              |
|        | 4              | 29,10   | 25,29    | 25,41     | 26,60   | 3,81              |
|        | g              | 33,89   | 32,41    | 33,70     | 33,33   | 1,48              |
|        | d              | 22,93   | 19,29    | 21,55     | 21,26   | 3,63              |
|        |                |         |          |           |         |                   |
| BS-W3  | <b>średnia</b> | 21,90   | 17,63    | 23,27     | 20,93   | 5,63              |
|        | A              | 21,40   | 15,62    | 22,47     | 19,83   | 6,84              |
|        | B              | 22,41   | 19,65    | 24,07     | 22,04   | 4,42              |
|        | 1              | 22,49   | 15,79    | 25,20     | 21,16   | 9,40              |
|        | 2              | 25,97   | 20,26    | 28,47     | 24,90   | 8,21              |
|        | 3              | 22,83   | 19,18    | 21,23     | 21,08   | 3,65              |
|        | 4              | 16,32   | 15,30    | 18,18     | 16,60   | 2,88              |
|        | g              | 24,94   | 19,76    | 25,77     | 23,49   | 6,01              |
|        | d              | 18,87   | 15,50    | 20,76     | 18,38   | 5,26              |
|        |                |         |          |           |         |                   |
| BS-W4  | <b>średnia</b> | 18,09   | 16,62    | 21,18     | 18,63   | 4,56              |
|        | A              | 17,65   | 17,83    | 20,97     | 18,82   | 3,32              |
|        | B              | 18,52   | 15,42    | 21,38     | 18,44   | 5,97              |
|        | 1              | 16,79   | 16,06    | 16,07     | 16,31   | 0,74              |
|        | 2              | 15,69   | 16,20    | 21,86     | 17,91   | 6,17              |

Tabela 5. cd.

| Obiekt                   | Sesja I      | Sesja II     | Sesja III    | Średnia | $\Delta_{\max} w$ |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|---------|-------------------|
| 3                        | 22,22        | 17,29        | 25,25        | 21,59   | 7,96              |
| 4                        | 17,65        | 16,95        | 21,53        | 18,71   | 4,58              |
| g                        | 21,82        | 20,60        | 25,54        | 22,65   | 4,95              |
| d                        | 14,36        | 12,65        | 16,81        | 14,61   | 4,16              |
|                          |              |              |              |         |                   |
| <b>Średnie dla sesji</b> | <b>22,90</b> | <b>20,59</b> | <b>25,39</b> |         |                   |

Tabela 6. Wilgotności średnie (wilgotność objętościowa [%]) dla układów opisowej analizy danych w obszarze badawczym Roztocze – podłoże margliste

| Obiekt                   | Sesja I      | Sesja II     | Sesja III    | Sesja IV     | Sesja V      | Sesja VI     | Średnia | $\Delta_{\max} w$ |       |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|-------------------|-------|
| RM-W1                    | średnia      | 18,50        | 16,23        | 38,08        | 46,98        | 48,11        | 46,89   | 35,80             | 31,88 |
|                          | A            | 18,09        | 16,08        | 40,28        | 45,48        | 46,64        | 45,79   | 35,39             | 30,56 |
|                          | B            | 18,91        | 16,39        | 35,88        | 48,49        | 49,59        | 48,00   | 36,21             | 33,20 |
|                          | 1            | 20,05        | 18,93        | 40,00        | 46,73        | 46,95        | 47,28   | 36,65             | 28,35 |
|                          | 2            | 11,93        | 11,00        | 29,25        | 36,28        | 37,25        | 35,10   | 26,80             | 26,25 |
|                          | 3            | 19,88        | 16,85        | 40,38        | 49,48        | 51,53        | 50,83   | 38,15             | 34,68 |
|                          | 4            | 22,15        | 18,15        | 42,68        | 55,45        | 56,73        | 54,38   | 41,59             | 38,58 |
|                          | g            | 15,39        | 13,88        | 46,46        | 47,13        | 46,75        | 45,24   | 35,81             | 33,25 |
| d                        | 21,61        | 18,59        | 29,69        | 46,84        | 49,48        | 48,55        | 35,79   | 30,89             |       |
|                          |              |              |              |              |              |              |         |                   |       |
| RM-W2                    | średnia      | 20,38        | 16,91        | 49,09        | 51,58        | 53,25        | 52,44   | 40,61             | 36,34 |
|                          | A            | 19,93        | 17,43        | 49,94        | 52,80        | 52,99        | 52,93   | 41,00             | 35,56 |
|                          | B            | 20,84        | 16,40        | 48,25        | 50,36        | 53,51        | 51,95   | 40,22             | 37,11 |
|                          | 1            | 22,10        | 18,38        | 40,93        | 53,28        | 54,38        | 55,48   | 40,75             | 37,10 |
|                          | 2            | 19,90        | 17,53        | 52,48        | 51,80        | 54,05        | 51,58   | 41,22             | 36,53 |
|                          | 3            | 21,60        | 17,90        | 52,50        | 52,40        | 55,20        | 53,35   | 42,16             | 37,30 |
|                          | 4            | 17,93        | 13,85        | 50,48        | 48,85        | 49,38        | 49,35   | 38,30             | 36,63 |
|                          | g            | 14,91        | 14,31        | 52,66        | 51,59        | 53,74        | 53,13   | 40,06             | 39,43 |
| d                        | 25,85        | 19,51        | 45,53        | 51,58        | 52,76        | 51,75        | 41,16   | 33,25             |       |
|                          |              |              |              |              |              |              |         |                   |       |
| <b>Średnie dla sesji</b> | <b>19,44</b> | <b>16,57</b> | <b>43,58</b> | <b>49,28</b> | <b>50,68</b> | <b>49,67</b> |         |                   |       |

**Tabela 7.** Wilgotności średnie (wilgotność objętościowa [%]) dla układów opisowej analizy danych w obszarze badawczym Roztocze – podłoże piaszczyste

| Obiekt            | Sesja I | Sesja II | Sesja III | Sesja IV | Sesja V | Sesja VI | Średnia | $\Delta_{\max} w$ |       |
|-------------------|---------|----------|-----------|----------|---------|----------|---------|-------------------|-------|
| RP-W3             | średnia | 11,31    | 10,46     | 18,63    | 15,63   | 13,82    | 18,20   | 14,68             | 8,16  |
|                   | A       | 9,33     | 10,53     | 20,63    | 15,91   | 13,74    | 12,94   | 13,84             | 11,30 |
|                   | B       | 13,30    | 10,40     | 16,63    | 15,35   | 13,90    | 23,46   | 15,51             | 13,06 |
|                   | 1       | 8,60     | 8,15      | 12,30    | 10,05   | 8,85     | 11,83   | 9,96              | 4,15  |
|                   | 2       | 15,60    | 15,65     | 26,65    | 20,70   | 17,60    | 25,30   | 20,25             | 11,05 |
|                   | 3       | 8,58     | 6,83      | 14,30    | 13,25   | 12,78    | 17,00   | 12,12             | 10,18 |
|                   | 4       | 12,48    | 11,23     | 21,25    | 18,53   | 16,05    | 18,68   | 16,37             | 10,03 |
|                   | G       | 14,11    | 12,00     | 24,45    | 18,79   | 15,66    | 20,56   | 17,60             | 12,45 |
|                   | D       | 8,51     | 8,93      | 12,80    | 12,48   | 11,98    | 15,84   | 11,75             | 7,33  |
| RP-W4             | średnia | 12,19    | 10,81     | 17,62    | 16,25   | 13,71    | 16,53   | 14,52             | 6,81  |
|                   | A       | 11,50    | 10,14     | 20,84    | 16,13   | 13,96    | 14,13   | 14,45             | 10,70 |
|                   | B       | 12,88    | 11,48     | 14,40    | 16,38   | 13,45    | 18,94   | 14,59             | 7,46  |
|                   | 1       | 12,00    | 10,40     | 11,95    | 13,10   | 11,35    | 11,10   | 11,65             | 2,70  |
|                   | 2       | 11,38    | 9,85      | 19,53    | 17,83   | 15,63    | 20,48   | 15,78             | 10,63 |
|                   | 3       | 13,38    | 11,53     | 21,85    | 19,30   | 15,28    | 20,40   | 16,95             | 10,33 |
|                   | 4       | 12,00    | 11,45     | 17,15    | 14,78   | 12,58    | 14,15   | 13,68             | 5,70  |
|                   | G       | 15,59    | 13,29     | 22,11    | 18,95   | 14,90    | 16,69   | 16,92             | 8,83  |
|                   | D       | 8,79     | 8,33      | 13,13    | 13,55   | 12,51    | 16,38   | 12,11             | 8,05  |
| Średnie dla sesji | 11,75   | 10,63    | 18,12     | 15,94    | 13,76   | 17,37    |         |                   |       |

W tabeli 8 zamieszczono charakterystykę gruntów z obszarów badań. W Gorcach i Beskidzie Sądeckim badania wykonano na próbkach pobranych do analizy wilgotności, zaś dla Roztocza wykorzystano istniejące opisy glebowe (Chodorowski i in. 2000).

Tabela 8. Podstawowa charakterystyka gruntów

| Numer próbki | Grupa granulometryczna (PN-86/02480) | Fracja [%] |        |       | Współczynnik filtracji (uproszczona formuła Hazena) (Twardowski i Drożdżak 2006) |   |
|--------------|--------------------------------------|------------|--------|-------|--|---|
|              |                                      | piaskowa   | pyłowa | iłowa | $d_{10}$ [mm]  | $k_{10} = 0,0116 \cdot (d_{10})^2$ [ $m \cdot s^{-1}$ ] |
| G-P1/B/2/d   | glina                                | 51,5       | 35,1   | 13,9  | 0,00100  | $1,16 \cdot 10^{-8}$                                    |
| G-P1/B/3/d   | glina                                | 47,3       | 38,5   | 14,2  | 0,00090  | $9,40 \cdot 10^{-9}$                                    |
| G-P2/B/2/d   | glina                                | 51,1       | 34,1   | 14,8  | 0,00097  | $1,09 \cdot 10^{-8}$                                    |
| G-P2/B/3/d   | glina                                | 51,7       | 32,9   | 15,4  | 0,00070  | $5,68 \cdot 10^{-9}$                                    |
| G-W1/B/2/d   | glina                                | 52,9       | 32,6   | 14,5  | 0,00095  | $1,05 \cdot 10^{-8}$                                    |
| G-W1/B/3/d   | glina                                | 53,5       | 31,7   | 14,8  | 0,00091  | $9,61 \cdot 10^{-9}$                                    |
| G-W2/B/2/d   | glina                                | 59,2       | 30,5   | 10,4  | 0,00120  | $1,67 \cdot 10^{-8}$                                    |
| G-W2/B/3/d   | glina                                | 55,7       | 30,7   | 13,6  | 0,00100  | $1,16 \cdot 10^{-8}$                                    |
|              |                                      |            |        |       |  |   |
| BS-W1/B/2/d  | pył piaszczysty                      | 44,0       | 50,7   | 5,3   | 0,00120  | $1,67 \cdot 10^{-8}$                                    |
| BS-W1/B/3/d  | pył piaszczysty                      | 43,5       | 51,8   | 4,7   | 0,00110  | $1,40 \cdot 10^{-8}$                                    |
| BS-W2/B/2/d  | pył                                  | 23,4       | 67,8   | 8,8   | 0,00105  | $1,28 \cdot 10^{-8}$                                    |
| BS-W2/B/3/d  | pył piaszczysty                      | 37,7       | 56,5   | 5,6   | 0,00120  | $1,67 \cdot 10^{-8}$                                    |
| BS-W3/B/2/d  | pył piaszczysty                      | 43,9       | 50,3   | 5,8   | 0,00110  | $1,40 \cdot 10^{-8}$                                    |
| BS-W3/B/3/d  | pył piaszczysty                      | 47,6       | 46,5   | 5,9   | 0,00111  | $1,43 \cdot 10^{-8}$                                    |
| BS-W4/B/2/d  | pył piaszczysty                      | 51,4       | 41,6   | 7,0   | 0,00105  | $1,28 \cdot 10^{-8}$                                    |
| BS-W4/B/3/d  | pył piaszczysty                      | 57,8       | 36,8   | 5,4   | 0,00110  | $1,40 \cdot 10^{-8}$                                    |
|              |                                      |            |        |       |  |   |
| RM-W1/B/2/d  | ił                                   | 38,5       | 16,9   | 44,6  | 0,00020  | $4,64 \cdot 10^{-10}$                                   |
| RM-W1/B/3/d  |                                      |            |        |       |  |   |
| RM-W2/B/2/d  |                                      |            |        |       |  |   |
| RM-W2/B/3/d  |                                      |            |        |       |  |   |
|              |                                      |            |        |       |  |   |
| RP-W3/B/2/d  | piasek gliniasty                     | 78,0       | 19,0   | 3,0   | 0,00700  | $5,68 \cdot 10^{-7}$                                    |
| RP-W3/B/3/d  |                                      |            |        |       |  |   |
| RP-W4/B/2/d  |                                      |            |        |       |  |   |
| RP-W4/B/3/d  |                                      |            |        |       |  |   |

Dla Gorców i Beskidu Sądeckiego pomiary własne według Norm: PN-86/B-02480, PN-EN ISO 14688-1:2006, PN-ISO 11465:1999, dla Roztocza na podstawie: Chodorowski i in. 2000.

Oznaczenia:  $d_{10}$  – średnica miarodajna,  $k_{10}$  – współczynnik filtracji (temperatura wody 10°C)

### 3.2. Analiza przestrzennego rozkładu wilgotności

Graficzną analizę przestrzennego rozkładu wilgotności gruntu dla każdego obszaru badań wykonano w płaszczyznach pionowych, przecinających teren wzdłuż linii: A i B, wzdłuż linii siatki (pozycji) nr 1, 2, 3 i 4 oraz w płaszczyznach spadku stoku, odpowiadających danej głębokości pobierania próbek gruntu (d i g). Jako przykład na rycinie 2 pokazano linie izometralne w płaszczyznach d i g dla wybranych obiektów z każdego terenu: G-P2 (seria I), BS-W4 (seria III), RM-W1 (seria III), RP-W4 (seria III). Do wykreślenia izolinii użyto funkcji interpolującej kriging (program Surfer v. 9). Pozostałe zobrazowania wilgotności w odpowiednich płaszczyznach zamieszczone są w sprawozdaniach z badań.

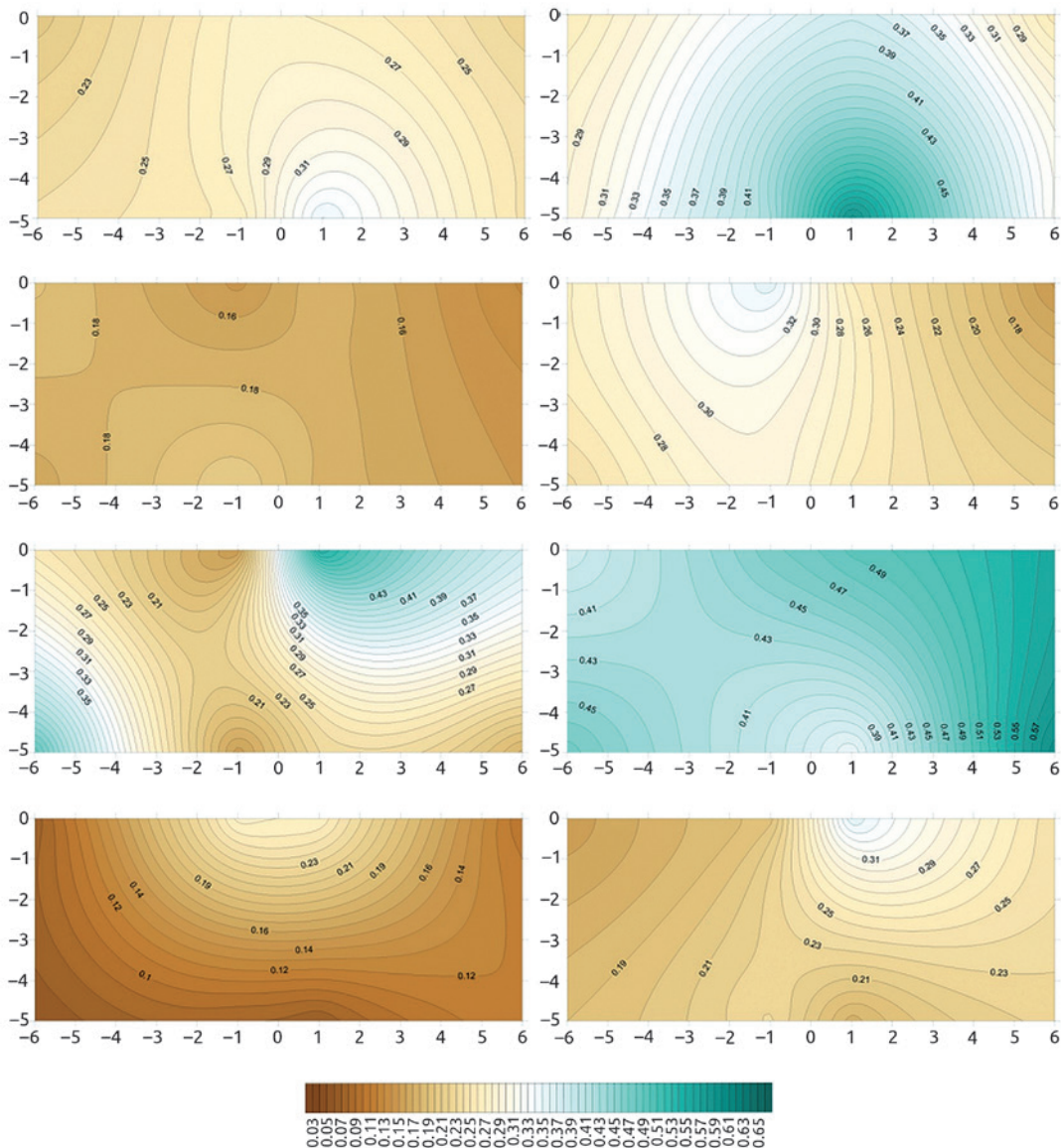
Komplet czynników klasyfikacyjnych wykonanych analiz statystycznych oraz wszystkie wyniki tych analiz zestawiono w sprawozdaniach z badań. Poniżej (tab. 9) przytoczono tylko te analizy, dla których wykazano statystyczną istotność różnic. Do ich wykonania użyto programów Statistica 10 i Statistica 13.

Jednym z wymogów stosowania analizy wariancji jest zgodność rozkładu badanej cechy z normalnym. Przeprowadzone testy (wyniki zawarte w odpowiednich sprawozdaniach) wykazały w przeważającej części, że warunek ten nie jest spełniony. Mimo to analizy przeprowadzono, korzystając z opinii Tadeusiewicza i in. (1993) oraz Stanisza (2007), iż przy niewielkich odstępstwach w tym zakresie metoda daje wiarygodne wyniki, gdy porównywane są grupy równoliczne.

Przedstawiane badania przestrzennego rozkładu wilgotności gruntu w obszarze leżącym za wylotem urządzeń odwadniających drogi leśne, wykonane w różnych lokalizacjach geograficznych, różnych warunkach gruntowych i przy różnym stanie opadów, pokazują pewne zróżnicowanie badanej cechy. Zakres przeprowadzonych pomiarów terenowych, badań laboratoryjnych i wykonanych obliczeń objął z konieczności jedynie najważniejsze i łatwe do zmierzenia cechy terenu, gruntów i obiektów.

Badania wykonywano przy różnych obiektach odwadniających – przepustach betonowych i wodospustach drewnianych o odmiennych konstrukcjach (jedno- i dwużerdziowych oraz zbijanych z tarcicy), lecz wpływ na istotność statystyczną różnic wilgotności bardziej zależał od sumy opadów przed pomiarem niż od samej konstrukcji urządzenia. Związane jest to zapewne ze zróżnicowaną (lecz w przedstawianych badaniach niemierzoną) powierzchnią drogi, z jakiej obiekty te zbierały wodę i kierowały ją na stok.

Nie uwidoczniła się zależność wilgotności gruntu od odległości w stosunku do krawędzi pobocza (linie A i B). Zanotowano tylko jeden przypadek statystycznie istotnej różnicy średnich wilgotności między liniami – seria nr VI w obiektach terenu RP. Była to seria z najwyższą zanotowaną na tym obszarze



**Ryc. 2.** Rozkład wilgotności gruntu w płaszczyznach spadku terenu na głębokościach  $d$  (po lewej stronie rysunku) i  $g$  (po prawej) dla wybranych obiektów (od góry): G-P2, BS-W4, RM-W1, RP-W4. Linia ściekowa za wylotem wodospustu przechodzi przez środek górnej krawędzi każdego zobrażenia (współrzędne: 0;0)

Tabela 9. Wyniki testowania hipotez zerowych. Poziom istotności  $p < 0,05$ 

| Teren badań    | Testowana zmienna<br><i>Hipoteza zerowa</i>    | Seria pomiarowa | Efekt (Ef) |          | df  | MS       | F        | P |
|----------------|--|-----------------|------------|----------|-----|----------|----------|---|
|                |  |                 | Błąd (Err) | SS       |     |          |          |   |
| Gorce          | obiekt<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ | II              | Ef         | 0,061734 | 3   | 0,020578 | 5,315547 |   |
|                |  |                 | Err        | 0,232276 | 60  | 0,003871 | 0,002577 |   |
|                |  | III             | Ef         | 0,038158 | 3   | 0,012719 | 3,308633 |   |
|                |  |                 | Err        | 0,230656 | 60  | 0,003844 | 0,026020 |   |
|                |  | I               | Ef         | 0,118130 | 1   | 0,118130 | 28,16999 |   |
|                |  |                 | Err        | 0,259996 | 62  | 0,004193 | 0,000002 |   |
|                | głębokość<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$              | II              | Ef         | 0,064619 | 1   | 0,064619 | 17,46536 |   |
|                |  |                 | Err        | 0,229391 | 62  | 0,003700 | 0,000093 |   |
|                |  | III             | Ef         | 0,051341 | 1   | 0,051341 | 14,63704 |   |
|                |  |                 | Err        | 0,217473 | 62  | 0,003508 | 0,000305 |   |
|                |  | I-III           | Ef         | 0,073590 | 2   | 0,036795 | 6,289427 |   |
|                |  |                 | Err        | 1,105707 | 189 | 0,005850 | 0,002268 |   |
| Beskid Sądecki | obiekt<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ | I               | Ef         | 0,087340 | 3   | 0,029113 | 6,762997 |   |
|                |  |                 | Err        | 0,258287 | 60  | 0,004305 | 0,000527 |   |
|                |  | II              | Ef         | 0,087983 | 3   | 0,029328 | 6,803061 |   |
|                |  |                 | Err        | 0,258657 | 60  | 0,004311 | 0,000505 |   |
|                |  | III             | Ef         | 0,070378 | 3   | 0,023459 | 4,102952 |   |
|                |  |                 | Err        | 0,343063 | 60  | 0,005718 | 0,010269 |   |
|                | głębokość<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$              | I               | Ef         | 0,129013 | 1   | 0,129013 | 36,92651 |   |
|                |  |                 | Err        | 0,216614 | 62  | 0,003494 | 0,000000 |   |
|                |  | II              | Ef         | 0,114814 | 1   | 0,114814 | 30,70611 |   |
|                |  |                 | Err        | 0,231826 | 62  | 0,003739 | 0,000001 |   |
|                |  | III             | Ef         | 0,122219 | 1   | 0,122219 | 26,01986 |   |
|                |  |                 | Err        | 0,291222 | 62  | 0,004697 | 0,000003 |   |



|   |   |      |          |          |          |          |          |
|---|---|------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Roztocze – podłoże margliste                    | seria<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$ | I-VI | Ef       | 4,027896 | 5        | 0,805579 | 118,1505 |
|   |   |      | Err      | 1,268193 | 186      | 0,006818 | 0,000000 |
|   | obiekt<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$                                | III  | Ef       | 0,097130 | 1        | 0,097130 | 6,836823 |
|   |   |      | Err      | 0,426208 | 30       | 0,014207 | 0,013836 |
|   | głębokość<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$                             | I    | Ef       | 0,058910 | 1        | 0,058910 | 22,93376 |
|   |   |      | Err      | 0,077061 | 30       | 0,002569 | 0,000042 |
|   | głębokość<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$                             | II   | Ef       | 0,019652 | 1        | 0,019652 | 12,69781 |
|   |   |      | Err      | 0,046429 | 30       | 0,001548 | 0,001247 |
|   | głębokość<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$                             | III  | Ef       | 0,114362 | 1        | 0,114362 | 8,388855 |
|   |   |      | Err      | 0,408977 | 30       | 0,013633 | 0,006983 |
|   | linia<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$                                 | VI   | Ef       | 0,047048 | 1        | 0,047048 | 13,46307 |
|   |   |      | Err      | 0,104837 | 30       | 0,003495 | 0,000939 |
| pozycja<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ | V   | Ef   | 0,017526 | 3        | 0,005842 | 3,580080 |          |
|   |   | Err  | 0,045691 | 28       | 0,001632 | 0,026187 |          |
| głębokość<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$               | VI  | Ef   | 0,054422 | 3        | 0,018141 | 5,211533 |          |
|   |   | Err  | 0,097464 | 28       | 0,003481 | 0,005503 |          |
| głębokość<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$               | I   | Ef   | 0,030752 | 1        | 0,030752 | 23,86466 |          |
|   |   | Err  | 0,038658 | 30       | 0,001289 | 0,000032 |          |
| głębokość<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$               | II  | Ef   | 0,012920 | 1        | 0,012920 | 10,34314 |          |
|   |   | Err  | 0,037475 | 30       | 0,001249 | 0,003107 |          |
| głębokość<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$               | III   | Ef   | 0,085181 | 1        | 0,085181 | 13,55813 |          |
|   |   | Err  | 0,188480 | 30       | 0,006283 | 0,000907 |          |
| głębokość<br>$H_0: \mu_1 = \mu_2$               | IV  | Ef   | 0,027437 | 1        | 0,07437  | 9,599325 |          |
|   |   | Err  | 0,085745 | 30       | 0,002858 | 0,004203 |          |
| Roztocze – podłoże piaszczyste                  |   |      |          |          |          |          |          |

sumą opadów, w której linia B wykazała większą wilgotność niż linia A. Na terenie RM, w serii III (z największymi opadami), odnotowano, że w linii A grunt był wilgotniejszy, lecz bez statystycznej istotności różnic. W obszarach G i BS nie zaobserwowano żadnych regularności rozkładu wilgotności w grupowaniu liniami A i B.

Obserwacje przeprowadzone na terenach G i BS (grunty gliniaste i pylaste) wskazują najczęściej, że grunt w pozycjach najbliższych linii ściekowej (2 i 3) charakteryzuje się największą wilgotnością. Pewną stałość pod tym względem można stwierdzić w przypadku gruntów marglistych (RM), choć tu wydaje się to bardziej związane z konkretnym wodospustem, a nie odległością od linii ściekowej. Statystyczną istotność różnic wilgotności pogrupowanych pozycjami zaobserwowano jedynie w seriach V i VI na terenie RP – były to serie charakteryzujące się najmniejszą i największą sumą opadów. Potwierdza to znane zależności, zgodnie z którymi grunty piaszczyste, charakteryzujące się większymi prędkościami filtracji, bardziej dynamicznie reagują, przyjmując i oddając wodę przepływającą przez profil. Występowanie tej zależności w połączeniu z małymi spadkami terenu nie powoduje narażenia tych stoków na powstawanie osuwisk. Pozwala również wykluczyć występowanie liniowych uszkodzeń erozyjnych na powierzchni terenu, zwłaszcza w środowisku leśnym.

Pogrupowanie wilgotności gruntu ze względu na różne głębokości stanowi jedyny badany układ, który wykazuje pewną stałość i statystycznie istotne zróżnicowanie. Na terenach G i BS statystyczna istotność różnic wystąpiła we wszystkich seriach pomiarowych, zaś w badaniach roztoczańskich: w pierwszych 3 seriach w obszarze RM i pierwszych 4 seriach w obszarze RP. Na wszystkich terenach (za wyjątkiem RM) i we wszystkich pomiarach wykazano, że warstwa górna charakteryzuje się większą wilgotnością. W ilastych gruntach terenu RM czoło fali zwilżenia, formujące się po obfitszych opadach, przemieszcza się w głąb profilu wyraźnie wolniej niż na innych obszarach i to zmniejszenie prędkości może spowodować utrzymywanie się zwiększonej masy wierzchnich warstw profilu. Można to zaobserwować w odwróceniu wilgotności warstw – górne w pewnym okresie po obfitszym opadzie mają wilgotność większą niż dolne. Ten układ nie jest trwały i po zmniejszonych opadach, z upływem czasu powraca do „standardowej” przewagi wilgotności w warstwach dolnych. W połączeniu z ewentualnym, specyficznym uwarstwieniem profilu i większym spadkiem stoku mogłoby dojść do powstania płaszczyzny poślizgu i osuwania się gruntu, jednak w obserwowanych warunkach (niewielki spadek i zbyt małe opady) takie przemieszczenia nie występowały.

Charakterystyczne w tym układzie głębokości są jeszcze maksymalne różnice wilgotności między warstwami. Tereny G, BS i RP cechują się zbliżonym, stosunkowo niewielkim rozstępem średnich wilgotności (odpowiednio: 4,90%, 5,99% i 5,12%), co sugeruje w miarę sprawną filtrację wody w głąb

profilu z dużą ilością szkieletu i w gruntach piaszczystych, bezszkieletowych. Największe różnice średnich wilgotności zanotowano na terenie RM: 8,54%. Do podobnych wniosków prowadzi również porównanie rozstępów w warstwach z uwzględnieniem wielkości opadów w serii pomiarowej. Największe wartości rozstępów występują na gruntach marglistych (RM) – nawet do ok. 40%, co sugeruje dłuższe przetrzymywanie wody w warstwie profilu i potencjalnie większe szanse na powstanie osuwiska, zwłaszcza że w takich gruntach płaszczyzny poślizgu mogą ujawnić się dużo łatwiej.

Reasumując, zmiany wilgotności gruntu w badanych obszarach – przeważnie kilkuprocentowe przy dużych spadkach i większe przy małych spadkach – nie były na tyle istotne, aby uplastyczyć lub upłynnić grunt na stoku i doprowadzić do utraty jego stateczności (Wiłun 2013). Należy także zaznaczyć, że sumy dobowe opadu z 2 (3) dni przed pomiarem wilgotności nie opisywały całości rozkładu opadu w czasie, a w związku z tym, że były obiektywnie niewielkie, nie powodowały przesycenia profilu, ani też szybkiego przemieszczania się frontu zwilżenia w głębokości profilu. Interesujący przebieg propagacji frontu zwilżenia opisują Zydroń i Durałek (2014), relacjonujący badania osuwiska na Pogórzu Ciężkowickim. Dokonana przez tych autorów charakterystyka opadu, który spowodował osuwisko ( $P = 88,8$  mm,  $t =$  ok. 700 min) na badanym przez nich terenie, odbiega znacząco od obserwacji zawartych w niniejszym artykule. W obu pracach wskazane przez przywołanych badaczy zawartości frakcji pyłowej i piaskowej są zupełnie odwrócone. Inny też jest charakter spływu wody po stokach. W Ciężkowicach spływ następuje na całej płaszczyznie łąki, a w badaniach własnych na terenach zalesionych w sposób liniowy. W takich warunkach, nawet większe nachylenie stoków (np. w Gorcach 26–35°, w Ciężkowicach 22°) nie jest czynnikiem decydującym o utracie stateczności stoku.

Znane są badania zbliżone tematycznie, aczkolwiek dotyczące obszarów rolnych, wykonane w większej siatce geometrycznej, z mniejszymi spadkami terenu i przeprowadzone tylko w wierzchniej warstwie gruntu, częściowo związane z potrzebami nawadniania upraw (Usowicz i Usowicz 2004). Inne (Rutkowski i in. 2007; Janik i in. 2016) poświęcone są zmienności przestrzennej wilgotności gleby mierzonej metodą konduktometryczną lub oceniają dokładność powierzchniowego rozkładu wilgotności gleby przy różnych odległościach od punktów pomiarowych. Praca Łukowskiego i Usowicza (2014) porównuje rezultaty pomiaru wilgotności wykonane metodami TDR i grawimetryczną. W badaniach tych wykorzystano podobne techniki pomiaru wilgotności i sposoby kameralnego opracowania danych (interpolację metodą krigingu), lecz warunki i cele tych opracowań były odmienne od celu przedstawianych badań, w związku z czym nie można wprost odnosić prezentowanych w nich wyników do badań przedmiotowych.

## 4. Wnioski

Napotkane trudności interpretacyjne należy tłumaczyć dużą ilością czynników i uwarunkowań terenowych, wpływających na obserwowany rozkład wilgotności, stąd prezentowane badania trzeba uznać za przyczynek do dalszych prac nad problemem. Pożądane byłoby zróżnicowanie terenów przyszłych badań, zarówno pod względem warunków klimatycznych, sposobu użytkowania, spadku czy przepuszczalności gruntu. Uzasadnienie merytoryczne miałyby również włączenie do takich analiz szczegółowych badań gruntu, zwłaszcza z zakresu określania wytrzymałości na ścinanie oraz granic konsystencji (Zydroń i Zgoda 2012), i pomiarów powierzchni drogi, z jakiej konkretne obiekty zbierają wodę (Gołąb 2011).

W szczególności uważa się, że:

1. W leśnych zlewniach górskich, zwłaszcza przy dużych spadkach stoków i ograniczonej zdolności filtracyjnej gruntów (G i BS), woda odpływa z urządzeń odwadniających po powierzchni stoku, wzdłuż linii ściekowej z ograniczoną możliwością wsiąkania w grunt, co może powodować liniową erozję wodną, lecz na obserwowanym terenie nie stwarza warunków właściwych do powstawania osuwisk.
2. W leśnych zlewniach wyżynnych (RM i RP), przy niewielkich spadkach stoków szkody erozyjne nie występują, gdyż woda infiltruje w głąb profilu. Na gruntach marglistych proces ten przebiega wolniej, lecz i tu, ze względu na spadek, nie powstają warunki właściwe do osuwania się terenu.
3. W gruntach gliniastych z większym udziałem rumoszu skalnego (G i BS) i w gruntach piaszczystych (RP) wartości wilgotności warstw profilu są bardziej wyrównane niż w gruntach marglistych (RM) ze względu na warunki filtracji i obecność warstwy próchnicznej. Jednak na wszystkich badanych terenach i przeważnie we wszystkich seriach pomiarowych różnice okazały się statystycznie istotne – można zatem mówić o pewnej stałości. Charakterystyczny jest układ, w którym wilgotniejsza jest warstwa górna, ale w gruntach na podłożu marglistym wilgotność dolnej warstwy jest większa w okresach o mniejszych opadach, a zmiany wilgotności (przesuwanie się czoła fali zwilżenia) są wolniejsze.
4. Spodziewane różnice wilgotności ze względu na pozycje (odległości od linii ścieku) występują w analizie opisowej (pomierzone wartości wilgotności zamieszczone w sprawozdaniach oraz wartości średnie przedstawione w tabelach 4–7). W wielu przypadkach można obserwować tendencję do występowania większych wartości wilgotności gruntu przy linii ścieku, jednak – poza 2 seriami pomiarowymi na terenie RP – różnice te nie są statystycznie istotne. Nie powstają zatem strefy o dużych zmianach wartości wilgotności (w tym układzie analizowania), które ułatwiałyby uruchamianie gruntu na stoku.

5. Na zbadanych obszarach stabilność stoków wynikać może z miejscowych warunków gruntowych (w tym udziału szkieletu), porośnięcia terenu lasem i stosunkowo niewielkich ilości wody zrzucanej na stok z odpowiednio gęsto instalowanych na drodze wodospustów.

## Literatura

- Bardel T. 2012. O antropogenicznych przyczynach powstania osuwiska na zboczu byłej kopalni ilów „Kantoria” w Tarnowie. *Górnictwo i Geologia*, 7, 2, 35–47.
- Bartoszewski S., Michalczyk Z. 2012. Roztoczański Park Narodowy. W: *Wody w parkach narodowych Polski*. R. Bogdanowicz, P. Jokiel, J. Pociask-Karteczka. Red. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 264–279.
- Bartoszewski S., Michalczyk Z. 2013. Stosunki wodne RPN. W: *Roztoczański Park Narodowy – przyroda i człowiek*. R. Reszel, T. Grądział. Red. Roztoczański Park Narodowy, Zwierzyniec, 53–60.
- Brzezińska-Wójcik T., Harasimiuk M. 2013. Budowa geologiczna i rzeźba terenu RPN. W: *Roztoczański Park Narodowy – przyroda i człowiek*. R. Reszel, T. Grądział. Red. Roztoczański Park Narodowy, Zwierzyniec, 41–48.
- Brzezińska-Wójcik T., Hnatiuk R. 2015. Rzeźba terenu. W: *Roztocze – przyroda i człowiek*. T. Grabowski, K. Kałamucki, E. Kardaszewska. Red. Roztoczański Park Narodowy, Zwierzyniec, 75–91.
- Chodorowski J., Dębicki R., Klimowicz Z., Melke J., Moszyńska U. 2000. Morfologia oraz właściwości fizyczne i chemiczne gleb RPN. Część A. Aneks I do mapy przyrodniczej gleb Roztoczańskiego Parku Narodowego. Maszynopis, Roztoczański Park Narodowy, Konopnica–Lublin–Zwierzyniec.
- Czerniak A. Red. 2013. Wytyczne prowadzenia robót drogowych w lasach. Ośrodek Rozwojowo-Wdrożeniowy Lasów Państwowych w Bedoniu, Nowy Bedoń.
- Dębicki R., Bartmiński P., Chodorowski J., Miśta T. 2013. Gleby. W: *Roztoczański Park Narodowy – przyroda i człowiek*. R. Reszel, T. Grądział. Red. Roztoczański Park Narodowy, Zwierzyniec, 49–52.
- Gołąb J. 2011. Natężenie powierzchniowego spływu wody z leśnej drogi stokowej. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 7, 199–208.
- Gołąb J. 2015. Uwilgotnienie gruntu w obszarze za wylotem urządzeń odwadniających leśne drogi stokowe. Sprawozdanie z badań wykonanych w Gorceńskim PN. Wydruk komputerowy, Gorceński Park Narodowy.
- Gołąb J., Adamowicz A. 2018. Rozkład przestrzenny wilgotności gruntu w obszarze za wylotem wodospustów odwadniających drogi leśne w Roztoczańskim Parku Narodowym. Sprawozdanie z badań. Wydruk komputerowy, Roztoczański Park Narodowy.
- Gołąb J., Godzisz G. 2017. Rozkład przestrzenny wilgotności gruntu w obszarze za wylotem wodospustów odwadniających drogi leśne w Roztoczańskim Parku Narodowym. Sprawozdanie z badań. Wydruk komputerowy, Roztoczański Park Narodowy.

- Gołąb J., Urban K.** 2016. Uwilgotnienie gruntu w obszarze za wylotem urządzeń odwadniających leśne drogi stokowe. Sprawozdanie z badań wykonanych na terenie Leśnego Zakładu Doświadczalnego UR w Krakowie. Wydruk komputerowy, Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej UR w Krakowie.
- Gołąb J., Wańczyk R., Matusiak B.** 2006. Surface Runoff From Slanting Forest Roads. *Acta Scientiarum Polonorum. Silvarum Colendarum Ratio Industria Lignaria*, 5(1), 13–25.
- <http://gorczanskipark.pl> (dostęp: 10.2014 r.).
- <http://lzdtkrynica.ur.krakow.pl> (dostęp: 09.2015 r.).
- <http://roztoczanskipn.pl> (dostęp: 11.2017 r. i 10.2018 r.).
- Instrukcja obsługi. Sonda ML3 ThetaProbe. 2014. Geomor Technik, Szczecin.
- Janik G., Borecka-Stefańska E., Daniel A., Dawid M., Walczak A., Jurik L.** 2016. Ocena dokładności powierzchniowego rozkładu wilgotności objętościowej w wierzchniej warstwie gleby sporządzonego metodami geostatystycznymi. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 15(4), 167–179.
- Kondracki J.** 2011. Geografia regionalna Polski. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Łukowski M., Usowicz B.** 2014. Surface Soil Moisture, Satellite and Ground-Based Measurements. *Acta Agrophysica. Monographiae*, 1. Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie.
- Minet J., Lambot S., Delaide G., Huisman J.A., Vereecken H., Vanclooster M.** 2010. A Generalized Frequency Domain Reflectometry Modeling Technique for Soil Electrical Properties Determination. *Vadose Zone Journal*, 9, 4, 1063–1072.
- Norma PN-86/B-02480. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- Norma PN-EN ISO 14688-1:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
- Norma PN-ISO 11465:1999. Jakość gleby – Oznaczanie zawartości suchej masy gleby i wody w glebie w przeliczeniu na suchą masę gleby – Metoda wagowa.
- Rutkowski K., Kollarova K., Krajco J., Placko M.** 2007. Ocena zmienności przestrzennej wilgotności gleby na podstawie map konduktywności elektrycznej. Część II. *Inżynieria Rolnicza*, 8(96), 225–232.
- Stanisz A.** 2007. Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny, 2. Statsoft Polska, Kraków.
- Tadeusiewicz R., Izvorski A., Majewski J.** 1993. *Biometria*. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- Twardowski K., Drożdżak R.** 2006. Pośrednie metody oceny właściwości filtracyjnych gruntów. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 23(1), 477–486.
- Usowicz B., Usowicz Ł.** 2004. Punktowe pomiary wilgotności gleby a jej przestrzenny rozkład na polach uprawnych. *Acta Agrophysica*, 4(2), 573–588.
- Wemple B.C., Jones J.A.** 2003. Runoff Production on Forest Roads in a Steep, Mountain Catchment. *Water Resources Research*, 39(8), 1220. DOI:10.1029/2002WR001744.
- Wiłun Z.** 2013. Zarys geotechniki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.

- Zydroń T., Cholewa M.** 2014. Analiza stateczności pokryw stokowych na przykładzie zbocza z okolic Siar k. Gorlic. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 1(1), 73–87.
- Zydroń T., Durałek D.** 2014. Uwarunkowania stateczności pokryw stokowych na przykładzie zbocza z okolic miejscowości Pławna k. Ciężkowic (Pogórze Ciężkowickie). *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 13(1), 123–134.
- Zydroń T., Zgoda J.** 2012. Wpływ wilgotności na właściwości wytrzymałościowe gruntów z obszaru karpackiego. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 11(2), 75–84.





# Fotogrametryczna inwentaryzacja powykonawcza odcinka drogi leśnej z zastosowaniem bezzałogowego statku powietrznego (BSP)

Janusz Gołąb<sup>1</sup>, Gabriela Sołtysik<sup>2</sup>, Grzegorz Zbieg<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków, e-mail: janusz.golab@urk.edu.pl

<sup>2</sup> Dyplomanci

## Abstrakt

Konstrukcje inżynierskie wznoszone w Lasach Państwowych muszą być wykonywane według określonych procedur technicznych. W budownictwie drogowym prace kontrolujące zgodność prowadzonej budowy z projektem polegają m.in. na kilkakrotnym sprawdzaniu: rzędnych korytowania, rzędnych kolejnych warstw podbudowy i nawierzchni, stopnia ich zagęszczenia czy wymiarów konstruowanych elementów.

W pracy skupiono się na zbadaniu możliwości i efektów zastosowania nowoczesnych metod otrzymywania materiałów o charakterze metrycznym w inwentaryzacji powykonawczej. Do uzyskania odpowiedniego produktu metrycznego zastosowano bezzałogowy statek powietrzny, który za pomocą wbudowanej kamery fotograficznej zebrał odpowiednie dane w postaci filmu. Obróbka materiału fotograficznego, przy użyciu specjalistycznego oprogramowania, doprowadziła do powstania odpowiednich produktów metrycznych. Zastosowano się do zasady, zgodnie z którą obiekt należy fotografować wraz z widoczną na zdjęciach oraz pomierzoną geodezyjnie siecią referencyjną w postaci punktów rozmieszczonych poza granicami robót ziemnych. Budowle liniowe (drogi) wymagają wielu takich punktów przy jednym obiekcie. Założona sieć referencyjna musi być trwała, jeśli planuje się wykonanie kolejnych pomiarów do porównań.

Ze względu na trudne warunki budowy dróg w lesie i wysoki drzewostan sąsiadujący z pasem terenu, na którym prowadzono roboty, oraz specyficzne wymagania dotyczące realizacji nalotów wymuszony został niski pułap lotu dla uniknięcia zasłaniania powierzchni obiektu przez korony drzew. W takich warunkach właściwy kontakt użytkownika sprzętu z satelitami i systemem GPS jest utrudniony lub czasem niemożliwy. Skutkuje to zazwyczaj rezygnacją z predefiniowania trasy lotu i automatycznej jej realizacji – sterowanie odbywa się „ręcznie”, z dużym ryzykiem uszkodzenia sprzętu. Te same okoliczności towarzyszyły lotowi wykonanemu na potrzeby przedstawionego opracowania.

Przedstawiono efekty opracowania ok. sześćdziesięciometrowego odcinka nowo wybudowanej drogi gospodarczej (szlaku operacyjnego) na stokach góry Kostrza w Nadleśnictwie Limanowa, na którym zlokalizowano przepust z umocnieniami wlotu i wylotu oraz składnicę drewna z płyt betonowych. Do analiz fotogrametrycznych z wykonanych filmów wybrano 1 280 klatek. Uzyskano numeryczny model pokrycia terenu oraz ortomozaikę, na których można pomierzyć długości i powierzchnie, wykonać przekroje podłużne i poprzeczne, a także określić współrzędne przestrzenne dowolnego punktu, jeśli zastosowany układ referencyjny został nawiązany do istniejącej sieci geodezyjnej. Powtórzenie pomiarów – np. po zabudowaniu kolejnej warstwy podbudowy czy nawierzchni – pozwoliłoby na obliczanie objętości (zużycia materiału) na zasadzie różnicy kolejnych rastrów numerycznych modeli terenu. Materiały uzyskane tą drogą mogą być wielokrotnie i w łatwy sposób użyte do dalszych prac, kontroli i porównań, a także do określania stopnia zużycia szlaku w konkretnych warunkach eksploatacji.

**Słowa kluczowe:** lasy górskie, szlaki operacyjne, budowa szlaków, inwentaryzacja powykonawcza, fotogrametria, nalot niskiego pułapu

## 1. Wstęp

Reżim technologiczny i czasowy prac budowlanych i projektowych, a także aktualność danych w sytuacji dynamicznych zmian wymuszają sięganie do innowacyjnych środków i sposobów pozyskiwania informacji o terenie. Dostępność nowoczesnych technologii (fotogrametria, LIDAR) w sposób znaczący ułatwia ich wykorzystanie i ustanawia standard działania na rynku (Mieszczak i Oberski 2016; gisplay.pl).

Konstrukcje inżynierskie powstające w Lasach Państwowych muszą być wykonywane z poszanowaniem reguł postępowania określonych w obowiązującym prawodawstwie. Jedną z takich procedur jest kontrola zgodności z projektem stosowanej przez wykonawcę technologii, jakości materiałów, grubości i jakości ułożenia warstw w konstrukcji, zwłaszcza jeśli warstwy takie w następnych etapach budowy ulegają zakryciu kolejnymi warstwami (muratorplus.pl). Obowiązki kontroli zgodności wykonania inwestycji zlecane są inspektorowi nadzoru posiadającemu odpowiednią wiedzę, umiejętności i uprawnienia. W budownictwie drogowym prace kontrolne polegają m.in. na kilkakrotnym sprawdzaniu rzędnych korytowania, rzędnych kolejnych warstw podbudowy i nawierzchni, stopnia ich zagęszczenia czy wymiarów konstruowanych elementów.

W pracy zaprezentowano możliwości zastosowania nowoczesnych metod uzyskiwania materiałów o charakterze metrycznym (Kurczyński i Preuss 2011; Brach i in. 2019), tzn. takich, na podstawie których można określić parametry geometryczne konstrukcji. Mogą to być m.in. rzędne zabudowywanych warstw w konkretnych punktach budowli, wymiary liniowe wybranych elementów, grubości zagęszczonych warstw, objętości wbudowanych lub składowanych

materiałów (Gawin 2009; colidrone.pl), uzyskane spadki niwelety jezdni, niwelety rowów czy wielkości powierzchni skarp drogowych lub brzegów potoków umocnionych założoną w projekcie technologią. Do uzyskania odpowiedniego jakościowo produktu metrycznego zastosowano bezzałogowy statek powietrzny, który za pomocą zainstalowanej na pokładzie kamery fotograficznej zebrał odpowiednie dane w postaci filmu wysokiej jakości.

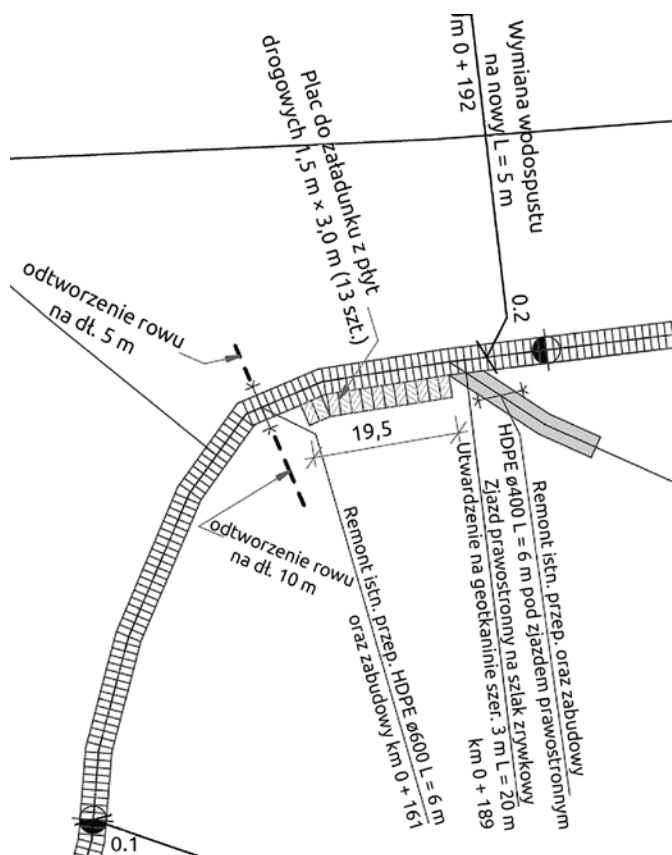
W rezultacie obróbki materiału fotograficznego, przy użyciu specjalistycznego oprogramowania, powstają odpowiednie produkty metryczne (Clapuyt i in. 2016; Agüera-Vega i in. 2018). Niezbędnym warunkiem jest fotografowanie obiektu wraz z założoną, widoczną na zdjęciach i pomierzoną geodezyjnie siecią referencyjną w postaci punktów rozmieszczonych na zewnątrz robót ziemnych, blisko ich granic. Budowle liniowe (drogi) wymagają wielu takich punktów przy jednym obiekcie (Agüera-Vega i in. 2017). Założona sieć referencyjna musi być trwała i nie może być zniszczona, jeśli planowane jest wykonywanie kolejnych nalołów oraz pomiarów do porównań (Karwacki 2018).

Warunki budowy dróg w lesie stawiają specyficzne i trudne wymagania dotyczące realizacji nalołów (Tomaščík i in. 2017) oraz geodezyjnego pomiaru współrzędnych przestrzennych założonej sieci referencyjnej. Wysoki drzewostan sąsiadujący z zazwyczaj wąskim pasem terenu, na którym prowadzona jest budowa, wymusza niski pułap lotu dla uniknięcia zasłaniania powierzchni obiektu przez korony drzew, utrudnia lub czasem uniemożliwia właściwy kontakt używanego sprzętu z satelitami i systemem GPS. Prowadzi to do rezygnacji z predefiniowania trasy lotu i automatycznej jej realizacji, a sterowanie statkiem musi odbywać się „ręcznie”, z dużym ryzykiem uszkodzenia sprzętu przy bardzo małych odległościach od gałęzi i pni drzew. Niski lot skutkuje również niewielką powierzchnią pojedynczej fotografii, co przy założonym dużym procencie pokrywania się zdjęć sąsiednich i wielkości obiektu, zwiększa ilość zdjęć poddawanych obróbce kameralnej, a w konsekwencji wydłuża czas wykonania potrzebnych analiz.

Przedmiot badań w niniejszej pracy stanowiła inwentaryzacja powykonawcza leśnego szlaku operacyjnego. Celem badań było testowanie możliwości zastosowania nowoczesnych środków i technologii w inwentaryzacji powykonawczej wybranego szlaku operacyjnego w Nadleśnictwie Limanowa.

## 2. Skrócony opis inwentaryzowanego szlaku operacyjnego

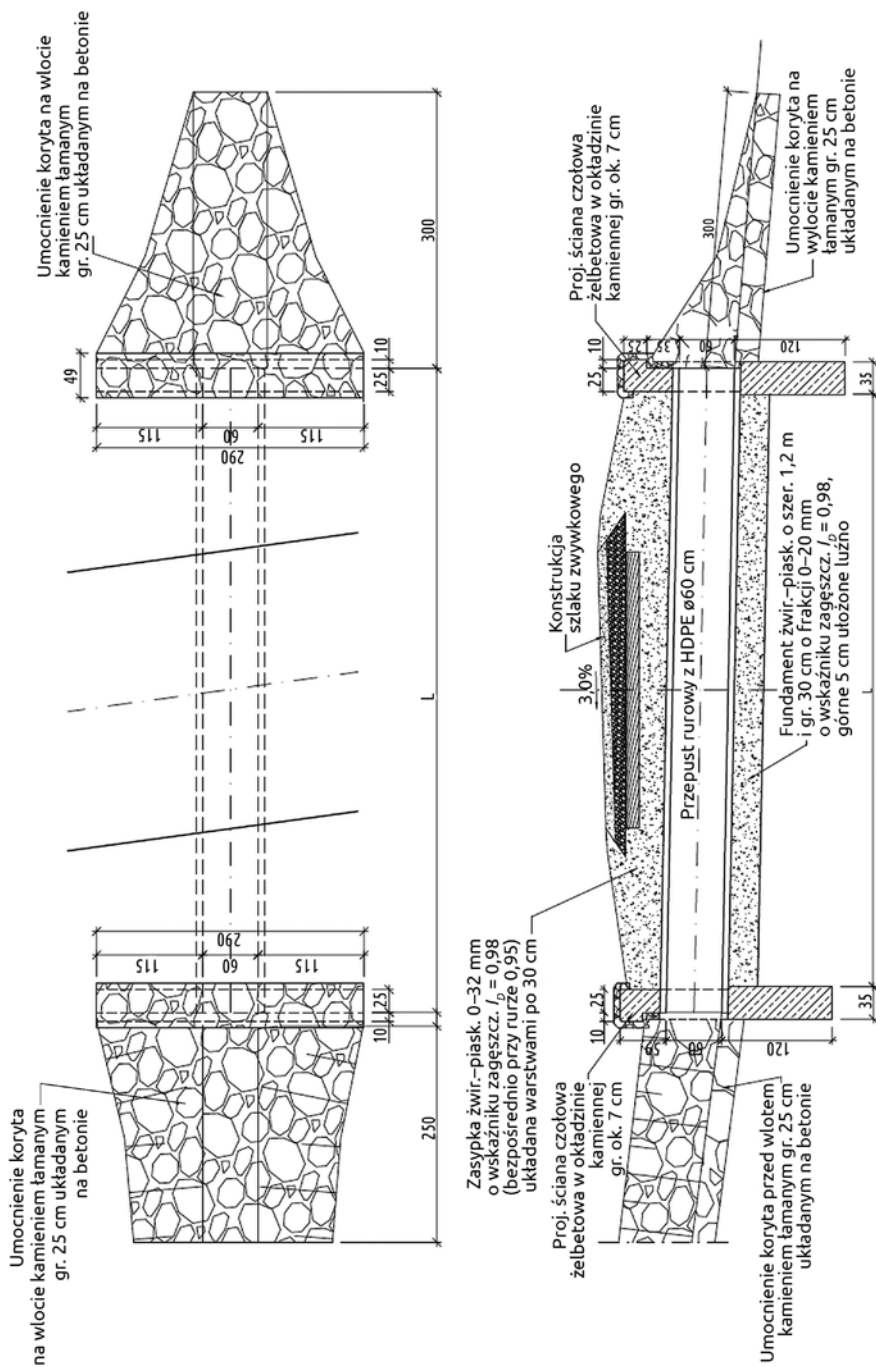
Pracę wykonano na fragmencie nowo wybudowanego szlaku operacyjnego w Nadleśnictwie Limanowa, w leśnictwie Kostrza, w oddziale 28c. Wybrane szczegóły konstrukcyjne szlaku i obiektów infrastruktury pokazano na poniższych rycinach (ryc. 1–3) zaczerpniętych z dokumentacji projektowej (Biuletyn Informacji Publicznej Nadleśnictwa Limanowa).



Ryc. 1. Fragment budowanego szlaku operacyjnego w planie (źródło: dokumentacja projektowa opublikowana do przetargu w BIP Nadleśnictwa Limanowa)



Ryc. 2. Przekrój normalny budowanego szlaku operacyjnego (źródło: dokumentacja projektowa opublikowana do przetargu w BIP Nadleśnictwa Limanowa)

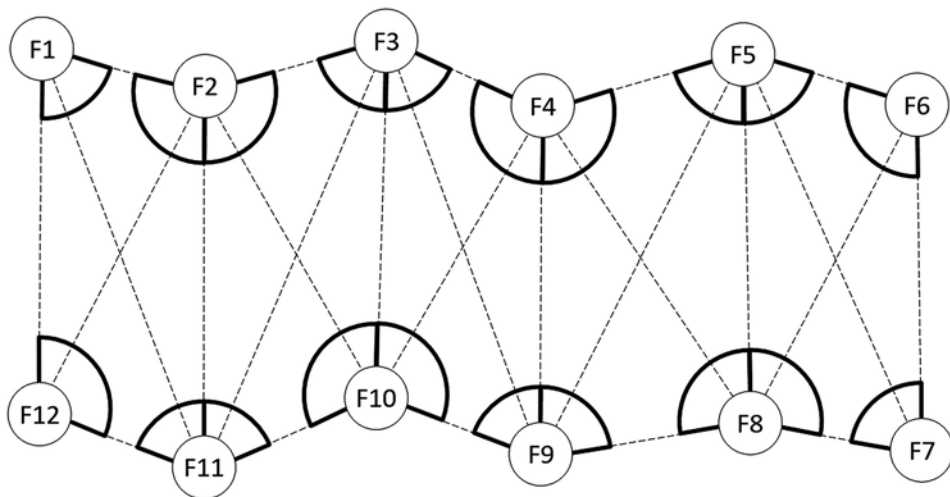


Ryc. 3. Projekt przepustu rurowego (źródło: dokumentacja projektowa opublikowana do przetargu w BIP Nadleśnictwa Limanowa)

### 3. Metodyka pomiarów i badań

#### 3.1. Wyznaczenie i pomiar punktów osnowy referencyjnej

W celu osiągnięcia dużej precyzji w wyznaczaniu współrzędnych, korzystając z tego, że obszar wyznaczony do badań był stosunkowo niewielki, zdecydowano się na nienawiazany układ 12 fotopunktów. Układ ten potraktowano jak poligon geodezyjny zamknięty, nienawiazany, lecz pomiary kątów poziomych zastąpiono pomiarami liniowymi, wykonanymi dalmierzem laserowym (Leica Disto X310, dokładność pomiaru długości 1 mm, wbudowana funkcja redukcji pomiaru do poziomu) (Instrukcja obsługi dalmierza Leica Disto X310). Kąty poziome wyliczono z równania cosinusów (wzór 1, szkic do pomiarów długości na ryc. 4). Pomiary wysokościowe (nienawiazane) wykonano, używając niwelacji geometrycznej. W celu eliminacji błędów grubych i uśrednienia systematycznych pomiary wykonano dwukrotnie. Ustalono wysokości punktów zbliżone do rzeczywistych na podstawie porównania z dostępnymi mapami warstwicowymi. Dokładność określenia współrzędnych oparto na doświadczeniu, że uzyskany materiał metryczny w opisywanych warunkach nalotu może osiągnąć wielkość piksela rzędu jednego milimetra lub nawet mniejszą.



Ryc. 4. Szkic terenowy pomiaru długości do wyliczenia kątów poziomych poligonu

$$\alpha = \arccos \left( \frac{c^2 - a^2 - b^2}{-2ab} \right) \quad (1)$$



gdzie:

$a, b$  – boki trójkąta leżące przy kącie  $\alpha$ ,

$c$  – bok trójkąta leżący naprzeciw kąta  $\alpha$ .

### 3.2. Wybrane parametry nalotu fotogrametrycznego

- Dron: DJI Mavic Pro, kamera wbudowana,
- sterowanie ręczne (lot poniżej koron drzew – ok. 3–4 m AGL),
- szacowana prędkość lotu – ok. 0,5 m/s,
- nagrywanie filmu FHD 24 kl/s z późniejszą automatyczną separacją co 10 klatek,
- zakładany procent pokrywania się zdjęć: 70% wzdłuż i 70% w poprzek szlaku.

### 3.3. Uzyskiwanie materiału metrycznego i opracowanie GIS

Opracowanie fotogrametryczne wykonane zostało w programie Agisoft PhotoScan Professional 1.4.3. Dobierając odpowiednie parametry wejściowe, na tym etapie wytworzono:

- rzadką chmurę punktów (łączenie zdjęć),
- dopasowanie łączonych zdjęć do układu referencyjnego w postaci fotopunktów o znanych współrzędnych przestrzennych,
- gęstą chmurę punktów,
- model przestrzenny w postaci siatki mesh,
- numeryczny model pokrycia terenu,
- ortomozaikę.

W programie tym wykonano także część pomiarów inwentaryzacyjnych w obiektach szlaku (określanie wymiarów liniowych wybranych elementów, powierzchni obrukowania wlotu i wylotu przepustu, powierzchni składnicy, rzędnych wlotu i wylotu przepustu oraz światła wlotu przepustu).

W programie QGIS 3.8.0 wykonano przekroje podłużne i poprzeczne obiektów szlaku w wybranych liniach (niweleta, umocnienie wlotu i wylotu przepustu, składnica, jezdnia).

Program Saga 7.0.0 posłużył do połączenia kafelków numerycznego modelu pokrycia terenu w jeden obiekt, na podstawie którego wykonywano następnie profile i przekroje.

## 4. Wyniki opracowania

### 4.1. Wyliczenie współrzędnych przestrzennych punktów osnowy referencyjnej

Tabela 1 przedstawia wyliczone współrzędne przestrzenne fotopunktów w układzie matematycznym.

Ze względu na wymagania programów do przetwarzania danych fotogrametrycznych, wartości współrzędnych zostały zapisane w plikach o rozszerzeniu .txt z tabulatorem jako znakiem rozdzielającym dane i kropką jako separatorem części ułamkowych.

**Tabela 1.** Współrzędne fotopunktów w przyjętym układzie referencyjnym

| Numer fotopunktu | Współrzędne |         |          | Numer fotopunktu | Współrzędne |         |          |
|------------------|-------------|---------|----------|------------------|-------------|---------|----------|
|                  | X           | Y       | Z        |                  | X           | Y       | Z        |
| F1               | 5,0000      | 5,0000  | 458,2350 | F7               | 40,5862     | 40,4465 | 459,9985 |
| F2               | 8,9091      | 19,6135 | 457,5285 | F8               | 32,7013     | 35,8612 | 459,4735 |
| F3               | 12,7814     | 31,1832 | 457,9855 | F9               | 24,1020     | 30,6738 | 459,0020 |
| F4               | 19,8882     | 36,6173 | 459,0790 | F10              | 17,2209     | 28,2294 | 458,2450 |
| F5               | 28,8921     | 42,2538 | 459,3925 | F11              | 13,5538     | 16,7783 | 457,6910 |
| F6               | 37,3059     | 46,4102 | 459,9430 | F12              | 10,5355     | 4,2488  | 458,4155 |

### 4.2. Przygotowanie uzyskanego materiału fotograficznego

Materiał fotograficzny (kilkanaście filmów) uzyskany w czasie nalotu został wstępnie oceniony pod względem przydatności do dalszej obróbki i z wybranych w sposób automatyczny filmów, przy użyciu programu Free Video Editor version 1.4.55.628, zostały wyselekcjonowane poszczególne klatki (co 10. klatka). Wykorzystanie materiału filmowego, zawierającego informacje, których szczegółowość obciążałaby pracę systemu w dalszej obróbce, nie wniosłoby w zasadzie nic nowego. Pokrycie terenu kolejnymi zdjęciami, nakładającymi się na siebie w ok. 70% (wzdłuż i w poprzek obiektu) było wystarczające dla uzyskania właściwego końcowego efektu. Wybrano 1 280 klatek o wymiarach 3 840 × 2 160 pikseli i rozdzielczości 96 dpi.

### 4.3. Opracowanie fotogrametryczne – łączenie zdjęć i dokładność dopasowania

Po wczytaniu zdjęć i współrzędnych fotopunktów do programu Agisoft PhotoScan Professional version 1.4.3 uruchomiono funkcję łączenia zdjęć, w wyniku czego otrzymano tzw. rzadką chmurę punktów. Parametry tej analizy zamieszczono na rycinie 5.

Następnie wskazano na zdjęciach fotopunkty, skontrolowano dane w zakładce *Camera Calibration* i uruchomiono funkcję *Optimize Cameras*. Po tych działaniach program dopasował układ zdjęć do współrzędnych fotopunktów z dokładnością, której wartości opisano na rycinie 6.

| Property                       | Value                    |
|--------------------------------|--------------------------|
| <b>Tie Points</b>              |                          |
| Points                         | 431,353 of 558,774       |
| Point colors                   | 3 bands, uint8           |
| Key points                     | No                       |
| Average tie point multiplicity | 11.2291                  |
| <b>Alignment parameters</b>    |                          |
| Accuracy                       | High                     |
| Generic preselection           | Yes                      |
| Key point limit                | 40,000                   |
| Tie point limit                | 4,000                    |
| Adaptive camera model fitting  | Yes                      |
| Matching time                  | 1 days 4 hours           |
| Alignment time                 | 1 hours 33 minutes       |
| <b>Optimization parameters</b> |                          |
| Parameters                     | f, cx, cy, k1-k3, p1, p2 |
| Adaptive camera model fitting  | No                       |
| Optimization time              | 3 minutes 56 seconds     |

Ryc. 5. Parametry wejściowe łączenia zdjęć (źródło: program Agisoft PhotoScan)

| Markers                                 | X err (m) | Y err (m) | Z err (m) | Accuracy (m) | Error (m) | Projections | Error (pix) |
|---|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|-------------|-------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> F1  | 0.061816  | -0.006409 | 0.021316  | 0.005000     | 0.065701  | 8           | 0.128       |
| <input checked="" type="checkbox"/> F2  | 0.019433  | -0.020994 | -0.070506 | 0.005000     | 0.076089  | 5           | 0.081       |
| <input checked="" type="checkbox"/> F3  | -0.014594 | -0.025717 | 0.028251  | 0.005000     | 0.040896  | 7           | 0.076       |
| <input checked="" type="checkbox"/> F4  | -0.025891 | -0.023097 | 0.013831  | 0.005000     | 0.037352  | 6           | 0.043       |
| <input checked="" type="checkbox"/> F5  | 0.032458  | -0.010632 | 0.003947  | 0.005000     | 0.034382  | 6           | 0.245       |
| <input checked="" type="checkbox"/> F6  | 0.084891  | -0.041025 | -0.015061 | 0.005000     | 0.095480  | 6           | 0.129       |
| <input checked="" type="checkbox"/> F7  | 0.000997  | 0.030390  | 0.000043  | 0.005000     | 0.030407  | 8           | 0.060       |
| <input checked="" type="checkbox"/> F8  | -0.008266 | 0.028817  | 0.006135  | 0.005000     | 0.030601  | 6           | 0.068       |
| <input checked="" type="checkbox"/> F9  | -0.072032 | 0.025107  | 0.003883  | 0.005000     | 0.076381  | 8           | 0.125       |
| <input checked="" type="checkbox"/> F10 | -0.050858 | 0.017136  | 0.020517  | 0.005000     | 0.057455  | 5           | 0.071       |
| <input checked="" type="checkbox"/> F11 | -0.005905 | -0.001445 | -0.033442 | 0.005000     | 0.033990  | 7           | 0.040       |
| <input checked="" type="checkbox"/> F12 | -0.022104 | 0.027848  | 0.020797  | 0.005000     | 0.041190  | 8           | 0.075       |
| <b>Total Error</b>                      |           |           |           |              |           |             |             |
| Control points                          | 0.042535  | 0.024029  | 0.026898  |              | 0.055768  |             | 0.108       |
| Check points                            |           |           |           |              |           |             |             |

Ryc. 6. Kontrola odchyłek dopasowania (źródło: program Agisoft PhotoScan)

#### 4.4. Opracowanie fotogrametryczne – gęsta chmura punktów

Gęstą chmurę punktów wykonano przy parametrach analizy widocznych na rycinie 7.

| Property                         | Value               |
|----------------------------------|---------------------|
| <b>Dense Cloud</b>               |                     |
| Points                           | 42,557,932          |
| Point colors                     | 3 bands, uint8      |
| <b>Reconstruction parameters</b> |                     |
| Quality                          | Medium              |
| Depth filtering                  | Moderate            |
| Depth maps generation time       | 11 hours 50 minutes |
| Dense cloud generation time      | 2 hours 22 minutes  |

Ryc. 7. Parametry startowe tworzenia gęstej chmury punktów (źródło: program Agisoft PhotoScan)

#### 4.5. Opracowanie fotogrametryczne – model 3D mesh

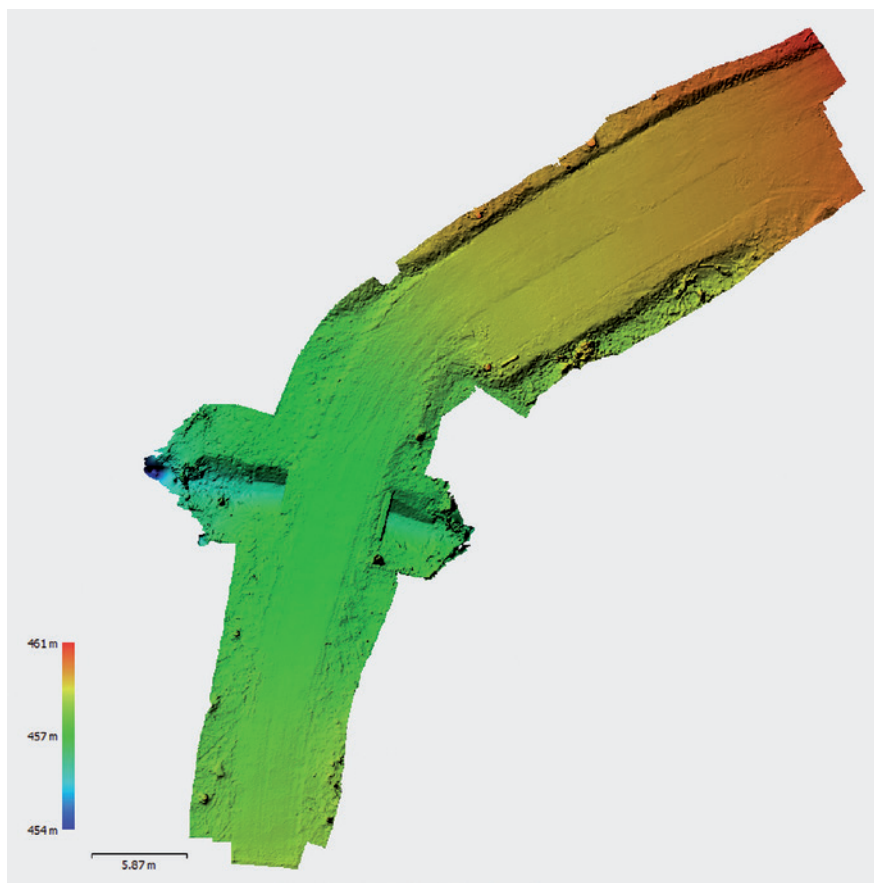
Model 3D wykonano, używając parametrów zamieszczonych na rycinie 8.

| Property                         | Value                 |
|----------------------------------|-----------------------|
| <b>Model</b>                     |                       |
| Faces                            | 2,837,194             |
| Vertices                         | 1,423,676             |
| Vertex colors                    | 3 bands, uint8        |
| <b>Reconstruction parameters</b> |                       |
| Surface type                     | Arbitrary             |
| Source data                      | Dense                 |
| Interpolation                    | Enabled               |
| Quality                          | Medium                |
| Depth filtering                  | Moderate              |
| Face count                       | 2,837,195             |
| Processing time                  | 44 minutes 53 seconds |

Ryc. 8. Parametry startowe tworzenia modelu 3D (źródło: program Agisoft PhotoScan)

#### 4.6. Opracowanie fotogrametryczne – Numeryczny Model Pokrycia Terenu

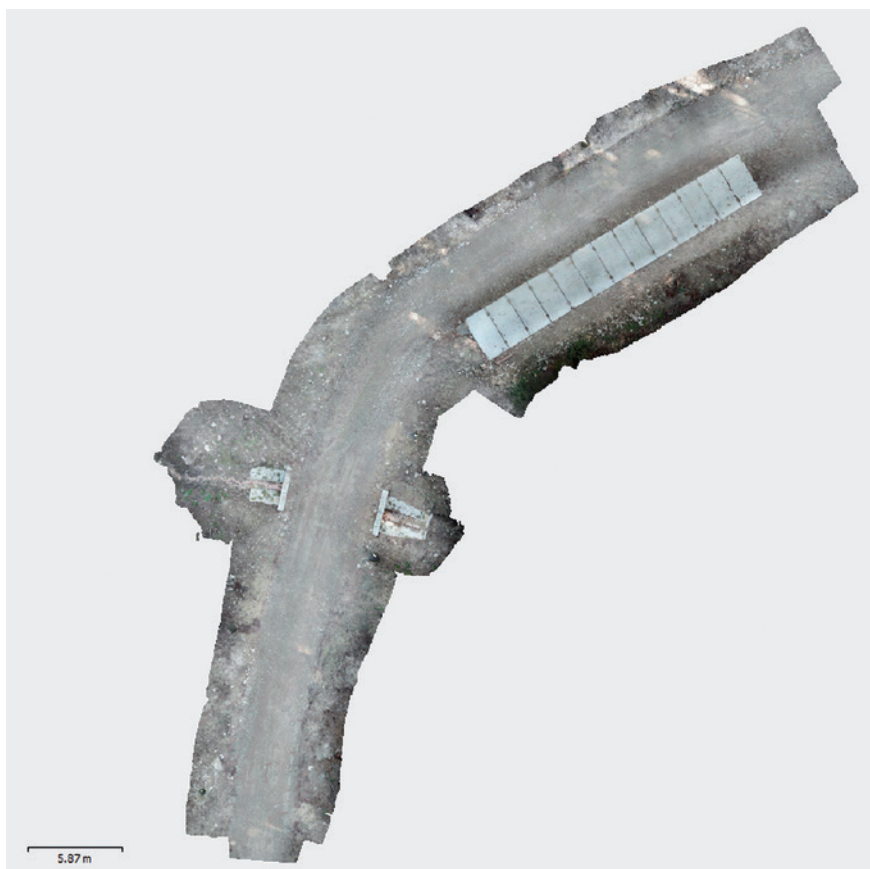
Na podstawie gęstej chmury punktów wygenerowano Numeryczny Model Pokrycia Terenu, który w sytuacji braku roślinności, na świeżo wykonanym szlaku operacyjnym można traktować jak klasyczny Numeryczny Model Terenu (ryc. 9). Uzyskano wielkość piksela 4,58 mm.



Ryc. 9. Numeryczny Model Pokrycia Terenu (źródło: program Agisoft PhotoScan)

#### 4.7. Opracowanie fotogrametryczne – Ortomozaika

Na wygenerowany wcześniej model 3D (mesh) nałożono fotografie i otrzymano ortomozaikę (ryc. 10) o pikselu wielkości 1,14 mm, która jest wygodnym produktem do wykonywania pomiarów liniowych i powierzchniowych, a także pobierania informacji o wysokości punktów.

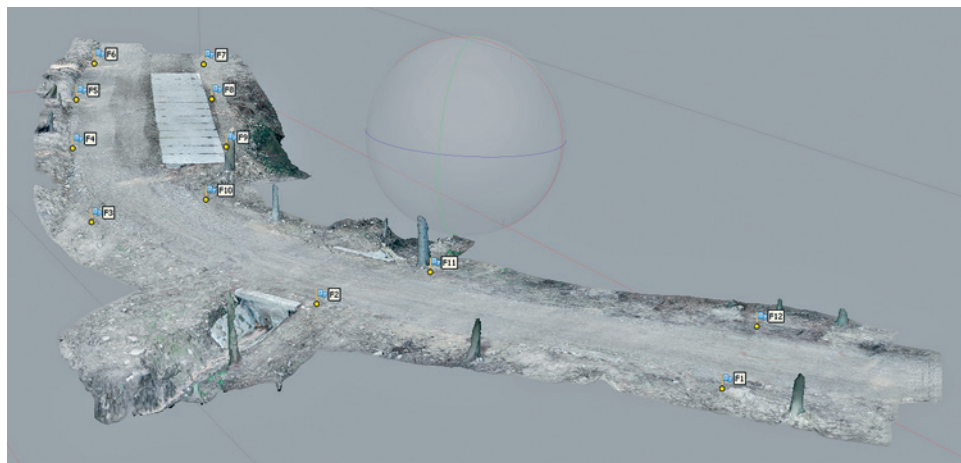


Ryc. 10. Ortomozaika (źródło: program Agisoft PhotoScan)

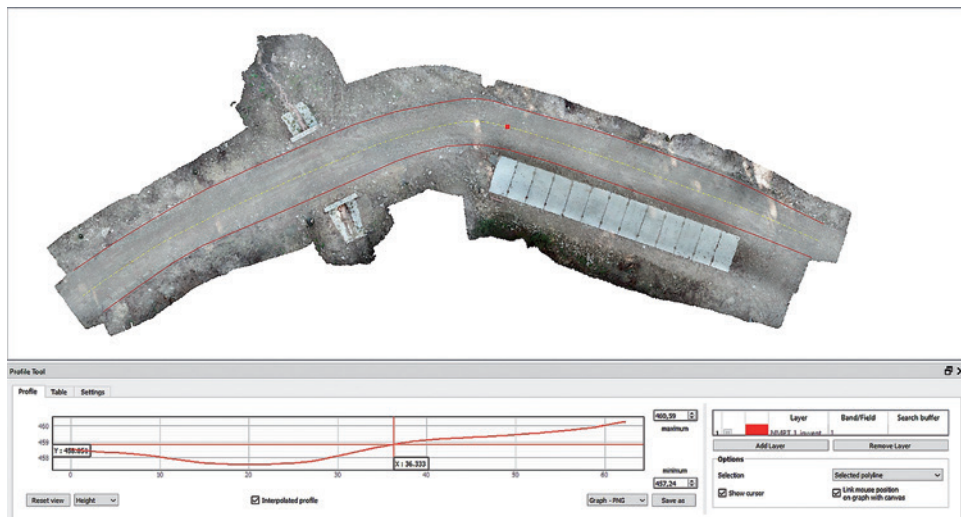
#### 4.8. Pomiary inwentaryzacyjne na uzyskanym materiale

Opisane wyżej działania dały w rezultacie materiał metryczny, na bazie którego wykonano i przedstawiono poniżej (ryc. 11–23) podstawowe pomiary w obserwowanych obiektach. Zaprezentowano widok ogólny odcinka, profile podłużne, przekroje poprzeczne w wybranych miejscach, pomiary liniowe i powierzchniowe, odczytanie wysokości punktu, a także próbę ustalenia wielkości promienia łuku poziomego kołowego (dopasowana krzywa ma promień 14 m; za podstawę przyjęto dopasowanie położenia punktu początkowego i końcowego łuku przy niesymetrycznym przebiegu trasy na łuku).

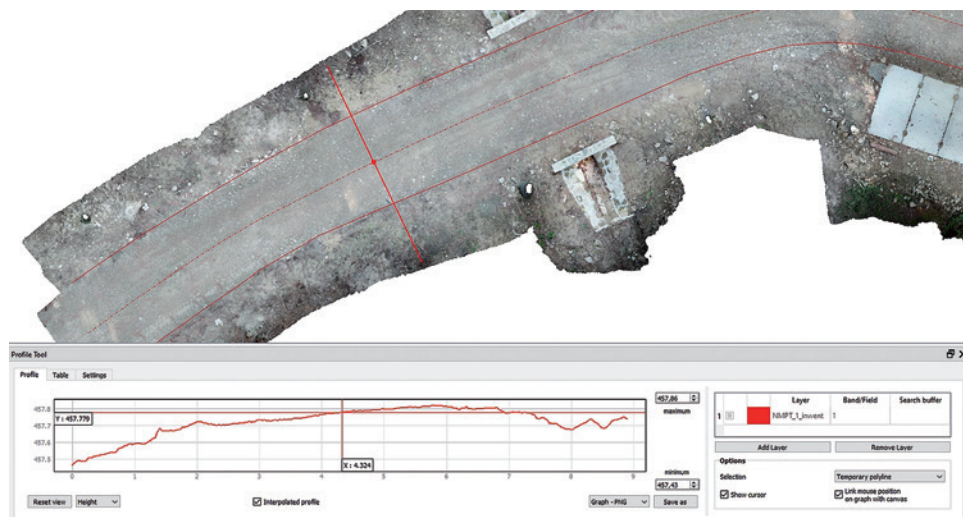




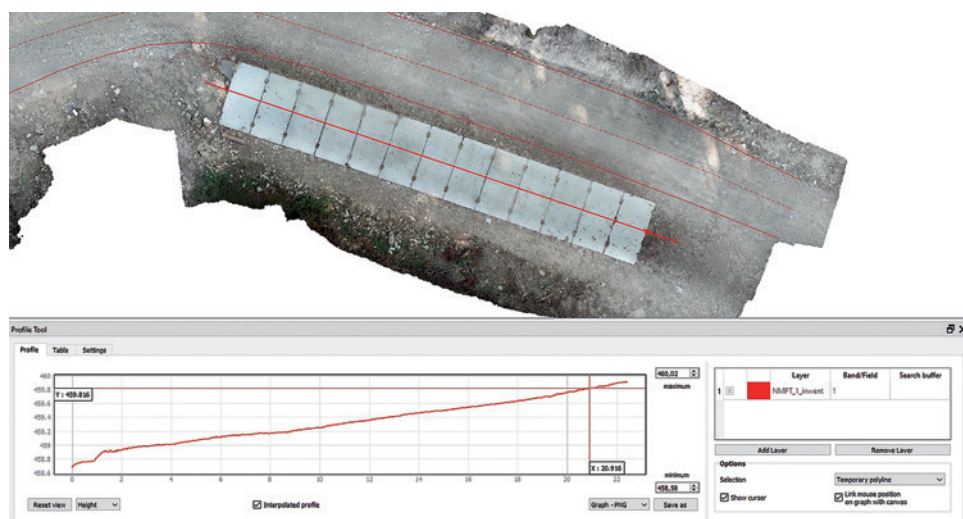
Ryc. 11. Widok ogólny odcinka szlaku (model 3D mesh) z siecią referencyjną (źródło: program Agisoft PhotoScan)



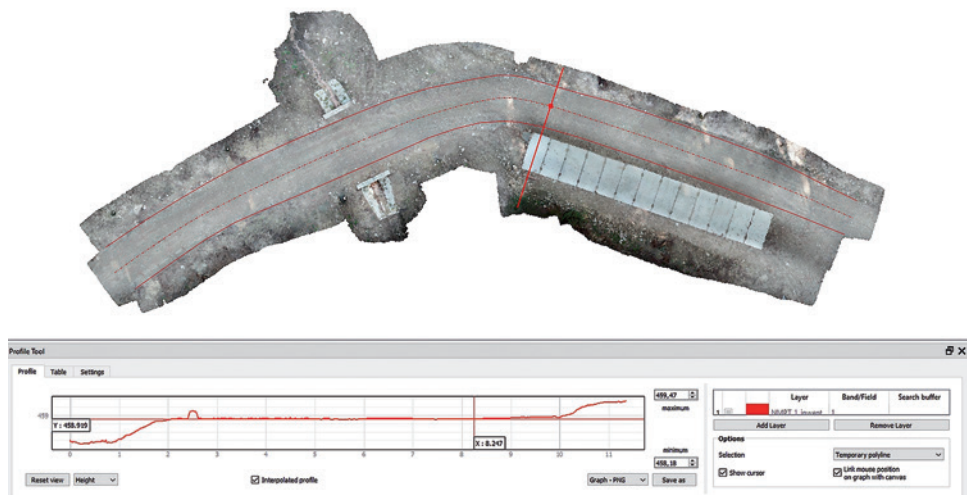
Ryc. 12. Niweleta szlaku (źródło: program QGIS)



Ryc. 13. Przekrój poprzeczny szlaku w wybranym punkcie trasy (źródło: program QGIS)



Ryc. 14. Profil podłużny składnicy drewna (źródło: program QGIS)



Ryc. 15. Wybrany przekrój poprzeczny szlaku i składnicy drewna (źródło: program QGIS)



Ryc. 16. Wielkość powierzchni składnicy drewna (źródło: program Agisoft PhotoScan)





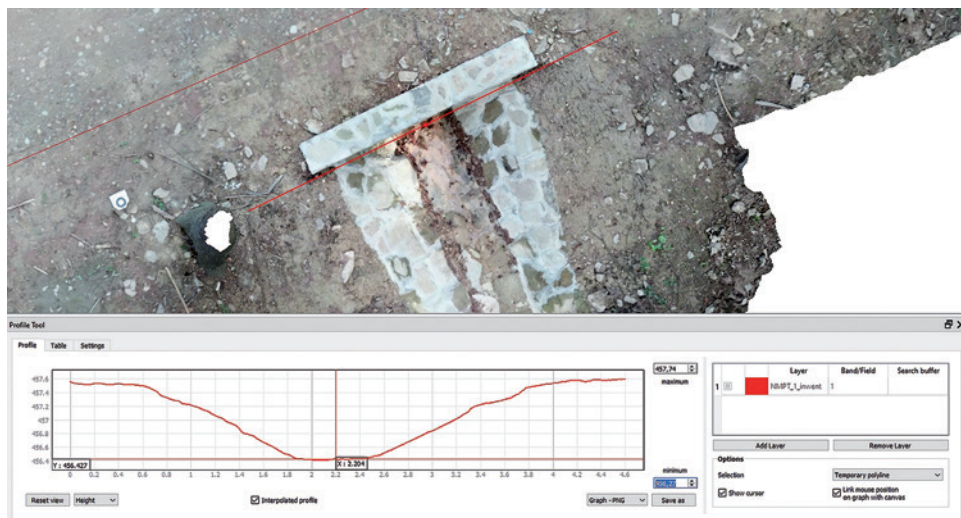
Ryc. 17. Długość przepustu rurowego (źródło: program Agisoft PhotoScan)



Ryc. 18. Wymiary ścianki wylotowej przepustu rurowego (długość i grubość) (źródło: program Agisoft PhotoScan)

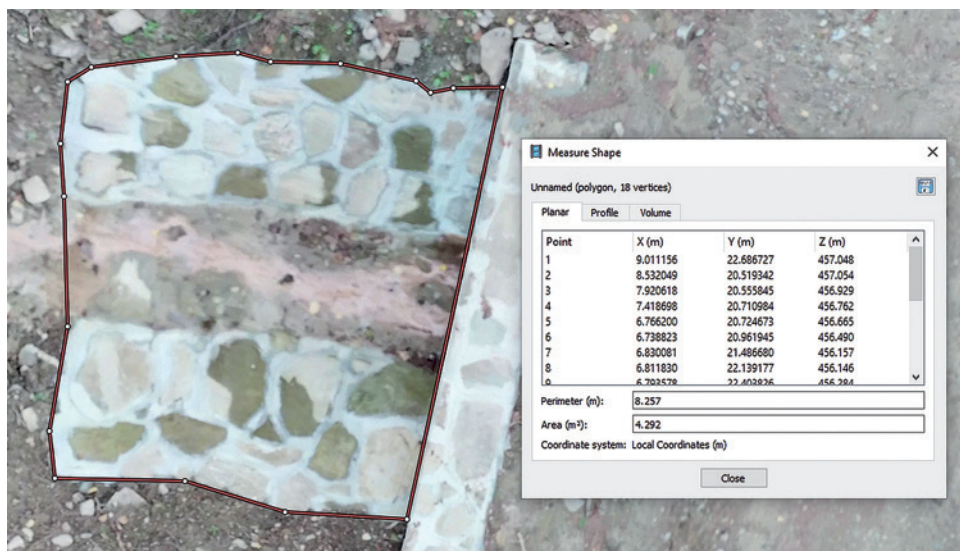


Ryc. 19. Współrzędne przestrzenne wylotu (z lewej) i wlotu (z prawej) przepustu rurowego (źródło: program Agisoft PhotoScan)



Ryc. 20. Przekrój poprzeczny umocnienia wlotu przepustu rurowego (źródło: program QGIS)





Ryc. 21. Powierzchnia umocnienia wylotu przepustu rurowego (źródło: program Agisoft PhotoScan)



Ryc. 22. Pomiar światła wlotu przepustu rurowego (model 3D mesh) (źródło: program Agisoft PhotoScan)



Ryc. 23. Wzajemne ułożenie zrealizowanej trasy i krzywizny łuku kołowego o promieniu 14 m (źródło: program QGIS)

## 5. Dyskusja

Przy obecnym postępie technicznym i technologicznym wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych, również do celów związanych z nadzorem i inwentaryzacją prac budowlanych, z dnia na dzień staje się coraz bardziej powszechne. Sprzyja temu dostępność sprzętu i oprogramowania, za pomocą którego można pozyskać w terenie odpowiedni materiał i następnie go przetworzyć z zadowalającą dokładnością finalną.

Przy budowlach liniowych prace terenowe ograniczają się do wyznaczenia i pomiaru sieci referencyjnej oraz wykonania samego nalotu (fotografowania / filmowania) w odpowiedniej gęstości nawrotów. Niski pułap lotu (pod koronami drzew) – na wysokim pułapie powierzchnię obiektu zasłaniałyby korony drzew – powoduje z jednej strony wysoką (milimetrową) dokładność uzyskiwanego materiału, z drugiej – wydłużenie czasu nalotu, zwielokrotnienie ilości nawrotów i materiału przekazywanego do analiz komputerowych, co wiąże się wprost z większą czasochłonnością opracowania kameralnego. Jeśli nie ma przeszkód w widoczności, loty mogą się odbywać na większych wysokościach, co zmniejsza ilość nawrotów, skraca czas lotu, ale też zwiększa wielkość piksela w materiale fotograficznym. Dużo w tym względzie zależy także od jakości (również ceny) kamery użytej do fotografowania. Należy wspomnieć o tym, że bardziej zaawansowane kamery są większe i cięższe, co pociąga za sobą konieczność stosowania większych dronów, które je będą przenosić.



Pomiar sieci referencyjnej można wykonać, używając technologii RTK (Ochalek i in. 2018), uzyskując w ten sposób gotowe współrzędne przestrzenne w wybranym układzie geodezyjnym. Dowiązuje to przestrzennie inwentaryzowany obiekt do istniejącego układu i umożliwia współpracę z innymi obiektami / projektami. W przypadku, w którym drzewostan utrudnia czy uniemożliwia kontakt z satelitami, układ referencyjny można pomierzyć geodezyjnie i potraktować jako niezależny, ale pomiary i prace kameralne określające współrzędne fotopunktów wymagają więcej czasu, choć stosowany tu sprzęt jest bardziej przystępny cenowo.

Uzyskiwany materiał metryczny pozwala na pomiary punktowe, liniowe i powierzchniowe oraz na wykonywanie przekrojów pionowych w dowolnym miejscu obiektu. Obiekt można także oglądać w dowolnie wybranej perspektywie, szczegółowości i skali. Opracowany w ten sposób materiał ma również tę zaletę, że można go porównywać z różnymi materiałami zdobytymi w nalotach realizowanych w innym czasie. Wymaga to oparcia kolejnych nalotów na tej samej sieci referencyjnej, a efektem są np. objętości układanych warstw w podbudowie czy nawierzchni drogi, zmiany objętości zapasu kruszywa na składowisku (ważne dla logistyki), jak również pojemności budowanych zbiorników retencyjnych / przeciwpożarowych. Najmniej dokładne pomiary wykonuje się na płaszczyznach pionowych (w pracy: światło przepustu), co wynika z pionowego kierunku ułożenia osi kamery w czasie wykonywania zdjęć. Tego rodzaju pomiary należy traktować jako orientacyjne.

Koszty pozyskania materiałów w terenie, sprzętu latającego, fotograficznego i programów do wykonywania specjalistycznych analiz (niektóre programy są bezpłatne) nie są niskie, jednak cała technologia jest coraz bardziej dostępna i, przy częstym wykorzystaniu, zasadniczo tania. Warto również zauważyć, że użycie w tym celu narzędzi, które oferuje klasyczna geodezja, także wymaga poniesienia stosownych i niemałych kosztów. Nie bez znaczenia pozostaje fakt, że i geodeci już wykorzystują w swych pomiarach opisywaną technologię.

## 6. Wnioski

1. Wykonywanie zadań współczesnej inżynierii drogowej, również w leśnictwie, może być wspomagane wykorzystaniem nowoczesnej technologii fotogrametrycznej.
2. Zarówno akwizycja, jak i opracowanie danych terenowych nie są trudne, ani czasochłonne, choć wymagają posiadania specjalistycznego sprzętu i oprogramowania. Otrzymywane materiały wynikowe o charakterze metrycznym umożliwiają wykonanie dowolnych pomiarów odległości, powierzchni, objętości czy określanie wysokości położenia wybranego punktu w stosunku

do poziomu morza, a także przekrojów pionowych w dowolnym miejscu i kierunku.

3. Przy niskiej wysokości lotu, przyjmowanej ze względu na okoliczności pracy wewnątrz drzewostanu, otrzymuje się bardzo wysoką dokładność uzyskanego materiału, osiągającą poziom nawet jednego milimetra. Ceną takiej precyzji pomiaru jest duże ryzyko uszkodzenia sprzętu w kontakcie z blisko rosnącymi drzewami.
4. Otrzymywane rezultaty w postaci konkretnych wymiarów i danych, dokładności, dostępności, możliwości wykorzystania w innych projektach, także w materiałach sprawozdawczych i prezentacyjnych, nawet w kontekście podniesienia prestiżu dzięki posługiwaniu się nowoczesną technologią, uzasadniają użycie przedstawionej metody.

## Literatura

- Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Martínez-Carricondo P. 2017. Assessment of Photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation Ground Control Points Number Using Unmanned Aerial Vehicle. *Measurement*, 98, 221–227. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.12.002.
- Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Martínez-Carricondo P., Sánchez-Hermosilla López J., Mesas-Carrascosa F.J., García-Ferrer A., Pérez-Porras F.J. 2018. Reconstruction of Extreme Topography from UAV Structure from Motion Photogrammetry. *Measurement*, 121, 127–138. DOI: org/10.1016/j.measurement.2018.02.062.
- Brach M., Chan J.C.-W., Szymanski P. 2019. Accuracy Assessment of Different Photogrammetric Software for Processing Data from Low-cost UAV Platforms in Forest Conditions. *iForest*, 12, 435–441. DOI: 10.3832/ifor2986-012.
- Biuletyn Informacji Publicznej Nadleśnictwa Limanowa. [https://bip.lasy.gov.pl/pl/bip/dg/rdlp\\_krakow/nadl\\_limanowa/zamowienia\\_publiczne/pg\\_201809110386308865738](https://bip.lasy.gov.pl/pl/bip/dg/rdlp_krakow/nadl_limanowa/zamowienia_publiczne/pg_201809110386308865738) (dostęp: 04.2019).
- Clapuyt F., Vanacker V., Van Oost K. 2016. Reproducibility of UAV-based Earth Topography Reconstructions Based on Structure-from-Motion Algorithms. *Geomorphology*, 260, 4–15. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.05.011.
- colidrone.pl (artykuł). <http://colidrone.pl/zastosowanie-dronow-gornictwie> (dostęp: 11.2019).
- Gawin A. 2009. Zastosowanie naziemnej fotogrametrii cyfrowej do aktualizacji mapy numerycznej w odkrywkowych zakładach górniczych. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 33, 2, 127–135.
- gisplay.pl (artykuł). <http://www.gisplay.pl/gis/7678-inwentaryzacja-930-kilometrow-linii-kolejowej-wykonanej-dronami-w-czasie-10-tygodni.html> (dostęp: 11.2019).
- Instrukcja obsługi dalmierza Leica Disto X310. <https://www.instrukcjaobslugipdf.pl/leica/disto-x310/instrukcja?p=1> (dostęp: 04.2019).

- Karwacki K.** 2018. Wykorzystanie fotogrametrii niskiego pułapu w badaniach osuwisk. Referat wygłoszony na IV Konferencji „Środowisko Informacji”. Centrum Nauki Kopernik, Warszawa.
- Kurczyński Z., Preuss R.** 2011. Podstawy fotogrametrii. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Mieszczak M., Oberski T.** 2016. Wykorzystanie niskobudżetowego UAS do nadzoru realizacji budowy obiektów liniowych na przykładzie inwestycji drogowej. Referat wygłoszony na XX Ogólnopolskim Sympozjum Naukowym „Fotogrametria dla geoinformacji”, Wrocław.
- muratorplus.pl (artykuł). <https://www.muratorplus.pl/biznes/wiesci-z-ryнку/co-potrafią-drony-na-placu-budowy-aa-nGzF-4GkT-jhmg.html> (dostęp: 11.2019).
- Ochalek A., Niewiem W., Puniach E., Ćwiakała P.** 2018. Accuracy Evaluation of Real-Time GNSS Precision Positioning with RTX Trimble Technology. Civil and Environmental Engineering Reports, 28, 4, 49–61.
- Tomašík J., Mokoš M., Saloň Š., Chudý F., Tunák D.** 2017. Accuracy of Photogrammetric UAV Based Point Clouds Under Conditions of Partially-open Forest Canopy. Forests, 8, 151. DOI:10.3390/f8050151.



# Czynniki wpływające na retencyjne właściwości elementów ekosystemów leśnych

Anna Klamerus-Iwan

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: anna.klamerus-iwan@urk.edu.pl

## Abstrakt

Pojemność wodna koron drzew i innych elementów ekosystemu stanowi jedną z głównych składowych bilansu wodnego środowisk leśnych oraz jest uważana za kluczowy element procesów ekohydrologicznych. Jej pomiaru dokonuje się różnymi metodami terenowymi i laboratoryjnymi. Zależy od szeregu czynników, które wynikają zarówno z cech drzewostanów, jak i warunków meteorologicznych. Przedstawione badania uzupełniają lukę w wiedzy na temat właściwości fizycznych i hydrologicznych listowia, kory i martwego drewna. Pokazują relacje pomiędzy właściwościami retencyjnymi a stopniem ich zanieczyszczenia, temperaturą wody opadowej, stopniem rozkładu czy cechami typowymi dla różnych gatunków.

Pomimo coraz większej liczby badań dotyczących hydrologicznej roli drzewostanu w zlewniach, nadal mamy niepełną wiedzę na temat wzajemnych relacji oraz, często przeplatających się, przyczyn i skutków w układzie: drzewostan – gleba – atmosfera.

Rosnące zanieczyszczenie i zmiany klimatu nie mogą być pomijane w budowie prognoz i modeli hydrologicznych.

**Słowa kluczowe:** pojemność wodna koron drzew, intercepcja, natężenie opadu deszczu, zwilżalność, retencyjność drzewostanów

## 1. Intercepcja i pojemność wodna drzew

Intercepcję definiuje się jako ilość wody, która może być zatrzymana na całej powierzchni drzewa lub drzewostanu. Jest to proces dynamiczny i zmieniający się podczas trwania opadu deszczu. Intercepcję można rozpatrywać interdy-

scyplinarnie, bo stanowi zarówno przyczynę, jak i konsekwencję bardzo wielu czynników i procesów. Rozwój oraz ewolucję metod określających pojemność wodną i intercepcję omówiono w wielu pracach, zagadnienie to podejmowali m.in. Friesen i in. (2015), Klamerus-Iwan i in. (2020 b).

W literaturze wyodrębnia się dwa ujęcia, w których można rozpatrywać intercepcję. Pierwsze jest wielkoobszarowe i dotyczy całych zlewni czy drzewostanów. Często problem stanowi zmierzenie wielkości „zbiornika intercepcyjnego”. Pomocne okazuje się wykorzystanie metod satelitarnych. Prowadzone są także badania w skali całych drzewostanów, w których stwierdza się, że odpowiednio zaprojektowany skład gatunkowy i zwarcie drzew mogą zdecydowanie przyczynić się do zmniejszenia spływu powierzchniowego (Wang i in. 2008). Badania Muzyło i in. (2009) wykazały, jak duży jest wpływ stopnia pokrycia terenu na hydrologię i bilans wodny. Wszystkie te prace wskazują na potrzebę określenia całościowego wpływu pokrycia terenu przez rośliny na system dystrybucji wody w lesie. Należy mieć również świadomość, że ten rezerwuuar wody, jakim jest roślinność w ekosystemie, może wpływać na chemizm wody przenikającej przez korony i spływającej po pniu do gleby.

Drugie podejście do problemu intercepcji jest bardziej ekosystemowe. W tym ujęciu można rozpatrywać realny wpływ pojedynczego drzewa na ilość wody, jaka dotrze do dna lasu. Nie są to małe wartości, bo nawet od 10 do 50% z całości opadu zostaje w koronach drzew (Crockford i Richardson 2000). Na intercepcję wpływają możliwości pojemnościowe danego zbiornika intercepcyjnego. Zbiornik intercepcyjny to ekwiwalent powierzchni, która przechwytuje wodę opadową lub opóźnia jej dotarcie do dna lasu. W tych procesach uwidacznia się wpływ takich elementów ekosystemu, jak mchy i porosty (Porada i in. 2018; Klamerus-Iwan i in. 2020 a). Pojemność wodna zależy od bardzo wielu czynników, które można podzielić na „drzewostanowe” i „meteorologiczne”.

Rozróżnienie intercepcji na aktualną, czyli mierzoną w czasie trwania opadu deszczu, i maksymalną, czyli potencjalnie możliwą przy danych warunkach, prowadzi do konieczności ustalenia pojemności wodnej poszczególnych elementów ekosystemu, takich jak korony drzew, kora, ściółka czy martwe drewno. Pojemność wodna nie jest wartością stałą, ulega znacznym wahaniom, na co wpływ mają m.in. warunki meteorologiczne, np. prędkość wiatru oraz wilgotność względna powietrza.

Pojemność wodna w głównej mierze zależy od stanu powierzchni materiału roślinnego (Rosado i Holder 2013). Zmienność sezonową i gatunkową zaobserwowali Neinhuis i Barthlott (1997), Nanko i in. (2006), Koch i Barthlott (2009), Holder (2013). Zmiany w składzie chemicznym samych liści są wynikiem ich przystosowania do życia w warunkach panujących w danej porze roku (Holder 2020). Struktura warstwy woskowej, odpowiedzialnej za sposób

przylegania kropli, jest związana z przemianami chemicznymi, zachodzącymi szczególnie w starzejących się liściach (Fernández i in. 2011). Zawartość wosków w kutykuli w przeliczeniu na jednostkę powierzchni liści jest dużo mniejsza w młodych liściach. Na teksturę powierzchni liści ma również wpływ zmieniające się środowisko, a głównie ilość zanieczyszczeń. Nawet niewielkie zmiany hydrofilności koron drzew mogą mieć duże konsekwencje ekologiczne w zlewniach zurbanizowanych (Doerr i in. 2006).

Wszystkie liście na gałęziach tworzą koronę drzewa. Sam układ gałęzi w koronie również nie pozostaje bez znaczenia. Co więcej, można pokusić się o stwierdzenie, że gospodarowanie wodą w obrębie korony jest swoistą strategią ekologiczną. Dla przykładu buk pospolity (*Fagus sylvatica*) z koroną „lejkowatą” ma gałęzie ustawione tak, że woda opadowa dobrze spływa do pnia. Gładka kora na pniu sprzyja stosunkowo szybkiemu spływowi wody do korzeni. Korzeń jest palowy – głęboki, przez co drzewo zasilane jest przede wszystkim tuż przy pniu. Mniejsze przenikanie wody następuje przez czaszę korony. Bredemeier (1988) szacuje spływ po pniach buków na max. 30%, według badań Małka i Wężyka (2000) spływ po bukach wynosi 2%–3,5%, według analiz Kozłowskiego (2013) przeprowadzonych w Stacji Bazowej ZMŚP Święty Krzyż spływ po bukach wynosi 13,7% (średnia dziesięcioletnia), max. miesięczny – 22,5% opadu bezpośredniego. Odwrotną zależność można wykazać dla sosny (*Pinus sylvestris* L.) o parasolowatej, ażurowej koronie, przez którą przenika dużo deszczu. Sama kora drzewa zmienia się z wysokością i wiekiem, ale zasadniczo klasyfikuje się ją jako chropowatą. Korzeń jest znacznie bardziej rozgałęziony i płytki. Drzewo pobiera więc wodę przez korzenie, która przenika z korony (Klamerus-Iwan i Szymański 2014; Kozłowski i Józwiak 2017).

Warstwą biorącą udział w przechwytywaniu wody z opadu jest również dolne piętro lasu. W monokulturach sosnowych odgrywa znikomą rolę, ale w mieszanych lasach, gdzie nawet podszyt jest wielowarstwowy, pełni istotną funkcję. Architektura przestrzenna drzewostanu, jego piętrowość również są związane z transformacją oraz dystrybucją wody do niższych warstw, a w konsekwencji i do korzeni. Nanko i in. (2006) zauważyli istotne zmiany energii kinetycznej kropeł docierających do niższych pięter w lesie. Należy również zwrócić uwagę na różnice w składzie gatunkowym i na dodatkowy przychód wody z osadów mgielnych (Wu i in. 2018).

Kora sama w sobie jest również istotnym zbiornikiem retencyjnym w ekosystemie. Stanowi najbardziej zewnętrzną warstwę łądy, gałęzi, a nawet korzeni drzew i pełni bardzo ważną funkcję zarówno dla pojedynczego drzewa, jak i dla ekosystemu (Van Stan i in. 2015). W celu ekstrapolacji wyników wodoodporności kory Levia i Herwitz (2005) wprowadzili podział drzew na te o szorstkiej i gładkiej korze. Opracowana przez nich klasyfikacja zwilżalności opiera się, podobnie jak w przypadku liści, na mierzeniu kątów nachylenia kropeł do



powierzchni kory. Wadą tej metody jest brak możliwości jej zastosowania do analiz drzewa stojącego. Tutaj z pomocą przychodzi ustalenie mikroreliefu kory, czyli przestrzennej tekstury jako mierzalnego czynnika, który ma duże znaczenie dla modelowania ekohydrologicznego (Sioma i in. 2018). Trójwymiarowy model kory z wykorzystaniem triangulacji laserowej obrazuje duże różnicowanie charakterystyk mikroreliefu wraz z wysokością nawet w obrębie jednego gatunku. To wskazuje na potrzebę uwzględnienia dużej zmienności indeksów morfologii kory wzdłuż pnia drzew. Ponadto można oczekiwać, że cechy morfologii kory będą się różnić w zależności od wieku, wymiarów drzewa i warunków siedliskowych.

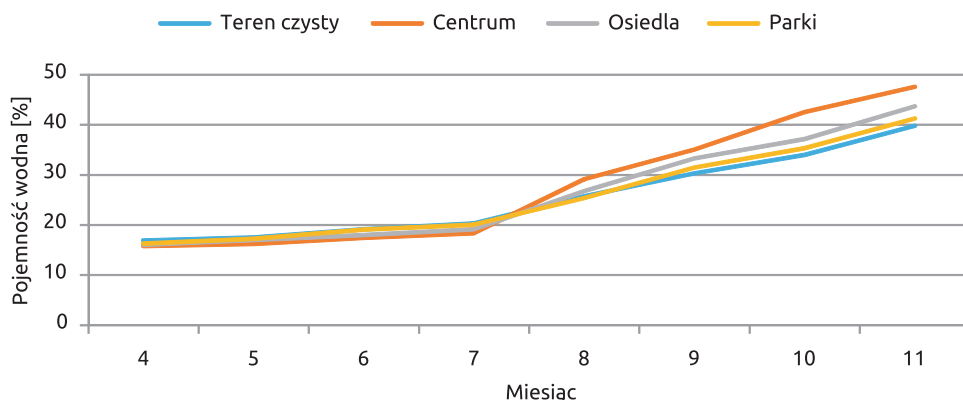
## 2. Wpływ zanieczyszczenia liści i igieł na pojemność wodną

Drzewa i krzewy są narażone na działanie zanieczyszczeń, mogą w różnym stopniu akumulować mikropyły na swojej powierzchni (Poppek i in. 2012). Gatunki drzew różnią się pod względem ilości zatrzymywanych zanieczyszczeń (Dzierżanowski i in. 2011; Sæbø i in. 2012). Niektóre gatunki, w tym także dąb, są wykorzystywane do biomonitoringu zanieczyszczenia powietrza (Ugolini i in. 2013). Długa ekspozycja na zanieczyszczenia powoduje zmianę tekstury powierzchni wybranych elementów drzew, co może wpływać na możliwości retencyjne koron. Ilość substancji szkodliwych w powietrzu i ich skład chemiczny mają wpływ na stan powierzchni aparatu asymilacyjnego (Kosiba 2008), dlatego uzasadnione jest rozpatrywanie pojemności wodnej koron drzew pod wpływem zanieczyszczeń w układzie stref odległości od źródła zanieczyszczenia. Kwestia narastającej ilości substancji szkodliwych w miastach była wielokrotnie poruszana (Nowak i in. 2008; Matyssek i in. 2012), niemniej jednak wpływ zanieczyszczeń na możliwości retencyjne koron drzew i związek z bilansem wodnym nie zostały wystarczająco zbadane. Obecność i wzrost ilości substancji smolistych, bogatych w wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w powietrzu stanowi poważny problem, ponieważ związki te są wszechobecne w środowisku (WHO 2017). Trudno je pomijać również w badaniach hydrologicznych, zwłaszcza że same są silnie hydrofobowe i nierozpuszczalne w wodzie.

Wpływ różnic gatunkowych oraz sezonowych na wysokość pojemności wodnej roślin był zauważalny także w przypadku lipy (*Tilia cordata* Mill.) i topoli (*Populus* L.), bez względu na to, czy próbki pobrano w terenie leśnym, czy w centrum miasta (Klamerus-Iwan i in. 2018 a). Miejsca poboru materiału do analizy – las, park miejski, osiedle mieszkalne, centrum miasta – różniły się zawartością węglowodorów aromatycznych w liściach i z tym poziomem zanieczyszczeń wiązano zmieniające się wartości pojemności wodnej koron drzew.

Najwyższą średnią pojemność wodną zanotowano dla gałęzi topoli pobranych w centrum miasta (27,76% całego opadu). Najniższą zmierzono dla gałęzi lipy w strefie osiedli mieszkaniowych (22,39%). Przeprowadzone doświadczenie pozwoliło na ustalenie istotnych różnic pomiędzy strefami poboru próbek w danych miesiącach pod względem ilości wody zatrzymującej się na gałęziach lipy i topoli. W przypadku obu gatunków pojemność wodna rosła z kolejnymi miesiącami okresu wegetacyjnego, ale wartości różniły się przebiegiem pomiędzy terenami, w jakich pobierano próbki. Wartości pojemności wodnej uzyskane w następujących po sobie miesiącach dla gałęzi pobranych w terenie leśnym stanowiły punkt odniesienia dla kolejnych wartości uzyskiwanych dla gałęzi pobranych w wybranych miejscach miasta. W kwietniu, maju, czerwcu i lipcu w terenie leśnym odnotowano najwyższą pojemność wodną, a w późniejszych miesiącach liście z tej strefy zatrzymywały najmniej wody w porównaniu z gałęziami pobranymi w mieście. Istnieje silna zależność zarówno pomiędzy pojemnością wodną a terminem poboru próbek, jak i miejscem ich poboru. W ujęciu gatunkowym najwyraźniejszy wzrost pojemności wodnej był obserwowany od lipca dla topoli. Kąty nachylenia kropli, świadczące o stopniu zwilżalności, malały w okresie wegetacyjnym dla obu gatunków i w każdej ze stref (ryc. 1). Ta zależność została również stwierdzona dla dębu i buka (Klamerus-Iwan i Błońska 2017; Klamerus-Iwan i Kraj 2017).

W liściach topoli zaobserwowano wyższą średnią zawartość wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA). Te silnie kancerogenne substancje są nierozpuszczalne w wodzie. Zawartość WWA różniła się w zależności od miejsc, w których pobrano próbki. Najwyższą zaobserwowano w liściach topoli pobranych w centrum miasta. Najmniejszą zawartość węglowodorów aromatycznych odnotowano dla liści lipy pobranych w lesie.

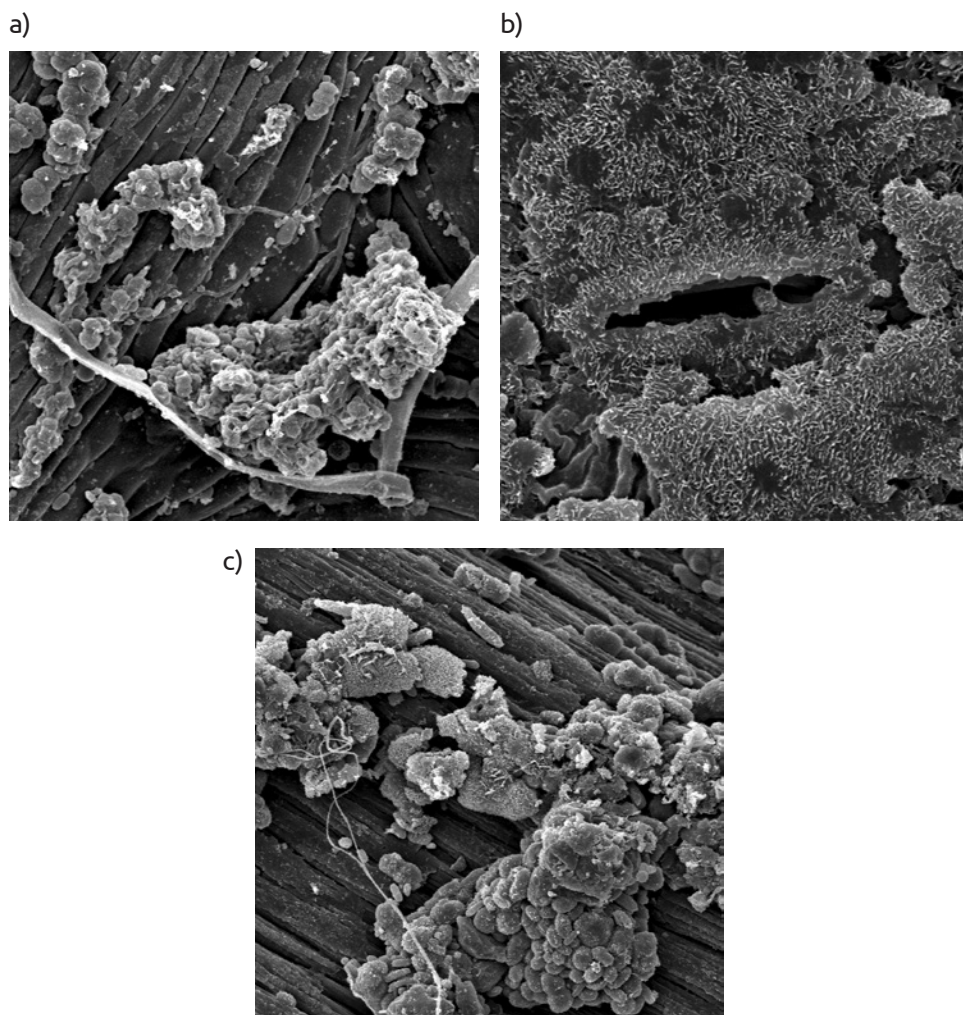


Ryc. 1. Sezonowa zmienność pojemności wodnej dla topoli w zależności od lokalizacji (źródło: Klamerus-Iwan i in. 2018 a)

Drzewa topoli charakteryzowały się wyższą pojemnością wodną i jednocześnie zatrzymywały w liściach więcej WWA. Gałęzie obu gatunków pobranych w ścisłym centrum miasta zawierały więcej WWA i cechowały się wysoką pojemnością wodną. Wraz ze wzrostem zawartości WWA rosła pojemność wodna koron drzew oraz malał kąt nachylenia kropel do liścia. W pierwszych miesiącach okresu wegetacyjnego na liściach z wysoką zawartością WWA pobranych w mieście stwierdzono niższą pojemność wodną. Na tej podstawie można wnioskować, że hydrofobowe węglowodory aromatyczne do pewnego momentu przenoszą swoje właściwości na liście. Wyraźny wzrost pojemności wodnej stwierdzono w drugiej połowie sezonu wegetacyjnego (począwszy od lipca) na gałęziach najbardziej zanieczyszczonych WWA (zob. ryc. 3). Prawdopodobnie było to spowodowane akumulacją zanieczyszczeń przyczyniających się do uszkodzenia powierzchni liści. Długotrwała ekspozycja na zanieczyszczenia doprowadza do erozji powierzchni liści i zmian w ich strukturze. Stopień zanieczyszczenia liści można również potwierdzić zdjęciami uzyskanymi ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), na których widać ilość zanieczyszczeń zebranych wokół aparatów szparkowych, zwłaszcza na powiększeniach fotografii wykonanych w październiku (Sgrigna i in. 2016) (ryc. 2).

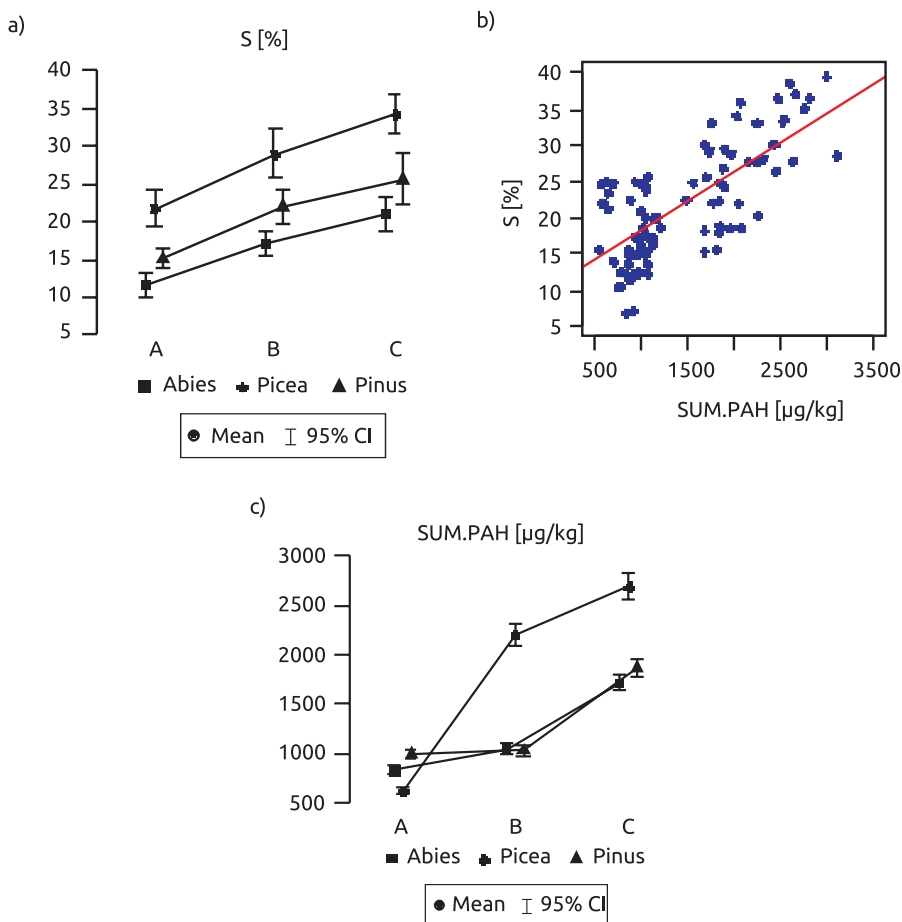
Silny i długotrwały stres abiotyczny drzew w terenie zurbanizowanym powoduje widoczne zmiany w funkcjonowaniu aparatu asymilacyjnego, co skutkuje zmianami hydrofobowości w hydrofilność liści. Analizy statystyczne wykazały dodatkowo, że zanieczyszczenia WWA związane z miejscem poboru próbek wyjaśniają w 95% zmienność uzyskiwanych wartości pojemności wodnej. Pozostałe 5% to inne czynniki zależne od samej lokalizacji, takie jak wyższe temperatury w mieście czy zmiany w kutykuli pod wpływem zanieczyszczeń (Poppek i in. 2011).

Wpływ lokalizacji i związanego z nią stopnia zanieczyszczenia na pojemność wodną analizowano także dla gatunków iglastych: sosny pospolitej, jodły pospolitej i świerka pospolitego (Klamerus-Iwan i in. 2018 b). Powierzchnia kontrolna znajdowała się w terenie leśnym (A), natomiast w obrębie miasta pobierano dwie dodatkowe próbki, jedną w ścisłym centrum Krakowa (C), a drugą na obszarze osiedli miasta (B). Na wykresach 3a i 3b widoczne jest, że pojemność wodna (S) zależy zarówno od gatunku drzewa, z którego pobierano gałęzie, jak i od jego lokalizacji. W tym wypadku jodła stała się gatunkiem referencyjnym, gdyż zatrzymywała najmniej wody we wszystkich lokalizacjach. Czynnikiem gatunkowym okazał się dominujący. Ilość zatrzymanej wody była wyższa o średnio 10,2% dla świerka i o 3,5 % dla sosny we wszystkich lokalizacjach łącznie. Świerk wykazywał najwyższą zdolność do zatrzymywania opadu. Skorelowanie sumy zakumulowanych wielopierścieniowych węglodorów aromatycznych (SUM.PAH) na powierzchni igieł z pojemnością wody (ryc. 3b) uwidacznia następującą zależność – im wyższa koncentracja zanieczyszczeń, tym wyższa pojemność wodna.



Ryc. 2. Przykładowe zdjęcia SEM liści pobranych z terenów zurbanizowanych (fot. A. Klamerus-Iwan)

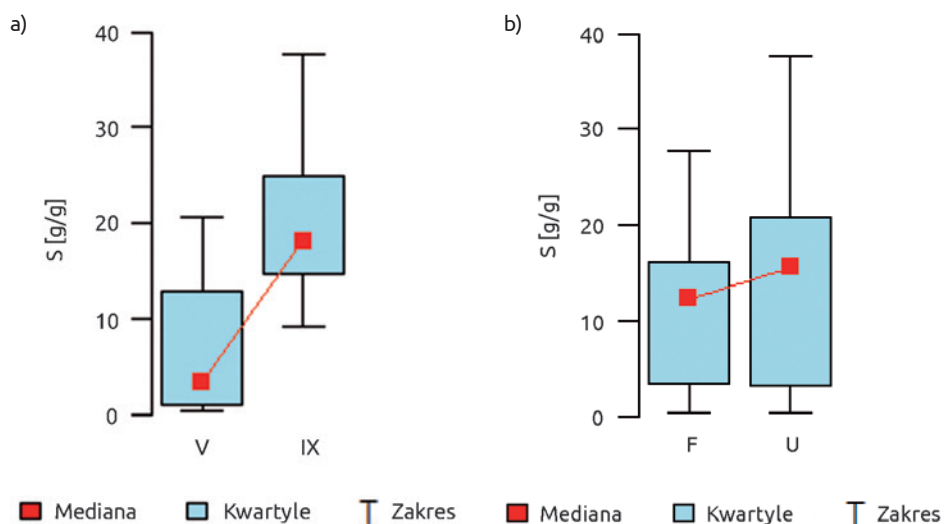
Organy asymilacyjne sosny i jodły wykazują bardzo podobne zdolności do zatrzymywania zanieczyszczeń. Świerk gromadzi najwięcej WWA, ma również najwyższą pojemność wodną (ryc. 3 c). To daje nie tylko informację o jego możliwościach retencyjnych, ale także o zdolności do fitoremediacji. Wszystkie gatunki zatrzymują podobne ilości zanieczyszczeń w terenie leśnym, ale na obszarach zurbanizowanych to właśnie świerk może mieć duże znaczenie jako gatunek wpływający na zmniejszanie ilości substancji szkodliwych w powietrzu.



**Ryc. 3.** a) Korelacja między pojemnością wodną (S) (%) a gatunkami i lokalizacjami; b) Korelacja między sumą stężeń WWA a gatunkami i lokalizacjami, gdzie: A – obszar kontrolny, B – dzielnica mieszkaniowa w mieście, C – centrum miasta

### 3. Sezonowe różnice w pojemności wodnej

Termin poboru próbek liści do badań wskazuje na dużą sezonową zmienność w pojemności wodnej. Dla zdrowych liści dębu szypułkowego można obserwować wzrost średniej pojemności wodnej z 6,2% całości symulowanego opadu w maju do 20,6% we wrześniu, a więc wiek liścia i jego stan fenologiczny nie mogą być pomijane w badaniach ekohydrologicznych. Wiek liścia znacząco wpływa również na kąty nachylenia kropli wody do jego powierzchni. Dla zdrowych liści analizowanych w maju kąt nachylenia wynosił średnio 153°, natomiast dla próbek z września 30° (ryc. 4).



Ryc. 4. Zależność pomiędzy pojemnością wodną a: a) terminem poboru próbki, b) lokalizacją próbki, gdzie: S – pojemność wodna, V – termin poboru próbki: maj, IX – termin poboru próbki: wrzesień, F – las naturalny, U – tereny zurbanizowane

#### 4. Zwilżalność materiału roślinnego i wpływ pokrycia liści patogenami chorobowymi na pojemność wodną

Pojemność wodna koron drzew ściśle wiąże się z cechą fizyczną samego materiału roślinnego, którą jest zwilżalność. Aryal i Neuner (2010) stworzyli klasyfikację, na podstawie której zbudowano system podziału roślin od najbardziej hydrofilnych po superhydrofilowe (tab. 1).

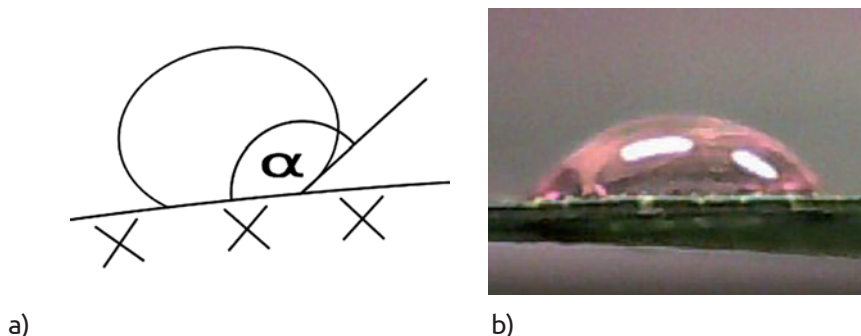
Klasyfikacja ta opiera się na wielkości kąta, pod jakim kropla wody przylega do liścia (ryc. 5). Bez wątplenia zawartość wosków w kutykuli ma duży wpływ na ilość zatrzymanej wody i kąt nachylenia kropli do liścia (Extrand 2005;

Tabela 1. Klasyfikacja stopni zwilżania według Aryala i Neunera (2010)

| Kąt przylegania kropeł ( $\alpha$ ) [°] | Stopień hydrofobowości  |
|---|-------------------------|
| < 40                                    | superhydrofilowe        |
| 40–90                                   | wysoka zwilżalność      |
| 90–110                                  | dobra zwilżalność       |
| 110–130                                 | trudno zwilżalne        |
| 130–150                                 | bardzo trudno zwilżalne |
| > 150                                   | superhydrofobowe        |



Li i Amirfazli 2008; Klamerus-Iwan i Błońska 2017). Natomiast Koch i Barthloot (2009) łączą efektywność zwilżania z takimi elementami liścia, jak włoski. Zwilżalność jest również związana z gatunkiem drzewa i stanem powierzchni (Papierowska i in. 2018). Dobrze przebadany wydaje się być efekt liści lotosu (Ensikat i in. 2010) i samooczyszczania się liści (Bhushan i Jung 2011).



Ryc. 5. Schemat pomiaru kąta nachylenia kropli do powierzchni liścia (źródło: Klamerus-Iwan i in. 2020)

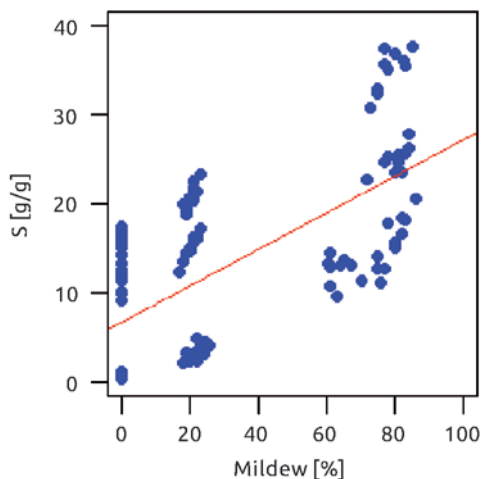
Superhydrofobowość daje ochronę przeciwko patogenom roślin, takim jak grzyby i bakterie, ponieważ zakażenie jest ograniczone brakiem wody i wilgotności (Stosch i in. 2007). Niektóre choroby dębów, takie jak mączniak prawdziwy (*Microsphaera alphitoides* Griff. et Maubl.), do rozwoju konidiów potrzebują właśnie wilgoci i dodatnich temperatur. Biały nalot skupień konidiów, które bywają bardzo liczne, ma charakter hydrofilowy. Przykładem pracy łączącej problem pokrycia liści grzybnią z zagadnieniem pojemności wodnej koron drzew jest publikacja Klamerus-Iwan i Witek (2018).

Wraz ze wzrostem pokrycia liści białym nalotem grzybni rośnie pojemność wodna i stopień zwilżalności liści dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.). Pojemność wodna próbek pobranych w lesie w maju wynosiła odpowiednio: 1% sumy opadu przy braku nalotu mączniaka na powierzchni liścia, 3% przy pokryciu mączniakiem do 20% powierzchni liścia, 15% przy pokryciu mączniakiem do 80% powierzchni liścia. Woda opadowa na młodych liściach pobranych w maju zatrzymywała się praktycznie tylko w obrębie miejsc z białą grzybnią mączniaka (ryc. 6). We wrześniu wartości pojemności wodnej wraz z analogicznym wzrostem pokrycia liści mączniakiem rosły od 11% do 25% zatrzymanej wody. Tworzeniu się konidiów *Microsphaera alphitoides* sprzyjają słoneczne i ciepłe wiosny oraz lata, tymczasem do ich kiełkowania potrzebna jest wilgoć w postaci kropeł (Kiss i in. 2004; Liyanage i in. 2017). Poprzez zatrzymywanie większej ilości wody z opadu patogen zapewnia sobie sprzyjające warunki do rozwoju grzybni. Większa ilość zatrzymanego opadu przez liście zainfekowane mączniakiem jest

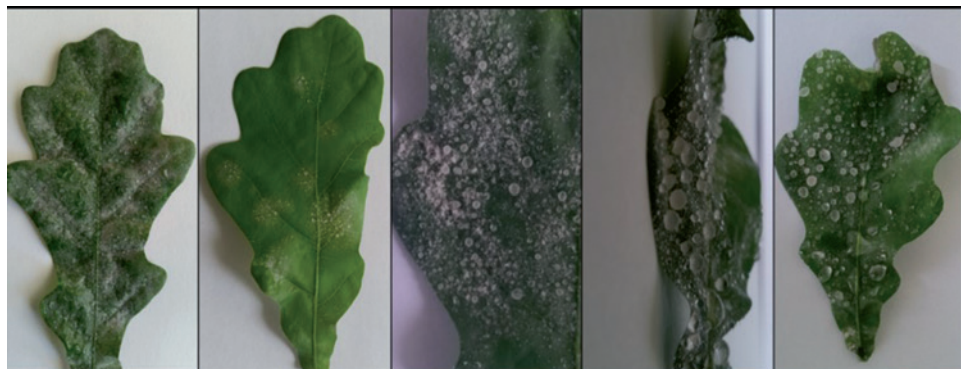


wynikiem zmiany stanu powierzchni na bardziej „szorstką” w stosunku do liścia niezainfekowanego. Stan powierzchni jako cecha materiałowa potwierdza duży wpływ na ilość zatrzymywanej wody nie tylko na materiale roślinnym.

a)



b)



**Ryc. 6.** Relacja stopnia porażenia liści dębu mączniakiem prawdziwym i krople wody zatrzymane w obrębie grzybni (źródło: Klamerus-Iwan i Witek 2018)

Analizy zdjęć z mikroskopu SEM wykazują, iż tekstura grzybni mączniaka dębu powoduje, że więcej zanieczyszczeń wyłapywanych jest przez konidia grzybni. Liście zainfekowane w 80% mączniakiem dębu, pobrane we wrześniu, w mieście zatrzymały średnio 35% opadu, a pobrane w lesie – 25% opadu. Kąt nachylenia w analogicznym układzie wynosił 35,5° i 23,6°. Można sądzić, że mączniak pojawiający się na terenach zanieczyszczonych potęguje wpływ tych zanieczyszczeń na pojemność wodną i zwilżalność materiału roślinnego. Przedstawiona obserwacja jest bardzo ważna i świadczy o istotnym wpływie

chorób liści zarówno na ilość akumulowanych na nich zanieczyszczeń, jak i na pojemność wodną aparatu asymilacyjnego drzew.

Te stwierdzenia potwierdzają doniosłą rolę roślin drzewiastych w ekosystemach leśnych, ale także w przestrzeni miejskiej. Wszystkie zmiany dokonujące się w środowisku nie pozostają bez znaczenia dla procesów hydrologicznych, zachodzących w koronach drzew.

Poza stanem powierzchni materiału roślinnego na możliwości retencyjne ekosystemów leśnych oddziałują także czynniki meteorologiczne, związane z samym opadem atmosferycznym (Nanko i in. 2006; Van Stan i in. 2015). Wpływ charakterystyki opadu (natężenie, rozmiar kropel, czas trwania) na dystrybucję wody w obrębie korony również potwierdza, że pojemność wodna i intercepcja nie są wartościami stałymi. Im niższe natężenie deszczu i im dłuższy czas jego trwania, pojemność wodna jest wyższa. Zbiornik intercepcyjny wypełnia się powoli, ale skutecznie. Krótkie oraz intensywne opady w większym stopniu i szybciej przenikają do dna lasu. Energia kinetyczna takich kropel jest duża. Na tej podstawie można stwierdzić, że uzasadnione są badania pojemności wodnej i intercepcji w różnych typach klimatu i dla różnych gatunków (Seidl i in. 2011).

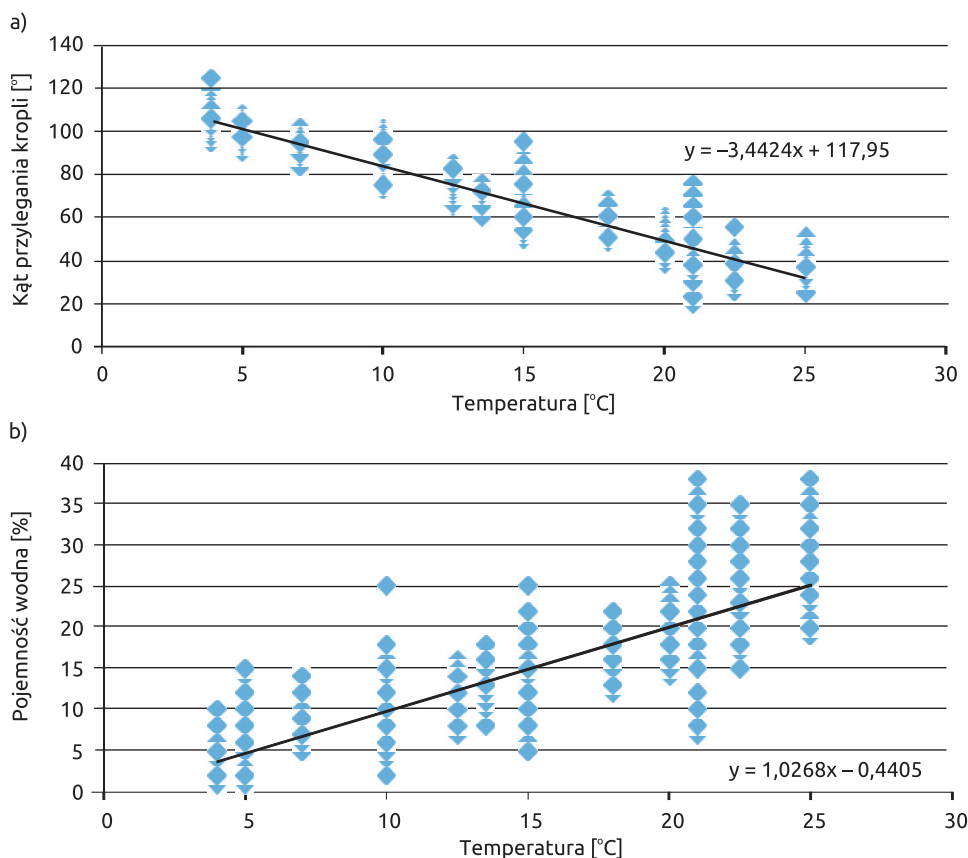
## 5. Wpływ zmian temperatury wody opadowej

Wyjaśnienie zmienności pojemności wodnej koron drzew i zwilżalności materiału roślinnego pod wpływem temperatury wody opadowej to także kwestia ważna z uwagi na fakt, że wszelkie zmiany klimatu mają wpływ na dostępność wody w ekosystemach leśnych (Socha i Durło 2012; Wasko i Sharma 2017). Ilość wody zatrzymana w koronach drzew, która nie zasili systemów korzeniowych, ma szczególne znaczenie w regionach z ujemnym bilansem wodnym (Martin i Von Willert 2000; Sadeghi i in. 2014) lub na terenach, gdzie zmiany klimatu i warunków wodnych mogą modyfikować granice zasięgów gatunków lasotwórczych, np. buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.) w Europie. Od stopnia dostępności wody zależy także utrzymanie bioróżnorodności, co jest ważną kwestią w prowadzeniu zrównoważonej gospodarki leśnej.

Wpływ zmian temperatur na zwilżalność materiału roślinnego i pojemność wodną koron drzew w publikacji Klamerus-Iwan i Błońskiej (2018) był analizowany na przykładzie sześciu gatunków lasotwórczych, występujących w Europie: dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.), buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.), lipy drobnolistnej (*Tilia cordata* Mill.), jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.), sosny pospolitej (*Pinus sylvestris* L.) i świerka pospolitego (*Picea abies* L.). W pracy wykazano, że temperatura deszczu istotnie oddziaływała na zwilżalność i pojemność wodną koron drzew. Wpływ ten był silny i ujemny dla zwilżalności, co oznaczało, że wraz ze wzrostem temperatury malał kąt

nachylenia kropeł do powierzchni liści. Malejący kąt przylegania dowodził, iż powierzchnia była silniej hydrofilna. Wraz ze wzrostem temperatury wody opadowej o  $1^{\circ}\text{C}$ , kąt nachylenia malał o  $3,44^{\circ}$ . Temperatura wody wykorzystanej do zraszania także istotnie statystycznie oddziaływała na pojemność wodną. Wpływ ten był silny i dodatni, a wraz ze wzrostem temperatury o  $1^{\circ}\text{C}$  ilość zatrzymanej wody w koronach drzew rosła o  $1,03\%$  z całości zastosowanego opadu (ryc. 7).

Dla wszystkich analizowanych gatunków łącznie oszacowano też, że wzrost temperatury o  $2,7^{\circ}\text{C}$  powoduje spadek kąta nachylenia kropli o ponad  $9^{\circ}$  i wzrost ilości wody zatrzymanej w koronach drzew średnio o  $2,77\%$  sumy opadu. Wyniki sumaryczne dla wszystkich gatunków razem pokazują skalę istotności problemu dla całych drzewostanów. Każdy gatunek ma jednak specyficzne cechy, które indywidualnie mogą wpływać na stopień przylegania kropeł i ilość zatrzymywanej w koronach wody (tab. 2).



Ryc. 7. Wpływ temperatury opadu na pojemność wodną i zwilżalność liści dla wszystkich gatunków razem (źródło: Klamerus-Iwan i Błońska 2018)

**Tabela 2.** Analiza regresji dla pojemności wodnej i zwilżalności z podziałem na gatunki (Klamerus-Iwan i Błońska 2018)

|    | Pojemność wodna |       |      |       |           |                | Zwilżalność (kąt nachylenia kropli) |      |       |        |           |                |
|----|-----------------|-------|------|-------|-----------|----------------|-------------------------------------|------|-------|--------|-----------|----------------|
|    | B               | SE    | Beta | t     | p         | R <sup>2</sup> | B                                   | SE   | Beta  | t      | p         | R <sup>2</sup> |
| BK | (Stała)         | -0,07 | 0,3  | -0,24 | 0,811     | 0,79           | 117,21                              | 0,6  |       | 195,44 | p < 0,001 | 0,96           |
|    | temp.           | 0,9   | 0,02 | 45,72 | p < 0,001 |                | -3,3                                | 0,04 | -0,96 | -83,2  | p < 0,001 |                |
| DB | (Stała)         | 1,56  | 0,31 | 4,97  | p < 0,001 | 0,78           | 116,49                              | 0,62 |       | 186,8  | p < 0,001 | 0,96           |
|    | temp.           | 0,93  | 0,02 | 44,73 | p < 0,001 |                | -3,15                               | 0,04 | -0,96 | -76,45 | p < 0,001 |                |
| LP | (Stała)         | -1,9  | 0,41 | -4,58 | p < 0,001 | 0,79           | 118,19                              | 0,57 |       | 207,74 | p < 0,001 | 0,97           |
|    | temp.           | 1,26  | 0,03 | 46,08 | p < 0,001 |                | -3,54                               | 0,04 | -0,97 | -94,04 | p < 0,001 |                |
| JD | (Stała)         | 0,67  | 0,31 | 2,18  | p < 0,005 | 0,81           | 116,23                              | 0,54 |       | 214,73 | p < 0,001 | 0,97           |
|    | temp.           | 0,98  | 0,02 | 48,09 | p < 0,001 |                | -3,3                                | 0,04 | -0,97 | -92,24 | p < 0,001 |                |
| SO | (Stała)         | -0,95 | 0,28 | -3,41 | p < 0,01  | 0,83           | 118,73                              | 0,63 |       | 188,6  | p < 0,001 | 0,97           |
|    | temp.           | 0,95  | 0,02 | 51,52 | p < 0,001 |                | -3,65                               | 0,04 | -0,97 | -87,74 | p < 0,001 |                |
| SW | (Stała)         | -1,95 | 0,29 | -6,8  | p < 0,001 | 0,86           | 120,84                              | 0,66 |       | 183,06 | p < 0,001 | 0,96           |
|    | temp.           | 1,14  | 0,02 | 60,12 | p < 0,001 |                | -3,71                               | 0,04 | -0,96 | -85,03 | p < 0,001 |                |

Objaśnienia: BK – buk, DB – dąb, LP – lipa, JD – jodła, SO – sosna, ŚW – świerk

Wraz ze wzrostem temperatury o  $1^{\circ}\text{C}$  kąty nachylenia malały od  $3,15^{\circ}$  – w przypadku dębu, do  $3,71^{\circ}$  – w przypadku świerka. Zmiana o  $3^{\circ}$  kąta przylegania do liści w niektórych przypadkach zmieniała kwalifikację zwilżalności, np. z niezwilżanych przy kątach  $110^{\circ}$ – $130^{\circ}$  na zwilżalne ( $90^{\circ}$ – $110^{\circ}$ ).

Po uwzględnieniu wpływu gatunkowego stwierdzono, że wpływ temperatury na pojemność wodną był najsilniejszy dla świerka, a najslabszy dla dębu. Wraz ze wzrostem temperatury o  $1^{\circ}\text{C}$  pojemność wodna koron rosła: dla buka o 1,35 gramów wody na gram biomasy [ $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ], dla dębu o  $1,39 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ , dla lipy aż o  $1,89 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ , dla jodły o  $1,47 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ , dla sosny o  $1,46 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  oraz dla świerka o  $1,71 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ . Uzyskanie innych wartości pojemności wodnej i innych kątów przylegania kropeł w tych samych temperaturach świadczyło o gatunkowej reakcji drzew, a nie tylko o wpływie zmian gęstości wody.

Otrzymane wyniki potwierdziły znany z literatury przedmiotu fakt, że świerk jest gatunkiem najbardziej wrażliwym na zmiany klimatu (Elkin i in. 2013). Ma to swoje odzwierciedlenie w zmniejszającym się znaczeniu świerka jako gatunku gospodarczego (Jolly i in. 2005; Seidl i in. 2011). W nieco większym stopniu odporna na zmiany klimatu wydaje się być jodła pospolita (Peguero-Pina i in. 2007; Carrer i in. 2010). Wyniki dotyczące zmian pojemności wodnej doskonale wpisują się w trend badań dotyczących odporności gatunkowej na zmiany klimatu. Ważnymi gatunkami ze względów gospodarczych są również buk pospolity i sosna pospolita (Pretzsch i in. 2016). Ustalenie optymalnego zmieszania i zwarcia tych drzew przy uwzględnieniu ich właściwości hydrologicznych może być nowym wyzwaniem dla gospodarki leśnej. Według uzyskanych danych sosna pospolita, podobnie jak wszystkie gatunki iglaste, silniej reaguje na wzrost temperatury pod względem ilości zatrzymanej w koronie wody opadowej.

Taka obserwacja jest istotna również z uwagi na fakt, że wymienione gatunki iglaste nie zrzucają igieł na okres zimowy. Daje to całoroczne lepsze osłonięcie gleby przed ulewnymi deszczami i ich erozyjnym wpływem, ale także ogranicza ilości wody docierającej do dna lasu i do systemów korzeniowych. Badacze prognozują również zwiększenie udziału buka w drzewostanach sosnowo-świerkowych, w celu optymalnego zmieszania, co będzie reakcją na zmiany klimatu (Pretzsch 2009).

Gatunki drzew mają różne wymagania ekologiczne i nierówne możliwości dostosowania się do oczekiwanych zmian klimatu. Dobór składu gatunkowego powinien opierać się na tych gatunkach, które będą lepiej adaptowały się w przeszłości, a nie na kryterium historycznej naturalności krajobrazu leśnego. Mieszane drzewostany dają szansę przyszłym pokoleniom na dokonywanie selekcji gatunków lepiej przystosowanych do zmian klimatu w czasie, kiedy te nastąpią. Należy pamiętać, że skład gatunkowy całych drzewostanów wpływa także na chemizm wody, która dociera do gleby, np. drzewa iglaste zakwaszają glebę.

Różnice gatunkowe potwierdzają wpływ rosnącej temperatury na intercepcję i stopień zwilżania oraz pokazują, że uzyskane wyniki nie są jedynie reakcją na zmianę gęstości wody na skutek oddziaływania temperatury.

Przedstawione badania dowodzą również, że nie można wiązać pojemności wodnej koron drzew tylko z wielkością powierzchni wyrażonej liczbowo, ale należy brać pod uwagę szereg czynników wpływających na stan tej powierzchni. Wyniki wskazują, że pojemność wodna koron drzew jest zależna od temperatury i ten fakt nie powinien być pomijany w budowie modeli hydrologicznych.

## 6. Martwe drewno

W ekosystemach leśnych istotnym rezerwuarem wody jest także leżące martwe drewno. Nawet w gospodarczych drzewostanach realizuje się politykę podnoszenia bioróżnorodności siedlisk poprzez zostawianie w lesie elementów martwego drewna. Leżanie martwego drewna w lesie przypisywanych jest wiele funkcji. Z punktu widzenia kształtowania się stosunków wodnych w lesie najczęściej zwraca się uwagę na jej rolę w procesie retencyjnym wody pochodzącej z opadów deszczu i śniegu, infiltracji wody opadowej w głąb profili glebowych, a także ochronie gleb przed erozją wodną i procesach próchnicotwórczych. Wodoodporność (WR) związana z pojemnością wodną jest jedną z podstawowych cech różnych materiałów, także przyrodniczych. WR może być określana na podstawie klasyfikacji pomiarów czasu wsiąkania kropli (WDPT). Klasyfikację zwilżalności dla materiałów roślinnych na podstawie czasu wsiąkania kropli zaproponowali Jungerius i Dekker (1990). Hydrologicznym skutkiem obecności martwego drewna w lesie jest histereza krzywej retencji wody. Inaczej mówiąc, martwe drewno stanowi rezerwar wody, który w późniejszym czasie jest oddawany do gleby albo do atmosfery poprzez parowanie.

Zabiegi leśne, które mogą zmieniać mikroklimat i dostępność martwego drewna, mogą również wpływać na skład gatunkowy i szybkość wzrostu zarówno owadów, jak i grzybów, co przekłada się na tempo rozkładu drewna i na jego fizyczne właściwości (Jacobs i Work 2012). Paletto i Tosi (2010) odnotowali wyraźny wzrost wilgotności oraz zmniejszenie gęstości drewna w kolejnych stopniach rozkładu w klimacie śródziemnomorskim. Wraz ze stopniem rozkładu drewna zmienia się jego struktura, co może mieć swoje odzwierciedlenie w zatrzymywaniu się wody i jej wsiąkaniu.

Badaniami nad pojemnością wodną i zwilżalnością objęto martwe drewno zarówno gatunków iglastych, jak i liściastych z klimatu umiarkowanego, tj. jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.), olszy czarnej (*Alnus glutinosa* Gaertn.), grabu pospolitego (*Carpinus betulus* L.), topoli osiki (*Populus tremula* L.), jesionu wyniosłego (*Fraxinus excelsior*), pochodzących z rezerwatu Czarna Różga (Błońska i in.



2017; Błońska i in. 2018). Poza pojemnością wodną i kątaami przylegania kropli do powierzchni drewna obliczono także swobodną energię powierzchniową (SFE). Martwe drewno różnych gatunków zmienia swoją gęstość wraz z zaawansowaniem stopnia rozkładu. Stopień zaawansowania dekompozycji wpływa na zmianę właściwości fizycznych drewna, takich jak wilgotność oraz porowatość. Drewno badanych gatunków z reguły cechowało się wzrastającą wilgotnością wraz z postępem procesu dekompozycji drewna. W drewnie w III stopniu dekompozycji (DC) stwierdzono 31,5%–59,6% wody w stosunku do masy suchego drewna. Drewno w IV stopniu DC charakteryzowało się zawartością wody w ilości 32,0%–75,4%. Drewno najsilniej rozłożone (V DC) zawierało największą ilość wody (69,5%–82,3%). Procentowa zawartość wody w stosunku do objętości świeżej próbki charakteryzowała się nieco mniejszymi wartościami. W niższych stopniach rozkładu najmniejszą ilość wody stwierdzono w drewnie jesionu, największą w drewnie osiki oraz jodły. W przypadku drewna najsilniej rozłożonego największą wilgotność wykazano w drewnie jesionu, najmniejszą w drewnie osiki. Błońska i in. (2018) zaimplementowali badanie czasu wsiąkania kropli wody (WDPT) do badań nad pojemnością wodną martwego drewna. W przypadku drewna o naturalnym uwilgotnieniu z reguły czas przenikania wody zmniejsza się wraz z zaawansowaniem stopnia rozkładu. Lekką wodoodporność drewna będącego w III stopniu DC stwierdzono jedynie u jodły oraz osiki, czas przenikania wody okazał się bowiem w przypadku tych gatunków stosunkowo krótki (średni WDPT: odpowiednio 8,8 s i 10,8 s). Drewno pozostałych gatunków dużo wolniej wchłaniało wodę (WDPT: 998,2 s–1 654,1 s). W klasyfikacji przedstawionej przez Täumera i in. (2005) takie wartości czasu wsiąkania charakteryzują trzecią klasę wodoodporności (*severely water repellent*). W przypadku drewna w IV stopniu DC najszybszym wsiąkaniem charakteryzowało się drewno jodły (WDPT: 10,4 s), wartości czasu wsiąkania ustalone dla innych gatunków były istotnie wyższe i wynosiły od 182,4 s (drewno osiki) do 1 154,0 s (drewno grabu). Te ostatnie odpowiadają trzeciej klasie wodoodporności według Täumera i in. (2005). W przypadku drewna najsilniej rozłożonego (V DC) wartości czasu wnikania wody dla drewna wszystkich badanych gatunków okazały się bardzo krótkie (WDPT: 0,9 s–3,8 s), co pozwala nazwać je dobrze zwilżalnymi.

Zmiany i dynamika pojemności wodnej martwego drewna są bardzo ważnymi elementami bilansu wodnego środowiska. Zależą w znacznej mierze od porowatości (związanej z oryginalną twardością drewna i stopniem rozkładu) – w próbkach o wyższej porowatości jest więcej potencjalnej przestrzeni, w jaką może wnikać woda.

Stwierdzona różnorodność właściwości hydrologicznych i fizycznych stanowi ważną informację o dynamice dostępności wody w martwym drewnie oraz potwierdza istotność ilości drewna w dnie lasu.



## 7. Podsumowanie i wnioski

Ilość wody zatrzymywana w koronach drzew jest ważnym składnikiem bilansu wodnego, który ma duży wpływ na mikroklimat zarówno lasów naturalnych, jak i miejskich (Aussenag 2000; Van Stan i in. 2018). Czynniki, które omówiono w niniejszej pracy, wpływają na zmiany pojemności wodnej koron drzew, jak również na samą zwilżalność materiału roślinnego, przez co nie mogą być pomijane w badaniach ekohydrologicznych (Fernández i Eichert 2009; Keim i Link 2018; Klamerus-Iwan i in. 2020 b). Ich wpływ na pojemność wodną koron drzew i zwilżalność liści stanowi przedmiot rosnącego zainteresowania ekohydrologów.

Główne wnioski z przedstawionych badań:

1. Różnice gatunkowe wpływają na ilość wody zatrzymywanej przez korony drzew oraz zwilżalność materiału roślinnego.
2. Zanieczyszczenie materiału roślinnego przez wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne wpływa na pojemność wodną koron drzew i zwilżalność liści. Oddziaływanie to jest tym silniejsze, im wyższy poziom zanieczyszczenia, ale także zależy od długości ekspozycji liści na działanie zanieczyszczeń. Bardzo istotne jest stwierdzenie, że hydrofobowe węglowodory aromatyczne na początku przenoszą swoje właściwości na liście i w rezultacie zmniejszają ilość zatrzymanej wody opadowej. Dłuższe i narastające zanieczyszczenie powoduje uszkodzenia w wierzchniej warstwie powierzchni liści, przez co stają się one bardziej hydrofilne.
3. Bez względu na czas i miejsce poboru próbek liście dębu z wyższym stopniem pokrycia białym nalotem grzybni mączniaka prawdziwego zatrzymywały więcej wody opadowej i charakteryzowały się większą hydrofilnością.
4. Wykazano, że wraz z wiekiem liści rośnie pojemność wodna koron drzew i kąt nachylenia kropeł wody do powierzchni liści.
5. Czynniki warunkujące ekohydrologiczne właściwości materiału roślinnego trudno rozpatrywać indywidualnie. Zarówno wiek liści związany z procesami sezonowymi, jak i zanieczyszczenie akumulowane w trakcie trwania okresu wegetacyjnego, a także stopień infekcji grzybami nawzajem potęgują lub zmniejszają przylepność kropeł i zmieniają możliwości retencyjne koron drzew.
6. Martwe drewno może być uznane za ważny zbiornik retencyjny.
7. Wykazano zależności pomiędzy cechą fizyczną materiału roślinnego, jaką jest zwilżalność, a pojemnością wodną.

Podsumowując, należy podkreślić, że ilości wody zatrzymywane w koronach drzew, które nie docierają do dna lasu, nie mogą być pomijane zarówno w badaniach hydrologii, jak i w analizie cech fizycznych materiału roślinnego (Papierowska i in. 2018).

## Literatura

- Aryal B., Neuner G. 2010. Leaf Wettability Decreases Along an Extreme Altitudinal Gradient. *Oecologia*, 162, 1–9.
- Aussenag G. 2000. Interaction Between Forest Stands and Microclimate. Ecophysiological Aspects and Consequences for Silviculture. *Annals of Forest Science*, 57, 287–301.
- Bhushan B., Jung Y.C. 2011. Natural and Biomimetic Artificial Surfaces for Superhydrophobicity, Self-cleaning, Low Adhesion and Drag Reduction. *Progress in Materials Science*, 56(1), 1–108.
- Błońska E., Kacprzyk M., Spólnik A. 2017. Effect of Deadwood of Different Tree Species in Various Stages of Decomposition on Biochemical Soil Properties and Carbon Storage. *Ecological Research*, 32(2), 193–203.
- Błońska E., Klamerus-Iwan A., Łagan S., Lasota J. 2018. Changes to the Water Repellency and Storage of Different Species of Deadwood Based on Decomposition Rate in a Temperate Climate. *Ecohydrology*, 11(8), e2023.
- Bredemeier M. 1988. Forest Conopy Transformation of Atmospheric Deposition. *Water, Air and Soil Pollution*, 40, 121–138.
- Carrer M., Nola P., Motta R., Urbinati C. 2010. Contrasting Tree-ring Growth to Climate Responses of *Abies alba* Toward the Southern Limit of Its Distribution Area. *Oikos*, 119, 1515–1525.
- Crockford R.H., Richardson D.P. 2000. Partitioning of Rainfall into Throughfall, Stemflow and Interception: Effect of Forest Type, Ground Cover and Climate. *Hydrological Processes*, 14(16), 2903–2920.
- Doerr S.H., Shakesby R.A., Dekker L.W., Ritsema C.J. 2006. Occurrence Prediction and Hydrological Effects of Water Repellency Amongst Major Soil and Land-use Types in a Humid Temperate Climate. *European Journal of Soil and Science*, 57, 741–754.
- Dzierżanowski K., Popke R., Gawrońska H., Sæbo A., Gawroński S.W. 2011. Deposition of Particulate Matter of Different Size Fractions on Leaf Surfaces and in Waxes of Urban Forest Species. *International Journal of Phytoremediation*, 13(10), 1037–1046.
- Elkin C., Gutiérrez A., Leuzinger S., Manusch C., Temperli C., Rasche L., Bugmann H. 2013. A 2°C Warmer World Is Not Safe for Ecosystem Services in the European Alps. *Global Change Biology*, 19, 1827–1840. DOI:10.1111/gcb.12156.
- Ensikat H.J., Ditsche-Kuru P., Barthlott W. 2010. Scanning Electron Microscopy of Plant Surfaces: Simple But Sophisticated Methods for Preparation and Examination. W: *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education*. A. Méndez-Vilas, J. Diaz. Red. Microscopy Book Series, 4 (1). Formatex Research Center, Badajoz, 248–255.
- Extrand C.W. 2005. Modeling of Ultralyophobicity: Suspension of Liquid Drops by a Single Asperity. *Langmuir*, 21, 10370–10374.
- Fernández V., Eichert T. 2009. Uptake of Hydrophilic Solutes Through Plant Leaves Current State of Knowledge and Perspectives of Foliar Fertilization. *Critical Reviews in Plant Science*, 28, 36–68.
- Fernández V., Khayet M., Montero-Prado P., Heredia-Guerrero A., Liakopoulos G., Karabourniotis G., Del Río V., Domínguez E., Tacchini I., Nerín C., Val J.,

- Heredia A.** 2011. New Insights into the Properties of Pubescent Surfaces: Peach Fruit as a Model. *Plant Physiology*, 156, 2098–2108. DOI:10.1104/pp.111.176305.
- Friesen J., Lundquist J., Van Stan J.T.** 2015. Evolution of Forest Precipitation Water Storage Measurement Methods. *Hydrological Processes*, 29(11), 2504–2520.
- Holder C.D.** 2013. Effects of Leaf Hydrophobicity and Water Droplet Retention on Canopy Storage Capacity. *Ecohydrology*, 6, 483–490.
- Holder C.D.** 2020. Advances and Future Research Directions in the Study of Leaf Water Repellency. W: *Forest-Water Interactions. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*, 240. D.F. Levia, D.E. Carlyle-Moses, S. Iida, B. Michalzik, K. Nanko, A. Tischer. Red. Springer, Cham.
- Jacobs J.M., Work T.T.** 2012. Linking Deadwood – Associated Beetles and Fungi with Wood Decomposition Rates in Managed Black Spruce Forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(8), 1477–1490.
- Jolly M., Dobbertin M., Zimmermann N., Reichstein M.** 2005. Divergent Vegetation Growth Responses to the 2003 Heat Wave in the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters*, 32, L18409. DOI: 10.1029/2005GL023252.
- Jungerius P.D., Dekker L.W.** 1990. Water Erosion in the Dunes. *Dunes of the European Coasts. Catena*, 18, 185–193.
- Keim R.F., Link T.E.** 2018. Linked Spatial Variability of Throughfall Amount and Intensity During Rainfall in a Coniferous Forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.006>.
- Kiss L., Russell J., Szentiványi O., Xu X., Jeffries P.** 2004. Biology and Biocontrol Potential of *Ampelomyces* Mycoparasites, Natural Antagonists of Powdery Mildew Fungi. *Biocontrol Science and Technology*, 14, 635–651. DOI:10.1080/0958315041001683600.
- Klamerus-Iwan A., Błońska E.** 2017. Seasonal Variability of Interception and Water Wettability of Common Oak Leaves. *Annals of Forest Research*, 60, 63–73.
- Klamerus-Iwan A., Błońska E.** 2018. Canopy Storage Capacity and Wettability of Leaves and Needles: the Effect of Water Temperature Changes. *Journal of Hydrology*, 559, 534–540.
- Klamerus-Iwan A., Kraj W.** 2017. Wettability and Interception in Relationship with the Seasonal Changes on the *Fagus sylvatica* Leaf Surface. *Forest Research Papers*, 78, 210–217.
- Klamerus-Iwan A., Szymański W.** 2014. Przestrzenno-czasowe zróżnicowanie pojemności wodnej koron drzew leśnych na przykładzie buka zwyczajnego. *Sylwan*, 161(2), 142–148.
- Klamerus-Iwan A., Witek W.** 2018. Variability of the Wettability and Water Storage Capacity of Common Oak Leaves (*Quercus robur* L.). *Water*, 10, 695.
- Klamerus-Iwan A., Kozłowski R., Przybylska J.** 2020 a. Variability of Water Storage Capacity in Three Lichen Species. *Biologia*. <https://doi.org/10.2478/s11756-020-00437-7>.
- Klamerus-Iwan A., Link T.E., Keim R.F., Van Stan II J.T.** 2020 b. Storage and Routing of Precipitation Through Canopies. W: *Precipitation Partitioning by Vegetation*.

- A Global Synthesis, J. Van Stan II, E. Gutmann, J. Friesen. Red. Springer Nature, Berlin, Germany, 17–34.
- Klamerus-Iwan A., Błońska E., Lasota J., Waligórski P., Kalandyk A.** 2018 a. Seasonal Variability of Leaf Water Capacity and Wettability Under the Influence of Pollution in Different Cityzones. *Atmospheric Pollution Research*, 9, 455–463.
- Klamerus-Iwan A., Gloor E., Sadowska-Rociek A., Błońska E., Lasota J., Lagan S.** 2018 b. Linking the Contents of Hydrophobic PAHs with the Canopy Water Storage Capacity of Coniferous Trees. *Environmental Pollution*, 242, 1176–1184.
- Koch K., Barthlott W.** 2009. Superhydrophobic and Superhydrophilic Plant Surfaces: an Inspiration for Biomimetic Materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 367, 1487–1509.
- Kosiba P.** 2008. Variability of Morphometric Leaf Traits in Small-leaved Linden (*Tilia cordata* Mill.) Under the Influence of Airpollution. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 77(2), 125–137.
- Kozłowski R.** 2013. Funkcjonowanie wybranych geoekosystemów Polski w warunkach zróżnicowanej antropopresji na przykładzie gór niskich i pogórza. *Landform Analysis*, 23.
- Kozłowski R., Józwiak M.** 2017. The Transformation of Precipitation in the Tree Canopy in Selected Forest Ecosystems of Poland's Świętokrzyskie Mountains. *Przegląd Geograficzny – Polish Geographical Review*, 89(1), 133–153.
- Levia D.F., Herwitz S.R.** 2005. Interspecific Variation of Bark Water Storage Capacity of Three Deciduous Tree Species in Relation to Stemflow Yield and Solute Flux to Forest Soils. *Catena*, 64, 117–137.
- Li W., Amirfazli A.** 2008. Hierarchical Structures for Natural Superhydrophobic Surfaces. *Soft Matter*, 4, 462–466.
- Liyanage K.K., Khan S., Brooks S., Mortimer P.E., Karunarathna S.C., Xu J., Hyde K.D.** 2017. Taxonomic Revision and Phylogenetic Analyses of Rubber Powdery Mildew Fungi. *Microbial Pathogenesis*, 105, 185–195. DOI:10.1016/j.micpath.2017.01.054.
- Małek S., Wężyk P.** Zmiany ilościowe i jakościowe opadów atmosferycznych na powierzchniach doświadczalnych w drzewostanach bukowych Ojcowskiego Parku Narodowego i Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Krynicy w latach 1997 i 1998. W: Monitorowanie procesów zachodzących w drzewostanach bukowych, w zmieniających się warunkach środowiska przyrodniczego, na przykładzie Ojcowskiego Parku Narodowego i Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Krynicy. S. Małek, P. Wężyk. Red. Katedra Ekologii Lasu Akademii Rolniczej w Krakowie, Popradzki Park Krajobrazowy, Kraków–Nowy Sącz, 69–85.
- Martin C.E., Von Willert D.J.** 2000. Leaf Epidermal Hydathodes and the Ecophysiological Consequences of Foliar Water Uptake in Species of *Crassula* from the Namib Desert in Southern Africa. *Plant Biology*, 2, 229–242.
- Matyssek R., Wieser G., Calfapietra C., de Vries W., Dizengremel P., Ernst D., Jolivet Y., Mikkelsen T.N., Mohren G.M.J., Le Thiec D., Tuovinen J.P., Weatherall A., Paoletti E.** 2012. Forest Under Climate Change and Air Pollution: Gaps in Understanding and Future Directions for Research. *Environmental Pollution*, 160(1), 57–65. DOI:10.1016/j.envpol.2011.07.007. PMID:22035926.

- Muzylo A., Llorens P., Valente F., Keizer J.J., Domingo F., Gash J.H.C. 2009. Review of Rainfall Interception Modelling. *Journal of Hydrology*, 370, 191–206.
- Nanko K., Hotta N., Suzuki M. 2006. Evaluating the Influence of Canopy Species and Meteorological Factors on Throughfall Drop Size Distribution. *Journal of Hydrology*, 329, 422–431.
- Neinhuis C., Barthlott W. 1997. Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces. *Annals of Botany*, 79, 667–677. DOI:10.1006/anbo.1997.0400.
- Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C., Hoehn R.E., Walton J.T. 2008. A Ground-based Method of Assessing Urban Forest Structure and Ecosystem Services. *Arboriculture and Urban Forestry*, 34(6), 347–358.
- Paletto A., Tosi V. 2010. Deadwood Density Variation with Decay Class in Seven Tree Species of the Italian Alps. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25, 164–173.
- Papierowska E., Szporak-Wasilewska S., Szewińska J., Szatyłowicz J., Debaene G., Utratna M. 2018. Contact Angle Measurements and Water Drop Behavior on Leaf Surface for Several Deciduous Shrub and Tree Species from a Temperate Zone. *Trees*, 32, 1253–1266. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1707-y>.
- Peguero-Pina J., Camarero J., Abadía A., Martín E., González-Cascón R., Morales F., Gil-Pelegrín E. 2007. Physiological Performance of Silver-Fir (*Abies alba* Mill.) Populations Under Contrasting Climates Near the South-Western Distribution Limit of the Species. *Flora*, 202(3), 226–236. DOI:10.1016/j.flora.2006.06.004.
- Popek R., Gawrońska H., Gawroński S.W. 2011. Susceptibility of Shrubs to Accumulation of Airborne Microdust. *Nauka, Przyroda, Technologie – Science, Nature, Technologies*, 5(6), 124.
- Popek R., Gawrońska H., Wrochna M., Gawroński S., Sæbø A. 2012. Particulate Matter on Foliage of 13 Woody Species: Deposition on Surfaces and Phytostabilisation in Waxes, a 3-year Study. *International Journal of Phytoremediation*, 15(3), 245–256.
- Porada P., Van Stan II J.T., Kleidon A. 2018. Significant Contribution of Non-vascular Vegetation to Global Rainfall Interception. *Naturae Geoscience*, 11(8), 563.
- Pretzsch H., del Rio M., Schütze G., Ammer Ch., Annighöfer P., Avdagic A., Barbeito I., Bielak K., Brazaitis G., Coll L., Drössler L., Fabrika M., Forrester D.I., Kurylyak V., Löf M., Lombardi F., Matovic B., Mohren F., Motta R., den Ouden J., Pach M., Ponette Q., Skrzyszewski J., Sramek V., Sterba H., Svoboda M., Verheyen K., Zlatanov T., Bravo-Oviedo A. 2016. Mixing of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Enhances Structural Heterogeneity, and the Effect Increases with Water Availability. *Forest Ecology and Management*, 373, 149–166.
- Rosado B.H.P., Holder C.D. 2013. The Significance of Leaf Water Repellency in Ecohydrological Research: a Review. *Ecohydrology*, 6, 150–161. <http://dx.doi.org/10.1002/eco.1340>.
- Sæbø A., Popek R., Nawrot B., Hanslin H.M., Gawrońska H., Gawroński S. 2012. Plant Species Differences in Particulate Matter Accumulation on Leaf Surfaces. *Science of the Total Environment*, 427–428, 347–354.

- Sadeghi S.M.M., Attarod P., Pypker T.G., Dunkerley D.** 2014. Is Canopy Interception Increased in Semiarid Tree Plantations? Evidence from a Field Investigation in Tehran, Iran. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38, 792–806.
- Seidl R., Rammer W., Lexer M.J.** 2011. Climate Change Vulnerability of Sustainable Forest Management in the Eastern Alps. *Climatic Change*, 106, 225–254. DOI: 10.1007/s10584-010-9899-1.
- Sgrigna G., Baldacchini C., Esposito R., Calandrelli R., Tiwary A., Calfapietra C.** 2016. Characterization of Leaf-level Particulate Matter for an Industrial City Using Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. *Science of Total Environment*, 548–549, 91–99. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.01.057.
- Sioma A., Socha J., Klamerus-Iwan A.** 2018. A New Method for Characterizing Bark Microrelief Using 3D Vision Systems. *Forests*, 9(1), 30. DOI:10.3390/f9010030.
- Socha J., Durło G.** 2012. How Will Climate Change Impact Biomass Increment by Norway Spruce Stands in Western Beskids? *Folia Forestalia Polonica. Series A*, 54(2), 94–108.
- Stosch A.K., Solga A., Steiner U., Oerke C., Barthlott W., Cermann Z.** 2007. Efficiency of Self-cleaning Properties in Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 81, 49–55. <http://pub.jki.bund.de/index.php/JABFQ/article/view/2111>.
- Täumer K., Stoffregen H., Wessolek G.** 2005. Determination of Repellency Distribution Using Soil Organic Matter and Water Content. *Geoderma*, 125, 107–115.
- Ugolini F., Tognetti R., Raschi A., Bacci L.** 2013. *Quercus ilex* L. as Bioaccumulator for Heavy Metals in Urban Areas: Effectiveness of Leaf Washing with Distilled Water and Considerations on the Trees Distance from Traffic. *Urban Forestry and Urban Greening*, 12, 576–584.
- Van Stan II J.T., Underwood S.J., Friesen J.** 2018. Urban Forestry: an Underutilized Tool in Water Management. *W: Advanced Tools for Integrated Water Resources Management. Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*, 3. J. Friesen, L. Rodríguez-Sinobas. Red. Elsevier, London, United Kingdom, 35–62.
- Van Stan II J.T., Levia D.F., Jenkins R.B.** 2015. Forest Canopy Interception Loss Across Temporal Scales: Implications for Urban Greening Initiatives. *Professional Geographer*, 67(1), 41–51.
- Wang J., Endreny T.A., Nowak D.J.** 2008. Mechanistic Simulation of Tree Effects in an Urban Water Balance Model. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(1), 75–85. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2007.00139.x.
- Wasko C., Sharma A.** 2017. Continuous Rainfall Generation for a Warmer Climate Using Observed Temperature Sensitivities. *Journal of Hydrology*, 544, 575–590. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.12.002.
- WHO.** 2017. <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2017/evolution-of-who-air-quality-guidelines-past-present-and-future-2017> (30.07.2020).
- Wu Y., Song L., Liu W., Liu W., Li S., Fu P., Shen Y., Wu J., Wang P., Chen Q., Lu H.** 2018. Fog Water Is Important in Maintaining the Water Budgets of Vascular Epiphytes in an Asian Tropical Karst Forests during the Dry Season. *Forests*, 9, 260.





# Materia organiczna w materiale zwietrzałym pozyskanym w wyniku ścierania cząstek rumowiska rzeczno pobranego z koryta potoku w małej leśnej zlewni górskiej

Ewa Słowik-Opoka

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: ewa.opoka@urk.edu.pl

## Abstrakt

W pracy podjęto problematykę występowania materii organicznej w korytach rzek i potoków górskich, w szczególności w osadach powstałych w wyniku obróbki mechanicznej transportowanego rumowiska rzeczno. Celem pracy jest określenie wpływu takich czynników jak seria ścierania, różnoziarnistość piaskowca oraz kształt ziaren na ilość materii organicznej w zwietrzelinie rumowiska, pozyskanej w wyniku przeprowadzenia laboratoryjnego badania ścieralności. Podstawę do przeprowadzenia badań stanowiło przyjęcie następujących hipotez badawczych: 1) różnoziarnistość piaskowca wpływa na kształt cząstek rumowiska, 2) w zwietrzelinie pozyskanej po każdej serii ścierania cząstek rumowiska ilość materii organicznej jest taka sama, 3) ilość materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej ze ścierania cząstek rumowiska z piaskowca drobnoziarnistego (A) i gruboziarnistego (B) różni się w sposób istotny, 4) kształt cząstek rumowiska nie wpływa na ilość materii organicznej w ich zwietrzelinie. Przedmiotem badań jest rumowisko rzeczno mające postać odłamków skalnych z piaskowca istebniańskiego, pobrane z koryta potoku w małej leśnej zlewni górskiej w Beskidzie Śląskim w polskich Karpatach. Ilość materii organicznej w zwietrzelinie rumowiska określono metodą strat przy prażeniu. Opierając się na wynikach przeprowadzonych badań i analiz statystycznych, stwierdzono, że różnoziarnistość piaskowca nie wpływa w sposób istotny na zmianę kształtu cząstek rumowiska. Maksymalna zawartość materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej ze ścierania cząstek rumowiska z piaskowca drobnoziarnistego jest o 3,11% większa w porównaniu z maksymalną zawartością materii organicznej w zwietrzelinie z piaskowca gruboziarnistego. Różnoziarnistość piaskowca jest jednym z czynników, który wpływa na akumulację materii organicznej w jego zwietrzelinie. Różnice w ilości pozyskiwanej zwietrzliny

w wyniku laboratoryjnego badania ścieralności cząstek rumowiska stanowią potwierdzenie, że różnoziarnistość piaskowca odgrywa istotną rolę w procesie obróbki mechanicznej okruchów skalnych.

**Słowa kluczowe:** zlewnia, potok górski, rumowisko, erozja, ścieranie, materia organiczna

## 1. Wprowadzenie

Jednym z najbardziej dynamicznych procesów kształtujących powierzchnię Ziemi jest proces wietrzenia (fizycznego, chemicznego) skał (Allen 2000). Zarówno charakter, jak i tempo procesów wietrzeniowych są uwarunkowane wieloma czynnikami. Kluczową rolę odgrywają właściwości i cechy skały poddawanej wietrzeniu oraz warunki środowiskowe, w których proces ten zachodzi, głównie temperatura i wilgotność. Istotne są również uwarunkowania topograficzne i czas oddziaływania poszczególnych procesów (Migoń 2013).

Głównymi czynnikami inicjującymi proces wietrzenia fizycznego (mechanicznego) jest temperatura powietrza i promieniowanie słoneczne (Allen 2000). Pod wpływem zmian temperatury w skale występują naprężenia, efektem czego jest pojawianie się pęknięć, które w określonych warunkach mogą prowadzić do osłabienia i defragmentacji skały. Istotną rolę w procesie wietrzenia odgrywają także organizmy roślinne, głównie drzewa, których systemy korzeniowe mogą powodować pękanie skały. W procesie wietrzenia chemicznego najważniejszym czynnikiem jest woda. Dzięki substancjom organicznym i nieorganicznym występującym w wodzie zachodzą reakcje chemiczne, które mogą powodować procesy rozpuszczenia, utlenienia oraz redukcji (Andrews i in. 1995). W obszarach górskich, osłabiane działaniem procesów wietrzeniowych skały ulegają defragmentacji, a powstający rumosz skalny dostarczany jest ze stoków do koryt cieków górskich, tworząc rumowisko rzeczne.

Obok rumowiska rzecznego, specyficznym materiałem transportowanym w korytach cieków górskich jest rumosz drzewny w postaci obumarłych drzew lub ich fragmentów (drzewa z zachowaną koroną i wiązką korzeni o przestrzennej strukturze, kłody, konary, korzenie, krzewy, zwały, karpy), które są dostarczane do koryt w wyniku spływów gruzowo-błotnych na stokach, wiatrowalów, lawin, erozji wodnej, działalności zwierząt, głównie bobrów (*Castor fiber*), szkodników drzew (kornik drukarz *Ipstygraphus*) czy gospodarki leśnej (Thompson 1995; Wyzga i in. 2003; Wohl i Scott 2016). W lasach naturalnych powstawanie rumoszu drzewnego ma miejsce w wyniku konkurencji (wydzielania się) lub zaburzeń powodujących masowe obumieranie drzew (huragan, gradacja, pożar). Rumosz drzewny dostający się do koryt cieków inicjuje powstawanie progów drzewnych (ang. *log steps*), które odgrywają istotną rolę

w obróbce transportowanych osadów i modelowaniu procesów fluwialnych (Montgomery i Piégay 2003; Słowik-Opoka i in. 2018).

Transportowane i akumulowane osady rzeczne, zarówno te w postaci ostrokrawędzistych odłamków skalnych, kamieni, żwirów, piasku, jak i w postaci rozdrobnionego, zwietrzałego materiału mineralnego mogą zawierać znaczne ilości materii organicznej (Keith i in. 2014). Znaczenie materii organicznej w osadach rzecznych stanowi przedmiot zainteresowań wielu badaczy (Ward i Aumen 1986; Webster i in. 1990, Galas 1993; Raczyńska i in. 2013; Puczeko i in. 2017). Rozdrobniony rumosz drzewny w ciekach stwarza możliwości bytowania wielu gatunkom zwierząt i ochronę bioróżnorodności (Pietrzyk i Papciak 2016), jednakże występowanie materii organicznej w ciekach jest również jednym z parametrów, który decyduje o stopniu zanieczyszczenia wód (Kubiak i Tórz 2005). Nadmierna ilość materii organicznej w ciekach powoduje ryzyko ich eutrofizacji, co ma bezpośredni wpływ na rozwój i kondycję ichtiofauny. Spadek zawartość tlenu rozpuszczonego w wodzie stanowi bezpośrednie zagrożenie dla bytowania ryb i organizmów bentosowych (Kłonowska-Olejnik i Radecki-Pawlik 2000).

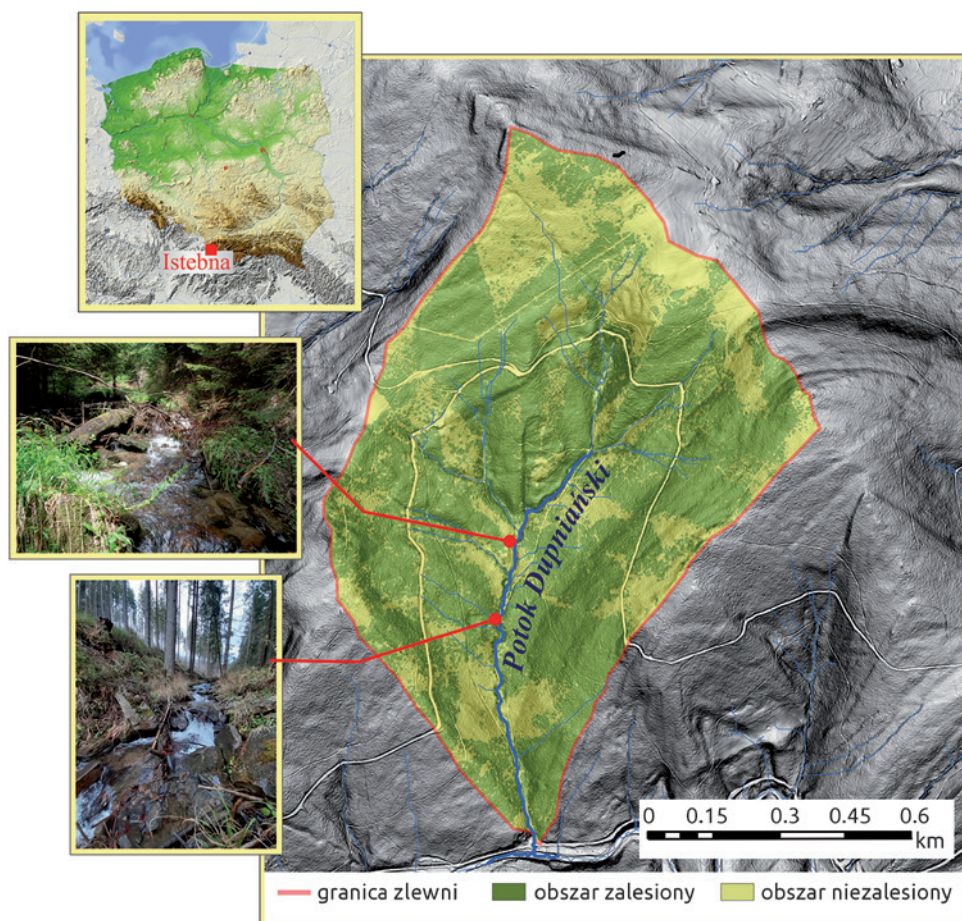
Problematyka akumulowania materii organicznej w osadach rzecznych, skutkującego wzrostem stężenia mineralnych form azotu i fosforu jest zagadnieniem istotnym z punktu widzenia ochrony ekosystemów wodnych (Bylak i Wójcik 2016; Piwińska i Gruca-Rokosz 2017). Obniżona zawartość tlenu wpływa negatywnie m.in. na tarliska oraz rozwój ryb w ich najmłodszych stadiach rozwojowych. Złe warunki tlenowe w ciekach, oprócz zmniejszenia ilości pokarmu dla ryb, powodują obniżenie bioróżnorodności gatunkowej organizmów bentosowych, ślimaków (*Gastropoda*), małży (*Bivalvia*), jak również larw określonych grup taksonomicznych, np. chruścików (*Trichoptera*), ważek (*Odontata*) czy jętek (*Ephemeroptera*) (Jezierska-Madziar i Pińskwar 2008).

Celem pracy jest określenie ilości materii organicznej akumulowanej w zwietrzelinie rumowiska rzeczno-geologicznego z uwzględnieniem takich czynników jak etap ścierania rumowiska, różnoziarnistość piaskowca oraz kształt ziaren rumowiska. Przyjęto następujące hipotezy badawcze: 1) różnoziarnistość piaskowca wpływa na kształt cząstek rumowiska, 2) w zwietrzelinie pozyskanej po każdej serii ścierania cząstek rumowiska ilość materii organicznej jest taka sama, 3) ilość materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej ze ścierania cząstek rumowiska z piaskowca drobnoziarnistego (A) i gruboziarnistego (B) różni się w sposób istotny, 4) kształt cząstek rumowiska nie wpływa na ilość materii organicznej w zwietrzelinie. Zwietrzelina pozyskana w wyniku ścierania cząstek rumowiska może być przedmiotem dalszych oznaczeń np. chemicznych czy mineralogicznych, a wyniki tych badań mogą stanowić przyczynek do poszerzenia wiedzy o współczesnych metodach badań procesów erozyjnych zachodzących w korytach potoków w małych leśnych zlewniach górskich.

## 2. Materiały i metody

### 2.1. Charakterystyka obszaru badań

Obiektem badań terenowych jest potok Dupniański płynący w leśnej zlewni górskiej zlokalizowanej w miejscowości Istebna, na terenie Nadleśnictwa Wiśla leśnictwa Bukowiec (ryc. 1). Potok jest prawostronnym dopływem rzeki Olzy należącej do dorzecza Odry. Granica zlewni obejmuje południowe stoki wzniesień: Bukowiec, Sałasz Dupne i Młoda Góra (pasmo Stożka). Powierzchnia zlewni potoku Dupniańskiego wynosi 1,7 km<sup>2</sup>, a długość cieku głównego 2 km. Wzniesienie maksymalne terenu w zlewni wynosi 0,882 m n.p.m.



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań – zlewni potoku Dupniańskiego w Nadleśnictwie Wiśla (grafika, mapa, fot. E. Słowik-Opoka)



a minimalne 0,493 m n.p.m. Źródła cieką znajdują się na wysokości 0,805 m n.p.m. W obrębie zlewni występują głównie stoki spadziste (13–17°) oraz stoki pochyłe (8–12°), a stoki południowe są często modelowane przez osuwiska (Starzak i in. 2015).

Pod względem tektonicznym, zlewnia potoku Dupniańskiego wchodzi w skład jednostki płaszczowiny śląskiej, której trzon stanowią utwory osadowe warstw istebniańskich i godulskich. Warstwy istebniańskie rozwinięte w Beskidzie Śląskim wykształcone zostały głównie w postaci różnorodnych utworów silikoklastycznych (Strzeboński 2005). Warstwy górne składają się z gruboławicowych piaskowców arkozowych, ciemnych łupków i zlepieńców. Warstwy dolne natomiast składają się z piaskowców i licznych soczewek zlepieńców. Piaskowce istebniańskie jako utwory różnoziarniste (z przewagą ziaren grubego piasku) są złożone z kwarcu, skalenia i miki, połączonych spoiwem żelazistym, kwarcytowym lub ilastym (Baran 1996). Struktura (wielkość ziaren) piaskowca istebniańskiego jest rozmaita, tj. od drobnoziarnistych przez gruboziarniste do zlepieńców. Piaskowce istebniańskie są podatne na proces wietrzenia i dostarczają okruchów skalnych o różnej wielkości i kształcie.

Zlewnia potoku Dupniańskiego, charakteryzująca się znacznymi różnicami wysokości terenu, w całości należy do karpackiej dzielnicy klimatycznej (piętro klimatyczne umiarkowanie ciepłe i umiarkowanie chłodne). Średnia roczna temperatura powietrza wynosi 6°C i waha się od 6°C w styczniu do 15°C w lipcu, natomiast średnia roczna suma opadów waha się w granicach 1100–1400 mm. Pokrywa śnieżna zalega przez 100–130 dni w roku, zazwyczaj od listopada do kwietnia, a jej grubość osiąga od 60 cm do 100 cm (Starzak 2006).

## 2.2. Pobór rumowiska rzecznoego do badań laboratoryjnych

W korytach rzek i potoków górskich podczas niewielkich przepływów występuje zjawisko tzw. selektywnej erozji polegającej na wymywaniu (wynoszeniu) drobnych ziaren, następuje proces obrukowania dna, czyli tworzenie się warstwy składającej się z większych ziaren (Słota i Szczęsny 1974). Wyznaczanie w korycie cieką obszaru próbkowania, który mógłby być uznany za miarodajny jest wysoce utrudnione. Zgodnie z zaleceniami Osucha (1965), próbki rumowiska rzecznoego (aluwiów) pobierano z powierzchni 1 m<sup>2</sup> metodą konwencjonalną, należąca do metod powierzchniowych (Billi i Paris 1992; Książek i in. 2008). Próbki rumowiska pobrano z 5 odcinków morfodynamicznych koryta potoku Dupniańskiego (Słowik-Opoka i in. 2018). Łącznie pobranych zostało 28 próbek rumowiska, które umieszczono w plastikowych pojemnikach, opisano i przewieziono do laboratorium celem przeprowadzenia dalszych badań i analiz.

### 2.3. Prace laboratoryjne

Badania ilości materii organicznej w materiale zwietrzałym pochodzącym ze ścieranych cząstek rumowiska rzecznoego przeprowadzono z uwzględnieniem: 1) serii ścierania, 2) różnoziarnistości piaskowca, 3) kształtu ziaren. Tak przyjęta koncepcja wymagała wykonania określonych prac laboratoryjnych.

#### 2.3.1. *Badanie składu uziarnienia rumowiska rzecznoego*

W celu scharakteryzowania rumowiska rzecznoego w pierwszej kolejności przeprowadzono badanie składu granulometrycznego próbek według PN-EN 933-1:1997. Z uwagi na fakt, że piaskowiec istebniański charakteryzuje się wyraźnym zróżnicowaniem konsystencji ziaren, w każdej z próbek rumowiska zastosowano podział na dwie podgrupy cząstek rumowiska, tj. zbudowanych z piaskowca drobnoziarnistego („A”) oraz z piaskowca gruboziarnistego („B”).

W korytach rzek i potoków górskich cząstki rumowiska rzecznoego jako bryły (obiekty trójwymiarowe) mogą przyjmować różny kształt (Shumm i Stevens 1973, Manecki i Muszyński 2008). W ramach prac laboratoryjnych wykonano pomiary długości trzech osi głównych cząstek prostopadłych względem siebie, mianowicie najdłuższej ( $a$ ), najkrótszej ( $c$ ) i pośredniej ( $b$ ) w celu określenia parametrów kształtu ziaren wyrażonych, jako: ( $a/b$ ) i ( $c/b$ ) (Giriati i in. 2007). Wyznaczone parametry posłużyły do przyporządkowania ziaren rumowiska do jednej z czterech kategorii kształtu, tj. dyski (D), kule (K), płasko-wydłużone (PW), wrzeciona (W) (Zingg 1935; Giriati i in. 2007).

#### 2.3.2. *Ścieranie rumowiska rzecznoego w celu pozyskania zwietrzliny*

Punktem wyjścia do badań ilości materii organicznej w zwietrzelinie rumowiska rzecznoego było przeprowadzenie badania ścieralności. Ścieranie cząstek rumowiska zostało przeprowadzone w laboratorium KULiITL w oparciu na założeniach metodycznych będących przedmiotem patentu (P.223736) (Słowik-Opoka i Klamerus-Iwan 2015). Ścieranie okruchów skalnych zostało przeprowadzone w środowisku wodnym w aparacie, którego zadaniem jest wymuszanie ruchu obrotowego cząstek z założoną prędkością.

W celu pozyskania materiału z zewnętrznych, w założeniu najbardziej zwietrzałych warstw cząstek rumowiska (zwietrzliny), ścieranie cząstek wykonano w kolejno następujących po sobie 3 seriach (S1, S2, S3), oddzielnie dla próbek rumowiska z piaskowca drobnoziarnistego (A) i gruboziarnistego (B). Czas trwania każdej serii ścierania wynosił 15 min., przy założonej prędkości wynoszącej 11 obr./min. Po przeprowadzeniu kolejnych serii ścierania, tj. S1, S2 i S3 częściowo starte cząstki rumowiska wyjmowano i oczyszczano ze zwietrzliny za pomocą lancy, a następnie łączono ze zwietrzeliną pozyskaną z wnętrza aparatu. Zwietrzelinę suszono w temp. 105°C do masy stałej i prze-

siewano z użyciem wytrząsarki i zestawu sit w celu wyselekcjonowania próbek o średnicy ziaren ( $d$ )  $\leq 0,25$  mm. Łącznie otrzymano 70 próbek zwietrzliny, w tym 40 próbek ze ścierania rumowiska z piaskowca drobnoziarnistego (A) oraz 30 próbek z piaskowca gruboziarnistego (B). Większość próbek zwietrzliny pozyskano w wyniku przeprowadzenia wszystkich trzech serii ścierania (S1, S2 i S3). Wyjątek stanowią 22 próbki pozyskane po przeprowadzeniu dwóch serii ścierania (S1 i S2) oraz 7 próbek, które pozyskano po wykonaniu tylko pierwszej (S1), zarazem jedynej serii ścierania. W przypadku tych próbek cząstki charakteryzowały się niską odpornością na ścieranie (ulegały całkowitemu rozpadowi), stąd wykonywanie kolejnych serii nie było możliwe.

### 2.3.3. Określenie ilości materii organicznej w zwietrzelinie

W celu zbadania ilości materii organicznej w zwietrzelinie rumowiska rzeczno-ego zastosowano metodę strat przy prażeniu (Myślińska 2016). Punktem wyjścia było zarówno odpowiednie przygotowanie próbek zwietrzliny, jak również tygielków (opis, suszenie, zważenie). Do każdego z tygielków wsypywano po 10 g zwietrzliny o uziarnieniu ( $d$ )  $\leq 0,25$  mm, co odpowiadało ok. połowie wysokości tygielka. Tygielki ze zwietrzeliną umieszczano w suszarce (temp.  $105^{\circ}\text{C}$ ) na 3 godziny celem wysuszenia. Następnie tygielki przekładano do eksykatora, a wystudzone ponownie ważono. Ponumerowane tygielki ze zwietrzeliną umieszczano w piecu muflowym. Układ tygielków we wnętrzu pieca każdorazowo był taki sam ze względu na fakt, że w wyniku działania wysokiej temperatury ( $750^{\circ}\text{C}$ ) tygielki pozbawiane były opisu numeracji. Wyjmowanie tygielków po spalaniu materii organicznej było możliwe dopiero po kilkunastu godzinach od zakończenia doświadczenia. Każdy z tygielków był ponownie opisywany (zgodnie z numeracją nadaną przed spalaniem). Tygielki umieszczano w suszarce celem wyeliminowania ew. wilgoci, przekładane do eksykatora, studzone i ponownie ważone.

Ilość materii organicznej obliczono według poniższej formuły (Myślińska 2016):

$$I_z = \frac{m_{st} - m_u}{m_{st} - m_t} \cdot 100 \quad (1)$$

gdzie:

$I_z$  – strata masy po prażeniu [%],

$m_u$  – masa tygielka z próbką wyprażoną do stałej masy [g],

$m_{st}$  – masa tygielka z próbką wysuszoną do stałej masy [g],

$m_t$  – masa wyprażonego tygielka [g].



## 2.4. Statystyczne opracowanie danych

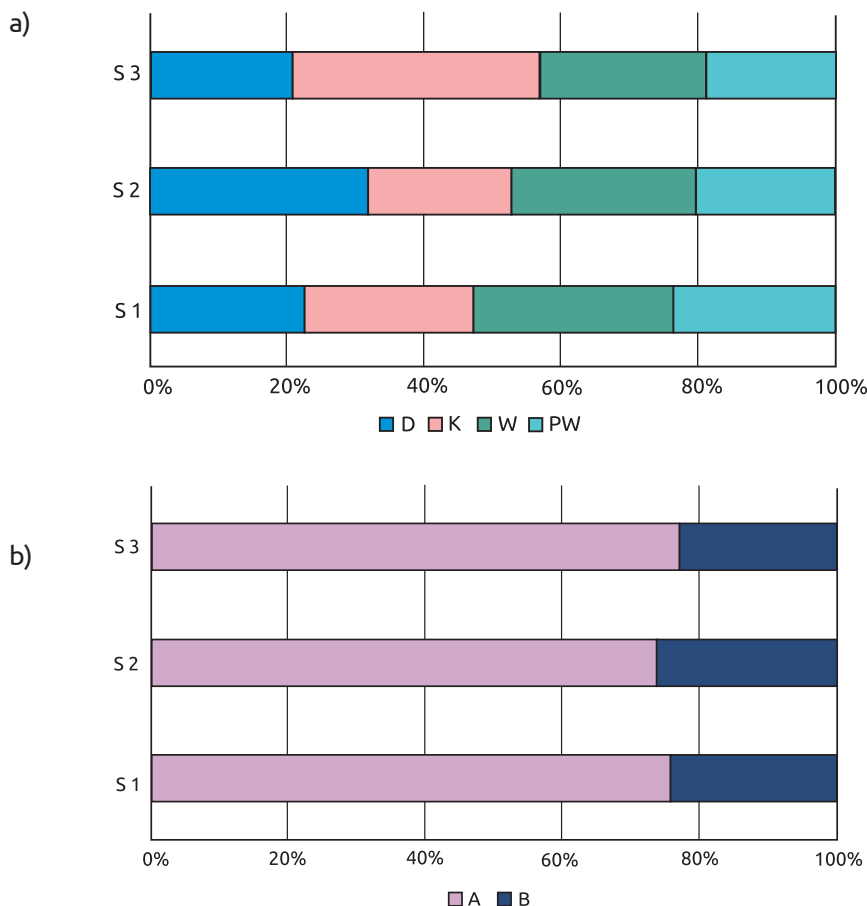
Dla wszystkich analizowanych zmiennych wyznaczono wartości podstawowych statystyk opisowych (średnia, odchylenie standardowe, kwartyle, dominanta, współczynnik zmienności), dla których zmienną grupującą były: 1) seria ścierania (S1, S2, S3), 2) różnoziarnistość piaskowca (A, B) i 3) kształt ziaren (D, K, PW, W). Do weryfikacji hipotez dotyczących zgodności rozkładu analizowanych zmiennych z rozkładem normalnym zastosowano test Shapiro-Wilka (STATISTICA 13.3). W celu weryfikacji hipotezy o równej zawartości materii organicznej dla dwóch prób (piaskowiec A i B) zastosowano test U Manna-Whitneya, natomiast z użyciem testu Kruskala-Wallisa przetestowano hipotezę mówiącą o równym udziale materii organicznej pomiędzy trzema i więcej próbkami (3 serie ścierania: S1, S2, S3). Do weryfikacji hipotezy zakładającej, że kształt cząstek zależy od różnoziarnistości piaskowca (A, B) zastosowano test  $\chi^2$  niezależności. Weryfikację wszystkich postawionych w pracy hipotez przeprowadzono na poziomie istotności 0,05.

## 3. Wyniki badań wraz z dyskusją

### 3.1. Wielkość, kształt i różnoziarnistość cząstek rumowiska

Przeprowadzone badanie składu granulometrycznego próbek rumowiska z piaskowca (A) i (B) wykazało, że największy udział miały cząstki o średnicy  $2 \div 5$  cm. W pierwszej serii (S1) ścieraniu poddane zostały cząstki rumowiska o kształcie dysku (D), kuli (K), wrzeciona (W) i płasko-wydłużonym (PW) (ryc. 2a). Podczas drugiej serii ścierania (S2) największy udział miały cząstki o kształcie dysku (D), a najmniejszy cząstki o kształcie kulistym (K) i płasko-wydłużonym (PW). Natomiast w ostatniej z serii ścierania (S3) w grupie ścieranych cząstek dominowały kule (K) przy znikomym udziale cząstek o kształcie płasko-wydłużonym (PW).

Analiza udziału cząstek rumowiska zbudowanych z piaskowca drobno- (A) i gruboziarnistego (B) na kolejnych seriach ścierania (ryc. 2b) wskazała, że udział cząstek z piaskowca (A) był znacznie większy od cząstek z piaskowca gruboziarnistego (B). W wyniku ścierania cząstek rumowiska o kształcie dysku (D) uzyskano 20 próbek zwietrzeli (w tym 11 z piaskowca A), z rumowiska o kształcie kuli (K) – 20 próbek (w tym 10 z piaskowca A), z rumowiska o kształcie wrzeciona (W) – 17 (w tym 9 z piaskowca A) oraz z cząstek o kształcie płasko-wydłużonych (PW) – 13 (w tym 10 z piaskowca A). Próbek zwietrzeli pozyskanych ze ścierania cząstek rumowiska zbudowanych z piaskowca gruboziarnistego (B) było odpowiednio: 9 (D), 10 (K), 8 (W) oraz 3 (PW).



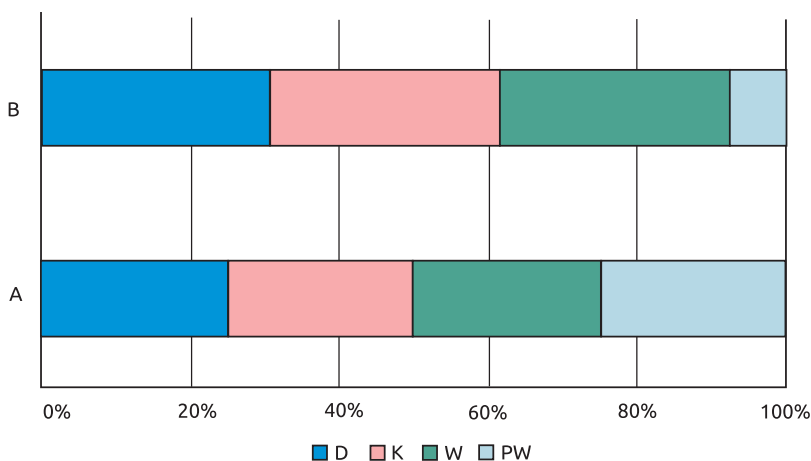
**Ryc. 2.** Udział procentowy cząstek: a) o kształcie dysku (D), kuli (K), wrzeciona (W) i płasko-wydłużony (PW) na tle serii ścierania (S1, S2, S3); b) z piaskowca drobnoziarnistego (A) i gruboziarnistego (B) z uwzględnieniem serii ścierania (S)

Zmiana kształtu odłamków skalnych transportowanych w korytach rzek i potoków górskich była i nadal jest przedmiotem badań wielu autorów (Knighton 1982; Mikoś 1993). W licznych opracowaniach zwracano uwagę na istnienie wielu mechanizmów, które decydują o stopniowym zmniejszaniu się okruchów skalnych w profilu podłużnym koryta i zmianie kształtu cząstek. Najczęściej podkreśla się znaczenie stopniowego ścierania okruchów (Kodama 1994), wietrzenia klastów *in situ* oraz wpływu lokalnej dostawy materiału w profilu podłużnym koryt rzek i potoków górskich (Pizzuto 1995). Za jeden z najważniejszych mechanizmów uznawany jest selektywny transport osadów (Menting i in. 2015). Istotne znaczenie ma również skład mineralny szkieletu

ziarnowego i rodzaj spoiwa, które stanowią o potencjale diagenetycznym skały (Manecki i Muszyński 2008). W przypadku piaskowców, minerałem skałotwórczym jest odporny na ścieranie kwarc, natomiast spoiwo złożone z minerałów ilastych lub węglanowych charakteryzuje się słabą odpornością na działanie procesów wietrzeniowych. Postawiona w pracy hipoteza, wg której kształt cząstek rumowiska zależy od różnoziarnistości piaskowca (ryc. 2a) została poddana weryfikacji z uwzględnieniem serii ścierania (S1, S2, S3).

Rozkład kształtu cząstek w zależności od różnoziarnistości piaskowca istebniańskiego podczas pierwszej serii ścierania (ryc. 3) pokazuje, że w przypadku cząstek z piaskowca drobnoziarnistego (A) wszystkie kształty cząstek (D, K, W, PW) występowały w równej mierze. W przypadku cząstek z piaskowca gruboziarnistego (B), cząstki rumowiska o kształcie płasko-wydłużonym występowały marginalnie, dominowały zaś cząstki o kształcie kuli, wrzeciona i dysku (podobnie jak w przypadku cząstek z piaskowca A). Test  $\chi^2$  niezależności ( $\chi^2 = 7,56$ ;  $df = 3$ ,  $p = 0,56$ ) potwierdził, że różnoziarnistość piaskowca nie ma wpływu na kształt cząstek rumowiska.

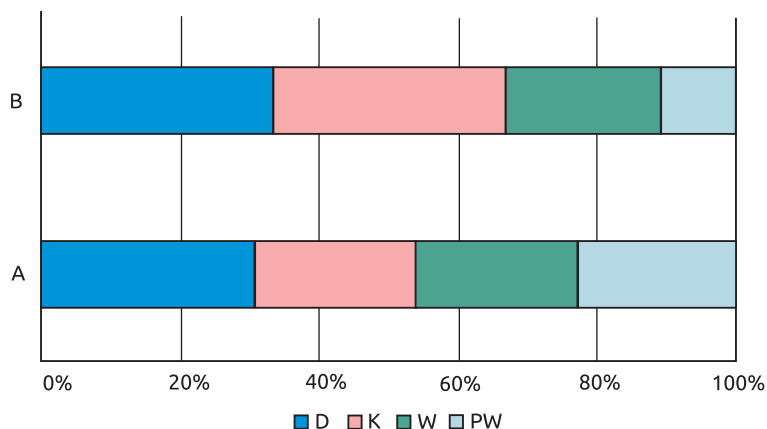
Rozkład kształtu cząstek rumowiska w zależności od różnoziarnistości piaskowca uzyskany po drugiej serii ścierania rumowiska (ryc. 4) pokazuje, że w przypadku piaskowca (A) cząstki o kształcie dysku stanowiły grupę najliczniejszą, natomiast cząstki o kształtach: K, W i PW występowały z takim samym prawdopodobieństwem. W przypadku cząstek rumowiska z piaskowca gruboziarnistego (B), cząstki o kształcie płasko-wydłużonym występowały w znikomej liczbie w stosunku do cząstek o kształcie dysku i kuli (podobnie jak w przypadku cząstek z piaskowca drobnoziarnistego A). Wyniki potwierdziły,



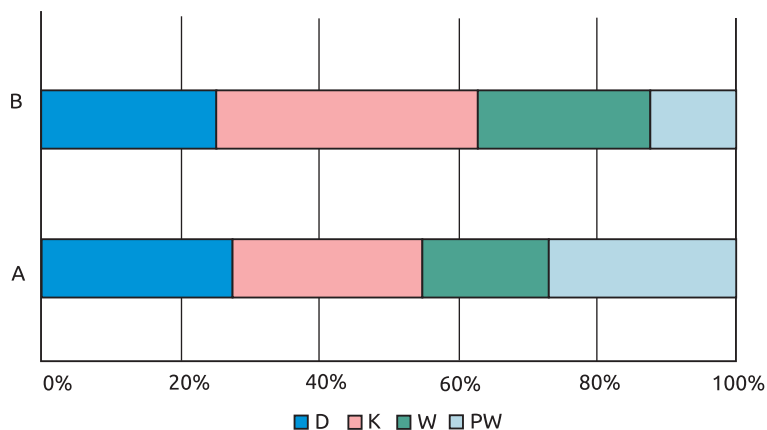
Ryc. 3. Udział cząstek rumowiska o kształcie dysku (D), kuli (K), wrzeciona (W) i płasko-wydłużonym (PW), zbudowanych z piaskowca drobnoziarnistego (A) i gruboziarnistego (B) po pierwszej serii ścierania (S1)

ze różnoziarnistość piaskowca nie wpływa istotnie na zmiany kształtu cząstek rumowiska ( $\chi^2 = 1,21$ ;  $df = 3$ ,  $p = 0,25$ ).

Cząstki rumowiska, które zostały poddane trzeciej serii ścierania (S3) charakteryzowały się tym, że najmniej liczną grupę stanowiły cząstki o kształcie wrzeciona (W) z piaskowca (A), natomiast pozostałe, tj. cząstki o kształcie D, K oraz PW występowały z takim samym prawdopodobieństwem (ryc. 5). Cząstki



**Ryc. 4.** Udział cząstek rumowiska o kształcie dysku (D), kuli (K), wrzeciona (W) i płasko-wydłużonym (PW), zbudowanych z piaskowca drobnoziarnistego (A) i gruboziarnistego (B) po drugiej serii ścierania (S2)



**Ryc. 5.** Udział cząstek rumowiska o kształcie dysku (D), kuli (K), wrzeciona (W) i płasko-wydłużonym (PW), zbudowanych z piaskowca drobnoziarnistego (A) i gruboziarnistego (B) po trzeciej serii ścierania (S3)

kuliste (K) z piaskowca gruboziarnistego (B) występowały z takim samym prawdopodobieństwem jak kule (K) zbudowane z piaskowca drobnoziarnistego (A). Najmniejszy udział miały cząstki o kształcie (PW) z piaskowca gruboziarnistego. Podobnie, jak w przypadku serii ścierania S1 i S2, test  $\chi^2$  niezależności ( $\chi^2 = 0,74$ ;  $df = 3$ ;  $p = 0,14$ ) wykazał, że konsystencja ziaren piaskowca nie ma wpływu na kształt cząstek rumowiska.

Uzyskane wyniki różnią się od prezentowanych w literaturze przedmiotu (Malarz 2004; Attal i Lavé 2009). Przypuszczalnie badane cząstki rumowiska rzecznego charakteryzują się większą odpornością na ścieranie, co wskazuje na wpływ lokalnej dostawy świeżego materiału skalnego do koryta cieku pochodzącego z podcięć erozyjnych różnego typu. Materiał ten może być dostarczany w sposób nagły, np. w wyniku wystąpienia osuwisk czy spływów gruzowych, a następnie stopniowo wprowadzany do systemu fluwialnego, głównie podczas wezbrań.

## 3.2. Materia organiczna w zwietrzelinie rumowiska rzecznego

### 3.2.1. Udział materii organicznej w materiale zwietrzałym pozyskanym w wyniku przeprowadzenia kolejnych serii ścierania (S1, S2, S3)

Udział materii organicznej w próbkach zwietrzliny pozyskanej po pierwszej serii ścierania (S1) wyniósł średnio 1,31% ( $s = 1,02\%$ ) (tab. 1). W przypadku połowy badanych próbek ilość materii organicznej wynosiła nie więcej niż 0,92%, w przypadku 25% próbek zwietrzliny stwierdzono ilość materii nie większą niż 0,74%, a w przypadku pozostałych 25% udział materii organicznej wynoszący 1,31% (ryc. 6). Zaobserwowano wysokie zróżnicowanie udziału materii organicznej w próbkach zwietrzliny pozyskanej po pierwszej serii ścierania (78,25%), gdzie minimalna zawartość materii organicznej wynosiła 0,3%, a maksymalna 4,51%.

W próbkach zwietrzliny pozyskanej po drugiej serii ścierania rumowiska (S2) stwierdzono udział materii organicznej średnio 0,95% (z odchyleniem standardowym  $s = 0,44\%$ ). Połowa badanych próbek charakteryzowała się udziałem materii organicznej nie większym niż 0,92%, 25% próbek udziałem materii organicznej nie większym niż 0,55%. W przypadku pozostałych 25% próbek udział materii organicznej wyniósł co najmniej 1,21%. Minimalna ilość materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej po drugiej serii ścierania wynosiła 0,32%, a maksymalna 2,05% (zróżnicowanie na poziomie średnim, tj. 46,77%).

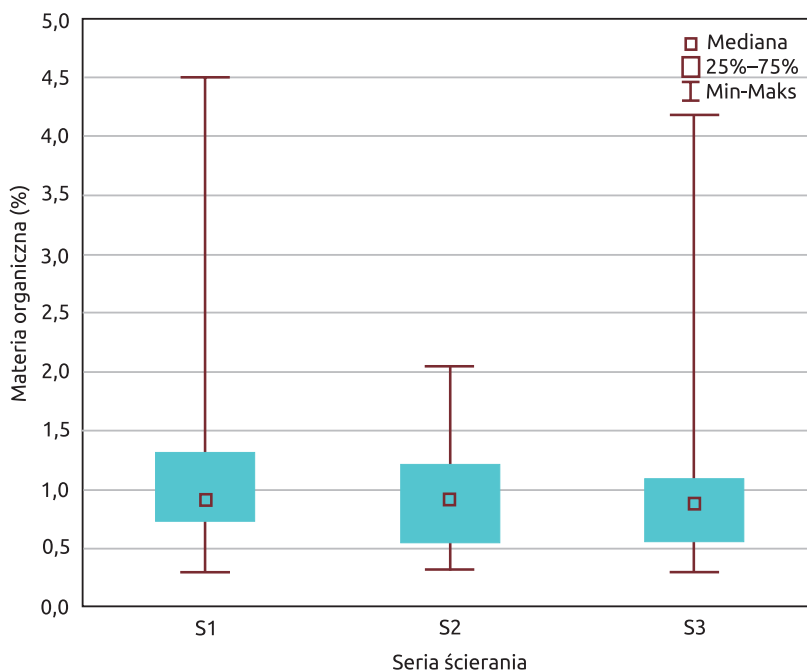
Udział materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej po trzeciej, tj. ostatniej serii badania ścieralności, wyniósł 0,88% (przy  $s = 0,85\%$ ). W 50% badanych próbek stwierdzono udział materii organicznej na poziomie 0,88%, 25% próbek charakteryzowało się zawartością materii organicznej nie większą niż 0,56%. Pozostałe próbki zawierały co najmniej 1,09% materii organicznej. Minimalna zawartość materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej po trzeciej (ostatniej)

serii scierania czastek rumowiska wynosila 0,30%, a maksymalna to 4,19%. Zroznicowanie zawartosci materii organicznej bylo bardzo duze i wynosilo 81,48%.

Próbki zwietrzliny pozyskane po pierwszej (S1) i trzeciej (S3) serii scierania rumowiska charakteryzowaly sie brakiem rozkladu normalnego, dlatego do weryfikacji hipotezy badawczej zastosowano test Kruskala-Wallisa (S1:  $W = 0,74$ ,  $p = 0,00$ ; S2:  $W = 0,96$ ,  $p = 0,41$ ; S3:  $W = 0,65$ ,  $p = 0,00$ ). W zwietrzelinie pozyskanej po kazdej z trzech serii scierania udzial materii organicznej byl podobny ( $H(2, N = 70) = 1,214287$ ;  $p = 0,54$ ) (ryc. 6).

**Tabela 1.** Statystyki opisowe dotyczace ilosci materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej po kazdej z trzech serii scierania: N – liczebność, Q1 – kwartyl pierwszy, Q3 – kwartyl trzeci, SD – odchylenie standardowe, Vs – wspolczynnik zmienności

| Seria | N  | Średnia | Mediana | Q1   | Q3   | SD   | Vs    |
|-------|----|---------|---------|------|------|------|-------|
| S1    | 29 | 1,31    | 0,92    | 0,74 | 1,31 | 1,02 | 78,25 |
| S2    | 22 | 0,95    | 0,92    | 0,55 | 1,21 | 0,44 | 46,77 |
| S3    | 19 | 1,05    | 0,88    | 0,56 | 1,09 | 0,85 | 81,48 |



**Ryc. 6.** Udzial materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej w wyniku przeprowadzenia trzech serii scierania czastek rumowiska (S1, S2, S3)

Zistoty procesów wietrzeniowych wynika, że najmniej odpornymi na ścieranie są zewnętrzne, zwietrzałe warstwy okruchów skalnych. Natężenie tych procesów jest silnie uzależnione od dostępności wody, która w przypadku niektórych skał powoduje wymywanie spoiwa (Allen 2000). Właściwości fizyczne zewnętrznej warstwy ścieranych okruchów skalnych różnią się od właściwości kolejno ścieranych warstw (Słowik-Opoka i Klamerus-Iwan 2015). Zróżnicowanie udziału materii organicznej w zwietrzelinie, tj. pomiędzy S1, S3 a S2 może wynikać z faktu, że jednolite pod względem zwietrzenia warstwy okruchów skalnych nie muszą mieć takiej samej miąższości (Słowik-Opoka i Klamerus-Iwan 2015).

### *3.2.2. Udział materii organicznej w zwietrzelinie rumowiska z uwzględnieniem różnoziarnistości piaskowca istebniańskiego (A, B)*

Aby określić ilość materii organicznej w zwietrzelinie rumowiska, do badań wykorzystanych zostało 40 próbek pochodzących ze ścierania rumowiska mających postać cząstek z piaskowca drobnoziarnistego (A) oraz 30 próbek ze ścierania cząstek zbudowanych z piaskowca gruboziarnistego (B).

W przypadku próbek zwietrzliny pochodzącej ze ścierania rumowiska z piaskowca drobnoziarnistego, ilość materii organicznej wyniosła średnio 1,48% z odchyleniem standardowym 0,94% (tab. 2). Połowa badanych próbek zwietrzliny odznaczała się udziałem materii organicznej nie większym niż 1,13%, 25% próbek zawierało nie więcej niż 0,93% materii organicznej, a pozostałe próbki charakteryzowały się udziałem materii organicznej wynoszącym co najmniej 1,56% (ryc. 7). Minimalna zawartość materii organicznej w zwietrzelinie wynosiła 0,74% a maksymalna to 4,51%, co wskazuje na znaczące zróżnicowanie udziału materii organicznej w próbkach zwietrzliny pochodzącej ze ścierania rumowiska z piaskowca drobnoziarnistego (63,28%).

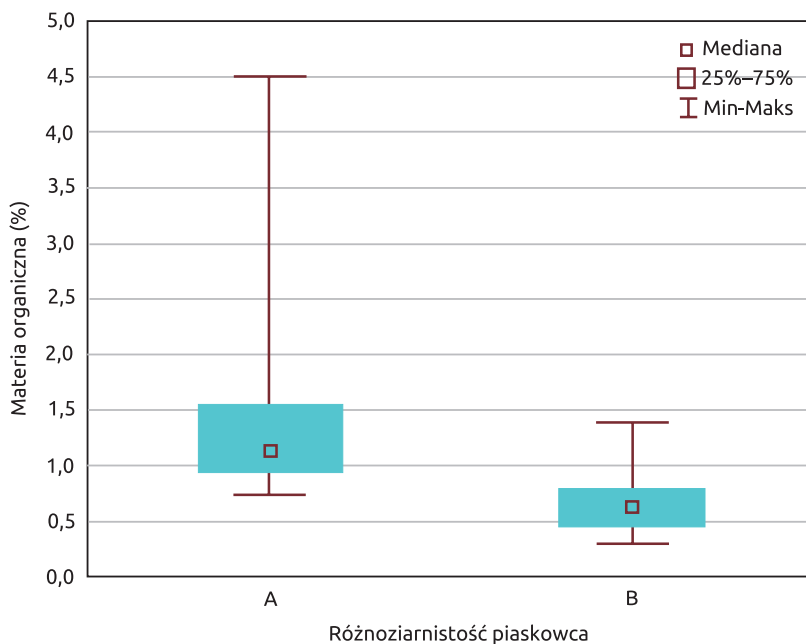
Zróżnicowanie udziału materii organicznej próbek zwietrzliny pozyskanej ze ścierania cząstek rumowiska w postaci piaskowca gruboziarnistego było na przeciętnym poziomie (41,87%). Średnio zawartość materii organicznej wynosiła 1,48%, połowa próbek wykazywała nie więcej niż 0,63% materii organicznej. Najmniejsza zawartość materii organicznej wynosiła 0,30%, zaś największa 1,40%.

Zweryfikowana została hipoteza, że udział materii organicznej w próbkach zwietrzliny pozyskanych w wyniku ścierania cząstek rumowiska z piaskowca drobno- i gruboziarnistego różni się w sposób istotny. Do weryfikacji hipotezy badawczej zastosowano test U Manna-Whitneya ( $Z = 6,05$ ,  $p = 0,00$ ). Stwierdzono, że w próbkach zwietrzliny pochodzącej ze ścierania cząstek rumowiska z piaskowca drobnoziarnistego (A) materii organicznej jest więcej niż w próbkach zwietrzliny rumowiska z piaskowca gruboziarnistego (B). Okruchy piaskowca drobnoziarnistego cechują się większym udziałem spoiwa, które wypełnia przestrzenie międzyziarnowe, co skutkuje zmniejszaniem się nasiąkliwości i zwiększaniem odporności na działanie procesu ścierania (Peszat



**Tabela 2.** Statystyki opisowe dotyczące ilości materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej ze ścierania cząstek rumowiska z uwzględnieniem różnoziarnistości piaskowca (A, B): N – liczebność, Q1 – kwartył pierwszy, Q3 – kwartył trzeci, SD – odchylenie standardowe, Vs – współczynnik zmienności

| Piaskowiec | N  | Średnia | Mediana | Q1   | Q3   | SD   | Vs    |
|------------|----|---------|---------|------|------|------|-------|
| A          | 40 | 1,48    | 1,13    | 0,93 | 1,56 | 0,94 | 63,28 |
| B          | 30 | 0,65    | 0,63    | 0,45 | 0,79 | 0,27 | 41,87 |



**Ryc. 7.** Udział materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej w wyniku ścierania cząstek rumowiska z uwzględnieniem różnoziarnistości piaskowca (A – drobnoziarnisty, B – gruboziarnisty)

i Wieser 1999). Zarówno ilość zwietrzliny pozyskanej po kolejnych seriach ścierania cząstek rumowiska z piaskowca A i B, jak również zakumulowanej materii organicznej są zróżnicowane.

### 3.2.3. Ilość materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej ze ścierania rumowiska z uwzględnieniem kształtu ziaren

Podczas transportu osadów w korycie ciek, oprócz zmian średnicy ziaren osadów, następują również zmiany ich kształtu (Zingg 1935, Blott i Pye 2008). Zwietrzelinę do badań pozyskano ze ścierania 20 cząstek rumowiska o kształcie

dysku (D), 20 cząstek o kształcie kulistym (K), 17 cząstek o kształcie wrzeciona (W) oraz 13 cząstek (PW).

W przypadku zwietrzliny pozyskanej ze ścierania dysków (D), zawartość materii organicznej wynosiła średnio 0,96%. Połowa badanych próbek zawierała nie więcej niż 1,02% materii organicznej (ryc. 8). Minimalna zawartość materii organicznej dla cząstek o kształcie dysku wynosiła 0,32%, a maksymalna 1,99%. Zróżnicowanie zawartości materii organicznej w cząstkach o kształcie dysku było na przeciętnym poziomie wynoszącym 41,97%.

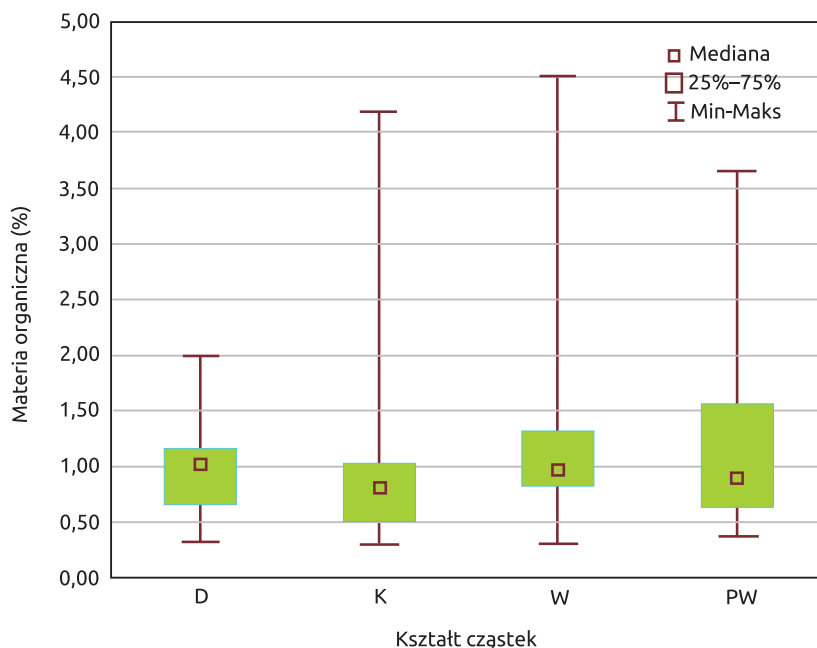
Zwierzelnina pozyskana ze ścierania cząstek kulistych rumowiska zawierała przeciętnie 1,05% materii organicznej, przy czym połowa próbek charakteryzowała się udziałem materii organicznej nie większym niż 0,81%. Zaobserwowano bardzo wysokie zróżnicowanie ilości materii organicznej w badanych próbkach, tj. na poziomie 98,72%.

Nieco odmiennie, w zwietrzelinie pozyskanej w wyniku ścierania cząstek rumowiska o kształcie wrzeciona (W) stwierdzono wysokie zróżnicowanie zawartości materii organicznej (współczynnik zmienności 76,17%) (tab. 3). Średnia zawartość materii organicznej w próbkach wynosiła 1,26% (z odchyleniem standardowym 0,96%). Połowa badanych próbek zwietrzliny zawierała nie więcej niż 0,97% materii organicznej, 25% próbek nie więcej niż 0,83%, a pozostałe próbki zawierały co najmniej 1,31% materii organicznej. Minimalna zawartość materii organicznej dla cząstek o tym kształcie wynosiła 0,30%, a maksymalna 4,51%.

Uśredniona wartość udziału materii organicznej w zwietrzelinie pochodzącej ze ścierania płasko-wydłużonych (PW) cząstek rumowiska wynosiła 1,31%. Minimalna zawartość materii organicznej to 0,37%, a maksymalna 3,65% (ryc. 8). Zróżnicowanie ilości materii organicznej w próbkach było dosyć wysokie (65,53%). W przypadku połowy badanych próbek zwietrzliny stwierdzono nie więcej niż 1,08% materii organicznej. Pozostałe 50% badanych próbek zwietrzliny stanowiły próbki zawierające nie więcej niż 0,78% i nie mniej niż 1,56% materii organicznej.

**Tabela 3.** Statystyki opisowe dotyczące ilości materii organicznej w zwietrzelinie z uwzględnieniem kształtu ścieranych cząstek rumowiska: N – liczebność, Q1 – kwartył pierwszy, Q3 – kwartył trzeci, SD – odchylenie standardowe, Vs – współczynnik zmienności

| Kształt | N  | Średnia | Mediana | Q1   | Q3   | SD   | Vs    |
|---------|----|---------|---------|------|------|------|-------|
| D       | 20 | 0,96    | 1,02    | 0,66 | 1,16 | 0,40 | 41,97 |
| K       | 20 | 1,05    | 0,81    | 0,51 | 1,02 | 1,04 | 98,72 |
| W       | 17 | 1,26    | 0,97    | 0,83 | 1,31 | 0,96 | 76,17 |
| PW      | 13 | 1,31    | 1,08    | 0,78 | 1,56 | 0,86 | 65,53 |



**Ryc. 8.** Udział materii organicznej w zwietrzelinie pozyskanej w wyniku ścierania cząstek rumowiska z uwzględnieniem kształtu ziaren: D – dyski, K – kule, W – wrzeciona, PW – płasko-wydłużone

W celu doboru odpowiedniego testu do weryfikacji hipotezy głoszącej, że ilość materii organicznej w próbkach zwietrzliny pozyskanej ze ścierania cząstek rumowiska o różnym kształcie jest taka sama, sprawdzono, czy badane próbki posiadają rozkład normalny (test Shapiro-Wilka). Jedynie w przypadku próbek zwietrzliny pozyskanej ze ścierania cząstek rumowiska o kształcie dysku (D) stwierdzono zgodność z rozkładem normalnym ( $W = 0,96$ ,  $p = 0,56$ ). Do weryfikacji powyższej hipotezy zastosowano test Kruskala-Wallisa (kuliste:  $W = 0,60$ ,  $p = 0,00$ ; wrzeciona:  $W = 0,70$ ,  $p = 0,00$ ; płasko-wydłużone:  $W = 0,83$ ,  $p = 0,02$ ). Udział materii organicznej we wszystkich badanych próbkach zwietrzliny pochodzącej ze ścierania ziaren rumowiska o różnych kształtach kształtował się na podobnym poziomie ( $H(3, N = 70) = 4,01$ ;  $p = 0,26$ ) (ryc. 8).

#### 4. Wnioski

1. Największy udział materii organicznej stwierdzono w próbkach zwietrzliny pozyskanej po ścieraniu cząstek rumowiska zbudowanych z piaskowca drobnoziarnistego (A). Różnoziarnistość piaskowca jest jednym z czynników, który wpływa na akumulację materii organicznej w jego zwietrzelinie.

2. Zwiertzelina pozyskana w wyniku ścierania cząstek rumowiska o różnym kształcie (kule, dyski, wrzeciona, płasko-wydłużone) zawiera podobne ilości materii organicznej.
3. Różnoziarnistość piaskowca nie jest czynnikiem determinującym zmiany kształtu ścieranych cząstek rumowiska.
4. Zwiertzelina, tj. materiał w różnym stopniu zwiertzały, pozyskiwany w wyniku laboratoryjnego badania ścieralności okruchów skalnych, może być przedmiotem innych analiz, np. chemicznych czy mineralogicznych.

### *Źródło finansowania*

*Prezentowane wyniki badań zostały sfinansowane w ramach realizacji grantu (Pol-Nor/209947/52) oraz w ramach Parku Technologicznego Ekoenergia – Woda – Bezpieczeństwo i wsparte finansowo przez Ekoenergia Silesia S.A.*

### Literatura

- Allen P.A. 2000. Procesy kształtujące powierzchnię Ziemi. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Andrews J.E., Brimblecombe P., Jickells T.D., Liss P.S. 1995. An Introduction To Environmental Chemistry. Blackwell Science, Oxford.
- Attal M., Lavé J. 2009. Pebble Abrasion Turing Fluvial Transport: Experimental Results and Implications for the Evolution of the Sediment Load Along Rivers. *Journal of Geophysical Research*, 114, F04023.
- Baran S. 1996. Zróżnicowanie warunków siedliskowych w Nadleśnictwie Wisła. *Sylwan*, 7, 77–92.
- Billi P., Paris E. 1992. Bed Sediment Characterization in River Engineering Problems. W: *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*. I. Bogen, D.E. Walling, T. Day. Red. IAHS Publications, 210, 11–20.
- Blott S. J., Pye K. 2008. Particle Shape: a Review and New Methods of Characterization and Classification. *Sedimentology*, 55–1, 31–63.
- Bylak A., Wójcik M. 2016. Reakcje bezkręgowców bentosowych na akumulację drobnoziarnistego osadu w potoku górskim. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 15(1), 35–47.
- Galas J. 1993. Particulate Organic Matter in the High Mountains Stream Sucha Woda (the High Tatra Mts., Poland). *Acta Hydrobiologica*, 35, 3, 203–212.
- Giriati D., Rutkowski J., Smolska E. 2007. Uwagi o znaczeniu interpretacyjnym analizy kształtu, obtoczenia i ułożenia ziaren frakcji gruboklastycznej wybranych środowisk sedymentacyjnych. W: *Badania cech teksturalnych osadów czwartorzędowych i wybrane metody oznaczania ich wieku*. E. Mycielska-Dowgiałło, J. Rutkowski. Red. Wydawnictwo SWPR, Warszawa, 10–17.
- Jezierska-Madziar M., Pińskwar P. 2008. Zagrożenia dla gospodarki rybackiej wynikające z postępującej eutrofizacji śródlądowych wód powierzchniowych. *Użytkownik*

- Rybacki – Nowa Rzeczywistość, PZW, 70–77. Zakład Badań Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN.
- Keith M. K., Sobieszczyk S., Goldman J. H., Rounds S.A.** 2014. Investigating Organic Matter in Fanno Creek, Oregon. Part 2 of 3: Sources, Sinks, and Transport of Organic Matter with Fine Sediment. *Journal of Hydrology*, 519, 3010–3027.
- Kłównska-Olejnik M., Radecki-Pawlik A.** 2000. Zróżnicowanie mikrosiedliskowe makrobezkręgowców dennych w obrębie łąch korytowych potoku górskiego o dnie zwirowym. XVIII Zjazd Hydrobiologów Polskich, Białystok.
- Knighton A.D.** 1982. Longitudinal Changes in the Size and Shape of Stream Bed Material: Evidence of Variable Transport Conditions. *Catena*, 9, 25–31.
- Kodama Y.** 1994. Experimental Study of Erosion and Its Role in Producing Downstream Fining in Gravel-Bed Rivers. *Journal of Sedimentary Research. Sect. A*, 64, 76–85.
- Książek L., Michalik A., Śladowski T.** 2008. Skład uziarnienia rumowiska jako wskaźnik lokalnej degradacji koryta rzecznoego. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 7(4), 3–12.
- Kubiak J., Tórz A.** 2005. Eutrofizacja. Podstawowe problemy ochrony wód jeziornych na pomorzu zachodnim. *Słupskie Prace Biologiczne*, 2. Akademia Rolnicza w Szczecinie, Szczecin.
- Malarz R.** 2004. The Rate of Gravel Abrasion in the Carpathian Rivers. *Geograficky casopis*, 56, 99–109.
- Manecki A., Muszyński M.** 2008. Przewodnik do petrografii. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Menting F., Langston A.L., Temme A.J.A.M.** 2015. Downstream Fining, Selective Transport and Hillslope Influence on Channel Bed Sediment in Mountain Streams. Colorado Front Range, USA. *Geomorphology*, 23, 91–105.
- Migoń P.** 2013. Geomorfologia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Mikoś M.** 1993. Fluvial Abrasion of Gravel Sediments. *Mitteilungen*, 123.
- Montgomery D.R., Piégay H.** 2003. Wood in Rivers: Interactions with Channel Morphology and Processes. *Geomorphology*, 51, 1–5.
- Myślińska E.** 2016. Laboratoryjne badania gruntów i gleb. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Osuch B.** 1965. Rozkład uziarnienia niespoistego materiału skalnego w przekrojach niektórych odcinków cieków karpackich. *Czasopismo Techniczne*, 10.
- Patent nr 223736. 2017. Sposób wyznaczania miar stopnia zwietrzenia szkieletu glebowego w środowisku suchym i wodnym. J. Kucza, E. Słowik-Opoka, A. Klamerus-Iwan. Urząd Patentowy RP.
- Peszat C., Wieser T.** 1999. Mineral Composition of Matrix in Thick-Bedded Istebna Sandstones (the Polish Flysch Carpathians). *Min. Pol.*, 30, 73–83.
- Pietrzyk A., Papiak D.** 2016. Materia organiczna w wodach naturalnych – formy występowania i metody oznaczania. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. JCEEA*, XXXIII, 63(2/I/16), 241–252.
- Piwińska D., Gruca-Rokosz R.** 2017. Wskaźnik pochodzenia i kierunków przemian materii organicznej w osadach dennych zbiorników wodnych. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. JCEEA*, XXXIV, 64 (1/17), 23–33.

- Pizzuto J.E. 1955. Downstream Fining in a Network of Gravel-Bedded Rivers. *Water Resources Research*, 31(3), 753–759.
- PN-EN 933–1:1997. Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania. PKN, Warszawa.
- Puczko K., Zieliński P., Jekatierynczuk-Rudczyk E. 2017. Rozpuszczona materia organiczna w wodach słodkich. *Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych*, 66, 3, 457–464.
- Raczyńska M., Machula S., Raczyński M. 2012. Materia organiczna jako ważny element stopnia zanieczyszczenia małych cieków na przykładzie potoku Osówka. *Inżynieria Ekologiczna*, 31.
- Schumm S.A., Stevens M.A. 1973. Abrasion in Place: a Mechanism for Rounding and Size Reduction of Coarse Sediments in Rivers. *Geology*, 1, 37–40.
- Słota H., Szczepny J. 1974. Metodyka poboru reprezentatywnych prób rumowiska dennego w warunkach górskich. *Gospodarka Wodna*, 2.
- Słowik-Opoka E., Klamerus-Iwan A. 2015. Badanie zmian nasiąkliwości szkieletu glebowego w wybranych poziomach genetycznych przy zastosowaniu laboratoryjnej metody ścierania, na przykładzie piaskowca magurskiego. *Sylvan*, 159(6), 452–460.
- Słowik-Opoka E., Wrońska-Wałach D., Michno A. 2018. Analysis of Sediment from Steps in a Small Catchment in the Polish Carpathians in Relation to the Transition Zone between the Hillslope and Fluvial System. *Catena*, 165, 237–250.
- Starzak R. 2006. Dynamika zapasu wody w glebach wybranych drzewostanów świerkowych Beskidu Śląskiego. Praca doktorska. AR w Krakowie, maszynopis.
- Starzak R., Kuczka J., Suliński J. 2015. Dynamika zapasu wody w glebach pod wybranymi drzewostanami świerkowymi Beskidu Śląskiego w latach 1999–2004. W: *Ekologiczne i hodowlane uwarunkowania przebudowy drzewostanów świerkowych w Beskidzie Śląskim i Beskidzie Żywieckim*. S. Małek. Red. Wydawnictwo UR, Kraków.
- STATISTICA (v. 13.3). 2020. StatSoft Polska Sp. z o.o.
- Strzeboński P. 2005. Debryty kohezyjne warstw istebniańskich (senon górny – paleocen) na zachód od Skawy. *Geologia*, 31, 2, 201–224.
- Thompson D.M. 1995. The Effect of Large Organic Debris on Sediment Processes and Stream Morphology in Vermont. *Geomorphology*, 11, 235–244.
- Ward G.M., Aumen N.G. 1986. Woody Debris as a Source of Fine Particulate Organic Matter in Coniferous Forest Stream Ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43, 1635–1642.
- Webster J.R., Golladay S.W., Benfield E.F., D'Angelo D.J., Peters G.T. 1990. Effects of Forest Disturbance on Particulate Organic Matter Budgets of Small Streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 9(2), 120–140.
- Wohl E., Scott D.N. 2016. Wood and Sediment Storage and Dynamics in River Corridor. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 5–23. DOI:10.1002/esp.3909.
- Wyźga B., Kaczka R.J., Zawiejska J. 2003. Large Woody Debris in Mountains Streams – Accumulation Types, Depositional Conditions and Environmental Significant. *Folia Geographica. Series Geographica-Phisica*, XXXIII–XXXIV.
- Zingg T. 1935. Beiträge zur Schotteranalyse: Schweizerische Mineralogische und Petrologische Mitteilungen, 15, 39–140.

# Geneza powstawania żwirowo-piaszczystych form dennych wzdłuż ujściowego odcinka rzeki Raby – zagadnienia wybrane

Ewa Słowik-Opoka

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: ewa.opoka@urk.edu.pl

## Abstrakt

W pracy ujęto problematykę powstawania form dennych wzdłuż ujściowego odcinka rzeki podgórskiej. Celem pracy jest określenie warunków hydrodynamicznych kształtujących dno rzeki o podłożu żwirowo-piaszczystym. Podstawę do przeprowadzenia badań stanowiło przyjęcie następujących hipotez: 1) Wzdłuż ujściowego odcinka rzeki podgórskiej powstają wydmy zbudowane z materiału żwirowo-piaszczystego o średnicy ziaren ( $d_{50}$ ) > 2 mm, 2) Występujące w korytach naturalnych formy denne odgrywają istotną rolę w kształtowaniu oporów przepływu. Przedmiotem badań są dwu- i trójwymiarowe mezoformy denne w postaci wydm. Pomiaru morfometryczne form dennych, obejmujące takie podstawowe wielkości jak wysokość ( $H$ ), długość ( $L$ ) i szerokość ( $W$ ) form dennych, przeprowadzono przy niskich i średnich stanach wody. Wyznaczono pionowy ( $L/H$ ) oraz poziomy ( $W/L$ ) indeks kształtu oraz wskaźnik stromości form ( $H/L$ ). Opierając się na wynikach przeprowadzonych badań i analiz statystycznych, określono związek pomiędzy wysokością ( $H$ ), stromością ( $H/L$ ), a długością ( $L$ ) form badanego odcinka Raby. Opracowane zostały zależności funkcjonalne: ( $H$ ) i ( $L$ ) oraz ( $H/L$ ) i ( $L$ ). Wyniki pomiarów geometrycznych form dennych rzeki Raby naniesione zostały na diagramy klasyczne. Aby scharakteryzować warunki hydrodynamiczne w miejscu występowania form dennych, zbadano rozkład prędkości chwilowej oraz przeprowadzono obliczenia prędkości dynamicznej ( $v_*$ ), naprężeń stycznych ( $\tau$ ), bezwymiarowego parametru Shieldsa ( $\Theta$ ) i współczynnika oporów przepływu ( $f$ ). Badania potwierdziły, że w określonych warunkach hydrodynamicznych możliwe jest powstawanie na ujściowym odcinku rzeki podgórskiej form dennych w postaci wydm żwirowo-piaszczystych, które powodują zmianę wielkości oporów przepływu. Wyniki prezentowanych badań mogą znaleźć zastosowanie w praktyce inżynierskiej, np. podczas wyznaczania przepływu obliczeniowego, gdy



szerokość dna wyznaczona zostanie z wykorzystaniem wysokości form dennych. Prezentowana praca stanowi podstawę do dalszych rozważań dotyczących procesu powstawania, migracji i dyssypacji żwirowo-piaszczystych form dennych w ciekach o charakterze podgórskim.

**Słowa kluczowe:** zlewnia, rzeka podgórska, parametry hydrodynamiczne, granulometria, formacje denne

## 1. Wprowadzenie

Rzeki są naturalnymi powierzchniowymi układami wodnymi posiadającymi ukształtowane przez nurt rzeczny koryto, którego kształt zależy od wielkości przepływu wody oraz jakości materiału budującego dno i brzegi. W korytach wód płynących zachodzą nieustanne procesy erozji, transportu i akumulacji. Działalność erozyjna polega na przekształcaniu koryt w kierunku pionowym i poziomym (wcinanie się koryt, meandrowanie). W wyniku procesu erozji wodnej w korycie ma miejsce transport i akumulacja erodowanego materiału skalnego, jak również rumoszu skalnego dostarczanego do koryt w wyniku działania procesów erozyjnych na stoku. W określonych warunkach hydrodynamicznych transport i akumulacja materiału mineralnego w korycie sprzyja powstawaniu zróżnicowanych utworów rzecznych, w postaci mikro- (zmarszczki wodne), mezo- (wydmy) i makroform (łachy, odsypiska) (Allen 2000; Zieliński 2014), jednakże proces powstawania utworów rzecznych będzie przebiegać nieco inaczej w przypadku rzek nizinnych, a inaczej w przypadku rzek i potoków górskich.

Powstawanie form dennych w rzece ma miejsce głównie w wyniku wzajemnego oddziaływania przepływu wody oraz materiału budującego dno koryta cieku (Dąbkowski i in. 1982). Opierając się na uproszczonym podziale utworów dennych, zaproponowanym przez Simonsa i Richardsona (1966), pierwszą, niejako wyjściową formą dna jest dno płaskie, bez wzniesień czy przegłębień większych niż, jak podaje Yang (1996), największa średnica materiału dennego. Radecki-Pawlik (2002) za Leopoldem i in. (1964) podał, że w obszarze formowania się dna płaskiego woda płynie z małą prędkością ( $v < 45 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ). W przypadku, gdy głębokość wody lub spadek dna koryta ulegną zwiększeniu, następuje ruch ziaren frakcji piaszczystej, a każda zmiana, tj. zarówno zwiększenie spadku dna lub głębokości wody w korycie powoduje, że ruch materiału dennego staje się bardziej intensywny i na dnie zaczynają się formować utwory w postaci zmarszczek wodnych. Przy dalszym wzroście prędkości przepływu na dnie zaczynają tworzyć wydmy. Możliwe jest również występowanie tzw. form przejściowych, które powstają w wyniku występowania znaczących prędkości przepływu wody ( $v \geq 120 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ), gdzie

wydmę ulegają częściowemu lub całkowitemu rozmyciu i ma miejsce powstawanie płaskiego dna z ruchem rumowiska, tworzą się fale piaszkowe przechodzące w antywydmę ( $v \leq 170 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (Allen 1968).

Tematyka powstawania utworów rzecznych jest przedmiotem badań naukowców w kraju i za granicą. Na szczególną uwagę zasługuje klasyfikacja utworów rzecznych przedstawiona w pracy Allena (1968), gdzie w sposób szczegółowy scharakteryzowane zostały parametry geometryczne utworów rzecznych oraz mechanizmy rządzące ich powstawaniem, migracją i rozmywaniem. W pracach Młynarczyka (1989), Pruszaka (1998) i Coufala (1995) przedstawiono tematykę powstawania piaszczystych form dennych w ciekach nizinnych. Znane są prace, w których opisano utwory denne powstałe w warunkach laboratoryjnych na drodze eksperymentów naukowych (Simons i Richardson 1966; Ashley 1990; Southard 1991). Autorzy, opierając się na wynikach własnych badań, opracowali szereg zależności empirycznych i graficznych, które aktualnie uchodzą za klasyczne (Pasierbiewicz 1976; Pruszek 1989; Carling i in. 2000; Radecki-Pawlik 2002), jednakże nie obejmują formacji dennych zbudowanych z materiału mineralnego o średnicy ziaren  $\geq 2 \text{ mm}$ . Wynika to głównie z braku wystarczającej liczby danych pomiarowych zebranych bezpośrednio w terenie (wysoka dynamika zanikania form). Jedną z interesujących prac, prezentującą wyniki badań terenowych form żwirowo-piaszczystych, jest opracowanie Carlinga i in. (2005), którzy opierając się na wynikach badań terenowych form dennych znalezionych na dnie rzeki Ren (Niemcy), usystematyzowali poszczególne etapy powstawania i ewolucji mezoform w postaci wydm. Według Carlinga i in. (2000) rozwijające się na dnie małe mobilne wydmy mogą skutecznie zwiększać dostawę sedymentu i w ten sposób dawać początek nowym utworom dennym. Ponadto w określonych warunkach hydrodynamicznych ma miejsce przemieszczanie się wydm i zmniejszanie się ich objętości, a w konsekwencji powstawanie nowych form. Najnowsze opracowania ujmujące badania warunków hydrodynamicznych towarzyszących powstawaniu form dennych na odcinkach rzek o podłożu żwirowo-piaszczystym to prace Besta (1996), Kleinhausa (2002), Williamsa i in. (2007).

Proces powstawania form dennych rzeki podgórskiej o dnie żwirowo-piaszczystym jest nadal niewystarczająco poznany z uwagi na jego złożoność, związaną głównie z hydraulicznie zróżnicowanym przepływem wody w korycie, charakterystyką składu granulometrycznego dna i rumowiska rzeczno oraz zmianami morfometrii koryta.

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów geometrycznych oraz składu frakcyjnego utworów rzecznych w postaci mezoform – wydmy zaobserwowanych na ujściowym odcinku rzeki podgórskiej o podłożu żwirowo-piaszczystym wraz z charakterystyką warunków hydrodynamicznych. Pierwszą, posta-

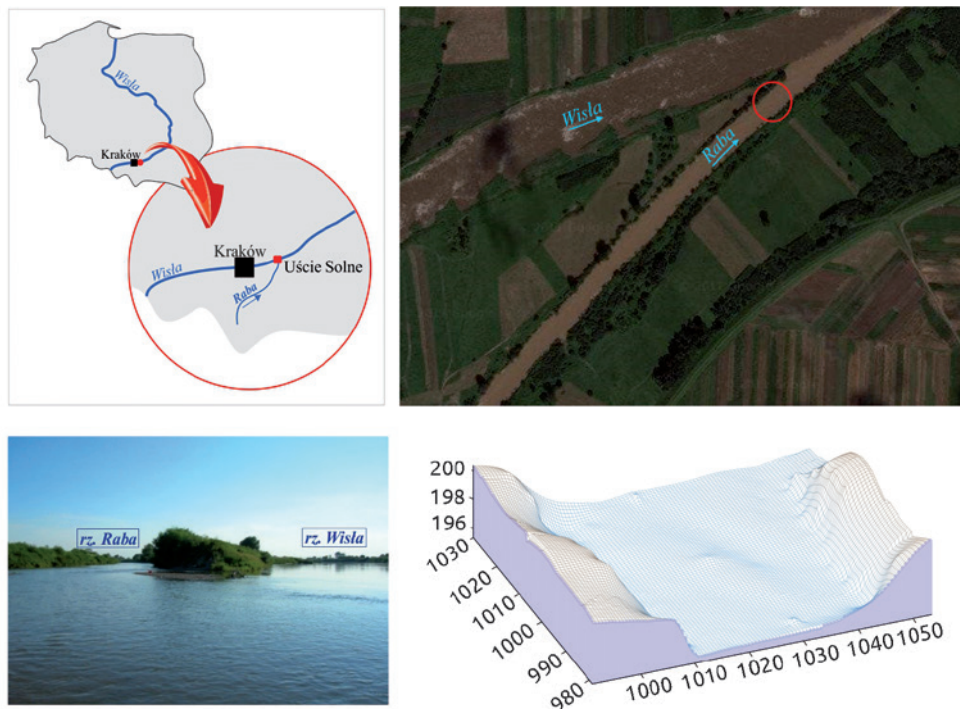
wioną w pracy tezą jest twierdzenie, że na dnie rzeki o charakterze podgórskim powstają mezofomy – wydmy zbudowane z frakcji żwirowo-piaszczystej. Teza druga stanowi o tym, że utwory te odgrywają istotną rolę w kształtowaniu szorstkości dna i oporów przepływu. Opory przepływu związane z występowaniem form dennych w korycie cieką powodują m.in. zmiany wartości przepływu obliczeniowego, co ma istotne znaczenie z punktu widzenia praktyki inżynierskiej. Zweryfikowanie postawionych w pracy tez pozwoli na poszerzenie wiedzy o warunkach hydrodynamicznych kształtujących dno rzeki o podłożu żwirowo-piaszczystym i powstawaniu formacji dennych w ciekach podgórskich.

## 2. Materiały i metody

Metodyka badań obejmowała wykonanie pomiarów terenowych i prac laboratoryjnych, jak również przeprowadzenie obliczeń parametrów hydrodynamicznych w obrębie występowania form dennych kształtujących dno ujściowego odcinka rzeki Raby. W ramach prac terenowych wykonano pomiary morfometryczne form dennych oraz pomiary głębokości wody. Pobrane zostały próby materiału mineralnego budującego formy denne. Zbadano rozkład prędkości chwilowej nad charakterystycznymi punktami form dennych w celu określenia warunków hydrodynamicznych panujących w ich obrębie.

### 2.1. Charakterystyka obszaru badań

Badania terenowe zostały przeprowadzone na ujściowym odcinku rzeki Raby w miejscowości Uście Solne (ryc. 1), na którym zaobserwowano występowanie formacji dennych w postaci wydm oraz łąch podwodnych i utworów napowierzchniowych. Dno badanego odcinka rzeki zbudowane jest głównie z frakcji piaszczystej oraz drobnych i grubych żwirów. Wyrównany spadek badanego odcinka rzeki wynosi 0,32‰, przy spadku zwierciadła wody 0,0006. Przepływ średni niski SNQ obliczony wg formuły Stachy (Punzet 1981) wynosi 2,71 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), natomiast SNQ 5,44 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Przepływ średni roczny (SSQ) obliczony wg formuły Krzanowskiego (1972) wynosi 20,86 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) a przepływ minimalny  $Q_{\min 50\%} = 1,39$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) (Słowik-Opoka 2006).



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań (mapa i fot. E. Słowik-Opoka)

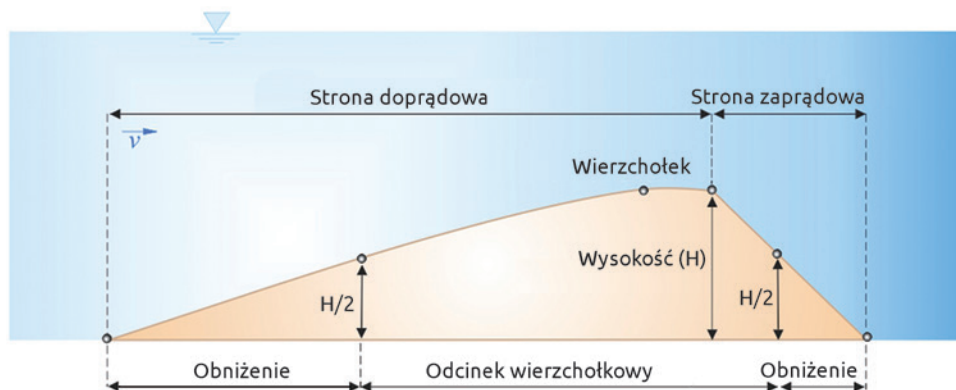
## 2.2. Morfometria form dennych

Charakterystyka geometryczna form dennych obejmuje takie parametry jak wysokość ( $H$ ) mierzona w miejscu najwyższego wzniesienia wydmy, długość ( $L$ ) mierzona równoległe do kierunku przepływu, szerokość ( $W$ ) mierzona prostopadle do długości (ryc. 2). Znajomość tych parametrów pozwala na wyznaczenie pionowego ( $L/H$ ) i poziomego ( $W/L$ ) indeksu kształtu oraz wskaźnika stromości formy ( $H/L$ ). W literaturze przedmiotu omówione zostały klasyczne związki empiryczne dotyczące geometrii formacji dennych w rzekach, opisujące m.in. zależność wysokości formy ( $H$ ) od jej długości ( $L$ ) (Allen 1968). Przykładem jest klasyczne równanie (1) opracowane przez Flemminga (1998) (Carling i in. 1993), które opisuje tzw. górne ograniczenie, po przekroczeniu którego nie obserwuje się powstawania form:

$$H = 0,16 L^{0,84} \quad (1)$$

Allen (1968) na podstawie szeregu prac dotyczących wskaźnika stromości zdefiniował stromość formy w zależności od jej długości:

$$H/L = 0,074 L^{-0,23} \quad (2)$$



Ryc. 2. Schemat przedstawiający parametry formy dennej

Pomiary morfometryczne wydm kształtujących dno ujściowego odcinka rzeki Raby przeprowadzono przy niskich i średnich stanach wody z użyciem przymiaru. Równolegle mierzono głębokość wody w korycie w miejscu występowania formacji dennych. Związek pomiędzy wysokością ( $H$ ) i wskaźnikiem stromości ( $H/L$ ) a długością form dennych ( $L$ ) opracowano statystycznie, ustalając korelację pomiędzy zmiennymi zależnymi ( $H$ ), ( $H/L$ ) a zmienną niezależną ( $L$ ) (dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ ). Zależności funkcjonalne pomiędzy wysokością ( $H$ ), wskaźnikiem stromości ( $H/L$ ), a długością ( $L$ ) wydm wyznaczono, stosując oś główną zredukowaną przy założeniu, że obie osie ( $X$ ,  $Y$ ) mają rozkłady normalne. Ustalono równania osi głównych zredukowanych dla poszczególnych zależności oraz wyznaczono współczynniki ( $a$  i  $b$ ). Sporządzone zostały diagramy opisujące zależności zachodzące pomiędzy wysokością ( $H$ ), długością ( $L$ ) form a głębokością wody w korycie ciek ( $h$ ): ( $H/h$ ,  $L/h$ ) (Allen 1968), na które naniesiono wyniki dotyczące wydm rzeki Raby.

### 2.3. Charakterystyka granulometryczna materiału mineralnego

W celu określenia składu granulometrycznego form dennych, próbki materiału mineralnego pobrano *in situ* metodą zamrażania (Klingeman i Emmett 1982). Zastosowanie tej metody umożliwiła pozyskanie próbek o nienaruszonej strukturze. Pobór próbki przebiega w ten sposób, że do miedzianej rurki o średnicy ok. 2 cm zainstalowanej bezpośrednio w korycie ciek wlewany jest  $\text{CO}_2$  (lub ciekły azot) (ryc. 3a), w wyniku czego następuje zmrożenie przylegającego rumowiska. Tak pozyskaną próbkę układa się nad specjalną skrzynią z przegrodami (ryc. 3b), dzięki czemu można określić skład uziarnienia reliefu dna na określonych głębokościach odpowiadających szerokości przegrody (w przypadku mniejszych utworów dennych próbki materiału pobierano w postaci



całych form). Skład granulometryczny form dennych określono metodą sitowo-wagową. Badanie to stanowiło podstawę do opracowania krzywych uziarnienia oraz wyznaczenia wielkości średnicy miarodajnej ( $d_{50}$ ), uwzględnianej w obliczeniach parametrów hydrodynamicznych.

a)



b)



Ryc. 3. Pobór prób materiału mineralnego *in situ* metodą zamrażania (fot. E. Słowik-Opoka)

## 2.4. Parametry hydrodynamiczne w obrębie występowania wydym

### 2.4.1. Wyznaczenie prędkości chwilowej i dynamicznej ( $v^*$ )

Punktem wyjścia przy obliczaniu wybranych parametrów hydraulicznych, takich jak prędkość dynamiczna ( $v^*$ ), naprężenia styczne ( $\tau$ ), współczynnik oporu przepływu ( $f$ ) czy współczynnik szorstkości ( $n$ ), które odgrywają znaczącą rolę w kształtowaniu reliefu dna rzeki (Allen 2000), jest poznanie rozkładu prędkości przepływu wody (tachoidy) w obrębie występowania form dennych. Pomiary prędkości chwilowej przeprowadzono nad charakterystycznymi punktami form, z użyciem młynka hydrometrycznego Nautilus-2000 przy głębokości wody nieprzekraczającej 0,8 m, podczas średnich i niskich stanów wody.

Stosując metodę opisaną przez Gordon i in. (1992), prędkość dynamiczną ( $v_*$ ) wyznaczono, przyjmując założenie, że pomiary prędkości przepływu zostały przeprowadzone tuż nad dnem cieku, a ich wykresy są w przybliżeniu liniami prostymi. Wartości prędkości dynamicznej ( $v_*$ ) można wówczas wyznaczyć z wykresu prostej ( $v = f(h)$ ) (Gordon i in. 1992):

$$v_* = \frac{a}{5,75} \quad (3)$$

gdzie:

$v_*$  – prędkość dynamiczna [ $m \cdot s^{-1}$ ],

$a$  – współczynnik nachylenia prostej  $v = f(h)$  (zgodnie z równaniem ogólnym prostej przedstawionej w układzie półlogarytmicznym),

$h$  – odległość pomiaru prędkości wody nad dnem cieku [m],

$b$  – wyraz wolny równania (Radecki-Pawlik 2002).

### 2.4.2. Naprężenia styczne i bezwymiarowe w obrębie wydym

Naprężenia styczne ( $\tau$ ) to siły odpowiadające za ruch wody i transformację koryt rzek i potoków górskich (Allen 2000). W pracy, naprężenia styczne obliczono z wykorzystaniem wartości prędkości dynamicznej ( $\tau_1$ ) (4) oraz korzystając z formuły klasycznej uwzględniającej głębokość i spadek zwierciadła wody ( $\tau_2$ ) (5) (Michalik 1990; Mokwa 2002):

$$\tau_{(1)} = \rho \cdot (v_*)^2 \quad (4)$$

$$\tau_{(2)} = \gamma \cdot h \cdot I \quad (5)$$

gdzie:

$\tau_{(1,2)}$  – naprężenie styczne [ $N \cdot m^2$ ],

$\rho$  – gęstość wody [ $kg \cdot m^{-3}$ ],

$\gamma$  – ciężar właściwy wody [ $N \cdot m^{-3}$ ],



$h$  – odległość pomiaru prędkości wody nad dnem cieku [m],

$I$  – spadek zwierciadła wody [-].

Obliczone naprężenia styczne  $\tau_{(1,2)}$  w obrębie wydm posłużyły do wykonania obliczeń bezwymiarowych naprężeń krytycznych, nazywanych również parametrem Shieldsa (Allen 1968), odpowiednio:  $\Theta_1$  i  $\Theta_2$ , według wzoru (6):

$$\Theta_{(1,2)} = \frac{\rho_w \cdot g \cdot h \cdot S}{(\rho_r - \rho_w) \cdot g \cdot d_{50}} = \frac{\tau}{(\rho_r - \rho_w) \cdot g \cdot d_{50}} \quad (6)$$

w którym:

$\Theta_{(1)}$  – naprężenia bezwymiarowe obliczone na podstawie ( $\tau_1$ ) [-],

$\Theta_{(2)}$  – naprężenia bezwymiarowe obliczone na podstawie ( $\tau_2$ ) [-],

$\rho_w$  – gęstość wody [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

$g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],

$h$  – głębokość wody [m],

$S$  – spadek [-],

$\rho_r$  – gęstość rumowiska [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

$d_{50}$  – średnica miarodajna [m],

$\tau$  – naprężenie styczne [ $\text{N} \cdot \text{m}^2$ ].

Parametr Shieldsa jest stosowany w obliczeniach początku ruchu ziaren rumowiska o określonej średnicy (Bartnik 1992).

### 2.4.3. Współczynnik oporów przepływu ( $f$ )

Problematyka występowania oporów przepływu w korytach rzecznych jest zagadnieniem aktualnym i obecnie nabiera jeszcze większego znaczenia, m.in. z punktu widzenia realizacji zadań służących przywracaniu żeglowności rzek. W korytach rzecznych opory przepływu kształtowane są przez różnorodne czynniki, tj. rodzaj materiału koryta, stopień nieregularności brzegów i koryta, zmiany wielkości i kształtu przekroju poprzecznego rzeki, intensywność wegetacji czy stopień meandrowania (Gładki 1976; Mokwa 2002).

W naturalnych korytach rzek i potoków górskich opory przepływu są związane z nieregularnością oraz zmiennością kształtu koryt rzecznych, z meandrowaniem, transportem rumowiska rzecznoego oraz z powstawaniem form dennych (Gładki 1976).

Współczynnik oporów przepływu  $f_{(1,2)}$  obliczono wg dwóch koncepcji, mianowicie współczynnik  $f_{(1)}$  obliczono wg formuły (7) uwzględniającej naprężenia styczne (Gładki 1976), natomiast współczynnik  $f_{(2)}$  z uwzględnieniem prędkości dynamicznej (Allen 1971; Radecki-Pawlik 2002) (8):

$$f_{(1)} = 8 \cdot \left( \frac{v_*}{v_{sr}} \right)^2 \quad (7)$$

$$f_{(2)} = \frac{8\tau}{\rho_w \cdot (v_{sr})^2} \quad (8)$$

gdzie:

$v_*$  – prędkość dynamiczna [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$v_{sr}$  – prędkość średnia w pionie [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

### 3. Wyniki badań wraz z dyskusją

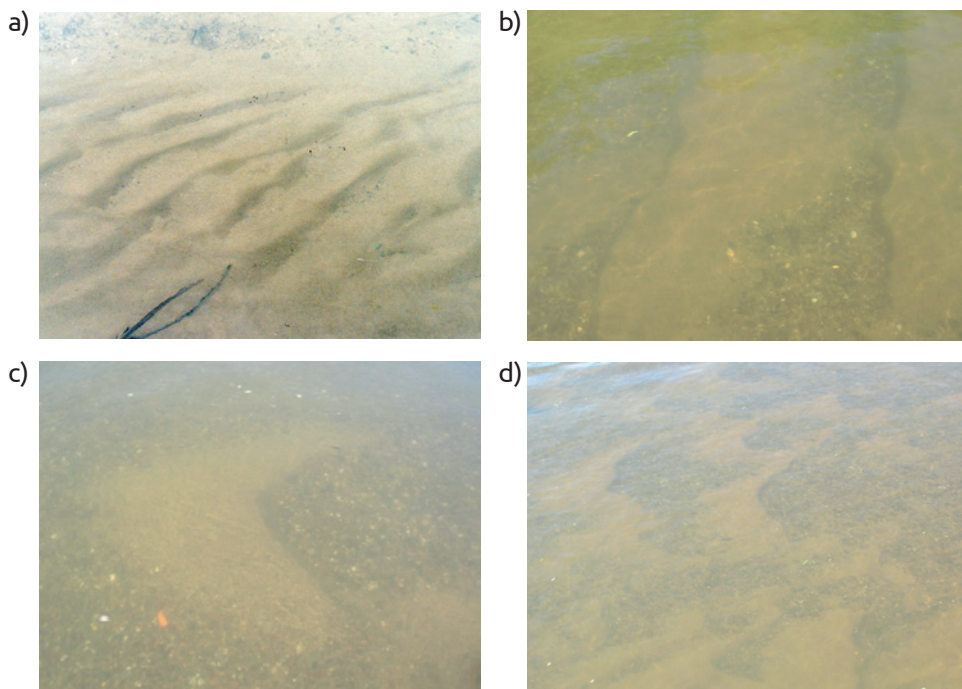
Wyniki badań dotyczące form dennych zaobserwowanych na ujściowym odcinku rzeki Raby zostały opisane w sposób szczegółowy w dysertacji Słowik-Opoki (2006). W niniejszej pracy przedstawiono wyniki dotyczące wybranych, charakterystycznych zespołów form dennych w postaci wydm, nazwanych: Raba 1, Raba 2, Raba 13, Raba 16 oraz Raba 17.

Raba 1 to zbiór wydm dwuwymiarowych prostokrawędziowych (ang. *2D, straight ripplemarks*) (Zieliński 2014), charakteryzujących się wysokością  $H = 0,07$  m, długością  $L = 1,2$  m i szerokością  $W = 1$  m (przy głębokości wody równej od 0,13 m mierzonej nad wierzchołkiem) (ryc. 4a). Obliczony wskaźnik stromości wydm ( $H/L$ ) odpowiada 0,06, co potwierdza spostrzeżenia Ashley (1990), która podała, że wskaźnik ten w przypadku wydm nie przekracza wartości 0,08. Poziomy indeks kształtu ( $W/L$ ) wynosi 0,83, natomiast pionowy ( $L/H$ ) = 17,1. Wydmy zostały uformowane z materiału mineralnego o średnicy miarodajnej ( $d_{50}$ ) równej 0,0015 m. Analizując wyniki obliczeń parametrów hydraulicznych wydm, można zauważyć, że średnia prędkość przepływu w pionie wynosiła od 0,20 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) nad stroną doprądową przez 0,50 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) nad wierzchołkiem wydmy do 0,48 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) nad obniżeniem, tj. po zaprądowej stronie formy. Największą prędkość dynamiczną ( $v_*$ ), równą 0,04 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) zlokalizowano nad wierzchołkiem formy, zaś najmniejszą nad zaprądową i doprądową stroną wydmy. Naprężenia styczne  $\tau_1$  wynosiły od 0,027 ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ) przy stronie doprądowej do 1,46 ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ) nad wierzchołkiem wydmy, natomiast naprężenia  $\tau_2$  osiągały wartości znacznie większe, odpowiednio 1,17 ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ) i 0,76 ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Bezwymiarowe naprężenia  $\theta_1$  mają wartość najwyższą, równą 0,06 nad wierzchołkiem wydmy, zaś najniższą na stronie doprądowej (0,0011). Naprężenia  $\theta_2$  wynoszą od 0,03 do 0,04. Wielkość naprężeń bezwymiarowych w zestawieniu ze średnicą ziaren wskazuje na to, że wydmy te, zgodnie z uwagami Bennetta i Bridge'a (1995) powinny zostać sklasyfikowane do

„warstw rumowiska wleczonego”. Analizując wyniki obliczeń współczynnika oporów przepływu ( $f$ ), można zaobserwować, że  $f_1$  obliczony wg formuły ujmującej prędkość dynamiczną ( $v$ ) przybiera znacznie większe wartości w porównaniu ze współczynnikiem  $f_2$  obliczanym z wykorzystaniem naprężeń stycznych ( $\tau_1, \tau_2$ ). Współczynnik  $f_1$  ma wartość najmniejszą (równą 0,006) przy stronie doprądowej formy, 0,046 nad wierzchołkiem i wartość największą (0,115) przy podstawie doprądowej strony wydmy. Podobnie prezentują się wyniki obliczeń współczynnika  $f_2$ , który wynosi 0,006 nad wierzchołkiem wydmy, 0,002 w obniżeniu strony doprądowej, a wartość najmniejszą (0,00011) osiąga na doprądowej stronie formy. Obliczone wartości współczynnika oporów przepływu, zgodnie ze spostrzeżeniami Carlinga (1993), wskazują na to, że w chwili prowadzenia badań wydmy zaczynały stopniowo ulegać zmniejszaniu, zarówno w kierunku pionowym (wysokość  $H$ ), jak i pionowym (długość  $L$ ).

Podobnie, zespół form dennych Raba 2 to wydmy 2D o prostej linii szczytu (prosto krawędziowe) (ryc. 4b) o wysokości 0,04 m, długości 1,15 m i szerokości 0,5 m (Słowik-Opoka i Radecki-Pawlik 2007). Wskaźnik stromości formy wynosi 0,03, obliczony poziomy indeks kształtu 0,43, a pionowy 28,8. Wydmy zespołu Raba 2 odznaczają się mniejszym wskaźnikiem stromości, co oznacza, że w porównaniu z opisaną powyżej grupą wydm zbioru Raba 1 są wydmami niższymi. Największą prędkość dynamiczną ( $v$ , = 0,05 m · s<sup>-1</sup>) oraz największe naprężenia styczne ( $\tau_1$ ), równe 2,150 (N · m<sup>-2</sup>) stwierdzono nad wierzchołkiem wydm. Wydmy zespołu Raba 2 odpowiadają formacjom dennym rzeki Ren (Radecki-Pawlik 2002) z tą jednakże różnicą, że wydmy reńskie to utwory kilkakrotnie większe, znalezione na dnie przy większej głębokości wody ( $h$ ). Omawiając wyniki obliczeń współczynnika oporów przepływu, można zauważyć, że ( $f_1$ ) nad punktem wierzchołkowym wydm wynosi 0,08506, natomiast ( $f_2$ ) jest o rząd wielkości mniejszy (0,00235). Wielkość współczynnika oporu ( $f_1$ ) = 0,08 (nad wierzchołkiem) odpowiada współczynnikowi oporów przepływu w obrębie występowania wydm rzeki Ren (Radecki-Pawlik 2002). Podsumowując, parametry geometryczne, hydrodynamiczne i średnica miarodajna materiału mineralnego wydm zespołu form Raba 2 odpowiadają parametrom wydm rzeki Ren, opisanym w pracy Radeckiego-Pawlika (2002). Wydmy reńskie są formami zdecydowanie wyższymi i dłuższymi, jednakże wskaźnik stromości w obydwu przypadkach wynosi ( $H/L$ )  $\cong$  0,03.

Wydmy zbioru Raba 13 to żwirowo-piaszczyste formy denne o kształcie półksiężyca (ang. 3D, *lunate ripplemarks*) (ryc. 4c). Wskaźnik stromości wydm wynosi od 0,02 do 0,07, a poziomy indeks kształtu wynosi od 0,54 do 1,22. Największą prędkość średnią w pionie, wynoszącą od 0,84 (m · s<sup>-1</sup>) do 0,88 (m · s<sup>-1</sup>), prędkość dynamiczną ( $v$ ) oraz naprężenia styczne ( $\tau_1$ ) (od 0,584 do 6,349 (N · m<sup>-2</sup>)) zaobserwowano nad wierzchołkiem wydm. Wielkość współczynnika oporów przepływu ( $f_1$ ) nad zaprądową stroną wydm wynosi od 0,0762



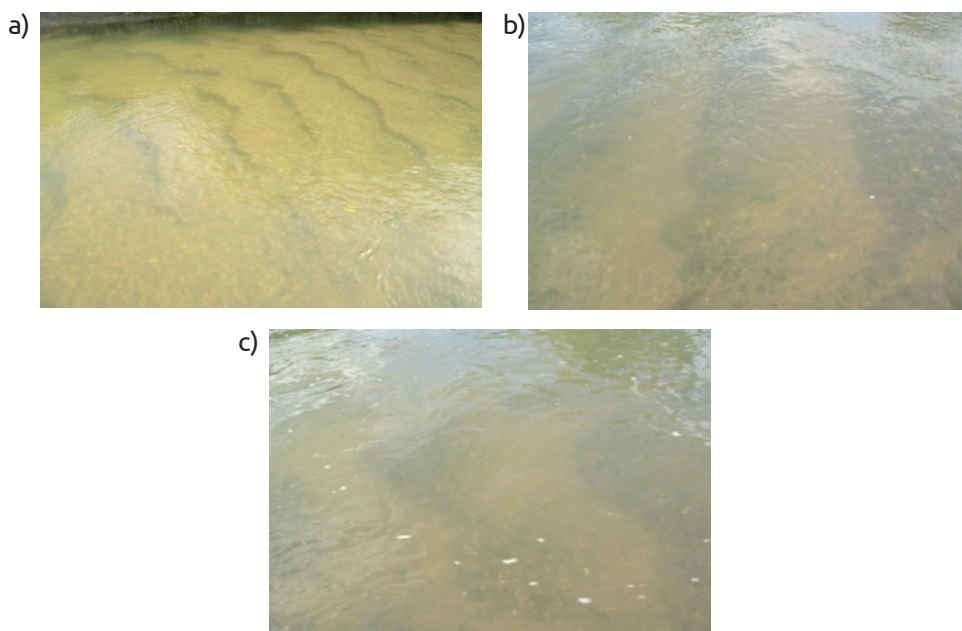
**Ryc. 4.** Mezoformy zbiorów: a) Raba 1, b) Raba 2, c) Raba 13, d) Raba 16 (fot. E. Słowik-Opoka)

do 0,18610, co oznacza, że wydmy w trakcie pomiarów charakteryzowały się maksymalną wysokością oraz stromością (Carling i in. 1993). Największe opory przepływu ( $f_2$ ) stwierdzono nad najwyższym wzniesieniem linii szczytu wydmy.

Interesującą grupę wydmy stanowią trójwymiarowe żwirowe wydmy językowe (ang. *3D, linguoid ripplemarks*) (ryc. 4d) zbioru Raba 16 (Słowik-Opoka i Radecki-Pawlik 2006). Średnica miarodajna ziaren materiału budującego wydmy wynosi 0,0040 m. Wydmy te powstały przy głębokości wody nieprzekraczającej 0,30 m. Wysokość badanych utworów rzecznych wynosi od 0,07 m do 0,11 m. Są to wydmy o długości od 0,60 m do 1,30 m i szerokości 1,60 m. Obliczony wskaźnik stromości ma zakres od 0,05 do 0,18. Poziomy indeks kształtu wynosi od 0,87 do 1,33, a pionowy odpowiednio 5,5 i 18,6. Pod względem wielkości poziomego i pionowego indeksu kształtu zespół wydmy Raba 16 odpowiada wydmom językowym rzeki Severn (UK) (Carling i in. 2000). Obliczone wielkości naprężeń stycznych ( $\tau_2$ ) wynoszą od 0,824 ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ) do 1,795 ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ). W obrębie wydmy językowej stwierdzono niewielkie naprężenia bezwymiarowe ( $\theta_2 = 0,0091 \div 0,0277$ ).

Zbiór form dennych Raba 17 obejmuje ponad 100 wydmy o wyraźnie zarysowanej linii szczytu, z czego 75% stanowią formy 2D o prostej linii szczytu,

zbudowane z piasku grubego ( $d_{50} = 0,0013$  m) o wysokości ( $H$ ) od 0,020 m do 0,075 m, długości ( $L$ ) nieprzekraczającej 1,20 m i szerokości ( $W$ ) 4,0 m. Pozostałe 25% form stanowią wydmy trójwymiarowe o zaokrąglonej linii szczytu (*ang. 3D sinusoidal ripplemarks*) i długości od 0,60 m do 1,50 m, wysokości od 0,025 do 0,12 m oraz szerokości nieprzekraczającej 3,50 m. Wskaźnik stromości tych wydym wynosi od 0,04 do 0,16, a jego wartość najwyższa odpowiada wydmom o wysokości  $H = 0,12$  m i długości  $L = 0,76$  m. Zarówno poziomy, jak i pionowy indeks kształtu wykazują zróżnicowanie ( $W/L$ : 0,87–4,7;  $L/H$ : 6,3–35,2). Interesujące jest zróżnicowane ułożenie linii szczytu wydym względem kierunku przepływu. Większość wydym zespołu Raba 17 (75%) to wydmy 2D o prostej krawędzi uformowanej prostopadle do kierunku przepływu (ryc. 5a), natomiast pozostała część to trójwymiarowe wydmy językowe (ryc. 5b) oraz półksiężycowe (ryc. 5c) o krawędzi uformowanej zgodnie z kierunkiem przepływu. Obliczony wskaźnik stromości wynosi od 0,03 do 0,12, poziomy indeks kształtu waha się od 1,02 do 4,31, a pionowy od 8,5 do 41 (przy głębokości wody 0,55 m i przepływie  $Q = 12,0$  m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>). Najmniejsze naprężenia styczne ( $\tau_2$ ) równe 1,971 (N · m<sup>-2</sup>) odnotowano przy głębokości wody 0,34 m, natomiast największe (3,1784 N · m<sup>-2</sup>) przy maksymalnej głębokości wody równej 0,54 m. Podobnie, najmniejsze naprężenia bezwymiarowe  $\theta_2$  (0,0937) zaobserwowano przy głębokości wody 0,35 m, a największe ( $\theta_2 = 0,1510$ ) przy maksymalnej głębokości wody ( $h = 0,54$  m).

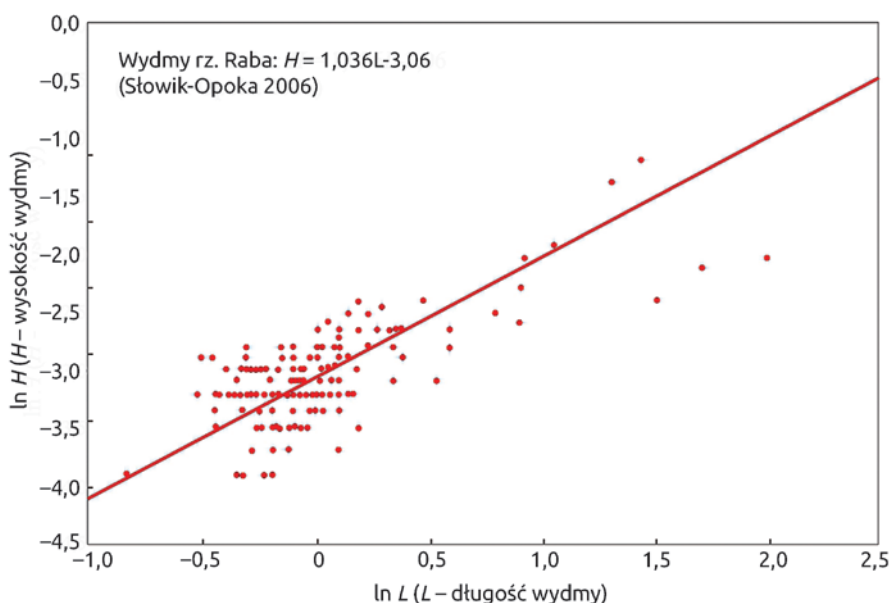


Ryc. 5. Mezoformy zbioru Raba 17: a) wydmy 2D, b) i c) wydmy 3D (fot. E. Słowik-Opoka)



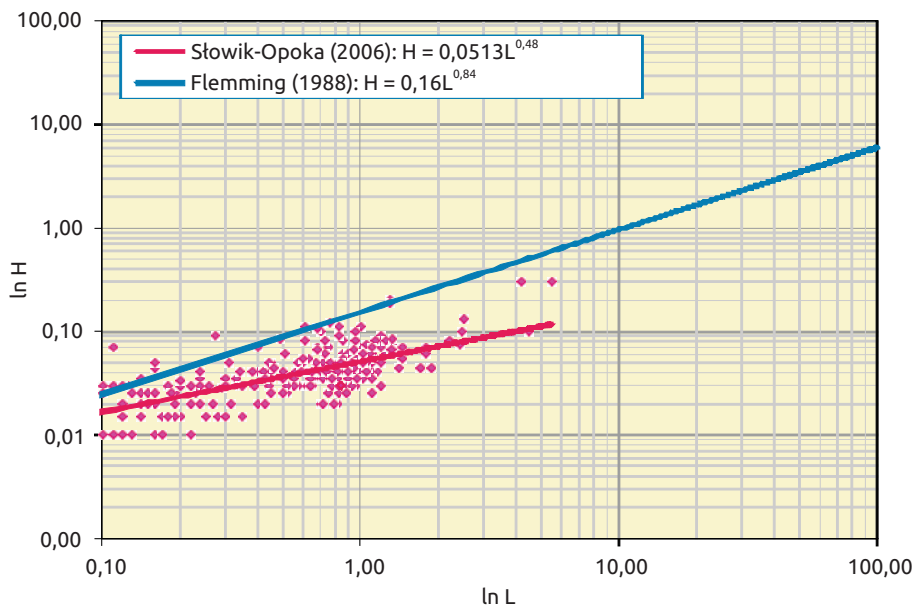
Mezoformy kształtujące dno ujściowego odcinka rzeki o podłożu żwirowo-piaszczystym to głównie wydmy o długości od 0,43 do 7,3 m i wysokości od 0,04 do 0,30 m. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów morfometrycznych wydm ustalono związek funkcjonalny, opisany równaniem:  $H = 1,036L - 3,06$  ( $r = 0,70$ ;  $0,61 < r < 0,77$ ;  $\alpha = 0,05$ ;  $n = 149$ ;  $F_{kryt. 0,05;1;149} = 3,84 < F_{obl.} = 142,24$ ) (ryc. 6), gdzie wraz ze wzrostem długości form ( $L$ ) wzrasta ich wysokość ( $H$ ).

Zależność pomiędzy wysokością ( $H$ ) a długością ( $L$ ) badanych wydm umieszczono na tle klasycznego wykresu Flemminga (1998) określającego tzw. „górne ograniczenie formowania się wydm” (ryc. 7). Przeważająca większość punktów znajduje się poniżej tego ograniczenia, co oznacza, że wydmy powstałe na dnie ujściowego odcinka rzeki Raby są krótsze i niższe w porównaniu z wydmami opisanymi przez Flemminga (1998). Uzyskane wyniki badań wydm rzeki Raby poszerzają dotychczasową wiedzę na temat geometrii wydm mniejszych od klasycznych (Ashley 1990).

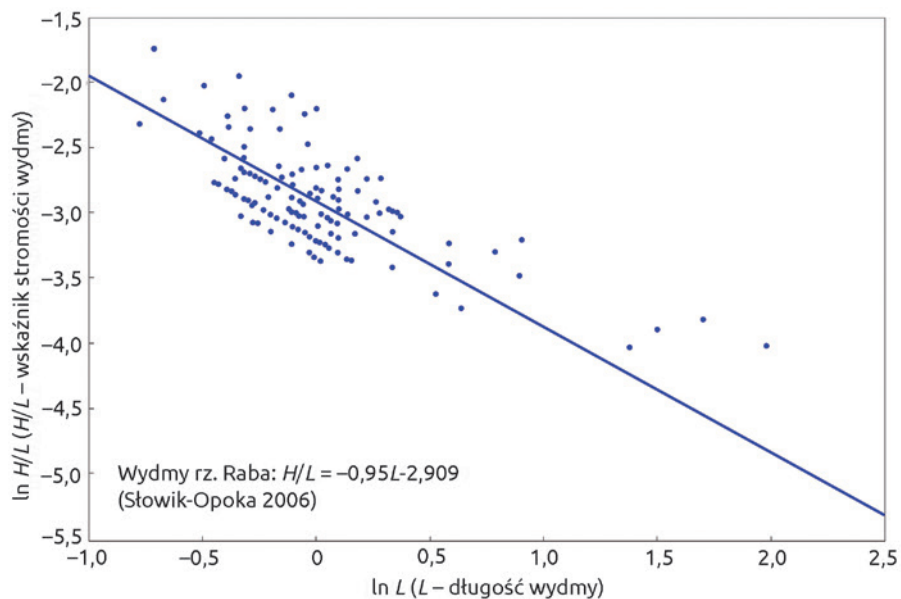


Ryc. 6. Zależność funkcjonalna wysokości formy ( $H$ ) od jej długości ( $L$ ) (źródło: Słowik-Opoka 2006; Radecki i in. 2006)

Na poniższym wykresie (ryc. 8) zilustrowano zależność obliczonego wskaźnika stromości ( $H/L$ ) od długości wydm ( $L$ ). Postać funkcji aproksymującej dane empiryczne przedstawia się następująco:  $H/L = -0,95L - 2,909$  ( $r = -0,71$ ;  $-0,75 < r < -0,66$ ;  $\alpha = 0,05$ ;  $n = 137$ ;  $F_{kryt. 0,05;1;137} = 3,84 < F_{obl.} = 137,06$ ). Najliczniejszą grupę wydm reprezentują formy o długości w zakresie od 0,5 do 2,0 m i wysoko-



Ryc. 7. Zależność wysokości wydmy ( $H$ ) od ich długości ( $L$ )



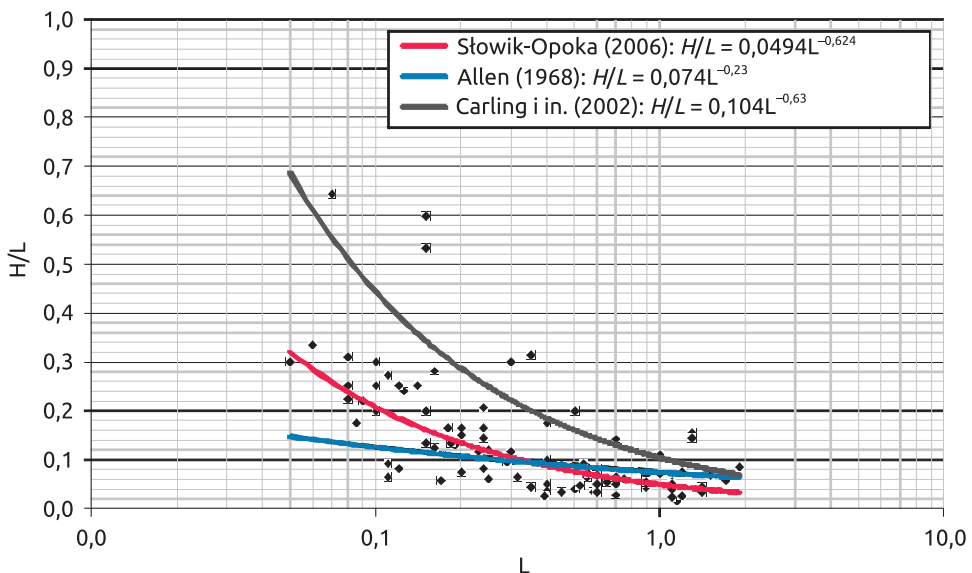
Ryc. 8. Zależność funkcjonalna wskaźnika stromości formy ( $H/L$ ) od jej długości ( $L$ )  
 (źródło: Słowik-Opoka 2006; Radecki-Pawlik i in. 2006)



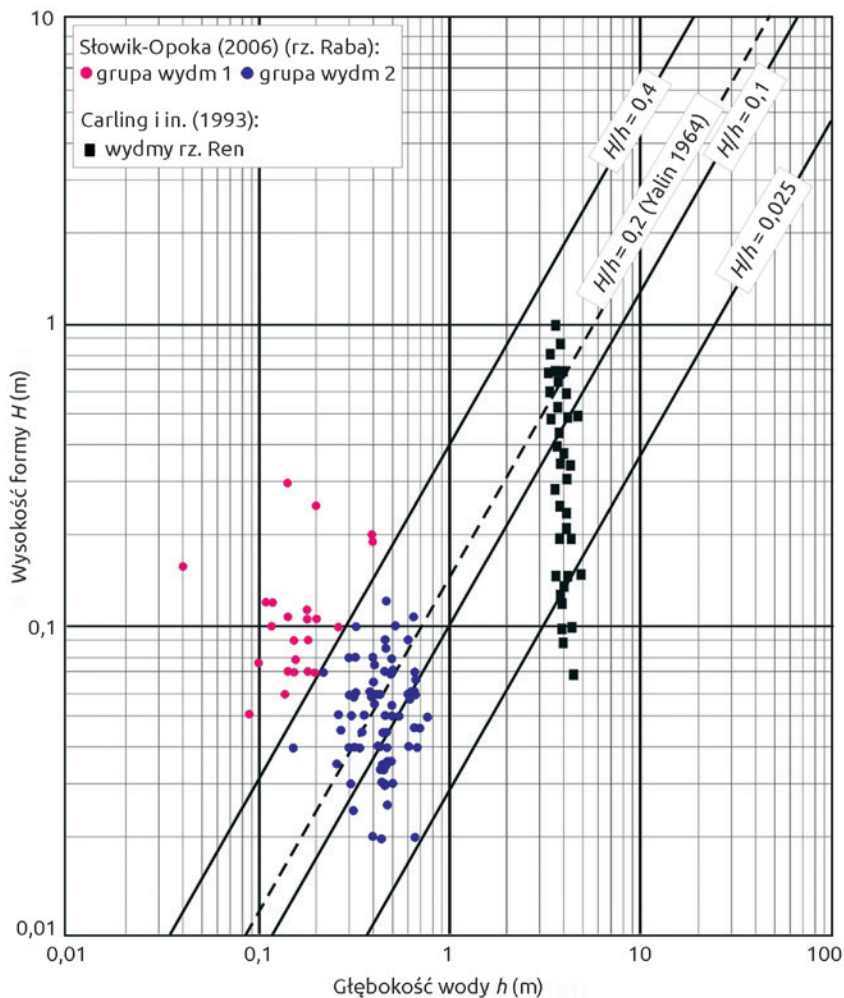
ści nieprzekraczającej 0,10 m. Zaobserwowano również wydmy niższe, jednakże o długości do 7,5 m.

Wyniki badań geometrii form naniesione zostały na klasyczny wykres zależności ( $H/L - L$ ) (Allen 1968; Carling i in. 2000) (ryc. 9). Przeważająca liczba punktów odpowiadających ( $H/L - L$ ) badanych wydm znajduje się poniżej wykresu prostej przedstawionej w pracy Allena (1968), co oznacza, że zdecydowana większość wydm charakteryzuje się wyższym wskaźnikiem stromości ( $H/L$ ). Wydmy powstałe na dnie rzeki o podłożu żwirowo-piaszczystym są krótsze i bardziej strome w porównaniu z wydmami badanymi przez Allena (1968) oraz Carlinga i in. (1993).

Wyniki badań dotyczące pomiarów wysokości ( $H$ ) i długości ( $L$ ) wydm oraz głębokości wody ( $h$ ) naniesiono na diagamy klasyczne (ryc. 10, 11). W przypadku pomiarów wysokości wydm ( $H$ ), mezofomy należące do grupy 1 to wydmy o wysokości od 0,05 m do 0,30 m powstałe przy głębokości wody ( $h$ ) w zakresie od 0,04 m do 0,40 m. Wydmy należące do tej grupy w całości znajdują się powyżej linii ograniczenia ( $H/h$ ) = 0,4. Oznacza to, że głębokość wody w obszarze występowania tych form odpowiada dwuipółkrotności wysokości wydm. Wydmy należące do grupy 2 to formy denne o wysokości od 0,02 m do 0,14 m występujące przy głębokości wody od 0,15 do 0,80 m i znajdujące się pomiędzy ograniczeniem ( $H/h$ ) = 0,025 a ( $H/h$ ) = 0,4. Oznacza to, że głębokość wody ( $h$ ) nad wydmami może osiągać od 2,5- do nawet 44-krotności wysoko-

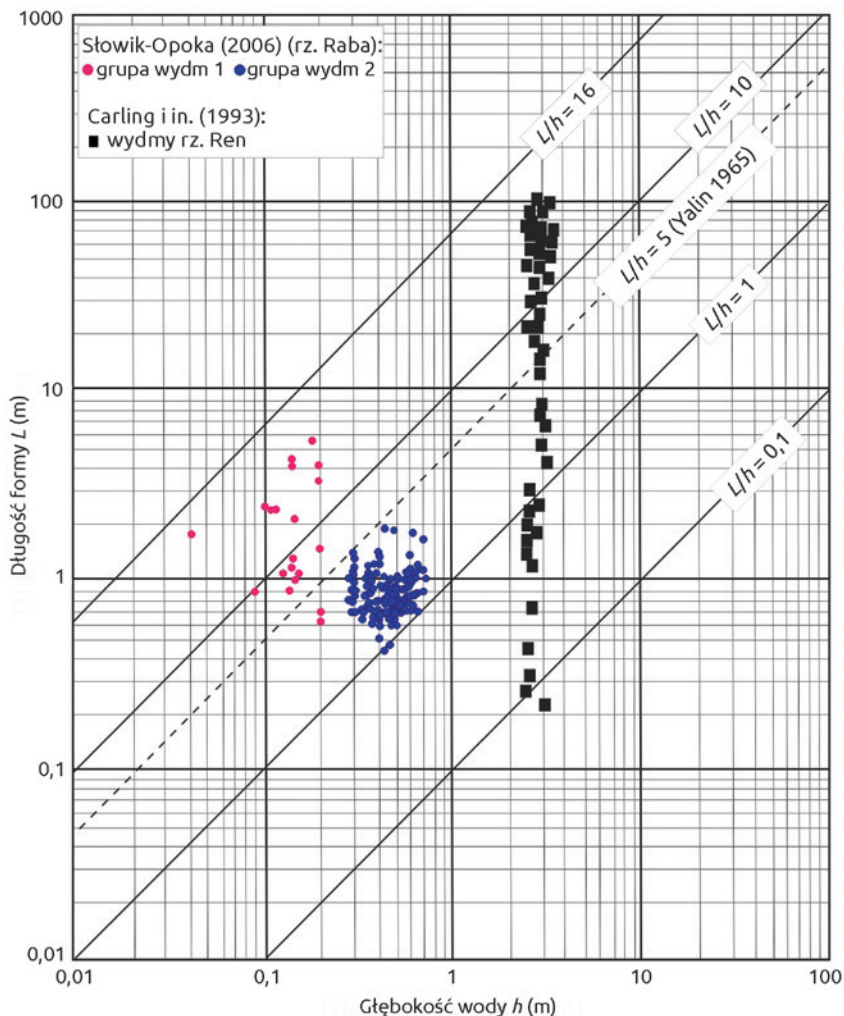


Ryc. 9. Zależność wskaźnika stromości badanych wydm ( $H/L$ ) od ich długości ( $L$ ) na tle wyników badań Allena (1968) i Carlinga i in. (2000)



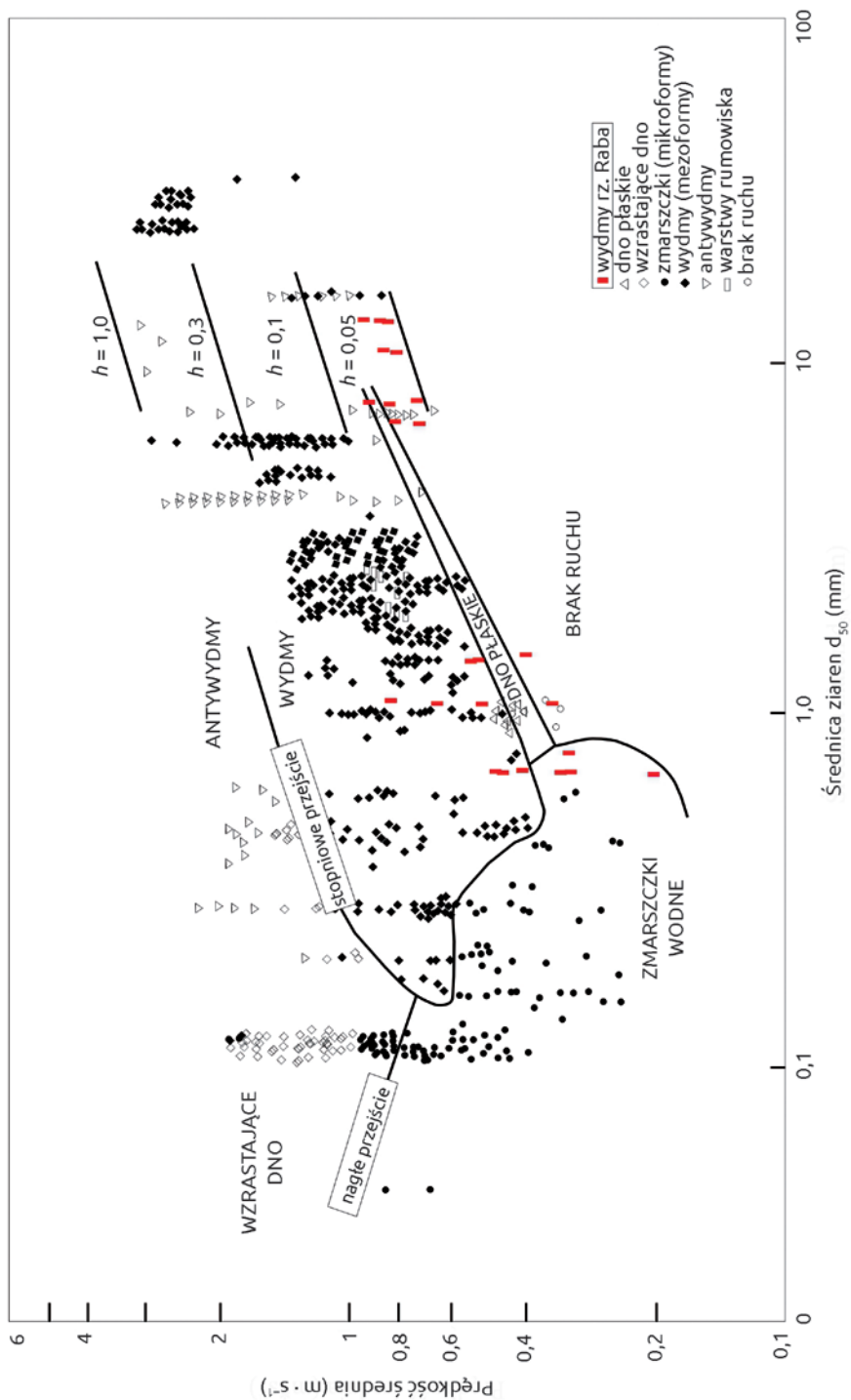
Ryc. 10. Zależność pomiędzy wysokością badanych wydmy ( $H$ ) a głębokością wody ( $h$ )

ści ( $H$ ). W przypadku klasycznego diagramu ujmującego zależność długości wydmy od głębokości wody ( $L/h$ ) (ryc. 11), wydmy grupy 1 charakteryzują się długością od 0,6 m do 7,5 m (przy  $h$  od 0,09 do 0,20 m). Grupa wydmy 2 to utwory rzeczne o długości od 0,4 m do 2,0 m, powstałe przy głębokości wody ( $h$ ) w zakresie od 0,3 m do 0,7 m. Relacja pomiędzy długością wydmy grupy 1 a głębokością wody ( $L/h$ ), wynosi od 5 do 16, a przypadku wydmy grupy 2, odpowiednio od 1 do 5. Długość wydmy może być równa głębokości wody ( $h$ ) w obrębie ich powstawania, jak również osiągać maksymalnie 16-krotność głębokości.



Ryc. 11. Zależność pomiędzy długością badanych wydmy ( $L$ ) a głębokością wody ( $h$ )

Wyniki badań wydmy ujściowego odcinka rzeki Raby naniesione zostały na klasyczny diagram opracowany przez Southarda (Carling i in. 2000) (ryc. 12), ilustrujący występowanie poszczególnych formacji dennych w zależności od średniej prędkości przepływu oraz średnicy miarodajnej ziaren. Wydmy ujściowego odcinka rzeki Raby znajdują się w obszarze przyporządkowanym do występowania zmarszczek (mikroform) oraz wydmy (mezofrom), gdzie przy prędkości średniej mniejszej od  $0,6 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$  możliwe jest występowanie wydmy zbudowanych z ziaren o średnicy  $d_{50} > 0,007 \text{ m}$ . Na dnie rzeki o podłożu żwirowo-piaszczystym możliwe jest występowanie form dennych odpowia-



Ryc. 12. Tworzenie się form dennych przy średniej głębokości przepływu 0,25–0,40 m i temp. wody 10°C dla piasku średnioziarnistego (źródło: Carling i in. 2000 za: Southardem 1991)

dających pod względem parametrów geometrycznych ( $H$ ,  $L$ ) mikroformom, jednakże zbudowanych z materiału mineralnego o uziarnieniu odpowiadającym wydmom klasycznym.

#### 4. Wnioski

1. Na dnie ujściowego odcinka rzeki o charakterze podgórskim przy głębokości wody ( $h$ ) w zakresie od 0,15 m do 0,75 m występują piaszczyste wydmy prostokrawędziowe i sinusoidalne ( $2D$ ), jak również wydmy językowe i półksiężycowe ( $3D$ ).
2. Przy średniej prędkości przepływu wynoszącej od  $0,45 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$  do  $0,8 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$  oraz prędkości dynamicznej ( $v_*$ ) nieprzekraczającej wartości  $0,05 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$  na dnie rzeki podgórskiej powstają wydmy żwirowo-piaszczyste.
3. Głębokość wody ( $h$ ) w obszarze występowania wydm żwirowo-piaszczystych wynosi od 2,5- do 44-krotności ich wysokości ( $H$ ). Wydmy mogą osiągać długość ( $L$ ) równą głębokości wody ( $h$ ), jak również osiągać maksymalnie 16-krotność głębokości ( $h$ ).
4. Wielkość obliczonego współczynnika oporów przepływu w obrębie badanych wydm odpowiada wartościom ( $f$ ) występującym w obszarze wydm klasycznych ( $0,042 < f < 0,16$ ).
5. Pomiędzy wysokością ( $H$ ) a długością ( $L$ ) wydm ujściowego odcinka rzeki podgórskiej istnieje zależność funkcjonalna, opisana równaniem:  $H = 1,036L - 3,06$ . Wydmy rzeki Raby są formami krótszymi i niższymi niż wydmy klasyczne.
6. Związek funkcjonalny pomiędzy stromością ( $H/L$ ), a długością wydm ( $L$ ) rzeki Raby został ujęty w postaci równania:  $H/L = -0,96L - 2,909$ . W przypadku większości wydm punkty odpowiadające zależności stromości wydm ( $H/L$ ) od ich długości ( $L$ ) znajdują się poniżej klasycznego wykresu przedstawionego w pracy Allena (1968):  $H/L = 0,074L^{-0,23}$ . Badane wydmy to utwory niższe i bardziej wydłużone, mniej strome.
7. Zapoczątkowane w pracy badania warunków hydrodynamicznych kształtujących dno rzeki podgórskiej o podłożu żwirowo-piaszczystym otwierają nowe możliwości badawcze, które w przyszłości pozwolą na opis procesu formowania się, migracji oraz dyssypacji utworów rzecznych w oparciu o bezpośrednie badania terenowe prowadzone w sposób ciągły z zastosowaniem najnowszego oprzyrządowania i metodyki.

### *Źródło finansowania*

*Badania przeprowadzono w ramach realizacji projektu naukowo-badawczego: G-1537/2005 (instytucje finansujące: British Council, Wielka Brytania oraz KBN, Warszawa). Artykuł stanowi publikację wyników badań ujętych w dysertacji doktorskiej Autorki.*

### Literatura

- Allen J.R. 1968. Current Ripples. Their Relation to Patterns of Water and Sediment Motion. North-Holland Publ. Co., Amsterdam.
- Allen J.R. 1971. Transverse Erosional Marks of Mud and Rocks, Their Physical Basic and Geological Significance. *Sedimentary Geology*, 5, 167–385.
- Allen P.A. 2000. Procesy kształtujące powierzchnię Ziemi. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Ashley G. 1990. Classification of Large-Scale Subaqueous Bedforms: a New Look at the Old Problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60, 160–172.
- Bartnik W. 1992. Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym. Początek ruchu rumowiska wleczonego. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie. Seria Rozprawy Habilitacyjne, 171.
- Bennett S.J., Bridge J.S. 1995. The Geometry and Dynamics of Low-Relief Bed Forms in Heterogeneous Sediment in a Laboratory Channel, and Their Relationship to Water Flow and Sediment Transport. *Journal of Sedimentary Research*, A 65, 29–39.
- Best J. 1996. The Fluid Dynamics of Small-Scale Alluvial Bedforms. W: *Advances in Fluvial Dynamics and Stratigraphy*. P.A. Carling, M.R. Dawson. Red. John Wiley and Sons, Ltd.
- Carling P.A., Gözl E., Glaister M.S., Radecki-Pawlik A., Rosenzweig S. 1993. Study and Numerical Modeling of Subaquatic Dunes in the River Rhine Near Niderwalluf. BFG, Koblenz Institute of Freshwater Ecology, Ambleside, UK, Koblenz, Niemcy, 1–31.
- Carling P.A., Gözl E., Orr H.G., Radecki-Pawlik A. 2000. The Morphodynamics of Fluvial Sand Dunes in the River Rhine Near Mainz, Germany. I. Sedimentology and morphology. *Sedimentology*, 47, 227–252.
- Carling P.A., Radecki-Pawlik A., Williams J.J., Rumble B., Meshkova L., Bell P., Breakspear R. 2005. The Morphodynamics and Internal Structure of Intertidal Fine-Gravel Dunes: Hill Flats, Severn Estuary, UK. *Sedimentary Geology*, 21.
- Coufal R. 1995. Zmiany położenia dna w ujściowym odcinku rzeki wywołane ruchem rumowiska. *Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej*, 515.
- Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A. 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- Dąbkowski L. 1989. Analiza oporów ruchu i kształtowania się średnich głębokości strumieni w korytach rzek o dnie piaszczystym. Seria Rozprawy Naukowe i Monografie, 97. Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa.



- Flemming B.** 1998. Zur klassifikation subaquatischer stömungstransversaler transportkörper. Bochumer Geol. Univ. Geotech. Arb., 29, 44–47.
- Gładki H.** 1976. Opory i prędkość przepływu w korytach rzek górskich na przykładzie Karpackich dopływów Wisły. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie. Seria Rozprawy Habilitacyjne, 118.
- Gordon D.N., McMahon T.A., Finlayson B.L.** 1992. Stream Hydrology. An Introduction for Ecologists. John Wiley and Sons Ltd., Chichester.
- Kleinhaus M.** 2002. Sorting out Sand and Gravel: Sedyment Transport and Deposition in Sand-Gravel Bed Rivers. Proefschrift Universiteit Utrecht, PhD Thesis.
- Klingeman P.C., Emmett W.W.** 1982. Gravel Bedload Transport Processes. W: Gravel-Bed Rivers: Fluvial Processes, Engineering and Management. R.D. Hey, J.C. Bathurst, C.R. Thorne. Red. John Wiley and Sons Ltd., USA. 141–179.
- Krzanowski S.** 1972. Przestrzenna zmienność odpływu średniego (spływu jednostkowego) na obszarze Karpat polskich. Praca doktorska, maszynopis.
- Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P.** 1964. Fluvial Processes in Geomorphology. W.H. Freeman, San Francisco, Kalifornia.
- Michalik A.** 1990. Badania intensywności transportu rumowiska wleczonego w rzekach karpackich. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie. Seria Rozprawy Habilitacyjne, 138.
- Młynarczyk Z.** 1996. Transport materiału piaszczystego w korycie rzeki meandrującej i kretej (na przykładzie Prosniej). Acta Quantenaria, 1. Wydawnictwo Naukowe UAM w Poznaniu.
- Mokwa M.** 2002. Sterowanie procesami fluwialnymi w korytach rzek przekształconych antropogenicznie. Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu. Seria Rozprawy, 439.
- Parzonka W., Kasperek R., Bartnik W.** 2004. Bed-Load transport of Polyfractional Material in Mountain Rivers. Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu, 481, 529–536.
- Pasierbiewicz K.** 1976. Prądowe formy depozycyjne występujące na dnie koryt aluwialnych w świetle badań laboratoryjnych. Postępy Nauk Geologicznych, 7. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.
- Pruszek Z.** 1998. Dynamika brzegu i dna morskiego. Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku, Gdańsk.
- Radecki-Pawlik A.** 2002. Wybrane zagadnienia kształtowania się form korytowych potoku górskiego i form dennych rzeki nizinnej. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie. Seria Rozprawy Habilitacyjne, 281, 142.
- Radecki-Pawlik A., Carling P.A., Słowik-Opoka E., Książek L., Breakspeare R.** 2006. Field Investigations of Sand-Gravel Bed Forms within the Raba river, Poland. W: River Flow. R.M.L. Ferreira, E.C.T.L. Alves, J.G.A.B. Leal, A.H. Cardoso. Red. Taylor & Francis Group, London, 1, 979–985.
- Simons D.B., Richardson E.V.** 1966. Resistance to Flow in Alluvial Channels. U.S. Geological Survey Professional Paper, 422-J, 1–61.
- Słowik-Opoka E.** 2006. Warunki hydrauliczne kształtujące dno rzeki o podłożu żwirowo-piaszczystym. Praca doktorska. KIW, WIŚiG, AR w Krakowie.
- Słowik-Opoka E., Radecki-Pawlik A.** 2006. Wybrane parametry hydrauliczne w obrębie wydm żwirowych języko-kształtnych. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi PAN, Oddział w Krakowie, 4(2), 159–172.



- Słowik-Opoka E., Radecki-Pawlik A.** 2007. Badania morfometryczne wydmy piaszczystych o prostej linii szczytu zaobserwowanych na dnie ujściowego odcinka rzeki Raby. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 6(1), 43–54.
- Southard J.B.** 1991. Experimental Determination of Bedform Stability. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 19, 423–455.
- Williams J., Carling P.A., Bell P.** 2007. Dynamics of Intertidal Gravel Dunes II. *Journal of Coastal Research, Special Issue 50*, 673–677.
- Zieliński T.** 2014. *Sedymentologia: osady rzek i jezior*. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Yang C.** 1996. *Sediment Transport – Theory and Practice*. McGraw-Hill, New York.



# Przebudowa zbiornika akumulacji rumoszu na obiekt małej retencji górskiej – studium przypadku

Rafał Starzak, Przemysław Huskiewicz

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: r.starzak@urk.edu.pl

## Abstrakt

Na terenach leśnych administrowanych przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe, zlokalizowanych jest wiele obiektów hydrotechnicznych, w tym przegród rumowiskowych na ciekach wodnych. Ich stan techniczny często pozostawia wiele do życzenia, a w wielu przypadkach stanowią realne zagrożenie zarówno dla ludzi, jak i środowiska przyrodniczego. W artykule przedstawiono koncepcję przebudowy zapory przeciwrumowiskowej na sztuczny zbiornik małej retencji górskiej. Zaproponowane rozwiązania projektowe przyczyniają się do zwiększenia retencji powierzchniowej, przywracają ciągłość potoku Kamienica w górnym biegu oraz stwarzają warunki do zwiększenia bioróżnorodności w otoczeniu zbiornika. Równocześnie wzrasta poziom ochrony infrastruktury drogowej przed szkodami powodziowymi oraz bezpieczeństwo przeciwpożarowe kompleksu leśnego. Budowa obejścia w formie przepławki podnosi ocenę hydrobiologiczną cieku oraz zapewnia spełnienie warunku *River continuum*, do czego zobowiązuje Ramowa Dyrektywa Wodna. Użycie jako budulca materiałów naturalnych, w tym rumoszu skalnego zalegającego powyżej korpusu zapory, ogranicza prace ziemne i minimalizuje koszty. Są to ważne przesłanki z uwagi na lokalizację obiektu w parku krajobrazowym oraz obszarze Natura 2000. Zaprezentowane rozwiązanie dotyczy potoku Kamienica w Sudetach Wschodnich, lecz zdaniem autorów jest uniwersalne dla lokalizacji górskich.

**Słowa kluczowe:** inżynieria leśna, retencja powierzchniowa, przepławka, formuła opadowa

## 1. Wstęp

Retencją wodną określa się zdolność do gromadzenia i przetrzymywania wody w zlewni w określonym miejscu i czasie (Bajkiewicz-Grabowska i Mikulski 1999; Ratomski 2013). Wyróżnia się wiele rodzajów retencji, a samo pojęcie jest rozumiane zarówno jako cecha środowiska, proces zachodzący w zlewni hydrologicznej, czy składowa równania bilansu wodnego (Suliński 2014). Spośród wydzielanych form retencji największe znaczenie ma retencja podpowierzchniowa (glebowo-gruntowa) oraz retencja szaty roślinnej i wód otwartych, zaliczane do retencji powierzchniowej. W ekosystemach leśnych najważniejszą rolę odgrywa retencja podpowierzchniowa wyrażona zapasem wody glebowej oraz intercepcja szaty roślinnej i ściółki (Suliński 2014). Retencja powierzchniowa na obszarach leśnych, która jest związana z rzeźbą terenu oraz retencja koryt i dolin pełnią funkcję uzupełniającą, przede wszystkim polegającą na powstrzymaniu spływu powierzchniowego i opóźnieniu odpływu wody.

W nawiązaniu do pojęcia retencji powierzchniowej funkcjonuje pojęcie małej retencji wodnej, rozumianej jako działania, najczęściej techniczne, zmierzające do zatrzymywania i magazynowania wody w zbiornikach o lokalnym zasięgu oddziaływania (Mioduszeowski 2008 b; Ratomski 2013). W innych opracowaniach (Miler 2008; Mioduszeowski 2008 a; Naturalna... 2016), pojęcie małej retencji wodnej jest rozumiane szerzej – jako całokształt działań technicznych i nietechnicznych zmierzających do poprawy bilansu wodnego zlewni poprzez zwiększenie jej zdolności do retencji. W tym ujęciu mała retencja wodna powiązana jest z wszystkimi formami retencji wody w zlewni.

Do działań technicznych w ramach małej retencji można zaliczyć prace hydrotechniczne i melioracyjne mające na celu opóźnienie spływu wód powierzchniowych. Są to procesy niepodlegające kontroli o trudno mierzalnym oddziaływaniu na środowisko. Obejmują one budowę małych zbiorników wodnych i piętrzenie wody w ciekach i jeziorach (Mioduszeowski 2008b, Miler 2013, Naturalna... 2016), w tym także wykorzystanie istniejących budowli piętrzących w korytach rzek (Żelazo i Popek 2014).

Ochrona przeciwozyjna gleby na pogórzach i w górach jest jednym z głównych zadań inżynierii i hydrologii leśnej (Suliński i Jaworski 1998; Szpila 2009). Z problematyką przeciwozyjną łączy się zabudowę potoków górskich, głównie w kontekście ochrony sieci komunikacyjnej i innych obiektów leśnych. Odrębnym zagadnieniem są zobowiązania administracji leśnej dotyczące wykonywania praw właścicielskich Skarbu Państwa w stosunku do śródładowych wód płynących znajdujących się w granicach terenów leśnych (Ustawa... 2017). Zabudowa potoków górskich w ramach regulacji koryt cieków naturalnych przewidzianych Ustawą Prawo Wodne (2017) służy także zapewnieniu bezpieczeństwa terenom przyległym, stabilizacji koryta potoku i ochronie przed

suszą. Urządzenia wodne stosowane przy zabudowie koryt potoków górskich, w tym również zbiorniki retencyjne, stanowią jeden z elementów zabezpieczeń przeciwerozyjnych w górach (Słowik-Opoka 2015).

Przedmiotem pracy jest mały sztuczny zbiornik wodny na potoku Kamienica w nadleśnictwie Łądek Zdrój. Celem opracowania jest zaprezentowanie wybranych rozwiązań projektowych możliwych do zrealizowania podczas przebudowy zapory przeciwrumowiskowej na obiekt małej retencji górskiej. Przebudowa obiektu jest konieczna ze względu na zły stan techniczny oraz brak ciągłości biologicznej w górnym odcinku potoku Kamienica. Wymóg zachowania ciągłości procesów ekologicznych i gradientowego charakteru stref rzecznych, określany jako *River continuum*, jest konieczny do osiągnięcia celów środowiskowych dotyczących potencjału ekologicznego i stanu wód powierzchniowych, do czego zobowiązuje Ramowa Dyrektywa Wodna (Dyrektywa... 2000).

Założono, że zbiornik małej retencji przyczyni się do podniesienia stanu retencji powierzchniowej zlewni potoku Kamienica, a także zwiększy ilość wody zasilającej ciek podczas okresów niedoboru opadów atmosferycznych. Funkcja przeciwpowodziowa z uwagi na niewielką pojemność czaszy zbiornika jest drugorzędna, zakłada się jednak, że dzięki zmniejszeniu prędkości przepływu wody nastąpi opóźnienie fali wezbraniowej. Utworzenie akwenu wpłynie na zróżnicowanie warunków wilgotnościowych terenów przyległych, zwiększając bioróżnorodność i przyczyniając się do rozwoju nadwodnych siedlisk hydrofilnych.

## 2. Lokalizacja obiektu

### 2.1. Charakterystyka terenu (zlewni potoku Kamienica)

Obiekt będący przedmiotem opracowania zlokalizowany jest na +6,846 km potoku Kamienica, uchodzącego do Morawki, który jest dopływem lewobrzeżnym Białej Łądeckiej, dopływu Nysy Kłodzkiej należącej do dorzecza Odry. Zlewnia potoku leży w granicach administracyjnych Gminy Stronie Śląskie, na gruntach Skarbu Państwa zarządzanych przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe Nadleśnictwo Łądek Zdrój.

Pod względem geobotanicznym zlewnia potoku Kamienica należy do Dolnoeregłowego Piętra Masywu Śnieżnika (Matuszkiewicz 2008). Potok Kamienica odwadnia wschodni stok Śnieżnika (1425 m n.p.m.), który jest zwornikiem masywu Śnieżnika będącego najwyższym pasmem górskim tej części Sudetów Wschodnich (Kondracki 1997).

Warstwa wierzchnia gruntu zbudowana jest z glin stokowych lub eluwialnych, wykształconych ze skał metamorficznych, głównie łupków krystalicznych i paragnejsów. Na utworach stokowych, których miąższość wzrasta w dół zboczy, wykształciły się gleby brunatne i brunatne kwaśne (Cichocki i in. 2013).

W zlewni przeważają lasy bukowo-świerkowe, a dominującym siedliskowym typem lasu jest bór mieszany górski świeży (Bank Danych o Lasach 2020). Obszar zlewni znajduje się w granicach trzech form ochrony przyrody, do których należą: korytarz ekologiczny „Góry Stołowe – Wschód”, Śnieżnicki Park Krajobrazowy oraz obszar specjalnej ochrony siedlisk Natura 2000 „Góry Bialskie i Grupa Śnieżnika”.

## 2.2. Opis istniejącego obiektu

Obiekt położony jest na wysokości 870 m n.p.m. (rzędna gardzieli przelewu) w głęboko wciętej dolinie potoku Kamienica (ryc. 1 a i b). Od południowej strony zapory znajduje się zbocze o dużym nachyleniu, od strony północnej



Ryc. 1. Widok na istniejącą zapórę przeciwrumowiskową (a) i dolina potoku powyżej załadowiska (b) (fot. P. Huskiewicz)



przebiega leśna droga gruntowa. W obrębie doliny występuje ruch pieszy oraz sporadycznie samochodowy, związany z gospodarką leśną. Poniżej zapory, poza obszarem leśnym, jest położona miejscowość Kamienica.

Istniejąca zaporę przeciwrumowiskowa jest w złym stanie technicznym. Najbardziej uszkodzona jest gardziel przelewu górnego, gdzie znajduje się duży wyłom (ryc. 2a), a w samym korpusie zlokalizowane są liczne przecieki. Struktura ściany bocznej jest naruszona, z widoczną wyrwą u jej podstawy tuż przy korpusie zapory (ryc. 2b). Brak działań konserwacyjnych oraz działanie wody, rumoszu skalnego i korzeni drzew, doprowadziły do poważnego osłabienia struktury budowli.



Ryc. 2. Zniszczona gardziel przelewu (a) oraz fragment ściany bocznej (b) (fot. P. Huskiewicz)



Czasza zapory wypełniona jest odkładami o składzie granulometrycznym rumowiska grubego będącego mieszaniną frakcji piaskowej, żwirowej i kamienistej (ryc. 3 a i b). Całkowite wypełnienie czaszy zapory powoduje przerzut rumoszu do dolnego stanowiska. Ważnym aspektem obecnego stanu obiektu jest brak przepławki dla ryb. Jest to poważne ograniczenie, powodujące przerwanie ciągłości biologicznej, m. in. uniemożliwiające migrację ryb w górę potoku.

W związku z tym, że nie udało się odnaleźć dokumentacji projektowej w archiwach zarówno Nadleśnictwa Łądek-Zdrój, jak i Starostwa Powiatowego

a)

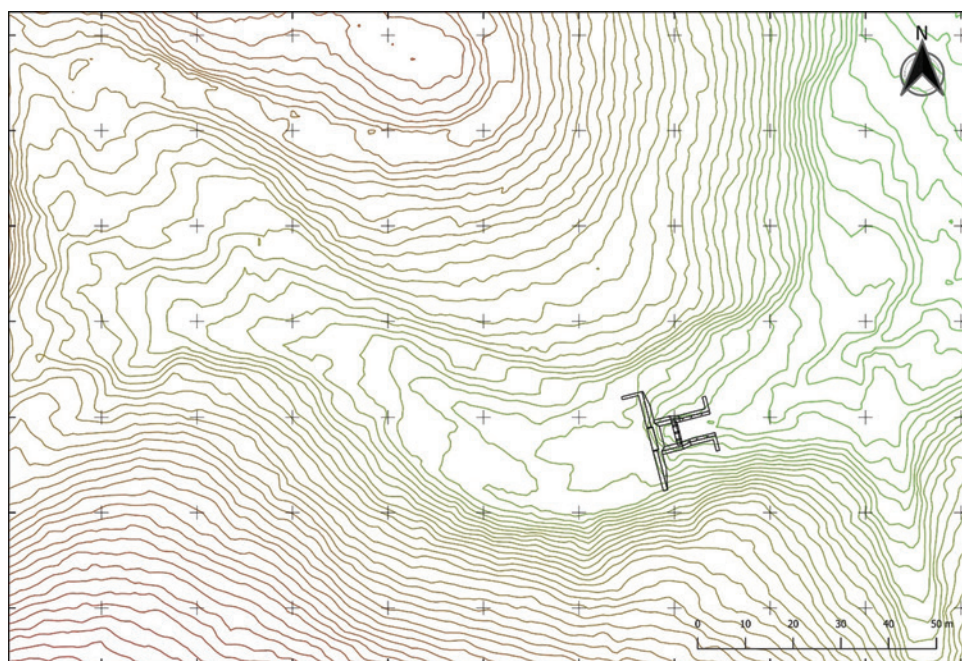


b)



**Ryc. 3.** Widok na załadowisko i przelew zapory od strony górnej wody (a) oraz w przeciwnym kierunku, po prawej stronie widoczna droga dolinowa (fot. P. Huskiewicz)

w Kłodzku, pierwotne wymiary zapory i jej lokalizację odtworzono, opierając się na pomiarach geodezyjnych istniejącego obiektu. Brak mapy zasadniczej obejmującej zasięgiem obszar zlewni rozwiązano, generując model rzeźby terenu na podstawie dostępnych danych. Posłużono się danymi pozyskanymi z Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii w Warszawie w formacie ASCII XYZ, zawierającymi współrzędne punktów siatki o rozmieszczeniu  $1 \times 1$  m w układzie współrzędnych P UWG 1992 oraz dane wysokościowe (wartości błędu średniego wysokości poniżej 0,2 m). Numeryczny model terenu wygenerowano w programie Quantum GIS (Szczepanek 2012; QGIS Development Team 2019). Podczas wizji terenowej pomierzono odbiornikiem GPS charakterystyczne punkty zapory, które następnie posłużyły, wraz z cyfrowym modelem zapory odtworzonym na podstawie pomiarów, do ulokowania istniejącego obiektu na numerycznym modelu rzeźby terenu (ryc. 4).



Ryc. 4. Lokalizacja zapory przeciwrumowiskowej na NMT doliny potoku Kamienica

### 3. Koncepcja przebudowy

#### 3.1. Założenia ogólne

Przyjęta koncepcja przebudowy zakłada zmianę roli obiektu z ograniczającej ruch rumowiska na spowolniającą odpływ wody ze zlewni. Planowana przebudowa ma również na celu zmniejszenie uciążliwości środowiskowej przegrody poprzez obniżenie jej wysokości oraz budowę przepławki. Rozwiązanie takie jest wyjściem pośrednim między likwidacją obiektu, a przywróceniem stanu pierwotnego (Bojarski i in. 2005). Projektowany zbiornik wodny został zaplanowany w miejscu załadowiska istniejącej zapory przeciwrumowiskowej. W celu realizacji tego założenia wykorzystano ukształtowanie terenu, czyli fragment doliny o niewielkim nachyleniu zlokalizowany pomiędzy skarpą wzdłuż drogi leśnej, a zboczem znajdującym się z południowej strony, na którym okresowo tworzy się zalewisko związane z istniejącą przegrodą, zapełnione obecnie rumoszem skalnym naniesionym przez wody potoku Kamienica. Zaprojektowano również przepławkę w formie obejścia, która zapewni ciągłość biologiczną cieku oraz umożliwi ruch drobnego rumowiska. Założono również umocnienie skarp wokół obiektu. W ramach zagospodarowania terenu opracowania przewidziano ułożenie kokosowych mat wegetacyjnych na półkach i skarpach zbiornika oraz zainstalowanie balustrady przy drodze na całej jego długości. Projekt uwzględnia zastosowanie głównie materiałów naturalnych z uwzględnieniem rumoszu rzeczno- i drewna pozyskanego w trakcie prowadzenia prac.

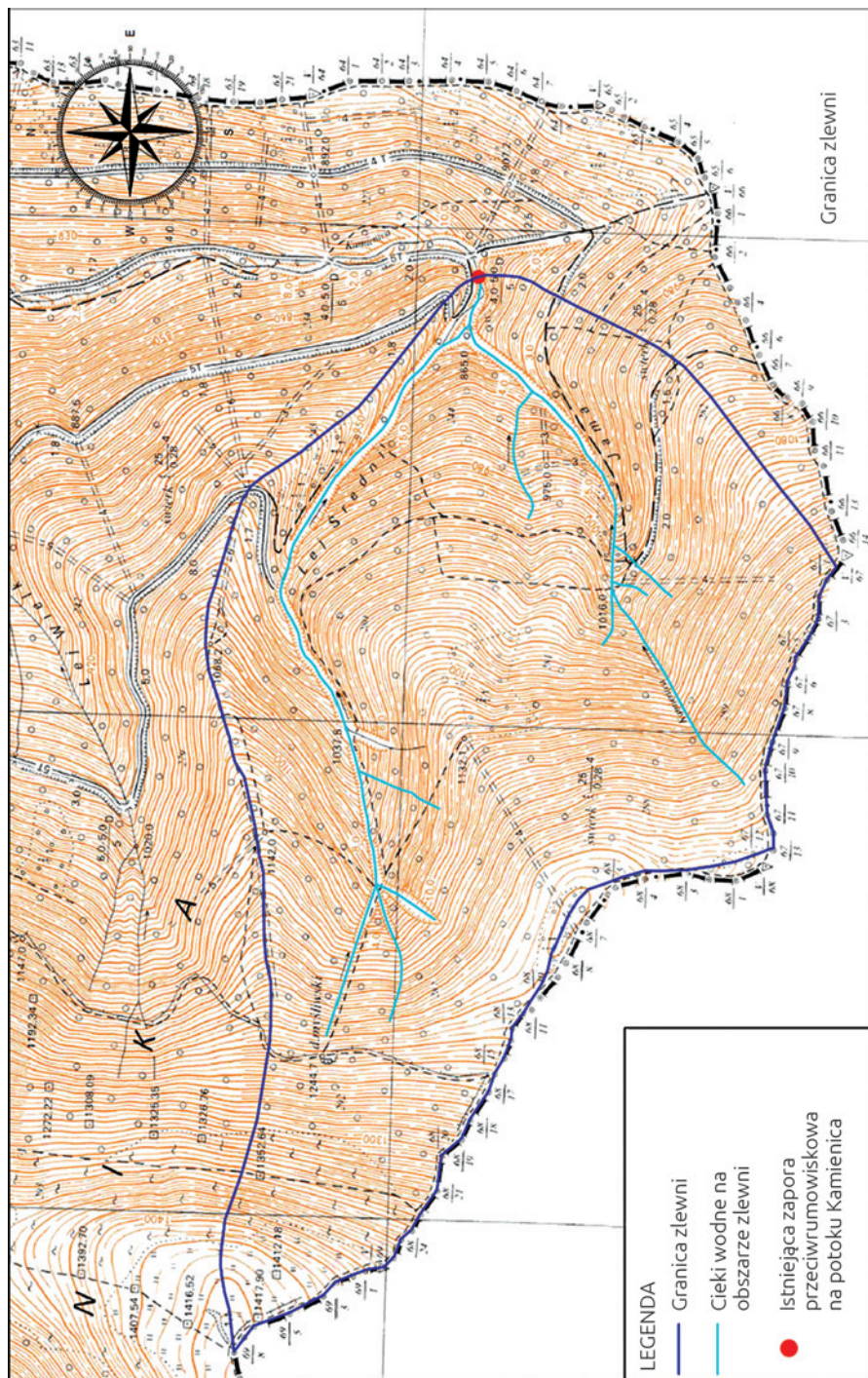
Zlewnia potoku Kamienica jest niekontrolowana, dlatego w celu wyznaczenia spodziewanego przepływu maksymalnego w badanym przekroju zastosowano formułę opadową (Banasik i in. 2017). Do obliczeń użyto maksymalnego dobowego opadu rocznego o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia (Banasik i in. 2017) wyznaczonego dla najbliższej położonej stacji opadowej w Stroniu Śląskim.

#### 3.2. Charakterystyka hydrologiczna zlewni do przekroju zaporowego i obliczenie przepływu maksymalnego rocznego o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% formułą opadową dla zlewni niekontrolowanej

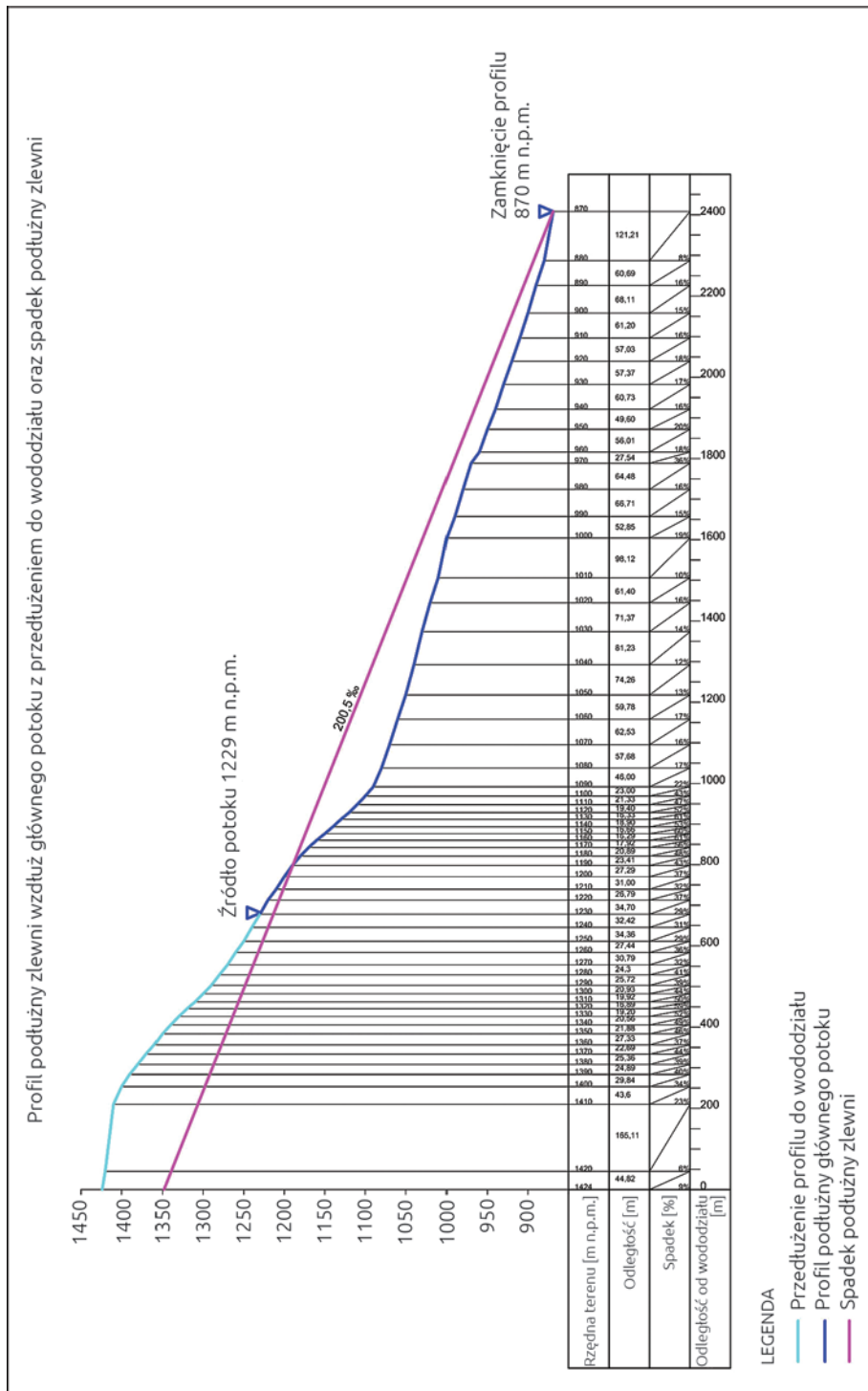
Granice zlewni hydrologicznej wyznaczono na mapie topograficznej w skali 1:5000 (ryc. 5). Powierzchnia zlewni Kamienicy po przekrój zaporowy wynosi 1,55 km<sup>2</sup>. Średnia wysokość zlewni, określona metodą hipsometryczną, jest równa 1116 m n.p.m.. Uśredniony spadek zlewni wyznaczono na podstawie profilu podłużnego wzdłuż doliny potoku Kamienicy (ryc. 6) (tab. 1).

Niewielka powierzchnia zlewni oraz jej położenie w pasie nadgranicznym uniemożliwiły obliczenie opadu średniego w zlewni na podstawie notowań w punktach położonych na zlewni lub w bezpośrednim sąsiedztwie. Dlatego na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto za reprezentatywne dla zlewni





Ryc. 5. Zlewnia i sieć hydrograficzna zlewni potoku Kamienica po profil zaporowy (źródło: Mapy Topograficznej Polski w skali 1:5000; Geoportal 2020)



Ryc. 6. Profil podłużny potoku Kamienica po profilu zaporowy z przedłużeniem do wododziału oraz wyznaczony spadek podłużny zlewni

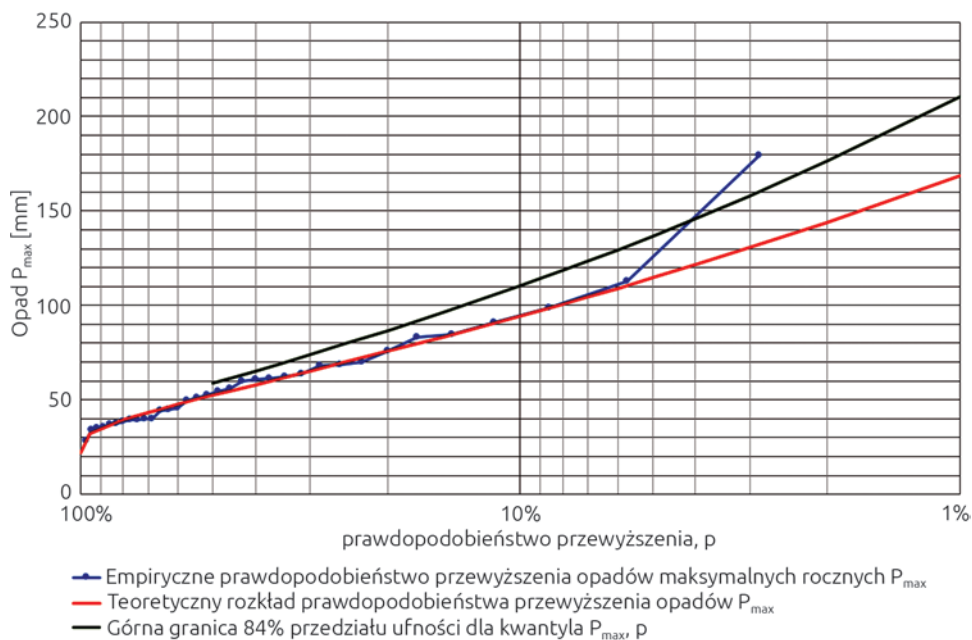
**Tabela 1.** Parametry fizyczno-geograficzne zlewni Kamienicy po przekrój zaporowy

| Parametr zlewni                                | Symbol      | wartość               |
|--|-------------|-----------------------|
| Powierzchnia zlewni po profil zaporowy         | $A$         | 1,55 km <sup>2</sup>  |
| Uśredniony spadek zlewni                       | $I_{r1}$    | 200,5‰                |
| Gęstość sieci rzecznej                         | $\rho$      | 5,38 km <sup>-1</sup> |
| Średnia długość stoków                         | $\bar{l}_s$ | 0,103 km              |
| Długość potoku Kamienica wraz z suchą doliną   | $L+l$       | 2,41 km               |
| Średni spadek stoków                           | $l_s$       | 369,8‰                |
| Współczynnik szorstkości koryt rzecznych       | $m$         | 7                     |
| Współczynnik szorstkości stoków                | $m_s$       | 0,1                   |
| Współczynnik kształtu fali dla zlewni górskich | $f$         | 0,6                   |

wartości rocznych opadów ze stacji opadowej w Stroniu Śląskim za lata 1984–2001. Opad normalny w przyjętym okresie wynosił 1187 mm.

Dane ze stacji opadowej w Stroniu Śląskim wykorzystano do obliczenia maksymalnego dobowego opadu rocznego  $P_{max, p}$  o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia  $p$  (Banasik i in. 2017). W każdym roku z okresu 1984–2001 wybrano dobowy opad maksymalny, a następnie uporządkowano malejąco serię chronologiczną danych i obliczono empiryczne prawdopodobieństwa przewyższenia. Następnie oszacowano dolne ograniczenie rozkładu  $\epsilon = 21,87$  mm, oraz obliczono parametry  $\mu$  i  $\sigma$  rozkładu logarytmiczno-normalnego metodą największej wiarygodności (Banasik i in. 2017). Otrzymano wartości  $\mu = 3,419$  i  $\sigma = 0,675$ . Kolejno obliczono wartości  $P_{max, p}$  dla wybranych wartości prawdopodobieństwa przewyższenia  $p$ , a uzyskane wielkości naniesiono na podziałkę prawdopodobieństwa (ryc. 7). Zweryfikowano za pomocą testu  $\lambda$  Kołmogorowa hipotezę  $H_0$ , że prawdziwy rozkład zmiennej  $P_{max}$  jest rozkładem lognormalnym. Obliczona wartość statystyki testowej  $\lambda$  Kołmogorowa wynosi  $\lambda_{Kol} = 0,580$ . Ponieważ jest mniejsza od 5% wartości krytycznej  $\lambda_{kr} = 1,36$ , nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej  $H_0$ , że rozkładem prawdopodobieństwa opadów maksymalnych  $P_{max}$  jest rozkład logarytmiczno-normalny z parametrami  $\epsilon = 21,87$  mm;  $\mu = 3,419$ ;  $\sigma = 0,675$ . W następnej kolejności obliczono górną granicę jednostronnego  $\beta\%$  przedziału ufności dla rzeczywistych prawdopodobnych dobowych opadów maksymalnych rocznych  $P_{max, p}$ . W tym celu przyjęto dla wartości  $\beta = 84\%$  wartość  $u_\beta = 0,994$  (Banasik i in. 2017).

W tabeli 2 zestawiono wybrane wyniki obliczeń, a na rycinie 4 pokazano krzywą prawdopodobieństwa opadów maksymalnych rocznych  $P_{max}$  wraz z –



Ryc. 7. Krzywa prawdopodobieństwa przewyższenia dobowych opadów maksymalnych rocznych  $P_{max}$

górną granicą 84% przedziału ufności dla kwantyla  $P_{max, p}$ . Do dalszych obliczeń użyto maksymalnego opadu dobowego o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 1\%$ ,  $H_1 = 168,7$  mm (tab. 2).

Tabela 2. Wybrane wartości górnej granicy 84% przedziału ufności dla kwantyla  $P_{max, p}$

| $p, \%$ | 50   | 20   | 10    | 5     | 2     | 1     |
|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| mm      | 52,4 | 75,8 | 94,4  | 114,6 | 144,0 | 168,7 |
| mm      | 58,8 | 86,6 | 110,3 | 136,7 | 176,4 | 210,5 |

Przepływ maksymalny roczny obliczono zgodnie z „Aktualizacją metodyki obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ” opracowaną przez Stowarzyszenie Hydrologów Polskich (Banasik i in. 2017), na podstawie wzoru:

$$Q_{max, p} = f \cdot F_1 \cdot \varphi \cdot H_1 \cdot A \mathcal{L}_p \cdot \delta_j \quad (1)$$

gdzie:

$f$  – bezwymiarowy współczynnik kształtu fali,

$F_1$  – maksymalny moduł odpływu jednostkowego [ $m^2 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$ ],



- $\varphi$  – współczynnik odpływu dla przepływów maksymalnych,  
 $H_1$  – maksymalny opad dobowy o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 1\%$  [mm],  
 $A$  – powierzchnia zlewni [km<sup>2</sup>],  
 $\lambda p$  – regionalny względny kwantyl dla zadanego prawdopodobieństwa  $p$ ,  
 $\delta_j$  – współczynnik redukcji jeziornej.

Hydromorfologiczną charakterystykę cieku  $\Phi_r$  obliczono ze wzoru:

$$\Phi_r = \frac{1000 (L + l)}{m I_{r1}^{1/3} A^{1/4} (\varphi H_1)^{1/4}} \quad (2)$$

gdzie:

- $L+l$  – długość cieku głównego wraz z suchą doliną,  
 $m$  – współczynnik szorstkości koryta cieku,  
 $I_{r1}$  – uśredniony spadek cieku (zlewni),  
 $A$  – powierzchnia zlewni,  
 $H_1$  – maksymalny opad dobowy o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 1\%$ ,  
 $\varphi$  – współczynnik odpływu dla przepływów maksymalnych.

Współczynnik odpływu dla przepływów maksymalnych określono na podstawie Mapy Gleb Polski w skali 1:500 000 opracowanej w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej (Banasik i in. 2017). Współczynnik ten wynosi dla glin i iłów  $\varphi = 0,88$ .

Wartość wyliczonej hydromorfologicznej charakterystyki potoku Kamienicy po przekrój zaporowy wynosi  $\Phi_r = 15,119$ .

Kolejny parametr zlewni to geomorfologiczna charakterystyka stoków zlewni potoku Kamienica obliczona wzorem:

$$\Phi_s = \frac{1000 (L + l)^{1/2}}{m_s I_s^{1/4} (\varphi H_1)^{1/2}} \quad (3)$$

gdzie:

- $l_s$  – średnia długość stoków,  
 $m_s$  – współczynnik szorstkości stoków,  
 $I_s$  – średni spadek stoków,  
 pozostałe oznaczenia jak we wzorze (2).

Czas spływu po stokach odczytano na podstawie danych zawartych w załączniku „B.4. Czas spływu po stokach  $t_s$  w funkcji  $\Phi_s$ ” (Banasik i in. 2017). Wartości pośrednie ustalono z zastosowaniem interpolacji liniowej. Dla wartości  $\Phi_s = 1,903$  obliczono  $t_s = 10,46$  min.

Na podstawie średniej wysokości zlewni ( $Z = 1116$  m n.p.m.) odczytano z tabeli w załączniku B.6 „Wartości funkcji  $F_1$  w zależności od czasu spływu po stokach  $t_s$  i hydromorfologicznej charakterystyki koryta  $\Phi_r$ ” (Banasik i in. 2017). Wartość  $F_1$  dla zlewni górskich ( $> 700$  m n.p.m.) dla  $\Phi_r = 15,119$  i  $t_s = 10,46$  min. wynosi  $F_1 = 0,0739$ .

Wskaźnik jeziorności zlewni Kamienicy wynosi  $JEZ = 0$ , co pozwala przyjąć współczynnik redukcji jeziornej  $\delta_j = 1,0$  (Banasik i in. 2017).

Dla wyliczonych parametrów zlewni Kamienicy odczytano z mapy zatytułowanej „M.2. Makroregiony i regiony Polski (opracowanie IMGW)” (Banasik i in. 2017) nazwę i oznaczenie makroregionu – 1a, Sudety. Następnie odczytano wartości z tabeli „B.8. Kwantyle  $\lambda_p$ ” (Banasik i in. 2017) dla makroregionu Sudety, region 1a (tab. 3). Wzorem (1) dla wybranych prawdopodobieństw obliczono przepływ maksymalny roczny o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% (tab. 3).

**Tabela 3.** Kwantyle  $\lambda_p$  oraz obliczone wzorem (1) przepływy maksymalne roczne  $P_{max,p}$  dla wybranych prawdopodobieństw przewyższenia  $p$

| $p, \%$                       | 50    | 30    | 20    | 10    | 5     | 3     | 2     | 1     |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\lambda_p$                   | 0,123 | 0,223 | 0,309 | 0,461 | 0,621 | 0,727 | 0,834 | 1,000 |
| $Q_{max,p}, m^3 \cdot s^{-1}$ | 1,2   | 2,3   | 3,1   | 4,7   | 6,3   | 7,4   | 8,5   | 10,2  |

### 3.3. Rozwiązania szczegółowe

#### 3.3.1. Przebudowa korpusu zapory

W ramach przebudowy zapory proponuje się obniżenie wysokości korpusu i poziomu gardzieli przelewu o 1,2 m (ryc. 10–12). Rozwiązanie takie jest zgodne z zaleceniami dotyczącymi przekształceń istniejących obiektów budownictwa wodnego (Bojarski i in. 2005) oraz zmniejsza ryzyko zalania drogi dolinowej w przypadku wystąpienia przepływów powodujących przekroczenie maksymalnego poziomu piętrzenia zapory. Do odbudowy uszkodzonego korpusu zapory zaleca się wykorzystać kamień ciosany układany ściśle na podkładzie z betonu oraz spoinowany zaprawą cementową. Prace powinny być wykonywane „na sucho”, przy wykorzystaniu części istniejącego budulca, który zgromadzony jest w niecce wypadowej, a także uzyskanego z rozbiórki górnej części skrzydeł i korpusu. Materiał ten przed ułożeniem powinien być dokładnie oczyszczony. Zakłada się przywrócenie prawej ściany bocznej oraz stopnia niecki do stanu pierwotnego. Projekt przewiduje przebudowę lewej ściany bocznej ze względu na konieczność usytuowania po tej stronie rampy przepławki. Zmianie ulegnie spadek szczytu ściany bocznej zgodnie z kierunkiem spadku przepławki. Nachylenie ściany na tym odcinku pozostanie niezmienione, natomiast cała ściana zostanie wydłużona

aż do wejścia przepławki do koryta cieku. Nachylenie ściany będzie zmienne – od pierwotnego wynoszącego 3,7:1, i stopniowo malejące do 1:1 w miejscu wejścia przepławki do koryta. Zaprojektowano również pogłębienie niecki wypadowej o 0,5 m i jej umocnienie narzutem kamiennym klinowym.

### 3.3.2. Czasza zbiornika

Czasza projektowanego zbiornika (ryc. 8, 9, 13 i 16) o całkowitej powierzchni 656 m<sup>2</sup> (0,07 ha) w najszerszym miejscu jest równa szerokości zapory, czyli 19,1 m, natomiast jego długość wynosi 35,5 m. Głębokość planowanego zbiornika ma być zmienna i będzie zależec od aktualnego stanu jego napełnienia. Dla poziomu użytkowego, czyli sięgającego dna wejścia ze zbiornika do przepławki wynosi 2,8 m, dla poziomu operatywnego, czyli sięgającego dna gardzieli przelewu wynosi 3,0 m, natomiast przy maksymalnym napełnieniu sięgającym do korony zapory wynosi 4,2 m. Pojemność zbiornika również uzależniona jest od aktualnego napełnienia i wynosi odpowiednio: dla poziomu użytkowego 711 m<sup>3</sup>, dla poziomu operatywnego 806 m<sup>3</sup> i dla poziomu przeciążenia 1492 m<sup>3</sup>. Zatem rezerwa powodziowa, będąca różnicą pomiędzy poziomem operatywnym a poziomem przeciążenia, będzie wynosić 686 m<sup>3</sup>. Skarpy zbiornika zaprojektowano tak, aby stworzyć możliwości dla rozwoju roślinności nadwodnej, co zostało osiągnięte przez zastosowanie dwóch półek na głębokości 0,5 m i 1 m względem poziomu operatywnego. Na półkach i skarpach przewidziano zainstalowanie kokosowych mat vegetacyjnych z sadzonkami roślin nadwodnych naturalnie występujących na tym obszarze. Na prawym brzegu (od strony stoku) maty powinny być układane od najniższej półki na głębokości 1 m do wysokości poziomu operatywnego. Dzięki temu zabiegowi zwiększy się różnorodność biologiczna w obrębie zbiornika, a jednocześnie brzeg zabezpieczony zostanie przed abrazją. Skarpy brzegu zbiornika (ryc. 14 i 15) mają zmienne nachylenie, to jest 1:1 od dna zbiornika do wysokości 2 m, 1:1,5 przy półce na wysokości od 2–2,5 m od dna, 1:2 przy półce na wysokości 2,5–4,2 m (maksymalny poziom piętrzenia). Umocnienie skarp narzutem kamiennym zostało zaprojektowane na podstawie sposobu ubezpieczania skarp stosowanego przy zabudowie rzek i potoków na Pogórzu Sudeckim, zaproponowanym przez K. Pietraszkę (Wołoszyn i in. 1994). Dla projektowanego zbiornika zastosowano schemat zbiornika retencyjnego przepływowego, czyli składającego się ze zbiornika oraz budowli upustowej (Mioduszewski 2003), którą w tym przypadku pełnić będzie gardziel przelewu obniżonej zapory przeciwrumowiskowej (ryc. 12).

### 3.3.3. Przepławka

Przywrócenie ciągłości biologicznej potoku dzięki możliwości swobodnej migracji organizmów wodnych planuje się osiągnąć, dobudowując do zapory przepławkę (ryc. 8, 10–12 i 15). Wejście ze zbiornika do przepławki umiejscowiono

w lewym skrzydle zapory, projektując niewielki przelew obok gardzieli przelewu głównego. Dno przepławki zaprojektowano o 0,2 m niżej niż krawędź gardzieli, co zapewni stały przepływ wody. Przyjęto dno przepławki o szerokości 0,8 m i głębokości 0,2 m, natomiast brzeg bystrza o nachyleniu 1:2. Całkowita szerokość przepławki wynosi 1,85 m. Prawy brzeg przepławki, czyli od strony koryta ciek, został obniżony o 0,1 m, dzięki czemu w przypadku zaistnienia większych przepływów, na przykład po silnych ulewach, nadmiar wody w pierwszej kolejności spływać będzie po ścianie bocznej do koryta ciek (ryc. 15).

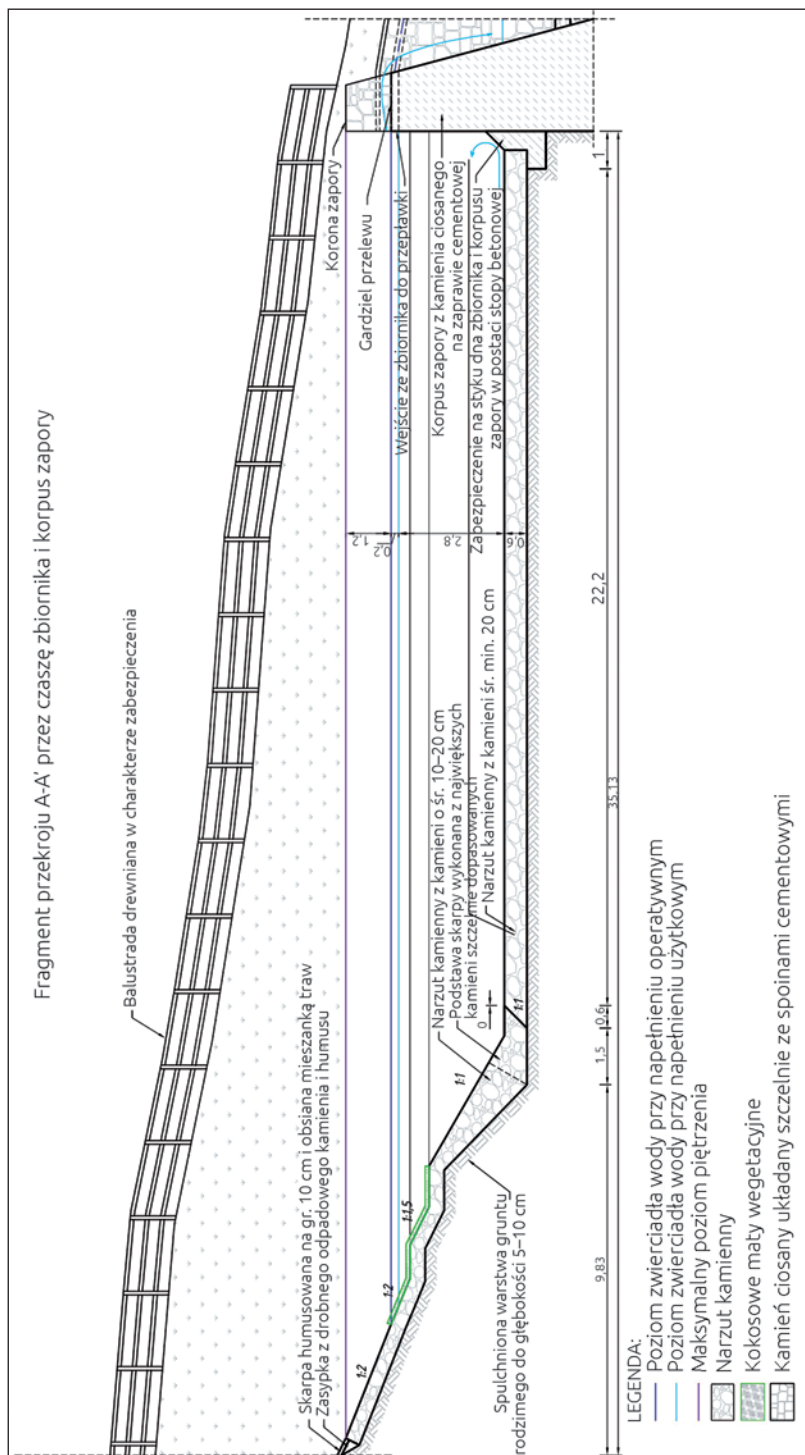
Projektując niniejszą przepławkę, wzorowano się na rozwiązaniach zaprezentowanych w poradniku pt. *Przepławki dla ryb – projektowanie, wymiary, monitoring* opracowanym przez Food and Agriculture Organization of the United Nations (Furdyna i in. 2016). Zgodnie z powyższym podręcznikiem, zazwyczaj stosuje się spadki wynoszące od 1:10 do 1:20 i łagodniejsze, jednakże w tym konkretnym przypadku zastosowanie spadku 1:7 zwiększyłyby długość przepławki do ponad 70 m, a przy spadku 1:10 połączenie z korytem ciek byłoby niemożliwe. Spadek przepławki, który zgodnie z niniejszym projektem wynosi 1:6, dostosowano do średniego spadku zlewni (201%, czyli 1:5) oraz do ukształtowania terenu (ryc. 10). Projektowana przepławka zakłada zatopienie rygli wykonanych z kamienia naturalnego w dno przepławki i jej skarpy w celu wymuszenia określonego przepływu wody. Przez naprzemienne ułożenie otworów w ryglach woda zmniejsza swoją prędkość, podobnie w przypadku większych przepływów, gdy poziom przekracza wysokość rygli, działają one również hamująco dla nurtu.

### 3.3.4. Skarpy

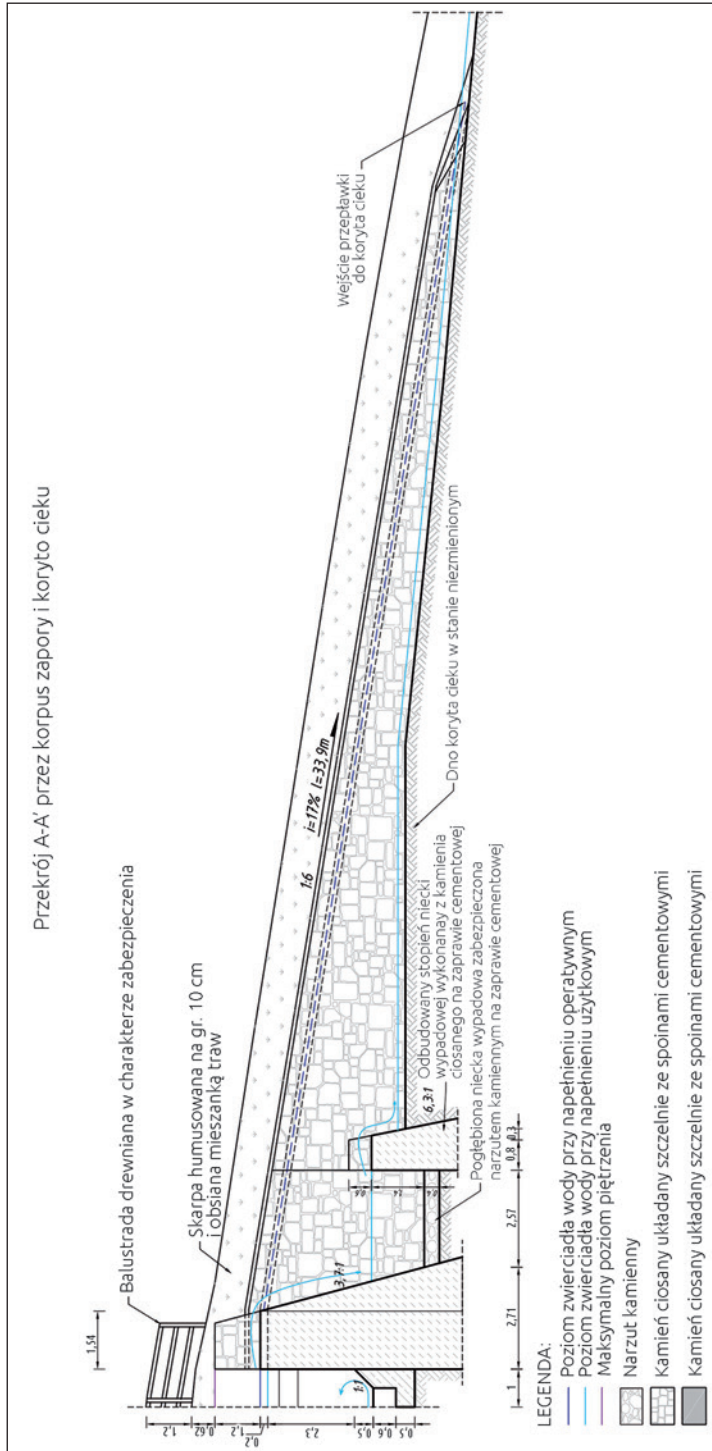
Skarpy wokół zbiornika wodnego oraz poniżej korpusu zapory na długości przepławki przewidziane zostały do umocnienia metodą humusowania. Przygotowaną w ten sposób powierzchnię planuje się obsiać mieszanką traw, których korzenie wzmocnią wierzchnią warstwę gleby, zabezpieczając ją przed erozją powierzchniową (ryc. 14). Całkowita powierzchnia skarpy, którą trzeba zabezpieczyć, wynosi ok. 620 m<sup>2</sup>.

### 3.3.5. Elementy dodatkowe

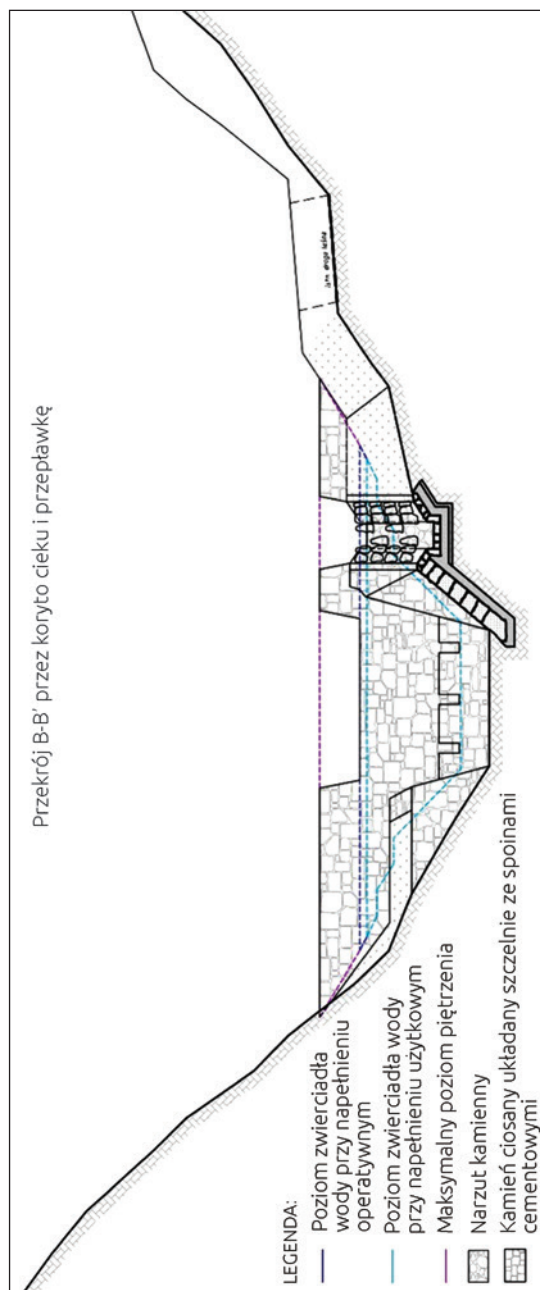
Droga leśna wzdłuż doliny przebiega w bezpośrednim sąsiedztwie zapory i zbiornika wodnego. Ponieważ jest uczęszczana zarówno przez turystów, jak i pracowników służby leśnej, zaprojektowano jej zabezpieczenie w postaci drewnianej balustrady o długości 34 m na odcinku zbiornika (ryc. 9). Balustrada o wysokości 1,2 m zostanie wykonana z pali drewnianych, impregnowanych ciśnieniowo, o średnicy 20 cm, wbitych w ziemię i ustabilizowanych wylewką z chudego betonu i kamieni oraz dwóch poprzeczek w postaci desek z tarcicy nieobrzynanej 4 × 15 × 200 cm.



Ryc. 9. Przekrój A-A' (ryc. 8) na odcinku czaszy zbiornika i korpusu zapory

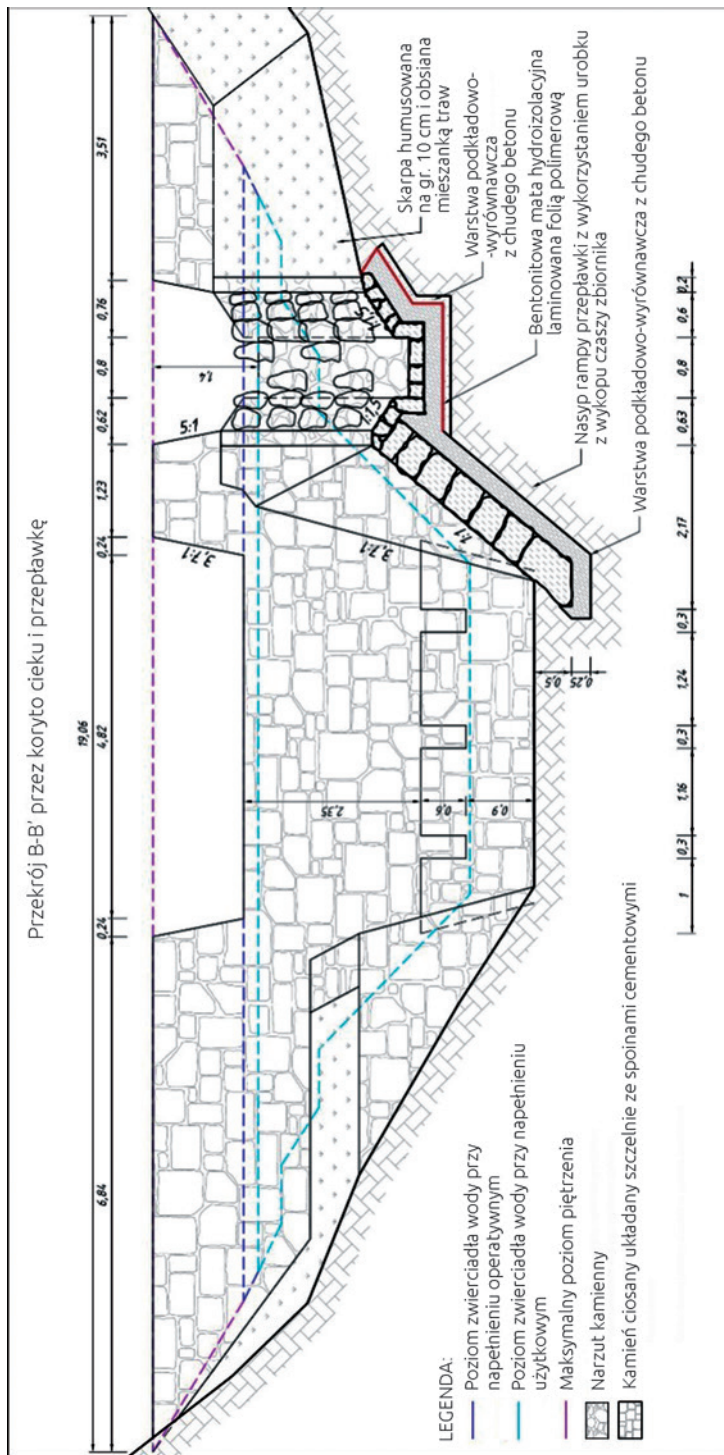


Ryc. 10. Przekrój A-A' (ryc. 8) na odcinku korpusu zapory i przeplawki

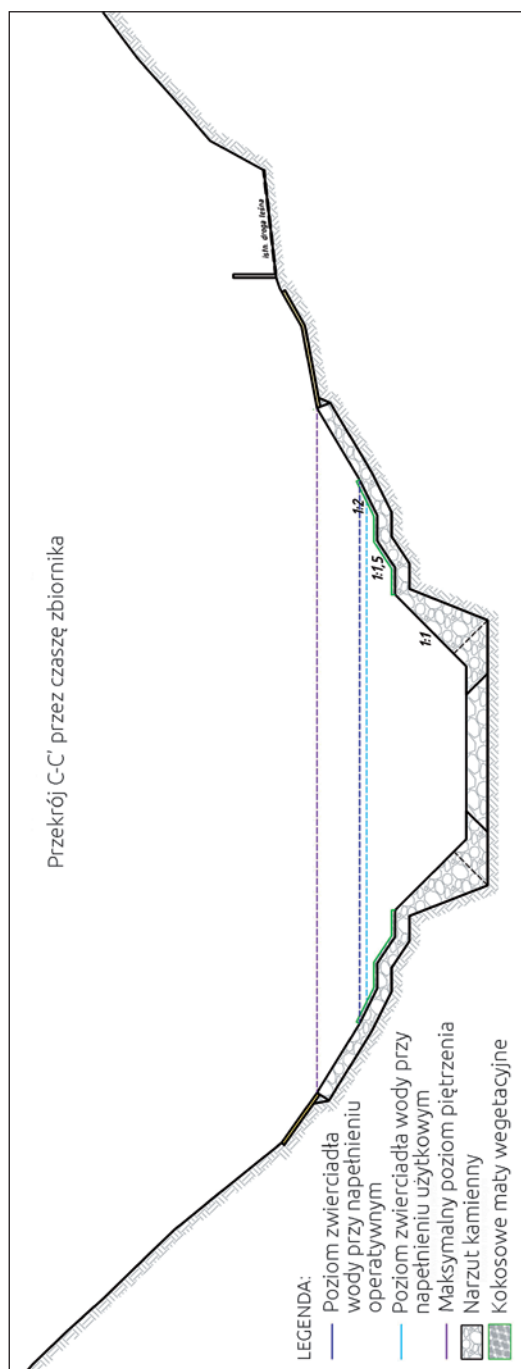


Ryc. 11. Przekrój B-B' (ryc. 8) przez koryto cieku poniżej zapory i przepławkę

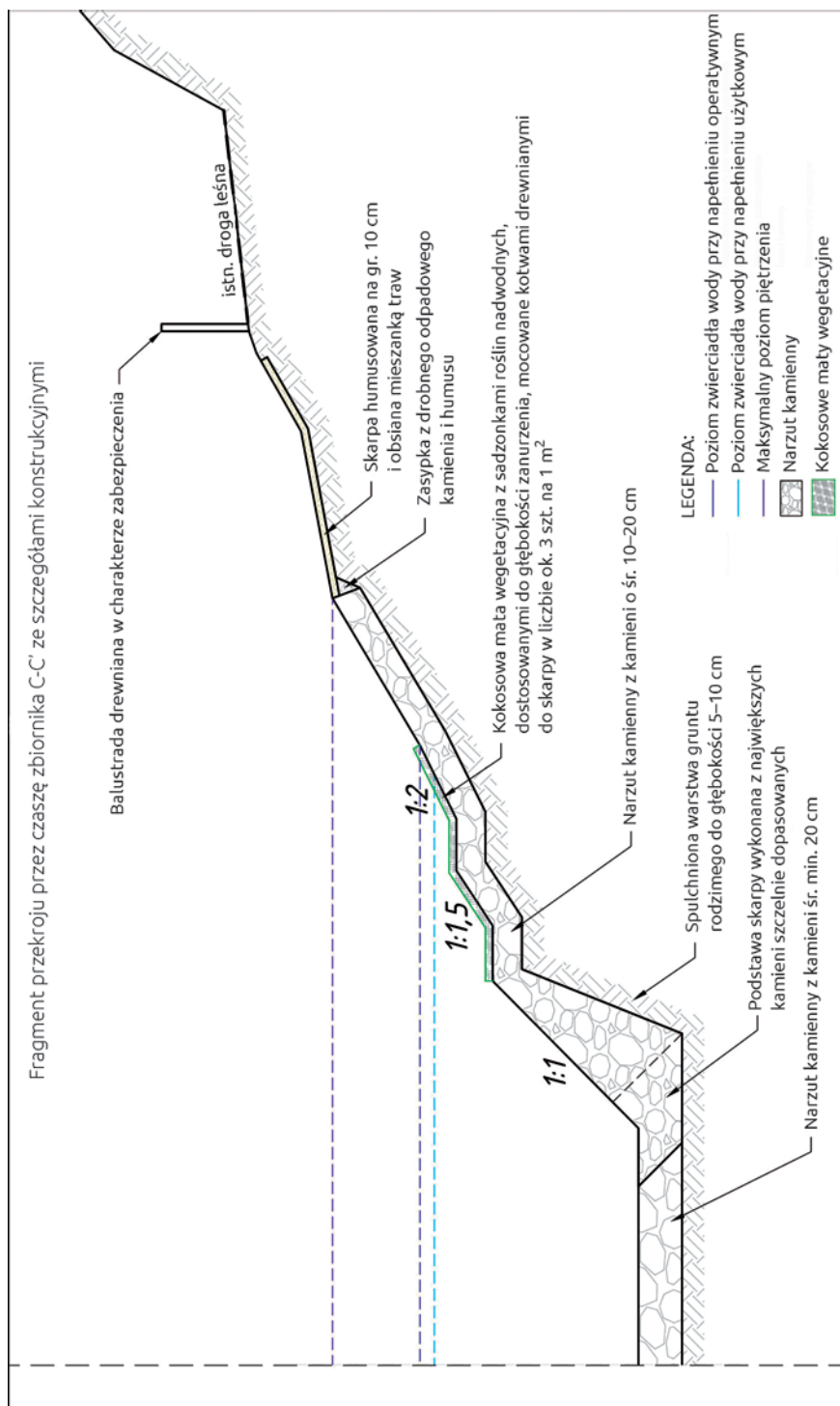




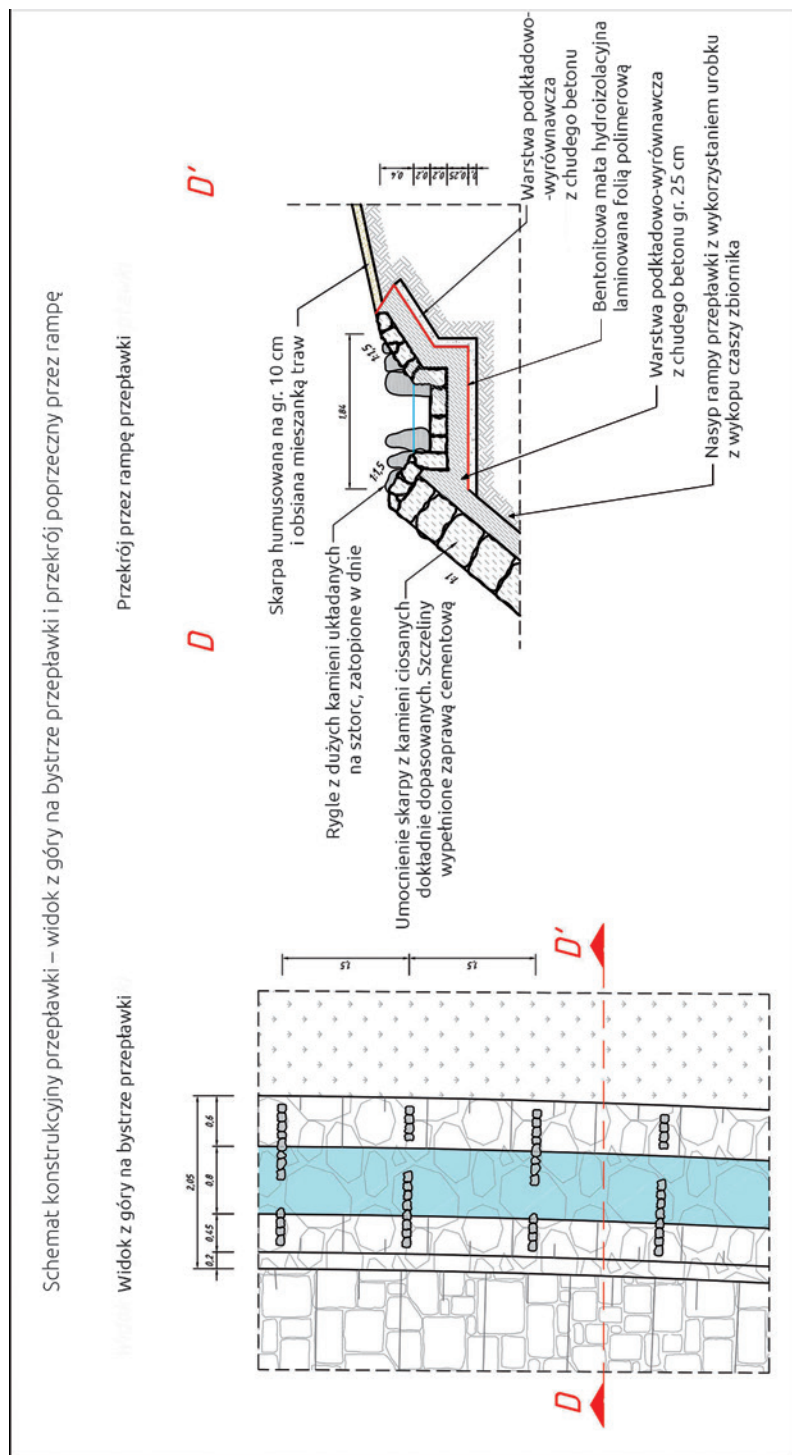
Ryc. 12. Widok korpusu zapory i przepławkę od dolnej wody



Ryc. 13. Przekrój C-C' (rzc. 8) przez czaszę zbiornika

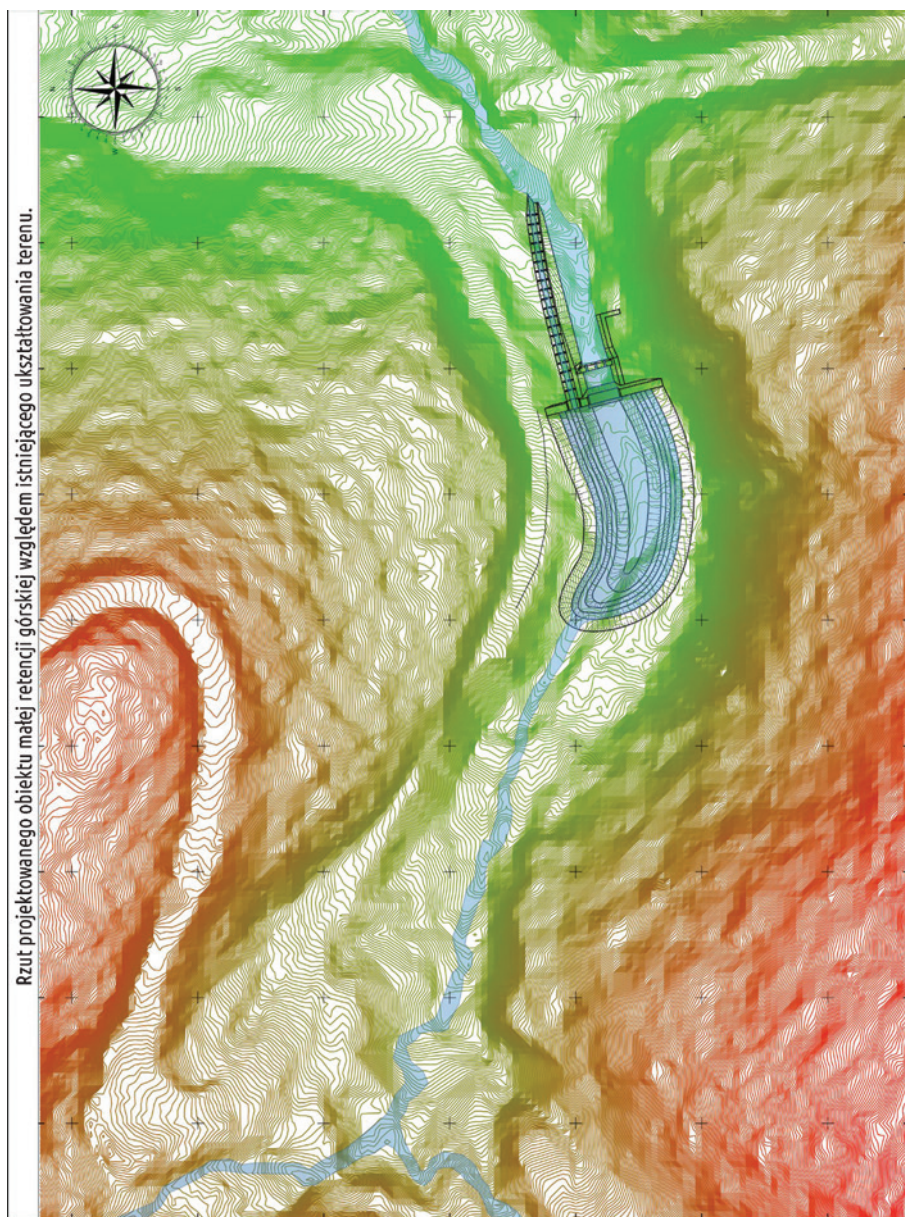


Ryc. 14. Szczegóły konstrukcyjne skarpy części zbiornika



Ryc. 15. Szczegóły konstrukcyjne przepławki





Ryc. 16. Lokalizacja zbiornika małej retencji na NMT doliny potoku Kamienica

## 4. Podsumowanie

Omówione w pracy rozwiązania pozwalają w sposób kompleksowy podejść do kwestii budowli hydrotechnicznych takich jak zapory przeciwrumowiskowe, zlokalizowanych wewnątrz kompleksów leśnych. Opisany przypadek zakłada wiele ograniczeń wynikających z konstrukcji obiektu oraz ukształtowania terenu, a także z głównego założenia, że zmienia się funkcja zapory. W podobnym przypadku należałoby również rozważyć ewentualną likwidację zbiornika akumulacji rumoszu.

Zaprojektowany obiekt małej retencji nie jest bardzo duży w porównaniu z innymi zbiornikami tego typu, jednakże ze względu na coraz poważniejsze w ostatnich latach niedobory wody, każda taka budowla ma strategiczne znaczenie dla poprawy stosunków wodnych. Dzięki powstaniu zbiornika wodnego jest możliwe zwiększenie retencji powierzchniowej zlewni o co najmniej  $806 \text{ m}^3$  przy poziomie operatywnym. Istotna jest również jego funkcja przeciwpowodziowa. Możliwość zatrzymania dodatkowych  $686 \text{ m}^3$  wody, czyli od poziomu operatywnego, gdy następuje normalny przepływ wody przez gardziel przelewu oraz przepławkę aż do poziomu przeciążenia, przyczyni się do złagodzenia następstw gwałtownych wezbrań dzięki opóźnieniu i zmniejszeniu prędkości fali powodziowej, co jest szczególnie istotne na terenach górskich, gdzie podniesienie poziomu wód w ciekach następuje stosunkowo szybko ze względu na duże spadki terenu oraz małą przepuszczalność podłoża. Zaproponowane rozwiązania biotechniczne – kokosowe maty vegetacyjne zawierające sadzonki roślin hydrofilnych stwarzają warunki sprzyjające wzrostowi bioróżnorodności obszaru, natomiast zaprojektowana przepławka przyczyni się do przywrócenia ciągłości biologicznej cieku, zapewniając swobodną migrację ryb i innych organizmów wodnych.

Z punktu widzenia hydrologii leśnej retencja wodna lasu kształtowana jest przede wszystkim przez zapas wody glebowej oraz intercepcję roślin i ściółki (Suliński 2014). Odrębnym zagadnieniem jest retencja obiektów naturalnych i sztucznych położonych w granicach kompleksów leśnych. Praktyczne znaczenie tego rozróżnienia obrazują ilościowe relacje między retencją budowli wodnych a retencją lasu. Przeciętna w czasie retencja aktualna gleb górskich kształtuje się na poziomie  $0,24 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$  ( $0,16\text{--}0,31 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ ) na obszarze Beskidu Śląskiego (Kucza i in. 2005; Starzak i in. 2015) i  $0,28 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$  ( $0,13\text{--}0,44 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ ) w Beskidzie Sądeckim (Starzak 2019). Pojemność użytkowa projektowanego zbiornika wynosi  $711 \text{ m}^3$  co, zakładając przeciętny zapas wody w glebie na poziomie  $0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ , odpowiada wodzie glebowej zmagazynowanej na powierzchni ok. 28 arów do głębokości 1 m.

Powyższe spostrzeżenia nie umniejszają roli zbiornika retencyjnego jako rezerwuaru wody powierzchniowej i jego roli hydrologicznej, krajobrazowej



i ekologicznej. Małe zbiorniki wodne wpływają korzystnie na stan środowiska dzięki tworzeniu okresowej lub stałej retencji zbiornikowej, poprawie jakości wody, ochronie przed erozją wodną oraz powodzią i suszami, zwiększeniu zasobów wód podziemnych i różnorodności biologicznej, wpływają na zmianę szaty roślinnej i powodują szybszy jej wzrost w zasięgu oddziaływania zbiornika, zmieniają mikroklimat najbliższego otoczenia, zaspokajają potrzeby wodne, urozmaicają walory krajobrazowe oraz sprzyjają rekreacji (Zwiększanie... 2009; Miler 2015; Naturalna 2016; Frydel 2017). Wymienione oddziaływanie jest szczególnie ważne w wielofunkcyjnym modelu leśnictwa.

### *Podziękowania*

*Autorzy składają podziękowania Pracownikom Nadleśnictwa Łądek Zdrój za okazaną pomoc podczas realizacji pracy.*

### Literatura

- Banasik K., Wałęga A., Węglarczyk S., Więzik W. 2017. Aktualizacja metodyki obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ. Stowarzyszenie Hydrologów Polskich, Warszawa.
- Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyźga B., Zalewski J. 2005. Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich. Wydawnictwo Ministerstwa Środowiska, Warszawa.
- Bajkiewicz-Grabowska E., Mikulski Z. 1999. Hydrologia ogólna. Wydanie III zmienione i uzupełnione. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Bank Danych o Lasach: <https://www.bdl.lasy.gov.pl> (dostęp: 24.02.2020).
- Cichocki Z., Foremnik I., Furmankiewicz J., Błachuta J., Gawroński A., Proćków M., Hajto M., Kuśmierz A., Bidłasik M., Krawczyńska B., Krawczyński J. 2013. Dokumentacja planu zadań ochronnych obszaru Natura 2000 Góry Białskie i Grupa Śnieżnika PLH020016 w województwie dolnośląskim. Instytut Ochrony Środowiska PIB.
- Dyrektywa 2000. Dyrektywa 2000/60/WE z dnia 23 października 2000 ustanawiająca ramy wspólnego działania w dziedzinie polityki wodnej (Ramowa Dyrektywa Wodna) (Dz.Urz. WE, L 327 z 22.12.2000).
- Frydel K. 2017. Woda wróciła czyli o małej retencji w Nadleśnictwie Kaliska słów kilka. Fundacja OKO-LICE KULTURY, Zblewo.
- Furdyna A., Jaszczuk E., Juszczeń M., Kupczyk-Kuriata P., Mitraszewska A., Nawrocki P., Przebięda M., Tymiński T., Wierzbicki M. 2016. Przepławki dla ryb: projektowanie, wymiary, monitoring. P. Nawrocki. Red. Fundacja WWF Polska, Warszawa.
- Kondracki J. 1997. Regiony fizycznogeograficzne Polski. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.

- Kucza J., Starzak R., Suliński J.** 2005. Wstępne wyniki pomiaru zapasu wody w glebie pod świerczynami istebniańskimi. *Czasopismo Techniczne*, Z. 10-Ś, 59–70.
- Matuszkiewicz J. M.** 2008. Regionalizacja geobotaniczna Polski. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa.
- Mioduszewski W.** 2003. Mała retencja – ochrona zasobów wodnych i środowiska naturalnego – poradnik. Wydawnictwo IMUZ, Falenty.
- Miler A.T.** 2008. Las i woda – wybrane zagadnienia. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 10(18), 24–32.
- Miler A.T.** 2013. Kompleksowa metodyka oceny stosunków wodnych w lasach. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań.
- Miler A.T.** 2015. Mała retencja wodna w Polskich lasach nizinnych. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, nr IV/1/2015, 979–992.
- Mioduszewski W.** 2008 a. Mała retencja w lasach elementem kształtowania i ochrony zasobów wodnych. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 10, 2(18), 33–48.
- Mioduszewski W.** 2008 b. Małe zbiorniki wodne. Wytyczne projektowania. 127/11. Wydawnictwo Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych, Falenty.
- Naturalna, mała retencja wodna – Metoda łagodzenia skutków suszy, ograniczania ryzyka powodziowego i ochrona różnorodności biologicznej. *Podstawy Metodyczne*. 2016. Globalne Partnerstwo dla Wody.
- QGIS Development Team. 2019. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- Ratomski J.** 2013. Zabudowa zlewni i koryt potoków górskich. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Słowik-Opoka E.** 2015. Przeciwdziałanie erozji wodnej w obiektach inżynierskich. *Inżynier Budownictwa*, 6, Warszawa.
- Starzak R., Kucza J., Suliński J.** 2015. Dynamika zapasu wody w glebach pod wybranymi drzewostanami świerkowymi Beskidu Śląskiego w latach 1999–2004. W: *Ekologiczne i hodowlane uwarunkowania przebudowy drzewostanów świerkowych w Beskidzie Śląskim i Beskidzie Żywieckim*. S. Małek. Red. Wydawnictwo UR, Kraków.
- Starzak R., Jaworski A., Suliński J., Skrzyszewski J., Pach M., Sypka P., Lach J.** 2019. Raport końcowy z realizacji tematu badawczego pt. „Zbadanie retencji wodnej drzewostanów górskich i podgórszych wytypowanych jako wzorcowe dla LKP Lasy Beskidu Sadeckiego oraz przyległych lasów podgórskich, w kontekście możliwości jej modulowania przez czynności gospodarcze”. DGLP w Warszawie, maszynopis.
- Suliński J.** 2014. Główne rodzaje retencji wodnej w lasach górskich. W: *Retencja wody na Sądecczyźnie. Znaczenie stan i potrzeby*. Materiały pokonferencyjne. A. Jucherski, D. Reško. Red. *Sądeckie Zeszyty Naukowe*, II. Stary Sącz, 65–86.
- Suliński J., Jaworski A.** 1998. Bilans wodny lasu w praktyce leśnej. W: *Międzynarodowa konferencja naukowa „Las i Woda”*. B. Osuch. Red. Politechnika Krakowska, Kraków.
- Szczepanek R.** 2012, *Quantum GIS – wolny i otwarty system informacji geograficznej*, *Czasopismo Techniczne*, 4-Ś, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 171–182.

- Szpila S.** 2009. Myślenie i działanie inżynierskie w inżynierii środowiska a kanony i wskazania prakseologii. Flexergis, Kraków.
- Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne. (Dz. U. z 2017 r. poz. 1566 z późn. zm.).
- Wołoszyn J., Czamara W., Eliasiewicz R., Krężel J.** 1994. Regulacja rzek i potoków. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław.
- Zwiększanie możliwości retencyjnych oraz przeciwdziałanie powodzi i suszy w ekosystemach leśnych na terenach nizinnych (projekt programu). 2009. W. Mioduszewski i E. Pierzgalski. Red. CKPŚ, Warszawa.
- Żelazo J., Poppek Z.** 2014. Podstawy renaturyzacji rzek. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

# Wpływ szlaków i dróg leśnych na odpływ wody w zlewni górskiej

Rafał Starzak, Miłosz Polak

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: r.starzak@urk.edu.pl

## Abstrakt

Przedmiotem pracy jest analiza opadu efektywnego i odpływu wody ze zlewni, symulowana przy użyciu matematycznego modelu opad-odpływ. Przedstawione w pracy badania mają służyć ocenie, czy uwzględnienie w opisie pokrycia zlewni powierzchni zajętej pod infrastrukturę inżynieryjną, zapewniającą udostępnienie kompleksów leśnych zmieni wartość opadu efektywnego i odpływ wody ze zlewni leśnej. Symulacje wykonano modelem SCS-CN dla różnych wariantów sposobu opisu pokrycia terenu zlewni, wykorzystując w tym celu dane dostępne w projekcie Corine Land Cover 2018, opisy taksacyjne drzewostanów oraz pomiary własne powierzchni szlaków i dróg leśnych. Obliczono parametr CN, opierając się na standardowych tabelach opracowanych przez National Resources Conservation Services oraz zmodyfikowanych przez Okońskiego i Milera (2010). Wyliczona wartość opadu efektywnego odpowiadającego odpływowi bezpośredniemu posłużyła do analizy reakcji zlewni za pomocą modelu Snydera. Analizowano kilka wariantów związanych z pokryciem terenu, wilgotnością początkową i zagospodarowaniem.

Stwierdzono, że obecność szlaków i dróg leśnych zmniejsza wartość retencji maksymalnej zlewni oraz zwiększa opad efektywny, a w konsekwencji powoduje wzrost przepływu maksymalnego i sumarycznego odpływu ze zlewni. Największe zmiany obserwowane są w modelu zakładającym początkowe warunki wilgotnościowe na zlewni jako suche, zaś najmniejsze dla stanu wilgotnego. Analiza otrzymanych wyników pozwala przyjąć założenie, że dominujący wpływ na wielkość odpływu mają początkowe warunki wilgotnościowe wyrażone tzw. opadami uprzednimi.

Zastosowanie do opisu pokrycia zlewni cech taksacyjnych drzewostanu wpływa na wartość opadu efektywnego, retencję i odpływ wody ze zlewni. Otrzymane wyniki potwierdzają zasadność użycia zmodyfikowanej metody SCS-CN (Okoński i Miler 2010) i konieczność dalszego dostosowywania metody do specyficznych warunków lasów górskich.

**Słowa kluczowe:** opad efektywny, model opad-odpływ, model Snydera, metoda SCS-CN

## 1. Wstęp

Przemiany pokrycia terenu zachodzące w czasie i w różnej skali przestrzennej pociągają za sobą implikacje ekonomiczne (Dorocki i in. 2019), a także wpływają na zmiany klimatyczne (Ciołkosz i in. 2011). Modyfikujący wpływ rodzaju pokrycia terenu na obieg wody w zlewni jest znany i badany od dawna (Lambor 1965; Swank i in. 2001). Przyjmuje się przy tym, że jednym z najważniejszych zadań hydrologii jest opis procesu transformacji opadu atmosferycznego w odpływ w odniesieniu do mechanizmów kierujących tym procesem, jak i do jego charakterystyk ilościowych w aspekcie dynamicznym (Okoński 2006). Środowisko leśne oddziałuje na warunki kształtowania się bilansu wodnego w sposób szczególny i odmienny od obszarów o innych rodzajach pokrycia terenu (Suliński 2002). Prawdopodobnie ta dotyczy również tworzenia się warunków odpływu ze zlewni (Andreassian 2004). W znacznej mierze powstawanie i przebieg odpływu w skali lokalnej zależy od specyfiki miejscowych warunków fizyczno-geograficznych. Trudno więc o uogólnienia i jednoznaczną ocenę wpływu środowiska leśnego na składową bilansową odpływu ze zlewni (Weiler i McDonnell 2004). Ten stan przypisuje się dwóm czynnikom. Po pierwsze, brak rozpoznania ilościowej relacji las–odpływ wody ze zlewni (Suliński 2002), po drugie, wciąż niezadowalające rozpoznanie mechanizmów procesów hydrologicznych (Osuch i Kowalik 1998; McDonnell 2003; Andreassian 2004). Pomimo wielu badań prowadzonych w zlewniach badawczych w ciągu ostatnich lat, wyjaśnienie procesu transformacji opadu w odpływ w zlewniach leśnych nie przyniosło zadowalającego rezultatu (Okoński 2006).

Odpływ ze zlewni leśnych niezależnie od tego, czy jest uwarunkowany uwalaniem wody z retencji śnieżnej czy opadami deszczu, jest bardziej wyrównany, a kulminacje są rozciągnięte w czasie i mniejsze niż na obszarach nieleśnych (Hewlett 1982; Soczyńska 1989; Swank i in. 2001; Chang 2003). Wpływ lasu na kształtowanie się odpływu w zlewniach zależy nie tylko od stopnia lesistości, lecz także od rozkładu przestrzennego obszarów leśnych w zlewni (Lambor 1965; Ciepeliowski i in. 2001). Jeśli lasy znajdują się w górnych, wododziałowych partiach zlewni, to wówczas pełniej oddziałują na spłaszczenie i wydłużenie się fali wezbraniowej oraz przesunięcie jej kulminacji w czasie. Rola lasu sprowadza się tu do znacznego zwiększenia proporcji odpływu podziemnego w stosunku do odpływu powierzchniowego oraz retencjonowania wody. Zjawisko to jest widoczne głównie w górskich zlewniach leśnych o znacznych spadkach powierzchni terenu. Podczas szczególnie długotrwałych i intensywnych opadów, gdy zdolności retencyjne się wyczerpują, modyfikująca rola lasu, polegająca na retencjonowaniu wody, ustaje (Lambor 1965).

Prowadzenie gospodarki leśnej wymaga przecięcia kompleksów leśnych siecią szlaków i dróg leśnych. Każdy z tych ciągów komunikacyjnych narusza

naturalną strukturę i ciągłość wierzchniej warstwy gleby, stając się potencjalnym miejscem koncentracji spływu powierzchniowego. Sprzyja temu również kompaktacja podścielającej warstwy mineralnej zmniejszająca przewodność hydrauliczną i zdolność infiltracji (Megahan 1972; Wemple i in. 1996; Kormanek 2004). Croke i in. (2001) wskazują, że spośród wszystkich działań związanych z gospodarką leśną to właśnie zrywka najbardziej przyczynia się do wzrostu erozji wodnej. Najbardziej podatne są drogi leśne, szlaki zrywkowe i składnice przyrzębowe, czyli miejsca, gdzie gleba jest zbita, odsłonięta i ma naruszoną strukturę. Ponadto górskie gleby leśne charakteryzują się zwykle poziomem organicznym słabo związanym z podłożem mineralnym i o małej miąższości, co zwiększa jego podatność na zmywanie przez spływ powierzchniowy (Malmer 1996; Douglas i in. 1999).

Istnieją co najmniej dwa rodzaje potencjalnego, bezpośredniego oddziaływania dróg leśnych na reakcję hydrologiczną zlewni (La Marche i Lettenmaier 2001): 1) nasilenie spływu powierzchniowego na utwardzonej lub zagęszczonej nawierzchni drogi ze względu na zredukowane tempo infiltracji i 2) przechwytywanie spływu podpowierzchniowego przez wcięcia drogowe.

Spływ powierzchniowy, formowany na utwardzonych drogach leśnych przez oba powyższe mechanizmy, jest zazwyczaj odprowadzany przez przydrożne rowy do sieci rzecznej. Ważnym aspektem jest to, że systemy rowów ułatwiają dotarcie wody opadowej i osadów do teoretycznie najczystszych źródłowych odcinków potoków górskich. Podobnie sytuacja wygląda na drogach gruntowych, gdzie po intensywnych opadach w wyniku wysycenia gleby wodą, tworzy się spływ powierzchniowy (Wałdykowski i Krzemień 2013; Butzen i in. 2014; Zemke 2016). Warto przy tym odnotować, że stosowane współcześnie na utwardzonych drogach leśnych urządzenia odwadniające z jednej strony mogą ograniczać natężenie niektórych niekorzystnych zjawisk, natomiast z drugiej strony, jeżeli są nieprawidłowo umiejscowione, mogą przyczyniać się do powstania nowych wcięć erozyjnych i osuwisk (Piehl i in. 1988; Wemple i in. 1996; Sidle i in. 2006). Natomiast na nieutwardzonych i nieposiadających prawidłowo funkcjonujących urządzeń odwadniających górskich drogach leśnych i na szlakach zrywkowych spływ powierzchniowy przebiega zgodnie ze spadkiem drogi, a woda wraz z osadami odprowadzana jest na stok lub bezpośrednio do potoku (Sidle i in. 2006). Badania prowadzone w Beskidach, ukierunkowane na wyjaśnienie znaczenia urządzeń odwadniających korpus leśnej drogi stokowej w kształtowaniu spływu powierzchniowego oraz procesów erozyjnych, nie pozwoliły na jednoznaczne ustalenie ich roli w tym procesie (Gołąb 2014; Gołąb i in. 2016). Z kolei tam, gdzie naturalne lub sztucznie nasypane podłoża drogi są podatne na erozję, brak systemów odwadniających może mieć katastrofalne skutki w przypadku dostawy osadów, szczególnie na obszarach o dużych deniwelacjach terenu.



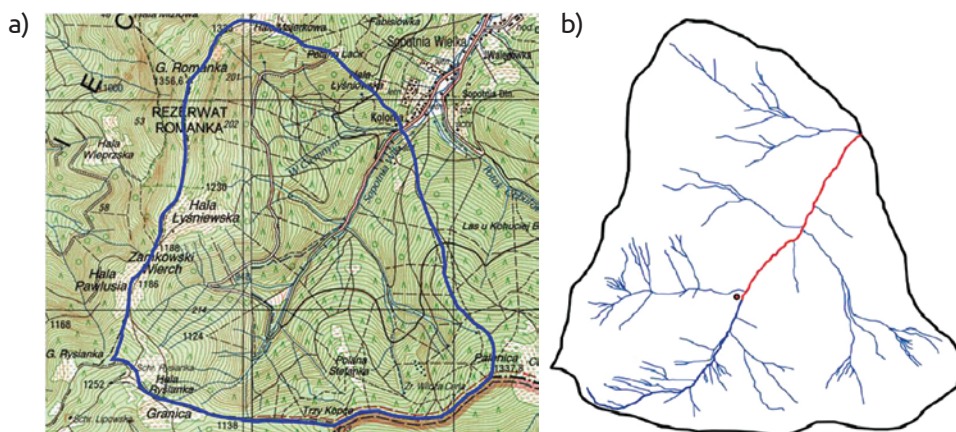
Dodatkowo drogi silnie wcięte w stok przechwytyją wodę podpowierzchniową i przekierowują ją na spływ wzdłuż osi drogi (Megahan 1972; Wemple i in. 1996; Negishi i in. 2008). Skala przechwytywania spływu podpowierzchniowego zależy od występowania i położenia warstw trudno przepuszczalnych. Badania nad stosunkami wodnymi w skarpie drogi stokowej (Gołąb 2004) dowodzą, że drogi powodują odwadnianie terenów znajdujących się w ich pobliżu. W górach z powodu nadmiaru wody opadowej wpływ tego zjawiska nie jest tak silny, aby negatywnie oddziaływać na żyzność gleby, a zatem na wzrost roślin. Pozostaje jednak problem efektu drenażu spowodowanego przez drogi, który jest nierozwiązany. Proces polega na szybkim dostarczaniu wody ze spływu powierzchniowego do cieków wodnych odwadniających zlewnię, co w generalnym ujęciu zmniejsza retencję glebową. Innym niekorzystnym zjawiskiem związanym ze spływem wody po drogach leśnych jest to, że w wyniku erozji tracą one swoje pierwotne cechy geometryczne, przez co pogarsza się ich przejezdność (Gołąb 2004).

Przedmiotem niniejszej pracy są analizy opadu efektywnego i odpływu wody ze zlewni symulowane przy użyciu matematycznego modelu opad–odpływ. Celem pracy jest zbadanie, czy uwzględnienie w opisie pokrycia zlewni powierzchni zajętej pod infrastrukturę drogową służącą prowadzeniu gospodarki leśnej istotnie zmienia wartość opadu efektywnego i odpływ ze zlewni leśnej. Symulacja taka powinna pomóc odpowiedzieć na pytanie, czy drogi i szlaki leśne zwiększają odpływ ze zlewni. Analizowano także wpływ warunków uwilgotnienia początkowego na opad efektywny i odpływ. Symulacje wykonano dla różnych wariantów sposobu opisu pokrycia terenu zlewni, wykorzystując w tym celu dane dostępne w projekcie Corine Land Cover 2018 (CLC 2018), opisy taksacyjne drzewostanów (BDL 2019) oraz pomiary własne. Badania wykonano przy użyciu metody SCS-CN oraz modelu matematycznego opad-odpływ Snydera. Użyta w modelu górską zlewnia Sopotnia została wybrana jako reprezentatywna dla Beskidów Zachodnich w związku z pokryciem powierzchniami leśnymi i prowadzoną tam gospodarką leśną. W ramach badań terenowych pomierzono wszystkie drogi i szlaki zrywkowe oraz inne obiekty zagospodarowania inżynierskiego mogące generować spływ powierzchniowy.

## 2. Obszar i metody badań

### 2.1. Charakterystyka fizyczno-geograficzna zlewni Sopotnia

Do opracowania wybrano zlewnię potoku Sopotnia po przekrój zlokalizowany na granicy kompleksu leśnego na 10 kilometrów jej biegu (N49°33'23,24" i E19°16'11,28") (ryc. 1a). Zlewnia obejmuje obszar 917 ha, a dominującym



Ryc. 1. Granica zlewni potoku Sopotnia po profil na 10 km biegu ciekui (a); geometryczny środek ciężkości zlewni (b) (źródło: ORCID 2019)

rodzajem pokrycia jej terenu są lasy zajmujące powierzchnię 834 ha (stopień zalesienia 91%) z wyjątkiem podszczytowych partii Romanki (1366 m n.p.m.) oraz hali Pawlusia, gdzie występuje niewielki areał łąk o powierzchni 83 ha (9%). Potok Sopotnia uchodzi do rzeki Koszarawy, która jest prawym dopływem Soły (dorzecze górnej Wisły). Długość potoku Sopotnia od źródła do profilu zamykającego wynosi 4,05 km. Źródło potoku Sopotnia położone jest na północno-wschodnim stoku Rysianki na wysokości 1240 m n.p.m. Kulminacja Romanki (1356 m n.p.m.) jest najwyższym punktem na zlewni, a deniwelacja wynosi 587 m.

Zlewnia położona jest prawie w całości na terenie Nadleśnictwa Jeleśnia (Leśnictwo Sopotnia Górna i Sopotnia Potok), niewielki tylko fragment znajduje się na terenie Nadleśnictwa Ujsoły (Leśnictwo Gawłowskie). Obszar badań jest położony w obrębie Beskidu Wysokiego. Według klasyfikacji przyrodniczo-leśnej (Zielony i Kliczkowska 2012) wchodzi w skład Mezoregionu Beskidu Żywieckiego i Krainy Karpackiej, a zgodnie z regionalizacją geobotaniczną Matuszkiewicz (2008) zlewnia przynależy do podokręgu zachodniej części Beskidu Żywieckiego (okręg Beskidu Żywieckiego, podkraina Zachodniobeskidzka, Kraina Karpat Zachodnich). Cały obszar zlewni rozciąga się w obrębie utworów płaszczowiny magurskiej. Najważniejszą rolę w budowie geologicznej odgrywiają gruboławicowe i drobnoziarniste piaskowce magurskie facji mikowej i łupki ilaste warstw magurskich wieku paleogeńskiego (Piotrowski i Piotrowska 2004). Dużą rolę w obrębie masywu Romanki odgrywają osuwiska strukturalne. Na zlewni występują czwartorzędowe koluwalne piaski i gliny z gruzem skalnym oraz zwietrzelinowe rumosze skalne i rumowiska koluwalne (Golonka i Wójcik 1976, 1978).

Biorąc pod uwagę regionalizację klimatyczną Polski, zlewnia znajduje się w regionie klimatów górskich. Według podziału klimatycznego Hessa (1965) wyróżnia się tu dwa piętra klimatyczne: umiarkowanie chłodne, od 769 do 1080 m n.p.m., ze średnią roczną temperaturą powietrza 6°C, chłodne, od 1080 do 1356 m n.p.m. ze średnią roczną temperaturą 4°C. Przeciętny spadek temperatury wraz z wysokością wynosi 0,58°C na każde 100 m. Podczas bezchmurnych i bezwietrznych nocy tworzy się inwersyjny rozkład temperatury powietrza (Zawada 1974). Wraz z wysokością wydłuża się okres zalegania pokrywy śnieżnej. W szczytowych partiach Romanki wynosi on 190 dni. Wraz ze wzrostem wysokości średnia temperatura roczna spada z 6°C do 2,4°C, opady rosną od 950 do 1350 mm, długość okresu wegetacyjnego zmniejsza się z 200 do 150 dni. Oprócz zróżnicowania wysokościowego, na klimat w dużym stopniu wpływa ukształtowanie i ekspozycja terenu (Zawada 1974).

Obszar zlewni rozciąga się w dwóch piętrach roślinności (Kulig 1959): od 769 m n.p.m. do 1150 m n.p.m. – regiel dolny oraz od 1150 do 1366 m n.p.m. – regiel górny. Głównym gatunkiem lasotwórczym jest świerk pospolity. Drzewostany świerkowe stanowią 86,9% powierzchni leśnej, pozostałe 13,1% to lasy bukowe (11,4%) i jodłowe (1,7%). Sposobem zagospodarowania jest rębnia stopniowa gniazdowa udoskonalona (IVD). Dominującym rodzajem siedliskowym lasu jest las mieszany górski (56,6%), następnie bór mieszany górski (31,3%), niewielki udział ma las górski (3,6%), a w szczytowych partiach bór wysokogórski (8,4%).

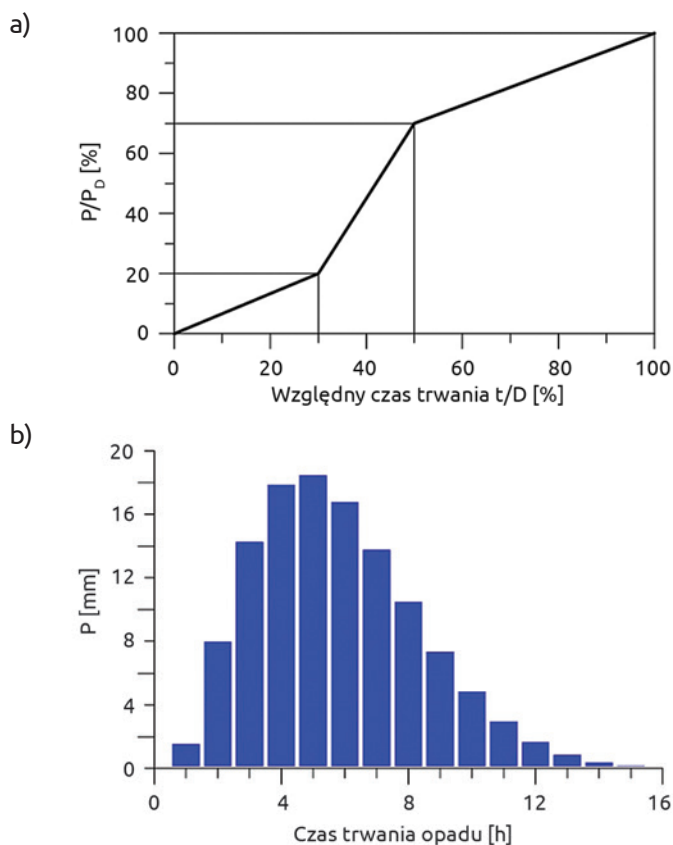
## 2.2. Obliczanie opadu efektywnego metodą SCS-CN

Opad efektywny to część opadu całkowitego biorącego udział w formowaniu spływu powierzchniowego. Jest obliczany jako różnica opadu całkowitego i strat, na które składają się: retencja powierzchniowa, parowanie terenowe, intercepcja i infiltracja. Każda z tych składowych może być obliczana w różny sposób. Jeżeli dysponujemy hydrogramem odpływu i hietogramem opadu, możemy określić sumę wyżej wymienionych składników. Różnica objętości wody opadowej i objętości odpływu jest wtedy wysokością wymienionych strat, a objętość odpływu jest sumarycznym opadem efektywnym na obszarze zlewni. W ten sposób możliwy jest podział opadu całkowitego na opad efektywny i straty. Opad efektywny jest stosowany m.in. w hydrologicznych modelach konceptualnych: Nasha (Nash 1958; Miler 2013) czy Snydera (Ponce 1989; Wałęga 2012).

Opad efektywny jest obliczany przy wykorzystaniu opadu całkowitego średniego na zlewni, opadu miarodajnego lub dla pojedynczego zdarzenia opadowego. W pracy wykorzystano wartość dobowego opadu miarodajnego odczytaną z Atlasu Hydrologicznego (1987) dla zlewni Sopotni. Opad efektywny obliczono dla wszystkich rozpatrywanych rodzajów pokrycia terenu

zlewni, przyjmując tę samą wartość opadu prawdopodobnego  $P\%$  o prawdopodobieństwie przekroczenia 1% równą 120 mm. Ponadto przyjęto, że czas trwania zdarzenia opadowego  $P_{1\%}$  wynosi 16 godzin, a rozdział opadu dobowego na przedziały obliczeniowe jest zgodny z rozkładem DVWK (1984). Rozkład DVWK zakłada, że przez pierwsze 30% czasu trwania opadu wystąpi 20% jego całkowitej wysokości, po czasie równym połowie trwania opadu pojawi się jego 70%, a pozostałe 30% całkowitego opadu w drugiej połowie czasu trwania (ryc. 2a). Rozkład opadu dobowego na przedziały obliczeniowe (godzinowe) widoczny jest na rycinie 2 b.

Jedną z najczęściej stosowanych metod obliczania opadu efektywnego jest metoda SCS-CN (ang. *Soil Conservation Service – Curve Number*), opracowana dla terenów rolniczych w połowie ubiegłego wieku przez USDA Natural



**Ryc. 2.** Przyjęty do obliczeń rozkład sumy deszczu (DVWK 1984) (a); histogram opadu całkowitego (b) (objaśnienia symboli:  $P$  – opad całkowity [mm],  $P = P_{1\%}$ ;  $P_D$  – suma opadu w czasie  $D$  [mm];  $t$  – czas od początku układu współrzędnych [h];  $D$  – czas trwania deszczu [h])

Resources Conservation Service (Chow 1964; National Engineering Handbook 1985). Model SCS-CN swoje źródło opiera na podziale opadu całkowitego na składową rozchodową nieskutkującą odpływem (chodzi tutaj o infiltrację i ewapotranspirację) oraz odpływ bezpośredni. Zakłada się, że najważniejszą rolę w powstawaniu opadu efektywnego odgrywają właściwości infiltracyjne gruntu z uwzględnieniem wilgotności początkowej przed wystąpieniem opadu skutkującego wezbraniem oraz pokrycie terenu zlewni. Charakterystyka pokrycia zlewni składa się z rodzaju i formy zagospodarowania danego terenu. W metodzie SCS-CN przyjęto, że maksymalna potencjalna retencja zlewni zależy od wyznaczonego doświadczalnie bezwymiarowego parametru *CN* (numer krzywej, ang. *Curve Number*). Oznaczany jest on na podstawie przepuszczalności gleb występujących na obszarze zlewni, sposobu użytkowania terenu, rodzaju uprawy oraz warunków wilgotnościowych gleby. Przy braku jasnych wytycznych zakłada się, że metoda ma zastosowanie przede wszystkim do zlewni małych i średnich.

W pierwotnej wersji metody wartość parametru *CN* odczytuje się z tabel sporządzonych dla warunków Ameryki Północnej. Przygotowano je na podstawie obszernego materiału badawczego obejmującego kilkadziesiąt zlewni eksperymentalnych położonych głównie w granicach umiarkowanej strefy Ameryki Północnej, o szerokim zakresie zmienności charakteru pokrycia i gleb. Ostateczna wersja tej metody jest uzależniona od specyfiki lokalnej i warunków fizycznogeograficznych (Miler 2013), dlatego pojawiły się liczne jej adaptacje do warunków lokalnych. Dla warunków polskich metodę dostosował Ignar (1986, 1993). W oryginalnej metodzie obszary leśne są traktowane jako jednorodne kategorie użytkowania terenu (Mishra i Singh 2003). Prace mające na celu zastosowanie metody dla warunków leśnych Europy Środkowej były prowadzone przez Ciepiewskiego i in. (2001), Okońskiego (2006), Okońskiego i Milera (2010) oraz Milera (2012).

W metodzie SCS-CN przyjmuje się równe proporcje między retencją aktualną a potencjalną zlewni oraz między opadem efektywnym a opadem całkowitym pomniejszonym o stratę początkową. Zakłada się, że stosunek straty początkowej do maksymalnej potencjalnej retencji wynosi 0,2. Opad efektywny jest wyrażany jako funkcja opadu całkowitego i maksymalnej potencjalnej retencji. Maksymalna potencjalna retencja wyrażona jest bezwymiarowym parametrem *CN*, którego wartość zawiera się w granicach od 0 do 100. Parametr ten wyznaczany jest doświadczalnie i obejmuje rodzaj pokrycia terenu, formę zagospodarowania oraz grupę glebową charakteryzującą się określoną przepuszczalnością (National Engineering Handbook 1985; Ignar 1986; Okoński 2006; Miler 2013). Wartość opadu efektywnego zależy również od aktualnych warunków wilgotnościowych na zlewni. Charakterystyką wyrażającą te warunki jest suma opadów w okresie 5 dni poprzedzających analizowany opad wezbraniowy (tab. 1).

**Tabela 1.** Wilgotność początkowa gleby (National Engineering Handbook 1985; Okoński 2006)

| Poziom warunków wilgotnościowych | Suma opadów w okresie 5 dni poprzedzających analizowany opad [mm] |                   |
|----------------------------------|---|-------------------|
|                                  | Okres pozawegetacyjny   | Okres wegetacyjny |
| AMC I                            | < 13  | < 35              |
| AMC II                           | 13–28   | 35–53             |
| AMC III                          | > 28  | > 53              |

Wyróżnia się trzy poziomy warunków wilgotnościowych i odpowiadające im wartości  $CN$ . Podstawowe założenie metody, że stosunek wysokości opadu efektywnego  $H$  do opadu całkowitego  $P$  pomniejszonego o straty początkowe  $I_a$  jest równy stosunkowi infiltracji aktualnej  $F$  do maksymalnej potencjalnej retencji zlewni  $S$ , można wyrazić w postaci równania:

$$\frac{H}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Po przekształceniu wzoru otrzymujemy:

$$H = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2)$$

gdzie:

$H$  – opad efektywny [mm],

$P$  – opad całkowity [mm],

$I_a$  – straty początkowe [mm],

$F$  – infiltracja aktualna [mm],

$S$  – maksymalna potencjalna retencja zlewni [mm].

Opad efektywny  $H_i$  obliczamy, zakładając, że straty początkowe  $I_a$  są równe:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (3)$$

gdzie:

$S$  – maksymalna potencjalna retencja zlewni [mm].

A po przekształceniu wzoru (2) otrzymano zależności, według których obliczono opad efektywny:

$$\begin{cases} H = \text{jeżeli } P \leq I_a \\ H = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \text{ jeżeli } P < I_a \end{cases} \quad (4)$$



gdzie:

$H$  – opad efektywny [mm],

$P$  – opad całkowity [mm],

$I_a$  – straty początkowe [mm],

$S$  – maksymalna potencjalna retencja zlewni [mm].

Średni dla zlewni parametr modelu  $CN_{sr}$  obliczono według wzoru:

$$CN = CN_{sr} = \frac{\sum_{k=1}^m CN_i A_i}{A} \quad (5)$$

gdzie:

$A$  – powierzchnia zlewni [km<sup>2</sup>],

$m$  – wartość będąca sumą liczby rodzajów pokrycia terenu na każdej z występujących klas gleb w danej zlewni [-],

$A_i$  – powierzchnia danego pokrycia terenu i znajdującego się na określonej klasie gleby [km<sup>2</sup>],

$CN_i$  – wartość parametru  $CN$  dla danego pokrycia terenu [-].

Maksymalną retencję zlewni  $S$  obliczamy wzorem:

$$S = 25,4 \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (6)$$

gdzie:

$S$  – maksymalna retencja zlewni [mm],

$CN = CN_{sr}$  – średni parametr modelu  $CN \Sigma [0,100]$ .

Do opisu rodzaju pokrycia terenu zlewni użyto danych dostępnych w ramach projektu CLC realizowanego przez Europejską Agencję Środowiska (EEA). Kategorie użytkowania wydzielone w bazie CLC oraz przyjęte w standardowej metodzie SCS-CN różnią się nieznacznie. W CLC 2018 wyróżniono trzy kategorie lasów: iglaste, mieszane i liściaste. W metodzie SCS-CN są dwie pozycje dla terenów leśnych: „rzadki las i poszycie” oraz „dobre pokrycie leśne”. Wyróżniony według CLC 2018 zespół roślinności drzewiastej i krzewiastej, „lasy i roślinność krzewiasta w stanie zmian”, zaklasyfikowano do terenów leśnych o dobrym pokryciu. Z kolei kategorię „łąki i pastwiska” według CLC 2018 zaklasyfikowano do łąk w dobrym stanie według podziału metody SCS-CN. Ponieważ kategorie powierzchni leśnych, zarówno w oryginalnej metodzie SCS-CN, jak i w bazie danych CLC 2018, są bardzo ogólne, do analizy wykorzystano również informacje taksacyjne zawarte w BDL (BDL 2019). Wartości parametru  $CN$  przyjęto za opracowaniem Okońskiego i Milera (2010), w którym

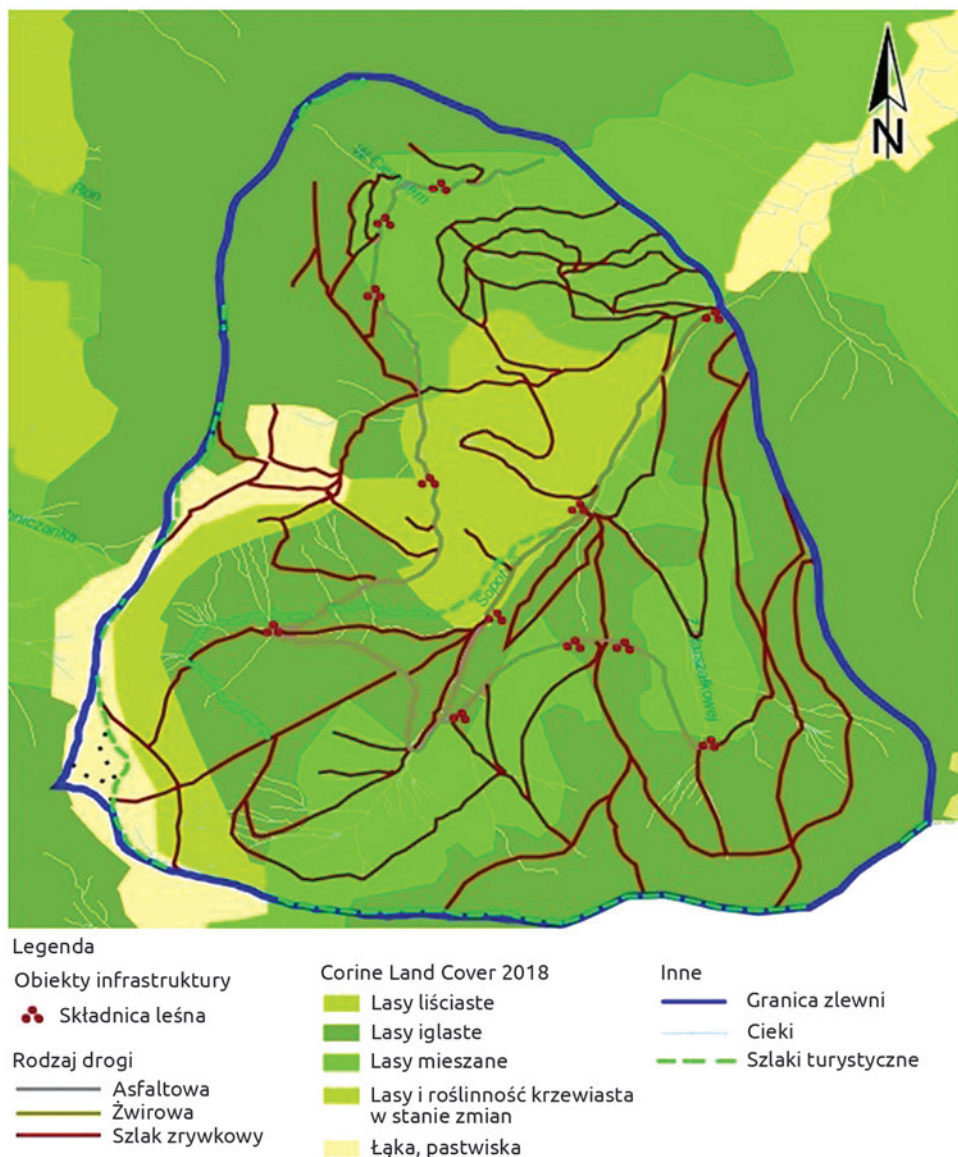
dokonano adaptacji metody dla warunków Polski centralnej, opierając się na charakterystyce drzewostanów, m.in. na stopniu zadrzewienia, obecności upraw leśnych i innych kategoriach użytkowania lasu. Stopień zadrzewienia drzewostanu głównego ustalono dla każdego wydzielenia na obszarze zlewni, opierając się na danych dostępnych w BDL (BDL 2019). Na podstawie obserwacji terenowych i ortofotomapy dostępnej na portalu BDL (BDL 2019), stwierdzono występowanie upraw leśnych oraz halizn i ustalono ich powierzchnię.

Na podstawie mapy pokrycia terenu CLC 2018 wydzielono oraz pomierzono w obrębie granic zlewni powierzchnie zajęte przez kategorie użytkowania terenu: największy areał zajmują lasy iglaste 478 ha (52,12%), lasy mieszane 246 ha (26,92%), kolejno lasy i roślinność w stanie zmian 96 ha (10,46%), lasy liściaste 52 ha (5,60%), łąki i pastwiska 45 ha (4,90%) (ryc. 3).

Wśród kategorii pokrycia terenu zlewni wyodrębniono także ulice i drogi, do których zaliczono zinwentaryzowane podczas prac terenowych drogi leśne z krawężnikami i odwodnieniem (asfaltowe), oraz drogi żwirowe i gruntowe, w tym szlaki zrywkowe i składnice leśne. Infrastrukturę drogową, zinwentaryzowaną podczas prac polowych, skategoryzowano według Okońskiego i Milera (2010), którzy wyodrębnili szlaki zrywkowe: świeże i wyerodowane oraz drogi leśne. Drogi asfaltowe i stokowe skategoryzowano jako drogi leśne, natomiast pozostałe obiekty infrastruktury drogowej – szlaki zrywkowe, szlaki turystyczne, ścieżki i składnice jako szlaki zrywkowe wyerodowane.

Drugą kategorią danych przestrzennych wykorzystanych w metodzie SCS-CN jest rodzaj pokrywy glebowej zdefiniowany na bazie przepuszczalności wodnej. W metodzie oryginalnej wyróżnione są cztery grupy: A – gleby o dobrej przepuszczalności, B – gleby o przepuszczalności powyżej średniej, C – gleby o przepuszczalności poniżej średniej i D – gleby o małej przepuszczalności (National Engineering Handbook 1985). W niniejszej pracy zastosowano klasyfikację gleb przygotowaną przez Ignara (1993), w której dostosowano podział oryginalny do grup granulometrycznych stosowanych w Klasyfikacji Gleb Leśnych Polski (2000). Na podstawie opisu wydzielenia leśnego (BDL 2019) ustalono osiem typów i podtypów gleby, a następnie przypisano im odpowiedni gatunek gleby na podstawie Atlasu Gleb Leśnych (Brożek i Zwydak 2010). Gatunek gleby posłużył do zakwalifikowania do odpowiedniej kategorii przepuszczalności według opracowania Ignara (1993). Wszystkie sklasyfikowane na obszarze zlewni gleby zaliczone zostały do kategorii B – gleb o przepuszczalności powyżej średniej i średnim współczynniku filtracji.

Do obliczeń wykorzystano parametry CN dla wszystkich poziomów wilgotnościowych: warunki suche (AMC I), przeciętne (AMC II) i mokre (AMC III) (National Engineering Handbook 1985; Okoński 2006; Miler 2013) (tab. 1). Według przyjętej zasady gleby suche generują najmniejszy odpływ powierzchniowy, a gleby wilgotne największy.



Ryc. 3. Pokrycie terenu zlewni potoku Sopotnia wraz z siecią dróg i szlaków leśnych (źródło: CLC 2018 i ORCID 2019)

Ostatecznie rozważano dziewięć przypadków kształtowania się parametru CN i maksymalnej retencji zlewni w zależności od warunków wilgotnościowych (AMC I, AMC II, AMC III) oraz kategorii użytkowania terenu (tab. 2).

1. W pierwszych trzech przypadkach wartość parametru CN oraz retencji maksymalnej zlewni obliczono, opierając się na kategoriach użytkowania

wynikających ze standardowych danych CLC 2018. Na obszarze zlewni wyróżniono pokrycie terenu: „łąka w dobrym stanie” oraz „teren leśny – dobre pokrycie”.

2. Kolejne trzy przypadki uwzględniały infrastrukturę drogową, dlatego z kategorii teren leśny i łąka wyodrębniono powierzchnie zaklasyfikowane do kategorii dróg. Działanie takie miało pozwolić ocenić wpływ powierzchni dróg i szlaków na symulowany odpływ wody ze zlewni.
3. W kolejnych przypadkach pokrycie terenu ustalono, opierając się na cechach taksacyjnych drzewostanu zestawionych przez Okońskiego i Milera (2010) oraz powierzchniach zajętych pod drogi i szlaki zrywkowe.

**Tabela 2.** Oznaczenie analizowanych przypadków opisu pokrycia terenu zlewni Sopotnia

| Pokrycie terenu                          | Warunki wilgotnościowe |        |         |
|--|------------------------|--------|---------|
|  | AMC I                  | AMC II | AMC III |
| Według CLC 2018                          | A1                     | A2     | A3      |
| Według CLC 2018 z wyodrębnionymi drogami | B1                     | B2     | B3      |
| Według BDL z wyodrębnionymi drogami      | C1                     | C2     | C3      |

Opierając się na wyodrębnionych powierzchniach cząstkowych zlewni (ryc. 2), charakteryzujących się odpowiednią kombinacją cech pokrycia terenu i kategorii gleby (tab. 2), dla każdej z nich obliczono wzorem (5) parametr  $CN_p$ , a następnie  $CN_{sr}$  w zlewni. W dalszej kolejności wyliczono wzorem (6) wartość retencji maksymalnej  $S$  zlewni. Przykład zestawienia danych i obliczenia dla przypadku **A1** przedstawiono w tabeli 3.

**Tabela 3.** Przykład obliczeń parametru  $CN$  dla zlewni cząstkowych Sopotni, przypadek **A1** – warunki wilgotnościowe suche (AMC I) i pokrycie terenu według CLC 2018

| Kategoria użytkowania       | CN dla kategorii gleb |    |    |    | Powierzchnia zlewni cząstkowych [km <sup>2</sup> ] |       |   |   | $CN_i \cdot A_i$ |
|-----------------------------|-----------------------|----|----|----|--|-------|---|---|------------------|
|                             | A                     | B  | C  | D  | A  | B     | C | D |                  |
| Łąka w dobrym stanie        | 15                    | 38 | 52 | 60 | –  | 0,450 | – | – | 17,1             |
| Teren leśny: dobre pokrycie | 12                    | 35 | 51 | 59 | –  | 8,720 | – | – | 305,2            |
| Suma                        |                       |    |    |    |  |       |   |   | 322,30           |

Po podstawieniu do wzoru (5) sumy iloczynów powierzchni cząstkowych i parametrów  $CN$  dla powierzchni cząstkowych (tab. 3) otrzymano średni dla zlewni parametr  $CN$  dla warunków **A1**:

$$CN = CN_{sr} = \frac{322,3}{9,17} = 35,1$$

gdzie:

powierzchnia zlewni  $A = 9,17 \text{ km}^2$  (tab. 4).

Po podstawieniu do wzoru (6) wyliczonego parametru  $CN_{sr}$  otrzymujemy wartość retencji maksymalnej zlewni:

$$S = 25,4 \cdot \left( \frac{1000}{35,1} - 10 \right) = 469,60 \text{ [mm]}$$

### 2.3. Obliczanie odpływu wody modelem Snydera

Do opisu transformacji opadu efektywnego w odpływ powierzchniowy wybrano model Snydera. Jest to model konceptualny o parametrach skupionych, bazujący na chwilowym hydrogramie jednostkowym (Ponce 1989). Kształt hydrogramu jednostkowego zależy od cech zlewni i jest reakcją zlewni na jednostkowy opad efektywny o wysokości 1 mm w jednostkowym czasie trwania (Ciepielowski i Dąbkowski 2006). Podstawowymi parametrami hydrogramu jednostkowego są czas wystąpienia kulminacji hydrogramu  $t_p$  oraz przepływ kulminacyjny  $Q_p$ .

Czas wystąpienia kulminacji  $t_p$  hydrogramu jednostkowego obliczamy wzorem:

$$t_p = t_L + \frac{t_D}{2} \quad (7)$$

gdzie:

$t_L$  – czas opóźnienia odpływu w godzinach (czas od środka hietogramu opadu efektywnego do kulminacji hydrogramu jednostkowego),

$t_D$  – standardowy czas trwania opadu efektywnego w godzinach [h].

Występujący we wzorze (7) czas opóźnienia odpływu  $t_L$  zależy od takich cech fizjograficznych zlewni, jak długość zlewni  $L_{max}$  i odległości pomiędzy przekrojem zamykającym zlewnię a przekrojem położonym najbliżej środka ciężkości zlewni  $L_c$ , i obliczany został wzorem:

$$t_L = 0,75 C_t (L_{max} \cdot L_c)^{0,3} \quad (8)$$

gdzie:

$C_t$  – parametr modelu ( $C_t = 1,8-2,2$ ),

$L_{max}$  – długość zlewni [km],

$L_c$  – odległość od przekroju zamykającego do przekroju cieku położonego najbliżej środka ciężkości zlewni [km].

Długość cieków głównego  $L$  oraz długość maksymalną zlewni  $L_{max}$  obliczono na podstawie mapy topograficznej w skali 1:25000 (ORSIP 2019) (tab. 4). Wyznaczenie środka ciężkości zlewni wykonano w programie Quantum GIS wersja 3.6 Goose (QGIS 2019) przy użyciu funkcji *centroid* (ryc. 2b).

**Tabela 4.** Charakterystyka fizjograficzna zlewni Sopotnia

| Parametr   | Symbol     | Jednostka                        | Wartość |
|--|------------|----------------------------------|---------|
| Długość cieków głównego  | $L$        | km                               | 4,025   |
| Długość cieków różnego rzędu   | $\Sigma L$ | km                               | 26,15   |
| Długość zlewni   | $L_{max}$  | km                               | 4,25    |
| Gęstość sieci rzecznej   | $D$        | $\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$ | 2,85    |
| Odległość od przekroju zamykającego do profilu cieków położonego najbliżej środka ciężkości zlewni | $L_c$      | km                               | 1,92    |
| Powierzchnia zlewni  | $A$        | $\text{km}^2$                    | 0,917   |
| Wysokość maksymalna  | $h_{max}$  | m n.p.m.                         | 1356    |
| Wysokość minimalna   | $h_{min}$  | m n.p.m.                         | 769     |
| Deniwelacja terenu   | $W$        | m                                | 587     |
| Wskaźnik stoczystości  | $S$        | –                                | 0,341   |
| Średni spadek powierzchni zlewni   | $J$        | %                                | 18,8    |
| Spadek wyrównany cieków  | $I$        | –                                | 0,120   |

Występujący w modelu (wz. 8) parametr  $C_t$  powinien być ustalony na bazie odpływu z najbliższej podobnej zlewni kontrolowanej. Jeżeli nie ma takiej możliwości, do symulacji można użyć wartości z zalecanego zakresu od 1,8 do 2,2. Aby zminimalizować odchylenia między sumą objętości opadu efektywnego a sumą obliczonego odpływu, przyjęto ostatecznie wartość środkową parametru  $C_t = 2,0$ . Jak zwraca uwagę Wałęga (2012), wartość parametru  $C_t$  dla zlewni karpacczych może się zmieniać w szerokich granicach w zależności od spadku i parametru  $CN$ .

Standardowy czas trwania opadu efektywnego  $t_D$  obliczono wzorem:

$$t_D = \frac{t_L}{5,5} \quad (9)$$

gdzie:

$t_L$  – czas opóźnienia odpływu w godzinach [h].

Przepływ kulminacyjny hydrogramu jednostkowego  $Q_p$  został wyliczony z równania:

$$Q_p = \frac{0,275 \cdot C_p A}{t_L} \quad (10)$$



gdzie:

$C_p$  – parametr modelu ( $C_p = 0,4-0,8$ ),

$A$  – powierzchnia zlewni [ $\text{km}^2$ ],

$t_L$  – czas opóźnienia odpływu w godzinach [h].

Do obliczeń przyjęto wartość parametru  $C_p = 0,7$ . Powierzchnię zlewni wyznaczono na mapie topograficznej w skali 1:25000 (ORSIP 2019).

Jako że czas dyskretyzacji opadu efektywnego ( $t_R = 1$  h) jest różny od czasu standardowego ( $t_D = 0,51$  h), obliczono zmodyfikowany czas wystąpienia kulminacji  $t_{pR}$ :

$$t_{pR} = t_{LR} + \left( \frac{t_R}{2} \right) \quad (11)$$

gdzie:

$t_{LR}$  – zmodyfikowany czas opóźnienia odpływu w godzinach [h],

$t_R$  – czas dyskretyzacji opadu efektywnego w godzinach [h].

We wzorze (11) wymagane jest użycie zmodyfikowanego czasu opóźnienia odpływu  $t_{LR}$ , który należy obliczyć wzorem:

$$t_{LR} = t_L + 0,25(t_R - t_D) \quad (12)$$

gdzie:

$t_L$  – czas opóźnienia odpływu w godzinach [h],

$t_R$  – czas dyskretyzacji opadu efektywnego w godzinach [h],

$t_D$  – standardowy czas trwania opadu efektywnego w godzinach [h].

Ostatecznie zmodyfikowany przepływ kulminacyjny hydrogramu jednostkowego  $Q_{pR}$  obliczono wzorem:

$$Q_{pR} = Q_p \frac{t_L}{t_{LR}} \quad (13)$$

gdzie:  $t_L$  i  $t_{LR}$  – jak we wzorze (12).

Czas trwania hydrogramu jednostkowego  $t_b$  obliczamy wzorem:

$$t_b = \frac{0,556 \cdot A}{Q_p} \quad (14)$$

gdzie:

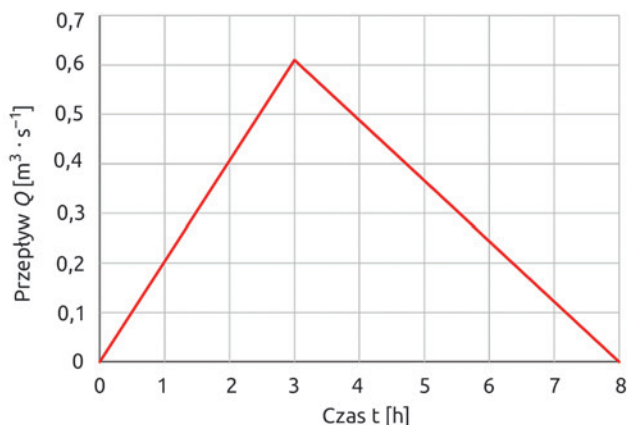
$Q_p$  – przepływ kulminacyjny hydrogramu jednostkowego [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$A$  – powierzchnia zlewni [ $\text{km}^2$ ].

Wyliczenie parametrów hydrogramu jednostkowego modelu Snydera dokonano, bazując na danych fizjograficznych zlewni (tab. 4). Obliczony wzorem (8) czas opóźnienia odpływu  $t_L$  wynosi 2,77 h, a standardowy czas trwania opadu efektywnego  $t_D$  (wz. 9) jest równy 0,5 h. Czas od rozpoczęcia opadu do wystąpienia kulminacji  $t_p$  hydrogramu jednostkowego wyliczono na 3 h (wz. 7). Ponieważ czas dyskretyzacji opadu efektywnego ( $t_R = 1$  h) jest różny od czasu standardowego ( $t_D = 0,5$  h), obliczono przy wykorzystaniu wzoru (12) zmodyfikowany czas opóźnienia odpływu  $t_{LR} = 2,89$  h, a następnie wzorem (11) zmodyfikowany czas wystąpienia kulminacji  $t_{pR} = 3$  h. Przepływ kulminacyjny hydrogramu jednostkowego  $Q_p$  (wz. 10) dla standardowego czasu trwania opadu efektywnego wynosi  $0,637 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a zmodyfikowany przepływ kulminacyjny  $Q_{pR}$  liczony wzorem (13) jest równy  $0,610 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Czas trwania hydrogramu jednostkowego  $t_b$  wyliczony wzorem (14) osiąga wartość 8 h.

Parametry kształtu hydrogramu jednostkowego posłużyły do wyliczenia rzędnych w funkcji czasu. Wykres hydrogramu jednostkowego zlewni potoku Sopotnia aż po przyjęty profil zamykający na 10 km biegu cieku obrazuje rycina 4.

Mnożąc wartości rzędnych hydrogramu jednostkowego przez wysokości opadu efektywnego w kolejnych przedziałach czasu (czasu dyskretyzacji,  $t_R = 1$  h) otrzymano wartości rzędnych hydrogramów elementarnych. Stanowią one graficzny obraz reakcji zlewni na opad efektywny o wysokości  $H$  w jednostkowym czasie trwania. Stosując zasadę superpozycji (Ciepielowski i Dąbkowski 2006), nałożono na siebie w kolejnych przedziałach czasu fale, dodając ich rzędne dla tych samych odciętych. Sumując hydrogramy elementarne, otrzymano hydrogramy odpływu ze zlewni Sopotni będące graficznym wyrazem reakcji zlewni na opad o znanej wysokości ( $P = 120$  mm) i czasie trwania ( $D = 16$  h, ryc. 2b).



Ryc. 4. Hydrogram jednostkowy zlewni Sopotnia

Dla każdego hydrogramu odpływu wyznaczono kulminację przepływu wody w profilu zlewni i ustalono wartość maksymalnego przepływu wody  $Q_{max}$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]. Uzyskano również sumę objętości opadu efektywnego  $V_H$  [ $m^3$ ] i objętość odpływu  $V_Q$  [ $m^3$ ] obliczonego modelem Snydera. Wartości tych użyto do wyliczenia bilansu masy  $\delta$ , który wyrażamy odchyleniem od różnicy sumy opadu efektywnego i sumy odpływu powierzchniowego obliczonego modelem Snydera według wzoru:

$$\delta = \frac{V_H - V_Q}{V_H} \cdot 100\% \quad (15)$$

Obliczony dla zadanych warunków bilans masy  $\delta$  jest równy 4,22%.

Powyższe obliczenia modelem Snydera wykonano dla dziewięciu różnych scenariuszy (tab. 1) odpowiadających dziewięciu przypadkom analizowanego pokrycia zlewni i wilgotności początkowej.

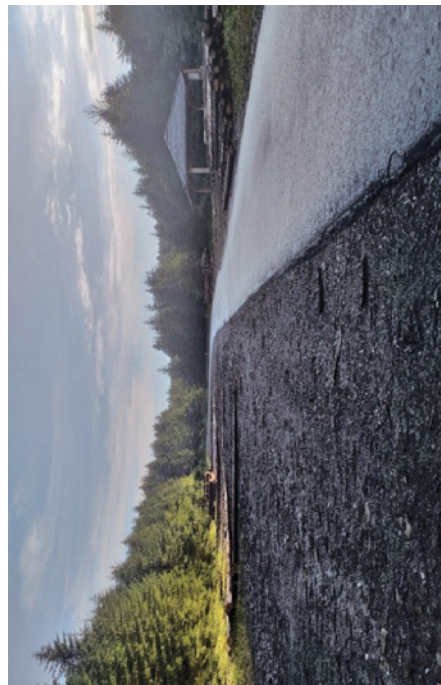
## 2.4. Pomiar sieci szlaków i dróg leśnych

Przy przygotowaniu niniejszej pracy przyjęto założenie, że wszystkie obiekty inżynierskiego zagospodarowania lasu służące gospodarce leśnej oraz zagospodarowaniu turystycznemu zostaną zinwentaryzowane w terenie. W miesiącach letnich 2019 roku dokonano pomiaru długości i szerokości oraz przebiegu dróg leśnych, szlaków zrywkowych, szlaków turystycznych oraz składnic i placów manewrowych. Obiekty klasyfikowano także ze względu na rodzaj nawierzchni, wyróżniając: nawierzchnię asfaltową, z tłucznią, gliniastą i kamienistą. Inwentaryzowano również ścieżki niezwiązane z prowadzeniem gospodarki leśnej, na których można było zauważyć naruszenie wierzchniej warstwy gleby. Pomiary długości wykonano na bazie zapisu śladu GPS, a szerokość dróg określano dalmierzem laserowym. Obserwacje terenowe wykazały, że część szlaków zrywkowych, zwłaszcza te położone w wyższych partiach zlewni, przy braku użytkowania pokrywają się roślinnością zielną. Podczas inwentaryzacji korzystano z opracowania udostępnionego przez Nadleśnictwo Jeleśnia pt. *Projekt docelowej sieci drogowej Nadleśnictwa Jeleśnia* (Projekt 2017).

## 3. Wyniki

### 3.1. Długość sieci komunikacyjnej na zlewni

Łączna długość zinwentaryzowanych obiektów drogowych, szlaków zrywkowych i ścieżek wyniosła 58,28 km (ryc. 5), w tym 42,51 km to szlaki zrywkowe, 6,99 km to szlaki turystyczne, 5,57 km stanowią drogi stokowe, 1,75 km drogi asfaltowe



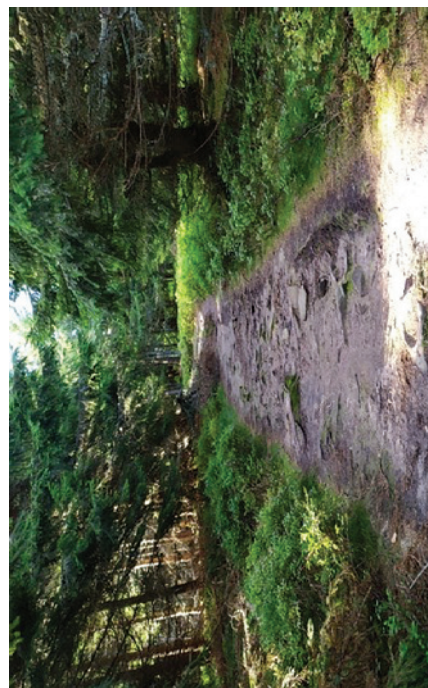
a)



b)



c)



d)

Ryc. 5. Szlaki komunikacyjne w zlewni Sopotni: a) droga asfaltowa ze składnic; b) droga stokowa żwirowa; c) szlak zrywkowy; d) szlak turystyczny (fot. M. Polak)



i 0,46 km ścieżki (ryc. 5). Wyodrębniono także składnice i place manewrowe o łącznej powierzchni 1,5 ha. Gęstość dróg wyniosła  $63,55 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1}$  przy średniej gęstości dróg dla Nadleśnictwa Jeleśnia wynoszącej  $24,06 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Projekt 2017). Pomierzona średnia szerokość dróg wynosi 2,6 m. Daje to w skali zlewni sumaryczną powierzchnię 15,5 ha (1,69%), zajęta pod drogową sieć komunikacyjną.

### 3.2. Zmienność retencji maksymalnej zlewni

Wartość bezwymiarowego parametru  $CN$  średniego w zlewni Sopotni, obliczona odpowiednio dla wszystkich rozpatrywanych przypadków zmienia się w zakresie od 35,1 do 78,6 (tab. 5). Różnice w wartościach  $CN$  między zastosowaniem opisu pokrycia zlewni wyłącznie na podstawie danych CLC 2018 (**A1-3**) a uwzględnieniem powierzchni zajętej pod drogi i szlaki zrywkowe (**B1-3**) są niewielkie i wynoszą 0,4% dla warunków wilgotnościowych mokrych, 0,9% dla warunków przeciętnych i 1,7% dla warunków suchych. Większe wartości parametru  $CN$  otrzymujemy, obliczając parametr, opierając się na metodyce dostosowanej do powierzchni leśnych i uwzględniając drogi (**C1-3**). Różnice między wartościami  $CN$  dla pokrycia zlewni CLC 2018 (**A1-3**) a BDL (**C1-3**) wynoszą 6,1% dla warunków mokrych, 10,3% dla warunków przeciętnych i 17,4% dla warunków suchych. Uwzględnienie dróg w opisie pokrycia zlewni zwiększa parametr  $CN$  średnio o 1%, a użycie opisu opartego na cechach taksonomicznych drzewostanu i drogi powoduje wzrost parametru  $CN$  średnio o 11,3% w stosunku do wartości obliczonej dla pokrycia zlewni CLC 2018.

Otrzymane wyniki (tab. 5) wskazują na dominujący wpływ warunków wilgotnościowych na wartość średniego w zlewni parametru  $CN$ . Najniższe wartości  $CN$  otrzymano dla warunków suchych, najwyższe dla wilgotnych, niezależnie od użytego sposobu opisu pokrycia zlewni. W przypadku opisu pokrycia zlewni według standardu CLC 2018 przyrost wartości  $CN$  wynosi 57% i 111% odpowiednio między warunkami suchymi (**A1**) a przeciętnymi (**A2**) i suchymi (**A1**) a wilgotnymi (**A3**). Po uwzględnieniu powierzchni zajętej pod drogi i CLC 2018 wartość  $CN$  zmienia się o 56% i 109% odpowiednio między warunkami suchymi (**B1**) a przeciętnymi (**B2**) i suchymi (**B1**) a wilgotnymi (**B3**). A dla opisu pokrycia zlewni według BDL i powierzchni dróg wartość  $CN$  zmienia się o 48% i 91% odpowiednio między warunkami suchymi (**C1**) a przeciętnymi (**C2**) i suchymi (**C1**) a wilgotnymi (**C3**).

Parametr  $CN$  posłużył do wyliczenia maksymalnej retencji zlewni  $S$  (wz. 6) wyrażonej w [mm] warstwy wody. Dla analizowanych przypadków (tab. 2) retencja waha się od 69,1 mm do 469,6 mm (tab. 5). Podobnie jak w przypadku parametru  $CN$  obserwujemy zmienność retencji związaną zarówno ze sposobem opisu użytkowania terenu, jak i warunkami wilgotnościowymi gleby przed wystąpieniem opadu.

**Tabela 5.** Zmienność parametru *CN*, maksymalnej retencji zlewni *S* i opadu efektywnego *H* między analizowanymi przypadkami pokrycia terenu i wilgotności początkowej gleby

|                | A1    | A2    | A3    | B1    | B2    | B3    | C1    | C2    | C3    |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>CN</i>      | 35,1  | 55,1  | 74,1  | 35,7  | 55,6  | 74,4  | 41,2  | 60,8  | 78,6  |
| <i>S</i> [mm]  | 469,6 | 207,0 | 88,8  | 457,5 | 202,8 | 87,4  | 362,5 | 163,7 | 69,1  |
| <i>H</i> [mm]  | 1,37  | 21,63 | 54,72 | 1,67  | 22,36 | 55,34 | 5,50  | 30,34 | 64,32 |
| <i>H/P</i> [%] | 1,1   | 18,0  | 45,6  | 1,4   | 18,6  | 46,1  | 4,6   | 25,3  | 53,6  |

Obserwujemy spadek wartości retencji maksymalnej po uwzględnieniu w opisie pokrycia zlewni powierzchni zajętej pod drogi i szlaki zrywkowe (**B1-3**) o 1,6% dla warunków wilgotnościowych mokrych, 2,0% dla warunków przeciętnych i 2,6% dla warunków suchych w porównaniu z opisem CLC 2018 (**A1-3**). Podobnie mniejszą wartość retencji otrzymujemy, kiedy do obliczeń zastosujemy metodykę opracowaną dla powierzchni leśnych oraz uwzględnimy drogi (**C1-3**). Różnice między wartościami retencji dla pokrycia zlewni CLC 2018 (**A1-3**) a BDL (**C1-3**) wynoszą 22,2% dla warunków mokrych, 20,9% dla warunków przeciętnych i 22,8% dla warunków suchych. Uwzględnienie dróg w opisie pokrycia zlewni zmniejsza wyliczoną retencję maksymalną zlewni średnio o 2,1%, a użycie opisu opartego na cechach taksacyjnych drzewostanu i drogi powoduje spadek wartości retencji średnio o 22,0% w stosunku do wartości obliczonej dla pokrycia zlewni CLC 2018.

Podobnie jak w przypadku parametru *CN* widoczny jest istotny wpływ początkowych warunków wilgotnościowych zlewni na retencję maksymalną. Różnica między retencją zlewni dla warunków wilgotnościowych określonych jako suche a warunkami wilgotnymi jest pięciokrotna. W przypadku opisu pokrycia zlewni według standardu CLC 2018 spadek wartości retencji zlewni wynosi 56% i 81% odpowiednio między warunkami suchymi (**A1**) a przeciętnymi (**A2**) i suchymi (**A1**) a wilgotnymi (**A3**). Po uwzględnieniu powierzchni zajętej pod drogi i CLC 2018 wartość retencji spada również o 56% i 81% odpowiednio między warunkami suchymi (**B1**) a przeciętnymi (**B2**) i suchymi (**B1**) a wilgotnymi (**B3**). A w przypadku opisu pokrycia zlewni według BDL i powierzchni dróg wartość retencji zmniejsza się o 55% i 81% odpowiednio między warunkami suchymi (**C1**) a przeciętnymi (**C2**) i suchymi (**C1**) a wilgotnymi (**C3**).

Warto zauważyć, że obliczone wartości retencji maksymalnej zlewni odpowiadają znanym z literatury wynikom pomiarów empirycznych zapasu wody glebowej. Biorąc pod uwagę wyłącznie zlewnie górskie o dominującym pokryciu lasami, retencja aktualna w stocentymetrowej warstwie gleby kształtuje się na



poziomie 160–310 mm w Beskidzie Śląskim (Kucza i in. 2005; Starzak i in. 2015) czy 130–440 mm w Beskidzie Sądeckim (Starzak i in. 2019). Z kolei biorąc pod uwagę retencję potencjalną wyznaczoną dla tych samych gleb górskich, zmienia się ona od 295 mm do 411 mm w Beskidzie Śląskim (Kucza i in. 2005; Starzak i in. 2015) oraz 215 mm do 542 mm w Beskidzie Sądeckim (Starzak i in. 2019).

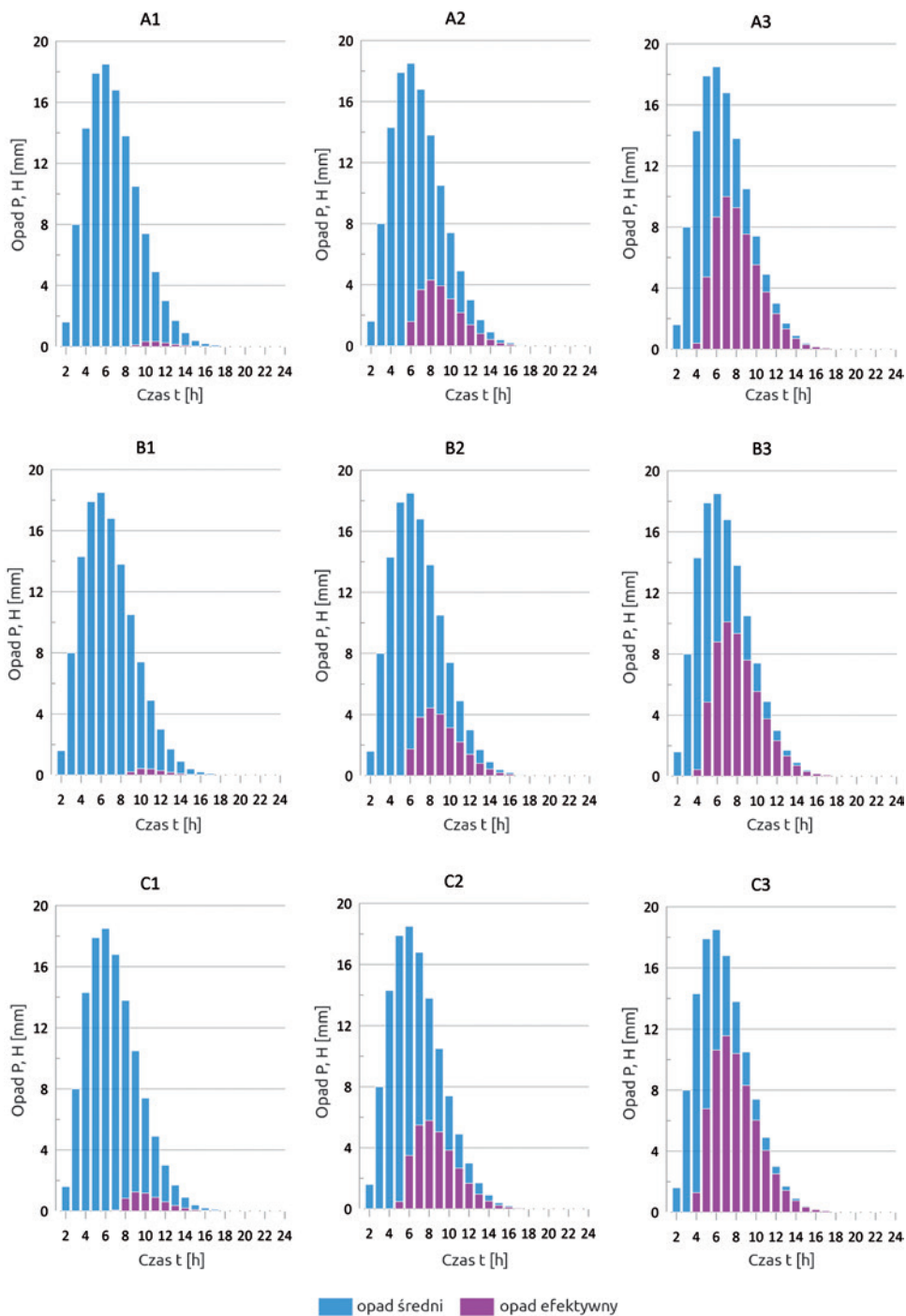
Zarówno wartości retencji aktualnej, jak i potencjalnej kształtują się na poziomie retencji maksymalnej zlewni obliczonej według metody SCS-CN dla warunków przeciętnych i suchych. Należy jednak podkreślić, że przytoczona retencja aktualna odpowiada zapasowi wody glebowej, a retencja potencjalna maksymalnej pojemności wodnej profilu glebowego o miąższości 100 cm. Z kolei maksymalna potencjalna retencja zlewni jest wyznaczana empirycznie na podstawie przepuszczalności gleb występujących na obszarze zlewni, sposobu użytkowania terenu, rodzaju uprawy oraz warunków wilgotnościowych gleby.

### 3.3. Opad efektywny

Wartości opadu efektywnego obliczone dla dziewięciu analizowanych przypadków zestawiono w tabeli 5 oraz w formie graficznej, w postaci hietogramów na rycinie 6. Otrzymane sumy opadu efektywnego dla opadu całkowitego  $P = 120$  mm zmieniają się w szerokich granicach od 1,4 mm do 64,3 mm. Opad efektywny w zależności od warunków wilgotnościowych i danych użytych do opisu pokrycia terenu stanowi od ok. 1% do prawie 54% opadu całkowitego.

Zmienność dla tych samych warunków wilgotności początkowej i różnych wariantów opisu rodzaju użytkowania jest nieduża. Różnica między pokryciem wyrażonym wyłącznie na podstawie danych z CLC 2018, a uwzględnieniem zinwentaryzowanej powierzchni dróg i szlaków zrywkowych powoduje wzrost wartości opadu efektywnego o ok. 27% dla warunków suchych, 3,3% przeciętnych i 1,1% dla warunków mokrych. W przypadku warunków suchych duży procentowy wzrost wartości opadu efektywnego w wartościach bezwzględnych stanowi tylko 0,3 mm warstwy wody. Tym samym w symulacjach przeprowadzonych przy użyciu modelu SCS-CN nie uwidacznia się znaczący wpływ szlaków komunikacyjnych na tworzenie się opadu efektywnego w zalesionej zlewni górskiej. Przy porównywaniu opisu pokrycia terenu według CLC 2018 i pokrycia terenu oszacowanego na bazie danych taksacyjnych drzewostanów BDL różnice wartości opadu efektywnego są większe: 318% dla warunków suchych, 40,5% przeciętnych i 17,5% mokrych. Wysokie różnice procentowe odpowiadają jednak małym różnicom wartości opadu (3,5 mm i 8 mm).

Duże różnice w wyliczonych wartościach opadu efektywnego widoczne są natomiast między warunkami zdefiniowanymi jako wilgotność początkowa gleby (AMC I, II, III). Wraz ze wzrostem wilgotności początkowej rośnie wartość parametru CN i spada retencja zlewni S (tab. 5). Dla wszystkich warunków pokrycia



Ryc. 6. Hietogramy opadu średniego i opadu efektywnego dla dobowego opadu całkowitego  $P = 120$  mm

zlewni spadek retencji zlewni między warunkami suchymi (AMC I) a mokrymi (AMC III) jest pięciokrotny. Pokazuje to wpływ stopnia retencji zlewni, czyli aktualnego wypełnienia umownego „zbiornika retencyjnego”, za jaki można uznać zlewnię hydrologiczną przed wystąpieniem opadu, na możliwość zatrzymania wody i spowalniania odpływu.

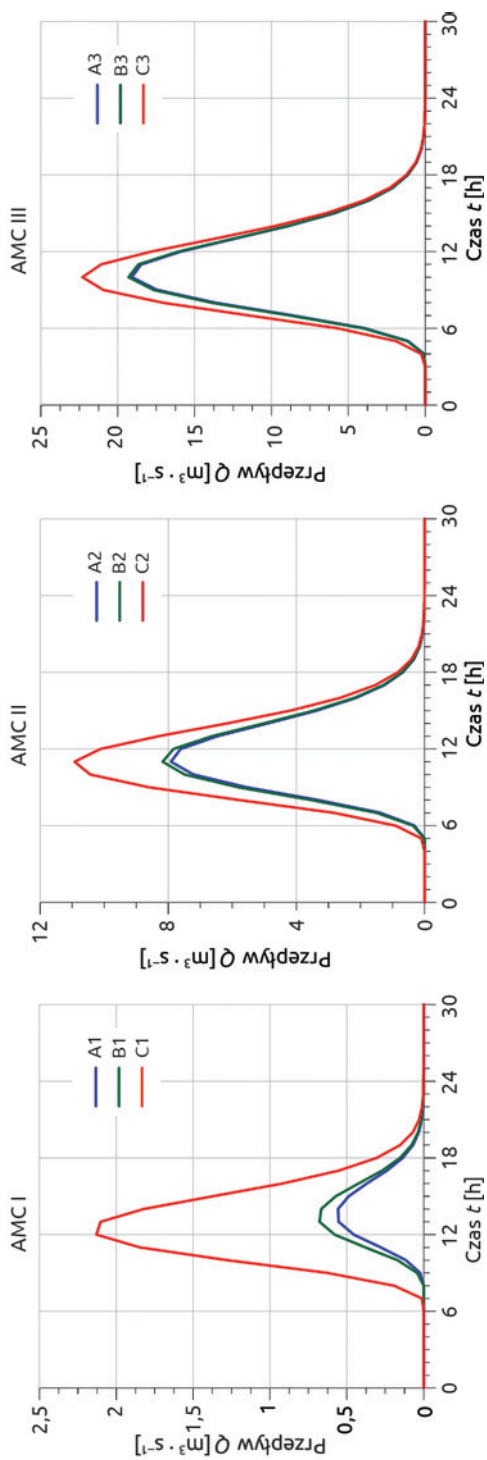
### 3.4. Transformacja opadu efektywnego w odpływ oparta na modelu Snydera

Hydrogramy odpływu ze zlewni Sopotni dla dziewięciu analizowanych przypadków (tab. 2) przedstawiono na rycinach 7–8. Należy je interpretować jako graficzny wyraz reakcji zlewni na opad o wysokości  $P = 120$  mm i czasie trwania  $D = 16$  h (ryc. 2 b).

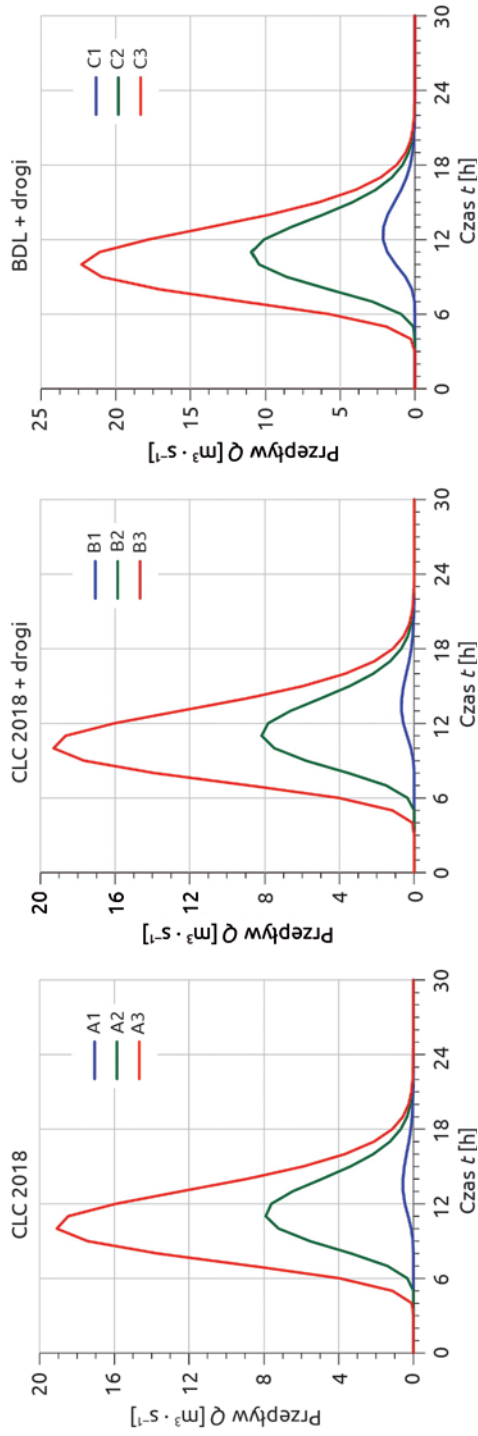
Jedną z najważniejszych informacji odczytanych z hydrogramu odpływu jest wartość maksymalnego przepływu  $Q_{max}$  (tab. 6). Jest to wielkość przepływu kulminacyjnego w profilu zamykającym zlewnię, będącego rezultatem opadu efektywnego. W tabeli 6 zestawiono również sumy objętości opadu efektywnego  $V_H$  i objętości odpływu  $V_Q$  wyliczone modelem Snydera. Obliczony wzorem (15) bilans masy dla zlewni Sopotni wynosi  $\delta = 4,22\%$ .

Otrzymane wyniki (tab. 6) pokazują bardzo dużą zmienność maksymalnego przepływu, kształtującą się od  $0,56 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  do  $22,29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Największe różnice widoczne są między wartościami wyliczonymi dla pokrycia zlewni według CLC 2018 a użyciem do opisu użytkowania terenu wartości krzywych CN zaproponowanych przez Okońskiego i Milera (2010). Wpływ dróg i szlaków zrywkowych widoczny jest przede wszystkim przy warunkach suchych i przeciętnych wilgotności inicjalnej gleby. Potwierdza to rolę sieci komunikacyjnej w modelowaniu odpływu wody ze zlewni. Jednocześnie obserwowane dla rozpatrywanych scenariuszy różnice w odpływie wody ze zlewni stanowią dowód na decydujący wpływ warunków wilgotności uprzedniej, która wyraża stopień wypełnienia umownego „zbiornika retencji”.

Analogicznie kształtuje się zróżnicowanie sumarycznej objętości odpływu wody ze zlewni, które zmienia się w zakresie od  $12\,050 \text{ m}^3$  do  $564\,895 \text{ m}^3$  (tab. 6). Wartości te dotyczą analizowanego hipotetycznego opadu deszczu o wysokości 120 mm i czasie trwania 16 godzin [h]. Przyrost sumarycznego odpływu wody ze zlewni między użyciem w modelu pokrycia terenu CLC 2018 (**A1-3**) a uwzględnieniem powierzchni zajętej pod drogi i szlaki zrywkowe (**B1-3**) wynosi 1,1% dla warunków wilgotnościowych mokrych, 3,4% dla warunków przeciętnych i 21,8% dla warunków suchych. Wartości te stanowią odpowiednio przyrost sumy odpływu o  $5485 \text{ m}^3$  (AMC III),  $6393 \text{ m}^3$  (AMC II) i  $2627 \text{ m}^3$ . Różnice między sumą odpływu wody wyliczoną z modelem Snydera dla pokrycia zlewni CLC 2018 (**A1-3**) a BDL (**C1-3**) wynoszą 17,6% dla warunków mokrych, 40,3% dla warunków przeciętnych i 301,1% dla warunków suchych. Wartości względne odpowiadają przyrostowi sumy odpływu o  $84353 \text{ m}^3$  dla



Ryc. 7. Hipotetyczne hydrogramy odpływu ze zlewni potoku Sopotnia dla różnych warunków wilgotności inicjalnej



Ryc. 8. Hipotetyczne hydrogramy odpływu ze zlewni potoku Sopotnia dla różnych warunków pokrycia terenu

**Tabela 6.** Zmienność maksymalnego przepływu  $Q_{max}$ , sumy objętości opadu efektywnego  $V_H$  i objętości odpływu, wyliczona modelem Snydera  $V_Q$  między analizowanymi przypadkami pokrycia terenu i wilgotności początkowej gleby

| Pokrycie terenu                             | Warunki wilgotnościowe   |   |   |
|---|--|---|---|
|   | AMC I (1)  | AMC II (2)  | AMC III (3)   |
| CLC 2018 (A)                                | $Q_{max} = 0,56 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$<br>$V_H = 12\,582 \text{ m}^3$<br>$V_Q = 12\,050 \text{ m}^3$ | $Q_{max} = 7,92 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$<br>$V_H = 198\,356 \text{ m}^3$<br>$V_Q = 189\,975 \text{ m}^3$  | $Q_{max} = 19,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$<br>$V_H = 501\,741 \text{ m}^3$<br>$V_Q = 480\,542 \text{ m}^3$ |
| CLC 2018<br>z wyodrębnionymi<br>drogami (B) | $Q_{max} = 0,68 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$<br>$V_H = 15\,325 \text{ m}^3$<br>$V_Q = 14\,677 \text{ m}^3$ | $Q_{max} = 8,18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$<br>$V_H = 205\,030 \text{ m}^3$<br>$V_Q = 196\,368 \text{ m}^3$  | $Q_{max} = 19,30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$<br>$V_H = 507\,468 \text{ m}^3$<br>$V_Q = 486\,027 \text{ m}^3$ |
| BDL<br>z wyodrębnionymi<br>drogami (C)      | $Q_{max} = 2,13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$<br>$V_H = 50\,461 \text{ m}^3$<br>$V_Q = 48\,329 \text{ m}^3$ | $Q_{max} = 10,93 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$<br>$V_H = 278\,218 \text{ m}^3$<br>$V_Q = 266\,463 \text{ m}^3$ | $Q_{max} = 22,29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$<br>$V_H = 589\,815 \text{ m}^3$<br>$V_Q = 564\,895 \text{ m}^3$ |

warunków AMC III, 76488 m<sup>3</sup> dla AMC II i 36279 m<sup>3</sup> dla ACM I. Uwzględnienie dróg w opisie pokrycia zlewni zwiększa odpływ średnio o 9%, a użycie opisu taksacyjnego drzewostanu i dróg powoduje wzrost średnio o 120% w stosunku do wartości obliczonej dla pokrycia zlewni CLC 2018.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Beskidy Zachodnie są obszarem Polski, na którym opady atmosferyczne przewyższają parowanie terenowe (Atlas Hydrologiczny 1987). Wzrastający wraz z wysokością terenu nadmiar opadów – w stosunku do możliwego parowania – w znacznej części musi odpłynąć systemem rzeczny. Spływ powierzchniowy jest generowany podczas nawalnych opadów deszczu lub intensywnego tajania pokrywy śnieżnej w porze wiosennej, szczególnie na większych nachyleniach stoków, kiedy szybkość spływu wody może być większa od możliwości wsiąkania wody do gleby. Największe znaczenie ma skoncentrowany spływ liniowy, którego źródłem może być sieć komunikacyjna związana z udostępnianiem kompleksów leśnych. Istotną rolę w takich warunkach odgrywa właściwe wytyczenie sieci dróg i szlaków oraz zastosowanie odpowiednich rozwiązań technicznych, których celem jest ograniczanie spływu powierzchniowego. Równorzędną rolę odgrywa przyjęcie odpowiedniego sposobu zagospodarowania lasu i dobór technologii pozyskania i transportu surowca drzewnego, które w ograniczonym stopniu wpłyną na generowanie spływu powierzchniowego na zlewni.

Do badania transformacji opadu w odpływ użyto metody SCS-CN oraz modelu matematycznego Snydera. Zastosowano różne warianty pokrycia terenu zlewni,



przygotowane na podstawie danych Corine Land Cover 2018, opisów taksacyjnych drzewostanów oraz pomiarów własnych dróg leśnych i szlaków zrywkowych.

Zastosowanie w modelu SCS-CN pokrycia terenu uwzględniającego obecność dróg i szlaków leśnych (1,7% powierzchni zlewni) zmniejsza wartość retencji maksymalnej zlewni oraz powoduje wzrost opadu efektywnego. Największe różnice widoczne są dla warunków wilgotnościowych suchych (AMC I), najmniejsze dla wilgotnych (AMC III). Dla warunków wilgotnościowych przeciętnych (AMC II) wysokość opadu efektywnego rośnie o ponad 3%, a retencja maksymalna zlewni maleje o 2%. Użycie w modelu Snydera opadu efektywnego obliczonego z uwzględnieniem powierzchni uszczelnionej dróg zwiększa maksymalny przepływ oraz sumaryczny odpływ wody ze zlewni. Największą zmianę obserwujemy dla warunków wilgotnościowych suchych, najmniejszą dla wilgotnych. Dla warunków wilgotnościowych przeciętnych (AMC II) jest to wzrost przepływu maksymalnego o 3,2%, co przekłada się na ok. 3,5% wzrost sumarycznego odpływu wody ze zlewni w stosunku do pokrycia terenu CLC 2018. Otrzymane wyniki dowodzą, że nawet niewielki procentowy przyrost powierzchni uszczelnionej lub o ograniczonych zdolnościach infiltracji wody w głąb gleby wpływa na charakterystykę i przebieg odpływu wody ze zlewni. Obserwowane różnice w wartościach retencji maksymalnej i opadu efektywnego wyliczone modelem CNC-CN dla różnych przypadków opisu pokrycia zlewni Sopotni wskazują na konieczność uwzględniania leśnej sieci komunikacyjnej jako odrębnej kategorii użytkowania zlewni.

Użycie do opisu pokrycia zlewni charakterystyk drzewostanu i szczegółowego rozróżnienia powierzchni leśnych wpłynęło istotnie na wartość parametru CN, retencję maksymalną oraz wartości hipotetycznego hydrogramu odpływu. Na podstawie otrzymanych wyników wydaje się właściwe stosowanie dla zlewni leśnych metodyki określania krzywych CN opracowanej przez Ignara (1986, 1993) i rozwiniętej przez Okońskiego i Milera (2010). Specyficzne warunki lokalne wyrażone charakterystyką drzewostanów istotnie różnicują wartość opadu efektywnego i parametry hipotetycznego hydrogramu odpływu.

Obserwowane dla rozpatrywanych scenariuszy różnice w odpływie wody ze zlewni dowodzą, że dominujący wpływ na odpływ mają początkowe warunki wilgotnościowe, wyrażone tzw. opadami uprzednimi. W znacznej mierze decydują one o możliwościach przyjęcia i retencji wody opadowej w zależności od ilości wody zgromadzonej we wszystkich formach retencji powierzchniowej i podpowierzchniowej na zlewni. Szczególne znaczenie ma retencja gruntowa wyrażona wilgotnością aktualną i poziomem wody gruntowej. Im jest wyższa przed wystąpieniem opadu, tym mniejsze znaczenie ma powierzchnia utwardzona, zajęta pod drogi i szlaki zrywkowe. Można to tłumaczyć tym, że w warunkach ograniczonej zdolności infiltracji gleby spływ powierzchniowy będzie generowany szybko na całej powierzchni zlewni.

Warto w tym kontekście zwrócić uwagę na formułowane dla gospodarki leśnej postulaty, których sprzeczność zauważa Suliński (2014). Z jednej strony stan retencji lasu powinien być jak najwyższy, tak aby woda była dostępna dla ekosystemu oraz stanowiła rezerwę na czas niedoborów opadów. Z drugiej strony, w tym samym czasie, umowny „zbiornik retencyjny”, za jaki można uznać las, powinien być pusty, aby zapewnić ochronę przeciwpowodziową i złagodzić skutki opadów katastrofalnych. Suliński (2014) konkluduje: „czy można oczekiwać, żeby «zbiornik na wodę», jak często określany jest las, był zarazem pełny i pusty?»

### *Źródło finansowania*

*Projekt Corine Land Cover 2018 w Polsce został zrealizowany przez Instytut Geodezji i Kartografii i sfinansowany ze środków Unii Europejskiej. Wyniki projektu zostały pozyskane ze strony internetowej Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska.*

### *Podziękowania*

*Autorzy składają podziękowania Pracownikom Nadleśnictwa Jeleśnia za okazaną pomoc podczas realizacji pracy.*

## Literatura

- Andreassian V. 2004. Waters and Forests: From Historical Controversy to Scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291, 1–27.
- Atlas Hydrologiczny Polski. 1987. J. Stachy. Red. IMGW, Warszawa.
- BDL 2019. Bank Danych o Lasach. <https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/> (dostęp: 10.2019).
- Brożek S., Zwydak M. 2010. Atlas gleb leśnych. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Butzen V., Seeger M., Wirtz S., Huemann M., Mueller C., Casper M., Ries J.B. 2014. Quantification of Hortonian Overland Flow Generation and Soil Erosion in a Central European Low Mountain Range Using Rainfall Experiments. *Catena*, 113, 202–212.
- Chang M. 2003. *Forest Hydrology*. CRC Press, Washington.
- Chow V.T. 1964. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Ciepielowski A., Dąbkowski S.L. 2006. Metody obliczania przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami). Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz.
- Ciepielowski A., Kucharska K., Wawrzoniak T. 2001. Kształtowanie się wzebrań opadowych w Sudetach Zachodnich. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa. Seria A2*, 916, 59–87.
- Ciołkosz A., Guzik C., Luc M., Trzepacz P. 2011. Zmiany użytkowania ziemi w Karpatach Polskich w okresie 1988–2006. IGiGP UJ, Kraków.

- Corine Land Cover. 2018. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. <http://clc.gios.gov.pl/> (dostęp:10.2019).
- Croke J., Hairsine P., Fogarty P. 2001. Soil Recovery from Track Construction and Harvesting Changes in Surface Infiltration, Erosion and Delivery Rates with Time. *Forest Ecology and Management*, 143, 3–12.
- Dorocki S., Krocak R., Bryndal T. 2019. Zmiany pokrycia terenu w polskich Karpatach na przełomie XX i XXI w. a poziom rozwoju lokalnego. *Przedsiębiorczość – Edukacja*, 15(1), 214–229.
- Douglas I., Bidin K., Balamurugan G., Chappell N.A., Walsh R.P.D., Greer T., Sinun W. 1999. The Role of Extreme Events in the Impacts of Selective Tropical Forestry on Erosion During Harvesting and Recovery Phases at Danum Valley, Sabah. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 354, 1749–1761.
- DVWK. 1984. Arbeitsanleitung zur Anwendung Niederschlag-Abflub-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Regeln 113. Teil II: Synthese. Verlag Paul Parey, Hamburg.
- Golonka J., Wójcik A. 1976. Szczegółowa Mapa Polski. 1030 Jeleśnia. 1:50000. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Golonka J., Wójcik A. 1978. Objasnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski. Arkusz Jeleśnia (1030). 1:50000. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Gołąb J. 2004. Influence of Forest Slope Road on Water Storage in Adjoining Soils, *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, Ser. Forestry. [www.ejpau.media.pl/series/volume7/issue2](http://www.ejpau.media.pl/series/volume7/issue2).
- Gołąb J. 2014. Water Runoff from Road Surface in Mountain Forests. *Ecological Questions*, 20, 63–69.
- Gołąb J., Badach E., Słowik-Opoka E. 2016. Przestrzenny rozkład wilgotności gruntu w obszarze przyległym do wylotu urządzeń odwadniających drogi leśne. *Sylwan*, 160(10), 861–870.
- Hess M. 1965. Piętra klimatyczne w polskich Karpatach Zachodnich. *Zeszyty Naukowe UJ. Prace Geograficzne*, 11.
- Hewlett J.D. 1982. *Principles of Forest Hydrology*. Georgia Iniversity Press, Athens.
- Ignar S. 1986. Określenie opadu efektywnego metodą SCS. Maszynopis, Katedra Budownictwa Wodnego, SGGW, Warszawa.
- Ignar S. 1993. Metodyka obliczania przepływów wezbraniowych w zlewniach nieobserwowanych. *Rozprawy Naukowe i Monografie SGGW*, 176.
- Klasyfikacja gleb leśnych Polski. 2000. Praca zbiorowa. Wydanie III PTG. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Kormanek M. 2004. Techniczne i przyrodnicze aspekty oddziaływania kół na wybrane gleby leśne. Praca doktorska. UR w Krakowie, maszynopis.
- Kucza J., Starzak R., Suliński J. 2005. Wstępne wyniki pomiaru zapasu wody w glebie pod świerczynami istebniańskimi. *Czasopismo Techniczne*, 10-Ś, 59–70.
- Kulig L. 1959. Hodowla lasu w górach. PWRiL, Warszawa.
- La Marche J.L., Lettenmaier D.P. 2001. Effects of Forest Roads on Flood Floks in the Deschutes River. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 115–134.

- Lambor J.** 1965. Podstawy i zasady gospodarki wodnej. PWN, Warszawa.
- Malmer A.** 1996. Hydrological Effects and Nutrient Losses of Forest Plantation Establishment on Tropical Rainforest Land in Sabah, Malaysia. *Journal of Hydrology*, 174, 129–148.
- Matuszkiewicz J.M.** 2008. Regionalizacja geobotaniczna Polski. IGiPZ PAN, Warszawa.
- McDonnell J.J.** 2003. Where Does Water Go When It Rains? Moving Beyond the Variable Scurce Area Konzept of Rainfall-Runoff Response. *Hydrological Processes*, 17, 1869–1875.
- Megahan W.F.** 1972. Subsurface Flow Interception by a Jogging Road In Mountains of Central Idaho. W: *Proceedings of the National Symposium on Watersheds In Transition*. American Water Resources Association, Fort Collins, CO, 350–365.
- Miler A.** 2012. Wpływ zmian użytkowania terenu na odpływy wezbraniowe z obszarów o znacznym zalesieniu Roztocza Środkowego. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2/I, 173–182.
- Miler A.** 2013. Kompleksowa metodyka oceny stosunków wodnych w lasach. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań.
- Mishra S.K., Singh V.P.** 2003. SCS-CN Method. Part II: Analytical treatment. *Acta Geophysica Polonica*, 51, 1, 107–123.
- Nash J.E.** 1958. Determining Runoff From Rainfall. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 10, 163–184.
- National Engineering Handbook. 1985. Hydrology, Section 4. US Dept. of Agriculture, National Resources Conservation Service, Washington D.C.
- Negishi J., Sidle R., Ziegler A., Noguchi S., Abdul Rahim N.** 2008. Contribution of Intercepted Subsurface Flow to Road Runoff and Sediment Transport in a Logging-Disturbed Tropical Catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 1174–1191.
- Okoński B.** 2006. Modelowanie odpływu bezpośredniego w zależności od stanów pokrycia zlewni leśnej. *Rozprawy Naukowe*, 374. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, Poznań.
- Okoński B., Miler T.** 2010. Adaptacja metody SCS-CN dla obliczania opadu efektywnego w zlewniach leśnych. W: *Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej*. T. 1. Monografie nr 68B. B. Więzik. Red. PAN Komitet Inżynierii Środowiska, Warszawa.
- Osuch B., Kowalik P.** 1998. Retencja wody w ściółce leśnej. W: *Materiały Konferencji „Las i woda”*. Kraków, 25–29 maja 1998. B. Osuch. Red. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 14–21.
- ORSIP. 2019. Pobrano z lokalizacji Otwarty Regionalny System Informacji Przestrzennej województwa śląskiego. <https://mapy.orsip.pl/imap/> (dostęp:10.2019).
- QGIS. 2019, marzec 20. Pobrano z lokalizacji Wolny i Otwarty System Informacji Geograficznej. <http://www.qgis.org/> (dostęp:10.2019).
- Piehl B.T., Beschta R.L., Pyles M.R.** 1988. Ditch-Relief Culverts and Low-Volume Forest Roads in the Oregon Coast Range. *Northwest Science*, 62, 3, 91–98.
- Piotrowski J., Piotrowska K.** 2004. Słownik jednostek litostratygraficznych Polski. T. III. Jednostki formalne mezozoiku i kenozoiku. T. Mardal. Red. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.

- Ponce V.M. 1989. *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Projekt docelowej Sieci Drogowej Nadleśnictwa Jeleśnia (stan na 20.12.2017). 2017. RDLP w Katowicach, Nadleśnictwo Jeleśnia, maszynopis.
- Soczyńska U. 1989. *Procesy hydrologiczne*. PWN, Warszawa.
- Swank W.T., Meyer J.L., Crossley D.A. Jr. 2001. *Long-Term Ecological Research: Coweeta History and Perspectives*. W: *Holistic Science the Evolution of the Geogria Institute of Ecology (1940–2000)*. G.W. Barrett, T.L. Barrett. Red. Sheridian Books, Ann Arbor, 143–163.
- Starzak R., Kucza J., Suliński J. 2015. *Dynamika zapasu wody w glebach pod wybranymi drzewostanami świerkowymi Beskidu Śląskiego w latach 1999–2004*. W: *Ekologiczne i hodowlane uwarunkowania przebudowy drzewostanów świerkowych w Beskidzie Śląskim i Beskidzie Żywieckim*. S. Małek. Red. Wydawnictwo UR, Kraków.
- Starzak R., Jaworski A., Suliński J., Skrzyszewski J., Pach M., Sypka P., Lach J. 2019. *Raport końcowy z realizacji tematu badawczego pt. „Zbadanie retencji wodnej drzewostanów górskich i podgórskich wytypowanych jako wzorcowe dla LKP Lasy Beskidu Sadeckiego oraz przyległych lasów podgórskich, w kontekście możliwości jej modulowania przez czynności gospodarcze”*. DGLP w Warszawie, maszynopis.
- Suliński J. 2002. *Podstawowe założenia w nauczaniu hydrologii leśnej*. *Sylwan* 12, 69–79.
- Suliński J. 2014. *Główne rodzaje retencji wodnej w lasach górskich*. W: *Retencja wody na Ślądczyźnie – znaczenie, stan i potrzeby*. A. Jucherski, D. Reško. Red. Ślądcie Zeszyty Naukowe, 2.
- Side R., Ziegler A., Negishi J., Nik A.R., Siew R., Turkelboom F. 2006. *Erosion Processes in Steep Terrain – Truths, Myths, and Uncertainties Related to Forest Management in Southeast Asia*. *Forest Ecology and Management*, 224, 199–225. 10.1016/j.foreco.2005.12.019.
- Wałęga A. 2012. *Próba opracowania zależności regionalnych do obliczania parametrów syntetycznego hydrogramu jednostkowego Snydera*. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 2(III), 5–16.
- Wałdykowski P., Krzemień K. 2013. *The Role of Road and Footpath Networks in Shaping the Relief of Middle Mountains on the Example of the Gorce Mountains (Poland)*. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 57, 4, 429–470.
- Weiler M., McDonnell J.J. 2004. *Virtual Experiments: a New Approach for Improving Process Conceptualization In Hill Slope Hydrology*. *Journal of Hydrology*, 285, 3–18.
- Wemple B.C., Jones J.A., Grant G.E. 1996. *Chanel Network Extension by Loggingroads in Two Bains, Western Cascades, Oregon*. *Water Resources Bulletin*, 32,6, 1195–1207.
- Zawada J. 1974. *Typologiczna charakterystyka lasów Romanki jako przyrodnicza podstawa zagospodarowania lasów Beskidu Żywieckiego*. *Prace IBL*, 489, 32–52.
- Zemke J. 2016. *Runoff and Soil Erosion Assessment on Forest Roads Using a Small Scale Rainfall Simulator*. *Hydrology*, 3, 25.
- Zielony R., Kliczkowska A. 2012. *Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.



Aktualne zagadnienia mechanizacji leśnictwa





# Automatyzacja procesu produkcji oraz kontrola parametrów sadzonek hodowanych w szkółkach kontenerowych

Mariusz Kormanek<sup>1</sup>, Stanisław Małek<sup>2</sup>, Jacek Banach<sup>2</sup>,  
Grzegorz Durło<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: rlkorma@cyf-kr.edu.pl

<sup>2</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Ekologii i Hodowli Lasu, Wydział Leśny, al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

<sup>3</sup> NaviGate sp. z o.o., ul. Wadowicka 8A, 30-415 Kraków

## Abstrakt

W artykule przedstawiono wyniki prac eksperymentalnych oraz wdrożeniowych, wykonanych w ramach badań zamawianych przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe (PGL LP), realizowanych na terenie gospodarstwa szkółkarskiego Nędza w Nadleśnictwie Rudy Raciborskie pt. „Optymalizacja produkcji sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym w wybranych szkółkach kontenerowych” (ER-2717-4/14). W szkółce kontenerowej skonstruowano i zamontowano uniwersalny system kontroli nawadniania i nawożenia na fragmencie pola produkcyjnego, działający na podstawie bilansu wody w komórkach kontenerów, przy uwzględnieniu parametrów mikroklimatycznych na polach produkcyjnych. Opracowano nowy harmonogram nawożenia dla sadzonek, uwzględniający rzeczywiste zapotrzebowanie roślin na pierwiastki. Do kontroli rozwoju sadzonek w sezonie wegetacyjnym zastosowano nowoczesne systemy analizy parametrów biometrycznych z wykorzystaniem programów WinRHIZO, WinSEEDLE i WinFOLIA, a także przyrządów do pomiaru wskaźnika powierzchni liści (LAI) oraz zawartości chlorofilu w liściach (SPAD), z uwzględnieniem standardowych procedur analiz parametrów mikroklimatycznych oraz oznaczeń chemicznych.

**Słowa kluczowe:** szkółkarstwo kontenerowe, nawożenie i nawadnianie, substrat, sadzonka

## 1. Wstęp

Na hodowlę sadzonek w szkółkach kontenerowych wpływa kilka czynników, niektóre z nich są niezależne lub częściowo niezależne od szkółkarza, zaś pozostałe można modyfikować. Mamy ograniczony wpływ na warunki środowiskowe, w których wznoszą się sadzonki, zaś duży na jakość materiału siewnego (Suszka 2000; Landis i in. 2010), organizację prac i sposób prowadzenia produkcji (Wesoły i Hauke 2009; Durło i in. 2016), dobór kontenera (Ruter i van de Werken 1991; Tian i in. 2017) i substratu do hodowli określonych gatunków (Nkongolo i Caron 1998; Abad i in. 2005; Buck i Evans 2010), a także prawidłowe wykonywanie nawadniania i nawożenia (Mathers i in. 2005; Beeson 2006; Landis i in. 2010; Lea-Cox i in. 2009; Dumroese i in. 2015; Durło i in. 2018). Specjalnie skomponowany substrat stosowany w produkcji szkółkarskiej, to jeden z ważnych elementów produkcji kontenerowej, szczególnie jego właściwości fizyczno-mechaniczne, które wpływają na wzrost i jakość produkowanych sadzonek (Strojny 2003; Szabla i Pabian 2003; Bilderback i in. 2005; Banach i in. 2013; Cabrera i Johnson 2014). Warunkami udanej hodowli są przede wszystkim właściwości powietrzno-wodne substratu oraz jego skład chemiczny (Rolbiecki i in. 2010; Leciejewski 2011).

Istotnym zagadnieniem w produkcji szkółkarskiej jest odpowiednie zarządzanie procesem nawadniania i nawożenia (Beeson 2006). Te zabiegi realizuje się przy zastosowaniu mobilnych systemów deszczujących, których wadami są wysokie zużycie energii oraz znaczne koszty elementów składowych, szczególnie w bardziej złożonych systemach. Ich zaletę stanowi natomiast możliwość zautomatyzowania procesu nawożenia i nawadniania, uwzględniającego rzeczywiste zapotrzebowanie sadzonek na składniki pokarmowe oraz wodę (Heiskanek 1995; Beeson 2006; Warsaw 2009; Durło i in. 2015). Do niedawna stosowanie zautomatyzowanych systemów kontroli nawożenia oraz nawadniania było rzadko spotykane ze względu na niedoskonałość aparatury pomiarowej, a szczególnie ograniczenia związane z czujnikami określającymi w sposób ciągły parametry substratu. Trudność dokonania pomiaru wynikała z dużej zawartości powietrza w podłożu i małej zawartości wody. Proporcja tych parametrów wpływa na dokładność pomiaru i decyduje o parametrach fizycznych substratu. Po opracowaniu zautomatyzowanej procedury pomiarowej pojawił się problem opłacalności stosowania systemów pomiarowych, tj. wysoki koszt aparatury przy niewielkiej skali produkcji materiału sadzeniowego w szkółkach kontenerowych. Obecnie cena zakupu systemów pomiarowych jest zdecydowanie niższa i dodatkowo sukcesywnie się obniża. Dlatego zastosowanie nowoczesnych systemów pomiarowych związanych z automatyzacją procesu nawożenia i nawadniania jest bardziej opłacalne, co może wpłynąć na redukcję kosztów produkcji sadzonek w kontenerach oraz zwiększyć ich jakość (Lea-Cox i in. 2009; Stowe i in. 2010).

W Polsce leśne szkółki kontenerowe wyposażone są najczęściej w standardowe systemy deszczujące, których działanie polega na przemieszczaniu się rampy deszczującej z zestawem dysz o zmiennej średnicy kropel dozujących ciecz roboczą. Rampa zamontowana na wózku jezdnym porusza się po torach położonych wzdłuż pola produkcyjnego, zaś część podająca ciecz znajduje się bezpośrednio nad roślinami. Systemy te są proste, wyposażone w podstawową automatykę, umożliwiają ciągłą pracę podczas przejazdu tam i z powrotem, najczęściej mają jedną lub dwie prędkości poruszania się, a zasilane są z sieci niskiego napięcia 230 V. Rozwiązania te z reguły pozwalają na zmianę długości pola zraszania, jak również na wyłączanie jednej ze stron rampy (lewej lub prawej), umożliwiają nawadnianie oraz dostarczenie środków ochrony lub wodnych roztworów nawozów mineralnych. Standardowe konstrukcje nie posiadają jednak rozwiązań, które umożliwiłyby wyłączenie aplikacji nawozu lub zastosowanie innego składnika na wybranym fragmencie pola lub na części, która znajduje się wewnątrz pola zraszania. Ten sam problem dotyczy zmiany pola nawadniania w obrębie powierzchni produkcyjnej. W większości przypadków użytkowane rampy deszczujące to urządzenia, w których uruchamianie i zatrzymywanie nawożenia lub nawadniania wykonywane jest każdorazowo manualnie przez personel obsługujący deszczownię. Kontrola ilości zużytej wody przez system deszczujący odbywa się zazwyczaj za pomocą wodomierza zainstalowanego w zbiorczym systemie pompującym. W tym przypadku wodomierz rejestruje globalne zużycie wody na wszystkich polach produkcyjnych, nie określa jednak ilości jej poboru przez poszczególne rampy deszczowe, z wyjątkiem sytuacji, gdy pracuje tylko jedna rampa. Ilość wody dostarczanej przez rampy wyliczana jest na podstawie czasu pracy poszczególnych segmentów, ciśnienia w instalacji oraz liczby i typu głowic zraszających. Obliczane w ten sposób wartości mogą się różnić od rzeczywistego zużycia wody ze względu na możliwe wahania ciśnienia w instalacji zasilającej, zniszczenie spowodowane użytkowaniem lub niedrożność końcówek zraszających oraz nieszczelności na poszczególnych odcinkach systemu transportującego wodę. Stosowanie systemów pomiarowych z indywidualnymi wodomierzami analogowymi jest z kolei kłopotliwe ze względu na konieczność notowania zużycia wody po zakończeniu cyklu deszczowania. Pozostałe parametry fizyczne wody są kontrolowane wrywkowo. Pierwszy to konduktancja określająca przewodność elektryczną wody, która służy do monitorowania stężenia roztworu składającego się z nawozu i wody. Drugi parametr to odczyn wody dostarczanej roślinom. Monitoring konduktancji odbywa się zazwyczaj w trakcie rozpoczęcia cyklu nawożenia i regulacji zespołu dozującego nawóz. Pomiar wykonuje się konduktometrem ręcznym w roztworze pobranym do pojemnika z ostatniej dyszy na rampie. Pomiar pH wody odbywa się z kolei w próbkach wody gromadzonych w plastikowych zbiornikach, przekazywanych następnie do laboratorium.

Trudności związane z kontrolą pola nawadniania i nawożenia oraz z oznaczaniem parametrów pracy deszczowni zasugerowały potrzebę opracowania systemu kontroli funkcjonowania deszczowni, a także unowocześnienia pomiaru parametrów ilości oraz jakości wody w wielosekcyjnych systemach nawadniania przy pomocy takich rozwiązań technicznych, które ułatwiłyby nadzorowanie systemu nawadniania sadzonek na polach produkcyjnych. Wykonanie tych modyfikacji w połączeniu z monitorowaniem parametrów substratów w komórkach kontenerów i parametrów morfologicznych hodowlanych sadzonek oraz chemizmu substratów i sadzonek pozwoliłoby na optymalizację procesu ich produkcji w szkółkach kontenerowych.

W pracy założono osiągnięcie następujących celów:

1. Wykonanie i przetestowanie funkcjonowania uniwersalnego systemu modyfikacji pola nawożenia i nawadniania przez rampę deszczującą, możliwego do zastosowania w standardowych systemach deszczujących wykorzystywanych w szkółkach kontenerowych.
2. Pomiar parametrów oraz ilości wody dostarczanej sadzonkom na pojedyncze pole produkcyjne przez stosowane w szkółce rampy deszczujące. Założono, że określanie oraz rejestracja zużycia wody będą odbywały się zdalnie, zaś wyniki pomiaru jakości wody deszczującej (konduktancja i pH) będą monitorowane na bieżąco, jak również zapisywane w pamięci urządzenia rejestrującego.
3. Dokonanie pomiaru wybranych parametrów fizyczno-mechaniczno-chemicznych substratu perlitowo-torfowego w kontenerach szkółkarskich oraz oceny cech morfologicznych i alokacji wybranych makropierwiastków w poszczególnych częściach sadzonek wyhodowanych na analizowanym substracie.

## 2. Materiały i metody

### 2.1. Uniwersalny system modyfikacji pola nawożenia i nawadniania rampy deszczującej

Założeniami konstrukcyjnymi systemu były prostota, autonomiczność i łatwość jego zamontowania do istniejącego w Gospodarstwie Szkółkarskim Nędzia systemu deszczowania, opartego na pracy ramp deszczujących typu HAB T1 BCC, a także możliwość szybkiego demontażu. Ze względów bezpieczeństwa założono, że system będzie zasilany napięciem z akumulatora 12 V, bez konieczności ingerencji w oryginalny układ sterownia deszczowni. System miał być tani, działać tylko nad poletkami badawczymi, nie modyfikując nawożenia i nawadniania na tej części pola, na której odbywała się produkcja sadzonek według standardowej procedury. Założono również możliwość zewnętrznej

kontroli nawożenia, odcinania nawożenia lub zmiany typu nawozu z jednoczesną automatyczną kontrolą nawadniania w celu zoptymalizowania zużycia wody na podstawie parametrów środowiska charakteryzujących warunki, w jakich następuje intercepcja cieczy roboczej. Urządzenie przetestowano w Gospodarstwie Szkółkarskim Nęcza w okresie od czerwca do października 2016 roku na 2 rampach deszczujących typu HAB-T1 szwedzkiej firmy BCC AB. Deszczownia tego typu to urządzenie w postaci dwuramiennej rampy o szerokości 25 m, której ramiona stabilizowane są stalowymi linkami połączonymi z pylonem zamocowanym na wózku. Całość układu porusza się po stalowym torowisku pomiędzy 2 sekcjami pola produkcyjnego. Na każdym z ramion zainstalowanych jest po 21 trójdyszowych obrotowych głowic zraszających oraz 2 skrajne głowice podające wodę sadzonkom rosnącym wzdłuż zewnętrznej krawędzi pola. Zaproponowany system działa, opierając się na automatycznej modyfikacji nawożenia, w taki sposób, aby okresowo następowało odcięcie dopływu roztworu nawozu, a w to miejsce doprowadzona była tylko woda (działanie niezbędne, gdyż podczas nawożenia rośliny otrzymują również wodę) lub inny nawóz.

Poza kontrolą nawożenia system modyfikował nawadnianie przez odcięcie podawania wody do przewodów zasilających zraszacze. Deszczownia przy wyłączonym systemie pracowała jak bez zamontowanego systemu, a proces nawożenia i deszczowania nie ulegał zmianie. W zależności od potrzeb, wykorzystując zaproponowany system, można modyfikować pole nawożenia i deszczowania w 3 wariantach. *Wariant I*, który przetestowano w 2016 roku na 2 rampach deszczujących, polegał na zamontowaniu dodatkowej rury rozpraszającej wodę na rampie, co pozwalało na modyfikowanie nawożenia i nawadniania na fragmencie pola deszczowania wewnątrz pola produkcyjnego, na dowolnej jego długości oraz szerokości. Na powierzchniach obsługiwanych przez każdą z ramp przygotowano po 2 prostokątne poletka testowe o szerokości 0,6 m i długości 10 m. Poletka usytuowane były wewnątrz pól produkcyjnych, jedno za drugim, w odległości 20 m od początku pola z przerwą pomiędzy nimi wynoszącą 15 m. *Wariant II*, nietestowany, polega na modyfikacji nawożenia i deszczowania połowy szerokości rampy deszczującej (lewe lub prawe ramię rampy, na długości pola produkcyjnego) przez sterowanie dopływem nawozu i wody do przewodu zbiorczego jednego z ramion rampy. *Wariant III*, również nietestowany, polega na modyfikacji nawożenia i nawadniania na całym polu produkcyjnym (na długości pól produkcyjnych, które obsługuje deszczownia) przez kontrolę dostarczania wody do przewodów zbiorczych, zasilających lewe i prawe ramię rampy. Na rycinach 1 i 2 przedstawiono testowane rozwiązania w *wariacie I*, z dodatkową rurą zasilającą, zamontowaną równoległe do przewodu rozpraszającego deszczowni na jednej z ramp (ryc. 1). Na dołączonej rurze zamontowano dysze zraszające na tej samej wysokości i w tej samej



a)



b)



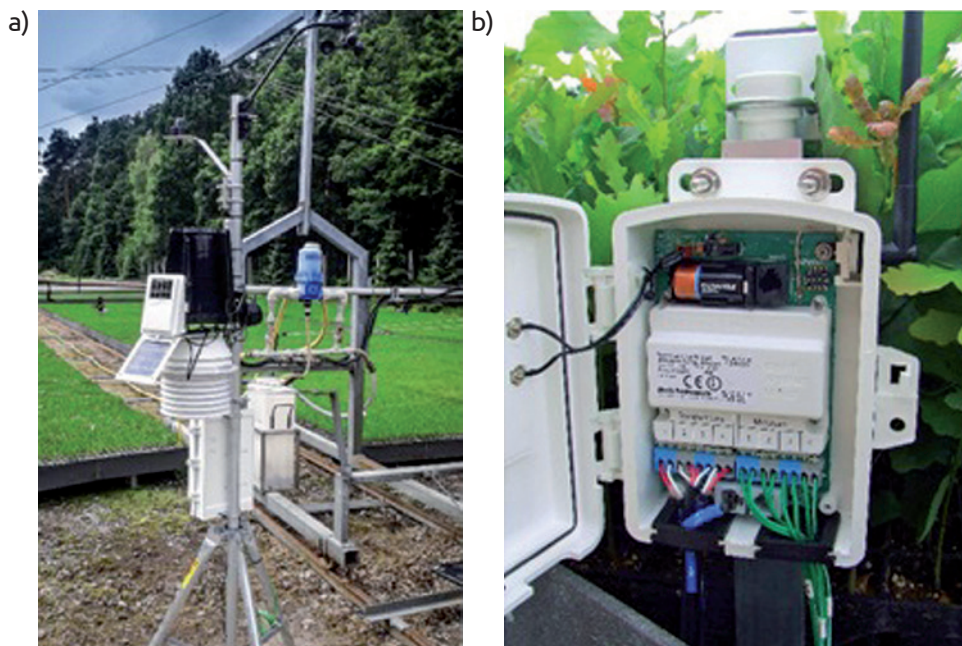
Ryc. 1. a) Domontowana dodatkowa rura wraz z głowicami zraszającymi;  
b) Układ sterowania oraz zawory sterujące dopływem wody i nawozu  
(fot. M. Kormanek)

odległości od wózka rampy, co dysze znajdujące się na rurze rozprowadzającej. Dodatkowa rura była zasilana cieczą doprowadzoną z układu hydraulicznego systemu, który zamontowano na wózku jezdnym rampy (ryc. 1 a), zaś 2 ze zdublowanych końcówek rozpylających na rurze rozprowadzającej rampy zaślepiono. Możliwe jest dublowanie większej liczby końcówek zraszających oraz umocowanie dodatkowej rury rozprowadzającej w dowolnym miejscu wzdłuż ramienia rampy deszczującej. Kontrola podawania nawozu i wody przez system we wszystkich wariantach odbywała się automatycznie za pomocą autonomicznego układu elektrycznego, który steruje elektrozaworami typu NO (normalnie otwarty) i NC (normalnie zamknięty). Zawory przyłączono do zasilania cieczą oraz do domontowanej rury elastycznymi przewodami (ryc. 1 b). Układ systemu zespolono z układem hydraulicznym rampy za pośrednictwem złączy GEKA. Złącza umożliwiają szybki demontaż systemu w razie jego awarii. Cieczą roboczą mogła być zarówno woda, jak i roztwór wodny nawozu, w zależności od tego, który z etapów hodowli sadzonek był realizowany na polu produkcyjnym. W celu monitorowania nawadniania zasilano jedną z cewek elektrozaworu (NO), zaś aby kontrolować nawożenie – dwie cewki elektrozaworów (NO i NC jednocześnie). Układ elektryczny systemu to autonomiczny układ zamontowany wraz z zasilającym go akumulatorem 12 V do wózka rampy deszczującej (ryc. 2 i 3).



Ryc. 2. Rampa deszczująca z zamontowanym systemem kontroli nawadniania i nawożenia (fot. M. Kormanek)





Ryc. 3. a) Stacja meteorologiczna (VP2PLUS); b) Rejestrator parametrów substratu (WLSMT 6345) (fot. G. Durło)

Po włączeniu układu elektrycznego systemem włącznikiem głównym i wybraniu trybu kontroli – nawożenia lub nawadniania (ryc. 1 b) – sterowanie działaniem systemu podczas poruszania się rampy deszczującej odbywa się automatycznie za pomocą dwóch włączników krańcowych, zamocowanych w obudowach na zewnętrznym obrysie wózka rampy deszczującej. Uruchomienie włączników odbywa się przez zespół odbojów (ryc. 2) wykonanych w postaci pionowych słupków wbijanych w ziemię. Na rozwiązania zastosowanych systemów uzyskano ochronę patentową – P. 421957 (2018) i P. 421958 (2018).

Układ elektryczny systemu wyposażono także w możliwość kontroli jego działania przez sygnał zewnętrzny, który jest uzyskiwany ze sterownika na podstawie pomiarów warunków atmosferycznych, wykonywanych w najbliższym sąsiedztwie pola z sadzonkami.

W trakcie testów przeprowadzanych w 2016 roku zastosowano sterownik wykonawczy sterujący nawadnianiem (typ DLIC 6560 WL firmy DAVIS), połączony z interfejsem radiowym (typ WWE 6316 firmy Davis).

Oba elementy układu były zasilane bateriami typu AA i poruszały się na wózku jeżdżącym rampy. Sterownik ten otrzymywał polecenia ze stacji meteorologicznej VP2PLUS firmy Davis (ryc. 3 a) o warunkach mikroklimatycznych wokół hodowanych sadzonek (prędkość i kierunek wiatru, wilgotność i tempe-

ratura powietrza, opad atmosferyczny, całkowite promieniowanie słoneczne, wilgotność substratu) oraz z radiowej autonomicznej stacji rejestrującej WLSMT 6345 firmy Davis (ryc. 3 b), kontrolującej działanie czujników wilgotności i temperatury substratu typu SMS 6440/6470 firmy Davis (Gaskin 1996; Charlesworth 2000).

Sterownik DLIC 6560 na podstawie zaprogramowanego algorytmu uwzględniającego informacje ze stacji meteorologicznej, analizującej przebieg bilansu wodnego (OPD-ETP), oraz informacji o parametrach substratu sterował nawadnianiem na kontrolowanym fragmencie pola produkcyjnego w zależności od wilgotności podłoża w komórkach kontenerów (Jensen i in. 1990; Langerud i Sandvik 1991; Synder i Pruitt 1992).

## 2.2. Pomiar parametrów i ilości dostarczanej sadzonkom wody na pojedyncze pole produkcyjne

W 2015 roku w Gospodarstwie Szkółkarskim Nędza do kontroli ilości wody przepływającej przez rampę deszczującą wykorzystano czujnik obrotowy typu GS4 WFS, model SEN02142B firmy Seedstudio z przetwornikiem hallotronowym, który zainstalowano w rurze głównej o dwucalowej średnicy (ryc. 4), zasilającej w wodę system nawadniania pola. Informacje z czujnika przekazywane były do układu przetwornika zliczającego obroty czujnika obrotowego, a następnie mikroprocesorowego rejestratora „Neptun” (produkt firmy Naweo sp. z o.o.), zaopatrzonego w łącze radiowe oraz modem z kartą telemetryczną, który przesyłał dane na stronę internetową (interfejs użytkownika). Dane z czujnika były zapisywane w pamięci i udostępniane on-line. Zastosowanie takiego systemu pomiarowego wymusiła potrzeba bieżącego monitorowania ilości zużytej wody, jak również kontroli i porównania z zaplanowanym harmonogramem deszczowania. Czujnik przepływu wody zamontowano na złączu zasilającym rampę deszczującą za pośrednictwem złącz GEKA. Wybór takiego sposobu zainstalowania układu pomiarowego, zamiast jego umocowania bezpośrednio na wózku rampy, związany był z brakiem dostępu do źródła zasilania, jak również możliwością występowania zakłóceń w transmisji danych przy przemieszczaniu się rampy deszczującej.

Zastosowany sposób montażu urządzenia pomiarowego uwzględniał także dodatkowy aspekt, tj. łatwy dostęp, niezależnie od aktualnego położenia rampy na polu produkcyjnym, umożliwiający szybki montaż i demontaż w przypadku awarii czujnika (złącza GEKA). System pomiaru pH oraz konduktancji oparto na urządzeniu pomiarowym CPC-461 firmy Elmetron z Zabrze (ryc. 5 b), wyposażonym w sondę pH oraz konduktometr, jak również w zintegrowany czujnik temperatury cieczy, na podstawie którego korygowano bieżące wskazania układu pomiarowego (ryc. 5 a).

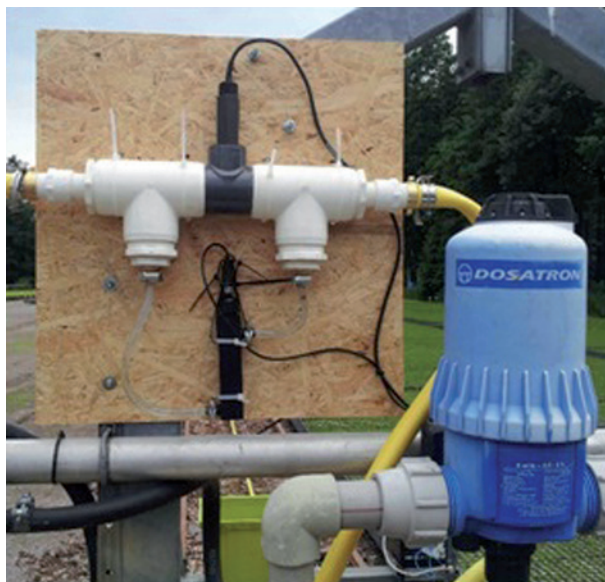


Ryc. 4. Czujnik pomiaru wody w rampie deszczującej zamontowany w rurze zasilającej deszczownię (fot. M. Kormanek)

Podobnie jak w przypadku pomiaru zużycia wody nie ingerowano w układ rozprowadzania cieczy na rampie deszczującej. Czujniki pomiarowe wraz z armaturą włączono w istniejący system za pomocą złączy GEKA i układu typu bypass. Takie rozwiązanie pozwalało na odłączenie systemu pomiarowego w dowolnym momencie bez konieczności przerywania pracy rampy deszczującej. Rejestrator CPC-461 na wyświetlaczu alfanumerycznym przedstawiał bieżące wartości odczynu, konduktancji oraz temperatury, jak również zapisywał je w pamięci urządzenia o pojemności 2000 rekordów dla każdego kanału. Cały układ pomiarowy wraz z armaturą zamontowany został na tablicy z płyty OSB, którą przytwierdzono do wózka rampy deszczującej. Takie rozwiązanie wymusiło konieczność kontroli przewodności wody za urządzeniem DOSATRON D8R dozującym nawóz, które było zamontowane na wózku rampy deszczującej.



a)



b)



Ryc. 5. a) System monitorowania pH oraz konduktancji zamontowany na wózku jezdnym rampy deszczującej na szkółce, czujniki; b) Rejestrator Elmetron (fot. G. Durło)



### 2.3. Pomiar wybranych parametrów fizyczno-mechaniczno-chemicznych substratu w kontenerach szkółkarskich oraz ocena cech morfologicznych i składu chemicznego sadzonek

Kontroli i monitorowania parametrów fizyczno-mechanicznych substratów w kontenerach szkółkarskich dokonano w latach 2014–2016 na substracie standardowo wykorzystywanym do produkcji. W badaniach kontenery napełniono podłożem perlitowo-torfowym (5% perlitu, 95% torfu) na automatycznej linii siewu szwedzkiej firmy BCC AB. Zastosowano 2 typy kontenerów: dla sosny zwyczajnej i świerka pospolitego – Hiko V120SS o wymiarach 10,9 cm × 35,2 cm × 21,6 cm (W × D × S) z 40 celami, każda o pojemności 120 cm<sup>3</sup>, a dla buka zwyczajnego i dębu szypułkowego – Hiko V265 o wymiarach 15,0 cm × 35,2 cm × 21,6 cm z 28 celami, każda o objętości 265 cm<sup>3</sup>.

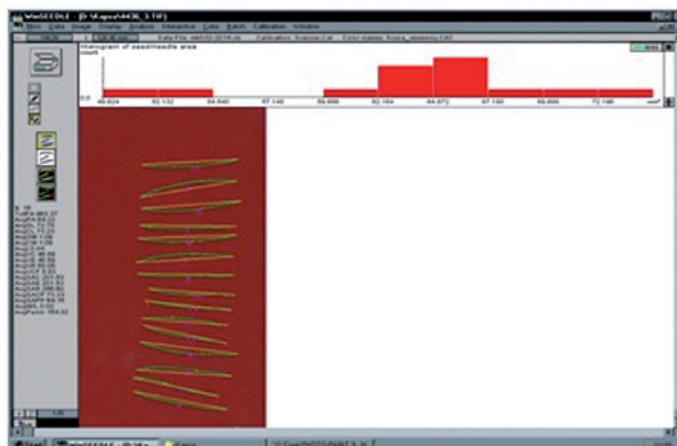
Na przykład w 2014 roku, w trakcie sezonu wegetacyjnego od maja do października, dla każdego gatunku pobierano w szkółce po jednym kontenerze w 12 terminach (w odstępach dwutygodniowych). Następnie określano parametry fizyczne substratu w 4 losowo wybranych celach, zaś w pozostałych mierzono zwięźłość substratu za pomocą penetrometru stożkowego Eijkelkamp (typ IB, 0606), ze stożkiem o średnicy podstawy równym 0,5 cala lub 0,33 cala (1,27 cm lub 0,78 cm) (ASAE Standards 1998; Ferree i in. 2004). Analizę parametrów fizycznych substratu poprzedzono pomiarem stopnia wypełnienia celu substratem, mierząc z dokładnością ± 1 mm poziom substratu w komórce. Następnie substrat nasączało wodą przez zanurzenie kontenera w pojemnikach z wodą (przez 12 h). Po nasączeniu podłoża kontenery wyjmowano z wody i przez ok. 20 minut odciekała tzw. woda grawitacyjna, luźno związana (Maciak i Liwski 1996). Następnie wyjmowano sadzonki i oddzielano ręcznie podłoże, tak aby nie uszkodzić systemu korzeniowego. Pobrany substrat ważono na wadze analitycznej z dokładnością ± 0,01 g, określając masę substratu nasączonego wodą. Substrat suszono przez 48 h (24 h w temp. 65°C oraz 24 h w temp. 105°C) i ponownie ważono, uzyskując masę substratu suchego. System korzeniowy sadzonek oddzielony od substratu wkładano do menzurki z wodą w celu określenia jego objętości, którą otrzymano z różnicy poziomu wody przed i po zanurzeniu w menzurce. Po wykonaniu pomiarów obliczano objętość rzeczywistą, którą zajmował substrat w komórce kontenera, z różnicy pomiędzy objętością teoretyczną (120 cm<sup>3</sup> dla Hiko 120SS i 265 cm<sup>3</sup> dla Hiko 265), objętością korzeni i objętością niezajętą przez substrat. Przy wykonywaniu pomiarów wzorowano się na metodyce Cannavo i in. (2011). W trakcie prowadzonych badań przeanalizowano łącznie 192 próbki substratu (12 powtórzeń × 4 gatunki × 4 cele w kontenerze). Wyznaczano również gęstości fazy stałej substratu metodą wygotowywania w kolbkach miarowych. Znając gęstość fazy stałej oraz gęstość objętościową substratu suchego w celi o nienaruszonej

strukturze, obliczano porowatość ogólną substratu, a następnie pojemność wodną i pojemność powietrzną. (Oleksynowa i in. 1993; Maciak i Liwski 1996; Myślińska 1999; Caron i in. 2007).

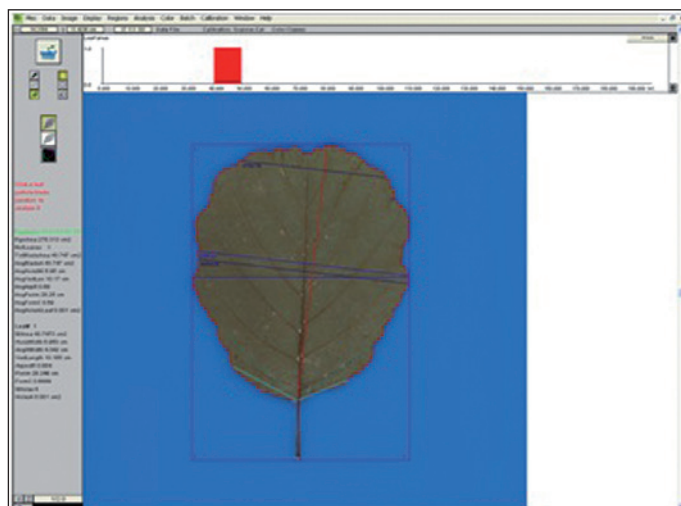
Poza parametrami fizyczno-mechanicznymi substratu mierzono parametry sadzonek, określając długość korzenia głównego, długość pędu z dokładnością do  $\pm 1$  mm oraz średnicę w szyjce korzeniowej z dokładnością do  $\pm 0,1$  mm, a także objętość systemu korzeniowego i suchą masę całkowitą sadzonek z dokładnością do  $\pm 1$  mg. W celu ustalenia powierzchni aparatu asymilacyjnego wykorzystano specjalistyczne programy do analizy obrazów, WinSEEDLE oraz WinFOLIA kanadyjskiej firmy Regent Inc., które umożliwiły określenie powierzchni pojedynczej igły lub liścia, a tym samym pozwoliły na uzyskanie informacji o łącznej powierzchni wszystkich analizowanych obiektów (ryc. 6 i 7).

W zależności od wersji programu (*Basic*, *Regular* lub *Pro*) można również dodatkowo określić różną liczbę parametrów liści i igieł (np. długość, szerokość, objętość, obwód, krzywiznę igły itp.). Ocena wielkości aparatu asymilacyjnego pozwala na poszukiwanie związku między tym parametrem sadzonek a ich jakością i późniejszą adaptacją po posadzeniu na uprawie. Do oceny morfologii systemu korzeniowego wykorzystywano program WinRHIZO (Regent Instruments Inc.). Zastosowanie tego oprogramowania w wersji *Basic* pozwala na określenie sumarycznej długości, powierzchni i objętości korzeni, przeciętną średnicę korzeni, liczbę wierzchołków, rozgałęzień i skrzyżowań, a w wersji *Regular* możliwa jest także analiza tych parametrów w zdefiniowanych klasach grubości korzeni (ryc. 8).

Największe możliwości analizy systemu korzeniowego daje wersja *Pro & Arabidopsis*, w której można określić poszczególne parametry z wykorzystaniem różnic w zabarwieniu korzeni, a także ocenić architekturę systemu korzeniowego z pomiarem fraktali. Przy użyciu tej wersji oprogramowania można przeprowadzić analizę topologii systemu korzeniowego, m.in. określić liczbę korzeni, kąt wyrastania pojedynczego korzenia, jego powierzchnię, długość, średnicę itp. Do analizy systemu korzeniowego sadzonek wystarczająca jest wersja *Regular* oprogramowania WinRHIZO, gdyż umożliwia określenie udziału korzeni drobnych (ang. *fine roots*), tj. korzeni o średnicy  $\leq 2$  mm, które wpływają na adaptację sadzonek po ich posadzeniu na uprawie. Przy zastosowaniu tych programów poszczególne części sadzonek powinny być skanowane na skanerze bezcieniowym z naświetleniem górnym, pozwalającym na skanowanie obiektów objętościowych. Standardowo stosowane są 2 typy urządzeń do pozyskiwania obrazów cyfrowych: skaner formatu A4 – Epson Perfection V800 Photo, wyposażony w system podwójnego obiektywu, zapewniający rozdzielczość  $6400 \times 6400$  dpi (gęstość optyczna 4,0 Dmax) oraz skaner formatu A3 – Epson Expression 12000XL Pro o rozdzielczości

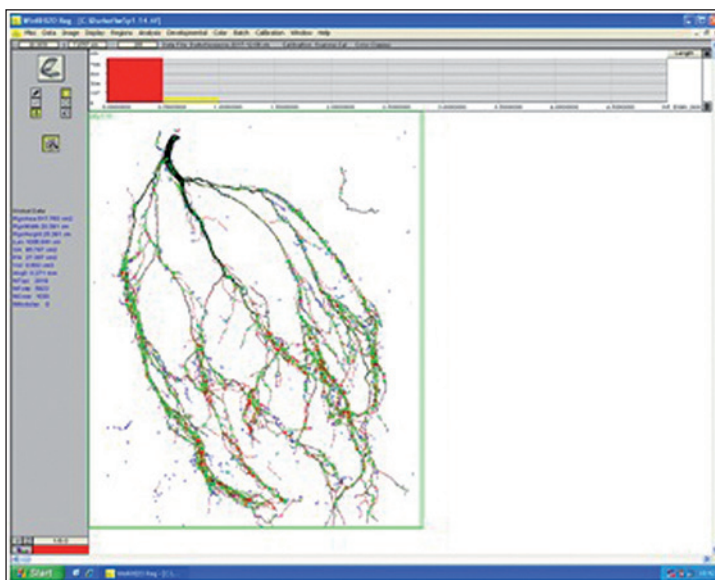


Ryc. 6. Zrzut ekranu obrazujący wynik analizy parametrów igieł w programie WinSEEDLE (źródło: analizy własne)



Ryc. 7. Zrzut ekranu obrazujący wynik analizy parametrów liścia w programie WinFOLIA (źródło: analizy własne)

2400 × 4800 dpi (gęstość optyczna 3,8 Dmax). Z reguły wykorzystywany jest skaner A4 ze względu na pięciokrotnie wyższy koszt zakupu skanera formatu A3. Do obydwu typów skanerów dołączane są specjalne tacki i system pozycjonowania, umożliwiające skanowanie umytych korzeni, które zanurzane są w wodzie w celu uzyskania wyraźniejszego obrazu systemu korzeniowego, co poprawia dokładność wykonywanych analiz.



Ryc. 8. Zrzut ekranu obrazujący wynik analizy parametrów systemu korzeniowego w programie WinRHIZO (źródło: analizy własne)

Do obydwu skanerów dostarczany jest również plik kalibracyjny, pozwalający na automatyczne przeliczenie wielkości pojedynczego piksela na jednostki metryczne (mm, mm<sup>2</sup>, cm, cm<sup>2</sup>), w zależności od zastosowanej rozdzielczości przy pozyskiwaniu obrazów analizowanych obiektów, co znacznie przyspiesza i ułatwia analizę danych pomiarowych.

W standardowo wykonywanym nawożeniu w szkółce stężenie nawozu dolistnego, docierające do pola produkcyjnego wraz z deszczowaniem (o jednakowej wielkości kropli), utrzymywane jest na jednakowym poziomie, tj. 0,6 mS/cm w całym okresie wegetacji. W praktyce zraszanie wraz z nawożeniem zależy od wilgotności substratu ocenianej subiektywnie. Stąd też w okresie obniżonej wilgotności podłoża dostarczane jest więcej pierwiastków niż by to wynikało z potrzeb sadzonek. W celu skontrolowania zawartości pierwiastków w sadzonkach w okresie realizacji badań przeprowadzono analizy chemiczne poszczególnych części sadzonek (aparatu asymilacyjnego, pędu i systemu korzeniowego) oraz substratu, w którym te sadzonki wzrastały. Systemy korzeniowe i pędy były cięte na drobniejsze części, tak aby przyspieszyć kolejny proces, którym było suszenie. Każdą część sadzonek suszono przez 48 godzin w temperaturze +65°C w suszarce laboratoryjnej. Następnie dokonano pomiaru suchej masy z dokładnością do 0,001 g za pomocą elektronicznej wagi Precisia 160M. Po określeniu masy zmielono poszczególne części sadzonek za pomocą młynka laboratoryjnego. Analizie poddano próbki materiału roślinnego, badane pod względem zawartości pier-

wiastków: C, N i S, z wykorzystaniem analizatora elementarnego LECO. Ze zmielonych próbek pobrano 0,5 g, które przy użyciu kwasu solnego i azotowego (w proporcji 7:3) poddano procesowi mineralizacji za pomocą urządzenia MARS. Czas mineralizacji 6 próbek wynosił 24 godziny. W zmineralizowanych próbkach za pomocą spektrometru emisyjnego ICP-OES wykonano spektrofotometryczny pomiar zawartości wybranych pierwiastków. Do prac obliczeniowych wykorzystano termin, w którym sadzonki uzyskały parametry „sadzunki wzorcowej”. Datę analiz zawartości pierwiastków określono na podstawie uzyskania pożądanego udziału sadzonek I i II klasy jakości ocenianej według normy PN-R-67025 (1999), który był wyznaczony granicą 90% dla sosny oraz 70% dla dębu (tab. 1).

Badano także wodę docierającą na pole produkcyjne – sumę opadu atmosferycznego i wody stosowanej do deszczowania, wody w zbiorniku retencyjnym, wody z ujęcia głębinowego, z roztworu nawozu dolistnego oraz ciecz uzyskaną z przesiąku spod kaset z wykorzystaniem analizatora Dionex 5000

**Tabela 1.** Terminy pobierania materiału sadzeniowego w latach 2014–2016 wraz z liczbą dni od wysiewu, tj. daty osiągnięcia przez sadzonki sosny zwyczajnej i dębu szypułkowego parametrów „sadzunki wzorcowej”

| 2014               |                       |     | 2015               |                       |     | 2016               |                       |     |
|--------------------|-----------------------|-----|--------------------|-----------------------|-----|--------------------|-----------------------|-----|
| Data poboru próbek | Liczba dni od wysiewu |     | Data poboru próbek | Liczba dni od wysiewu |     | Data poboru próbek | Liczba dni od wysiewu |     |
|                    | Sosna                 | Dąb |                    | Sosna                 | Dąb |                    | Sosna                 | Dąb |
| 15.05              | 66                    | 53  | 04.05              | 26                    | 34  | 25.04              | 40                    | 32  |
| 29.05              | 80                    | 67  | 18.05              | 40                    | 48  | 09.05              | 54                    | 46  |
| 12.06              | 94                    | 81  | 01.06              | 54                    | 62  | 23.05              | 68                    | 60  |
| 26.06              | 108                   | 95  | 15.06              | 68                    | 76  | 06.06              | 82                    | 74  |
| 10.07              | 122                   | 109 | 29.06              | 82                    | 90  | 20.06              | 96                    | 88  |
| 24.07              | 136                   | 123 | 13.07              | 96                    | 104 | 04.07              | 110                   | 102 |
| 07.08              | 150                   | 137 | 27.07              | 110                   | 118 | 18.07              | 124                   | 116 |
| 21.08              | 164                   | 151 | 10.08              | 124                   | 132 | 01.08              | 138                   | 130 |
| 04.09              | 178                   | 165 | 24.08              | 138                   | 146 | 16.08              | 152                   | 144 |
| 18.09              | 192                   | 179 | 07.09              | 152                   | 160 | 29.08              | 166                   | 158 |
| 02.10              | 206                   | 193 | 21.09              | 166                   | 174 | 12.09              | 180                   | 172 |
| 16.10              | 220                   | 207 | 05.10              | 180                   | 188 | 26.09              | 194                   | 186 |
| 30.10              | 234                   |     | 19.10              | 194                   | 202 | 10.10              | 208                   | 200 |
|                    |                       |     | 02.11              | 208                   | 216 | 24.10              | 222                   | 214 |

w celu równoczesnego analizowania zawartości anionów i kationów:  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ . Analizowano też stosowane nawozy, torf oraz wyjściowy substrat. Materiał doświadczalny, w zależności od jego rodzaju, został przebadany pod względem stężenia i ilości następujących składników chemicznych: C, N, S, P, Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B, oraz odczynu i przewodności elektrolitycznej w Laboratorium Geochemii Środowiska Leśnego i Terenów Przeznaczonych do Rekultywacji na Wydziale Leśnym Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Łącznie wykonano ponad 130 tys. pojedynczych oznaczeń. Materiał do analiz był pobierany ze szkółki od ok. połowy kwietnia do końca października (w zależności od roku produkcji), w odstępach dwutygodniowych.

Do kontroli wzrostu sadzonek w latach 2014–2016 wykorzystano również wskaźnik powierzchni liści (LAI) (ryc. 9 a) oraz zawartości chlorofilu w liściach (SPAD) (ryc. 9 b).

Pomiary powierzchni aparatu asymilacyjnego sadzonek drzew leśnych wykonano przy użyciu instrumentu LAI-2000 firmy LI-COR Bioscience. Serie pomiarowe zaplanowano w odstępach czasowych co 14 dni oraz w terminach, w których następowała widoczna zmiana cech morfologicznych sadzonek. Pomiary LAI wykonywano najczęściej w 15 powtórzeniach, zaczynając na początku maja, a kończąc w połowie listopada (ryc. 10).

Na jednym polu produkcyjnym wykonano w jednym sezonie wegetacyjnym 420 obserwacji, łącznie dla 4 gatunków, tj. sosny, świerka, buka oraz dębu szypułkowego. Uzyskano 1 680 wyników wraz z parametrami określającymi cechy przestrzenne szaty roślinnej (DIFN – udział powierzchni nieosłoniętej, GAPS – rozkład i częstość przerw w sklepieniu, MTA – średni kąt nachylenia liści) oraz odpowiadające im wartości błędów statystycznych. Wartości LAI stosowano jako zmienną w modelu intercepcji cieczy roboczej oraz opadu atmosferycznego, zaś zmienną modelu jako element optymalizacji czasu trwania pracy rampy deszczującej nad polem produkcyjnym. Ponadto indeks powierzchni liści LAI wykorzystywano do szacowania wielkości biomasy części nadziemnej sadzonek, niezbędnej do oceny efektywności nawożenia w trakcie trwania sezonu produkcyjnego.

Pomiary zawartości chlorofilu (*Leaf Greenness Index*) w aparacie asymilacyjnym sadzonek drzew leśnych wykonano przy użyciu instrumentu SPAD-502PLUS firmy Konica Minolta. Metoda pomiaru wykorzystuje różnicę gęstości optycznej przy 2 zakresach fal: 650 nm oraz 940 nm (ryc. 10). Pomiar indeksu SPAD wykonywany był co 14 dni na wybranych fragmentach pola produkcyjnego metodą bezinwazyjną. Seria pomiarowa obejmowała 20 liści wybranych losowo sadzonek na 10 polach testowych, każde o powierzchni 1 m<sup>2</sup> na powierzchni produkcyjnej sosny, świerka, buka oraz dębu szypułkowego.



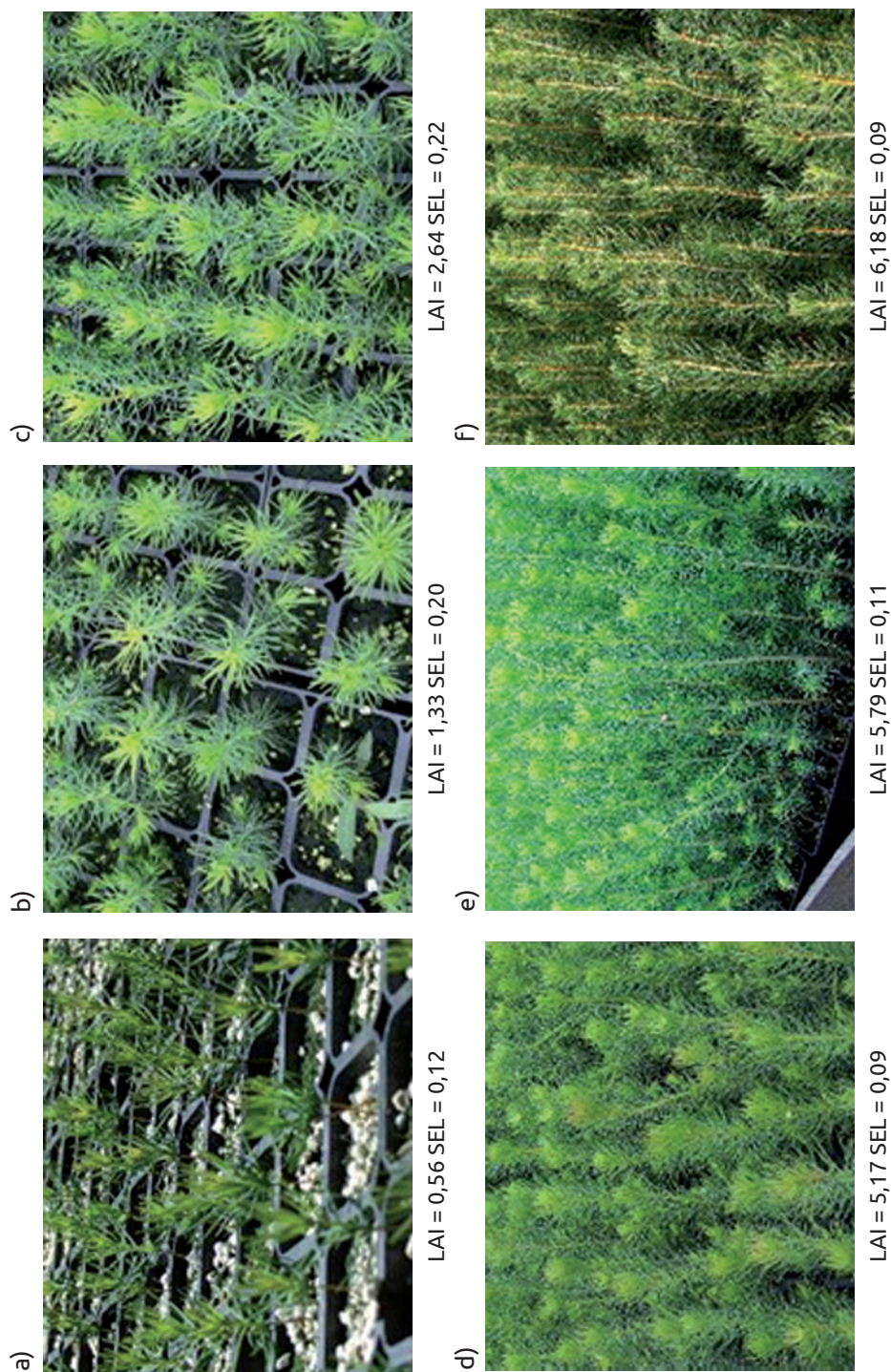
a)



b)



Ryc. 9. a) Pomiar wskaźnika powierzchni liści LAI na polu produkcyjnym sadzonek buka; b) Pomiar zawartości chlorofilu w liściach sadzonek dębu szypułkowego (fot. G. Durło)



Ryc. 10. Zmiany indeksu powierzchni igieł LAI sosny pospolitej na polu produkcyjnym w trakcie sezonu wegetacyjnego 2015 (fot. G. Durbo)

W tym samym czasie wybierano po 10 sadzonek każdego gatunku w całości i dokonywano pomiaru zawartości chlorofilu na wszystkich liściach. Te same sadzonki poddawano analizie na zawartość zielonego barwnika w laboratorium analiz chemicznych na Wydziale Leśnym Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Pomiary zawartości chlorofilu wykonywano głównie na potrzeby określenia dawek nawożenia azotowego w trakcie wzrostu i rozwoju sadzonek w okresie wegetacyjnym oraz w celu skontrolowania efektywności nawożenia dolistnego, realizowanego za pomocą ramp deszczujących.

### 3. Podsumowanie i wnioski

Wykonane prace konstrukcyjne oraz badawcze w latach 2014–2016 w Gospodarstwie Szkółkarskim Nęcza w Nadleśnictwie Rudy Raciborskie można podsumować następującymi wnioskami.

System kontroli nawadniania i nawożenia sadzonek zamontowany na rampie deszczującej HAB T1, w połączeniu z czujnikami monitorującymi wilgotność substratu oraz mikroklimat w pobliżu sadzonek, spełnił oczekiwania, a jego działanie było zgodne z założeniami konstrukcyjnymi. System nie wpływał na pracę rampy deszczującej poza kontrolowanymi poletkami, zaś na poletkach testowych umożliwił modyfikację procesu nawożenia i autonomiczną kontrolę nawadniania. Wyniki działania zaprojektowanego systemu okazały się korzystne z punktu widzenia gospodarki wodnej na polach testowych z sadzonkami produkowanymi zarówno w kontenerach Hiko 120SS, jak i w kasetach Hiko 256 (oszczędności ilości zużytej wody na poziomie 25% w sezonie obfitującym w opady). Zaletą systemu jest możliwość modyfikacji harmonogramu nawożenia i nawadniania z uwagi na odmienne wymagania roślin w przypadku, gdy na tym samym polu produkcyjnym odbywa się hodowla sadzonek w różnych typach kontenerów, co czyni rozwiązanie uniwersalnym i znacznie oszczędza czas pracy rampy. Na wykonane rozwiązanie uzyskano ochronę patentową P. 421957 (2018) i P. 421958 (2018).

Zastosowane rozwiązanie techniczne w zakresie monitorowania parametrów wody deszczującej okazało się stosunkowo proste w realizacji. Koszt urządzeń nie był wysoki, zważywszy, że możliwe jest rozbudowanie systemu do monitorowania innych ramp deszczujących z wykorzystaniem zastosowanego sterownika. System dawał możliwość kontroli pracy pojedynczej rampy deszczującej w dowolnym kroku czasowym, a jego elementy składowe (czujniki, rejestratory, interfejsy) były i są łatwo dostępne na rynku. Za dodatkowe zalety automatycznego systemu kontroli przepływu oraz jakości cieczy roboczej uznać należy także monitorowanie jakości wody deszczującej, regulację dawkowania nawozu, szybkie wykrycie awarii lub nieprawidłowości w dzia-



łaniu rampy deszczującej, jak również systemu dozującego nawóz do wody deszczującej.

Zastosowana metodyka wyznaczenia parametrów fizyko-mechanicznych substratu pozwoliła na monitorowanie zmian tych parametrów w trakcie wzrostu sadzonek. Uzyskane wyniki wskazują na dość znaczne wahania parametrów, co może mieć związek z różnicowaniem się jakości produkowanych sadzonek.

Analiza wielkości aparatu asymilacyjnego przy wykorzystaniu oprogramowania WinSEEDLE oraz WinFOLIA pozwoliła na określenie jego zmian w trakcie sezonu wegetacyjnego, skorelowanie jego wielkości z jakością wyhodowanych sadzonek, a także na weryfikację poprawności określania tego parametru bezpośrednio na polu produkcyjnym przy wykorzystaniu laiometru LAI-2000 firmy LI-COR Bioscience. Za pomocą programu WinRHIZO określono wielkość (sumaryczną długość) systemu korzeniowego dla sadzonek analizowanych gatunków, wyhodowanych w kontenerach Hiko V120ss i V265. Możliwa była również ocena występowania korzeni drobnych, tj. o średnicy  $\leq 2$  mm, w której wykazano udział tej frakcji grubościowej, kształtujący się u sadzonek wszystkich analizowanych gatunków i wariantów doświadczalnych na poziomie powyżej 95%.

Na podstawie analiz chemicznych oraz wyników pomiarów biometrycznych ustalono: średnie zapotrzebowanie sadzonek na poszczególne pierwiastki dla wyznaczenia terminu uzyskania parametrów „sadzonki wzorcowej” oraz udział lokowania pierwiastków w poszczególnych częściach sadzonek, w całym okresie ich wzrostu, jak również potencjalne źródła tych pierwiastków dla nich. Na tej podstawie oszacowano wielkości dawek poszczególnych pierwiastków niezbędnych dla uzyskania parametrów „sadzonki wzorcowej”, określono ilość wymywanych składników poza pole produkcyjne oraz zaproponowano alternatywny sposób nawożenia wraz z harmonogramem i sposobem kontroli sadzonek, przetestowany z pozytywnym rezultatem w 2016 roku.

Uzyskano informacje, dzięki którym możliwe było precyzyjne wyznaczenie parametrów bilansu wodnego na polu produkcyjnym, co z kolei pozwoliło na dopasowanie objętości cieczy roboczej do potrzeb roślin. Ponadto nowoczesne, bezinwazyjne metody oceny cech fenotypowych roślin umożliwiły ocenę potrzeb wodnych oraz nawozowych sadzonek drzew leśnych na każdym etapie ich produkcji w warunkach kontrolowanych.

### *Źródło finansowania*

*Badania zostały wykonane w ramach tematu „Optymalizacja produkcji sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym w wybranych szkółkach kontenerowych” (temat nr ER-2717-4/14), finansowanego przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe.*

## Podziękowania

*Składamy podziękowania pracownikom Nadleśnictwa Rudy Raciborskie oraz kierownictwu i pracownikom Gospodarstwa Szkółkarskiego Nędza za umożliwienie i pomoc w wykonaniu projektu opisanego w niniejszej pracy.*

## Literatura

- Abad M., Fornes F., Carrión C., Noguera V. 2005. Physical Properties of Various Coconut Coir Dust Compared to Peat. *HortScience*, 40(7), 2138–2144.
- ASAE Standards. 1998. Soil Cone Penetrometer. W: Standards Engineering Practices Data. American Society of Agricultural Engineers, 820–821.
- Banach J., Skrzyszewska K., Świeboda Ł. 2013. Wpływ podłoża na wzrost jednoletnich i dwuletnich sadzonek jodły pospolitej i buka zwyczajnego produkowanych w kontenerach styropianowych. *Leśne Prace Badawcze*, 74(2), 117–125.
- Beeson R.C. 2006. Relationship of Plane Growth and Actual Evapotranspiration to Irrigation Frequency Based on Management Allowed Deficits for Container Nursery Stock. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 131(1), 140–148.
- Bilderback T., Warren S., Owen J., Albano J.P. 2005. Healthy Substrates Need Physicals Too! *HortTechnology*, 15(4), 747–751.
- Buck J.S., Evans M.R. 2010. Physical Properties of Ground Parboiled Fresh Rice Hulls Used as a Horticultural Root Substrate. *HortScience*, 45(4), 643–649.
- Cabrera P.I., Johnson J.R. 2014. Fundamentals of Container Media Management: Part 1. Rutgers Fact, sheet FS 812. The State University of New Jersey.
- Cannavo P., Hafdhi H., Michal J.-C. 2011. Impact of Root Growth on the Physical Properties of Peat Substrate Under a Constant Water Regimen. *HortScience*, 46(10), 1394–1399.
- Caron J., Elric C.E., Michel J.-C., Naasz R. 2007. Physical Properties of Organic Soils and Growing Media: Water and Air Storage and Flow Dynamics. W: Soil Sampling and Methods of Analysis. M.R. Carter, E.G. Gregorich. Red. CRC Press, Boca Raton, 885–912.
- Charlesworth P. 2000. Soil Water Monitoring. National Program for Irrigation Research and Development. CSIRO Land and Water, 101.
- Cook A., Bilderback T., Lorscheider M. 2004. Physical Property Measurements in Container Substrates. A Field Quantification Strategy. SNA Research Conference, 49, 102–104.
- Dumroese R.K., Monville M.E., Pinto J.R. 2015. Using Container Weights to Determine Irrigation Needs: a Simple Method. *Native Plants*, 16(1), 67–71.
- Durło G., Jagiełło-Leńczuk K., Kormanek M., Małek S., Banach J. 2018. Supplementary Irrigation at Container Nursery. *Forest Research Papers*, 79(1), 13–21.
- Durło G., Jagiełło-Leńczuk K., Kormanek M., Małek S., Banach J., Dudek K. 2016. Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to Monitor the Physiological Condition of

- Plants in a Nursery. W: Research of Cutting Mechanisms in the Processing Wood Materials. Project No. 1/08/26/2015. J. Krilek Red. VEGA, Zvolen, Słowacja, 17–27.
- Durło G., Jagiełło-Leńczuk K., Banach J., Kormanek M., Małek S., Dudek K., Barszcz J., Skowrońska I.** 2015. Gospodarka wodna sadzonek sosny pospolitej (*Pinus sylvestris* L.) produkowanej w technologii kontenerowej. *Acta Agraria et Silvestria*. *Silvestris*, 53, 25–37.
- Ferree D.C., Streeter J.G., Yuncong Y.** 2004. Response of Container-grown Apple Trees to Soil Compaction. *HortScience*, 39(1), 40–48.
- Gaskin G.D., Miller J.D.** 1996. Measurement of Soil Water Content Using Simplified Impedance Measuring Technique. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63, 153–160.
- Heiskanek J.** 1995. Water Status of Sphagnum Peat and a Peat-perlite Mixture in Containers Subjected to Irrigation Regimes. *HortSciences*, 30(2), 281–284.
- Jensen M.E., Burman R.D., Allen R.G.** Red. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, Manual of Practice, 70.
- Landis T.D., Dumroese R.K., Haase D.L.** 2010. The Container Tree Nursery Manual, 7. Seedling Processing Storage and Outplanting. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Washington D.C.
- Langerud B.R., Sandvik M.** 1991. Transpiration of Containerized *Picea abies* Seedlings Grown with Different Irrigation Regimes. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 6, 79–90.
- Lea-Cox J.D., Ristvey A.G., Ross D.S., Kantor G.F.** 2009. Deployment of Wireless Sensor Network for Irrigation and Nutrient Management in Nursery and Greenhouse Operations. SNA Research Conference, 54, 28–34.
- Leciejewski P.** 2011. Nawadnianie szkółek leśnych. Biblioteczka Leśniczego, 330.
- Maciak F., Liwski S.** 1996. Ćwiczenia z torfoznawstwa. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Mathers H.M., Yeager T.H., Case L.T.** 2005. Improving Irrigation Water Use in Container Nurseries. *HortTechnology*, 15(1), 8–12.
- Myślińska E.** 1999. Parametry fizyczne torfów i ocena metod ich oznaczania. *Przegląd Geologiczny*, 47(7), 676–682.
- Nkongolo N.V., Caron J.** 1999. Bark Particle Sizes and the Modification of the Physical Properties of Peat Substrates. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(1), 111–116.
- Oleksynowa K., Tokaj J., Jakubiec J.** 1993. Przewodnik do ćwiczeń z gleboznawstwa i geologii. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Krakowie, Kraków.
- P. 421957. 2018. Prawo ochronne pt. „System zraszania i nawożenia dolistnego, zwłaszcza sadzonek w szkółkach leśnych i ogrodniczych”. Twórcy: Kormanek M., Małek S., Durło G., Banach J. Data zgłoszenia: 20.06.2017. Nadane dnia: 18.10.2018.
- P. 421958. 2018. Prawo ochronne pt. „System zraszania, zwłaszcza sadzonek w szkółkach leśnych i ogrodniczych”. Twórcy: Kormanek M., Małek S., Durło G., Banach J. Data zgłoszenia: 20.06.2017. Nadane dnia: 18.10.2018.
- Paquet J.M., Caron J., Banton O.** 1993. *In situ* Determination of the Water Desorption Characteristics of Peat Substrates. *Canadian Journal of Soil Science*, 73, 349–339.



- PN-R-67025: 1999. Materiał sadzeniowy. Sadzonki drzew i krzewów do upraw leśnych i na plantacje. Polski Komitet Normalizacyjny.
- Rolbiecki S., Musiał M., Fórmaniak A., Ryterska H.** 2010. Próba porównania potrzeb nawadniania szkółek leśnych w latach 2000–2009 w okolicach Bydgoszczy, Chojnic i Torunia. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 14, 23–30.
- Ruter J.M., van de Werken H.** 1991. Container Design Influences Physical Parameters of Different Media. *HortTechnology*, 12, 76–78.
- Snyder R.L., Pruitt W.O.** 1992. Evapotranspiration Data Management in California. Irrigation and Drainage Session Proceedings Water Forum, ASCE. 2–6 August 1992, Baltimore, MD., 128–133.
- Stowe D.C., Lamhamedi M.S., Carles S., Fecteau B., Margolis H.A., Renaud M., Bernier P.Y.** 2010. Managing Irrigation to Reduce Nutrient Leaching in Containerized White Spruce Seedling Production. *New Forest*, 40(2), 185–204.
- Strojny Z.** 2003. Podłoże w pojemnikowej produkcji szkółkarskiej. *Szkółkarstwo*, 4, 61–67.
- Suszcza B.** 2000. Nowe technologie i techniki w nasiennictwie leśnym. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Szabla K., Pabian R.** 2003. Szkółkarstwo kontenerowe. Nowe technologie i techniki w szkółkarstwie leśnym. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Tian N., Fang S., Yang W., Shang X., Fu X.** 2017. Influence of Container Type and Growth Medium on Seedling Growth and Root Morphology of *Cuclocarya paliurus* During Nursery Culture. *Forest*, 8(387), 1–16.
- Warsaw A.L.** 2009. Irrigation Management in Container Nursery Production to Reduce Water Use, Runoff and Offsite Movement of Agricultural Chemicals. MSc Thesis. Michigan St. University. UMI 1468379, ProQuest LLC Edit., MI 1346.
- Wesoły W., Hauke M.** 2009. Szkółkarstwo od A do Z. Centrum Informacji Lasów Państwowych, Warszawa.

# Systemy sterowania i kontroli pracy w nowoczesnych ciągnikach i maszynach rolniczych i leśnych

Mariusz Kormanek

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: rlkorma@cyf-kr.edu.pl

## Abstrakt

Współczesne ciągniki oraz maszyny rolnicze i leśne wyposażone są w najnowsze technologie elektroniczne i informacyjne, które zarządzają pracą silnika, ale też pracą pozostałych podzespołów tych urządzeń. W artykule przedstawiono aktualnie stosowane systemy sterowania i kontroli pracy ciągników i maszyn, działające na podstawie szeregowego protokołu komunikacyjnego CAN (Controller Area Network). Scharakteryzowano CAN oraz główne standardy opierające się na tym systemie, tj. SAE J1939 i ISO 11783. Na przykładach przedstawiono zastosowanie CAN w ciągnikach oraz maszynach rolniczych i leśnych, a także omówiono inne systemy możliwe do przyłączenia do sieci zgodnych z CAN, takie jak: LIN, FlexRay oraz MOST.

**Słowa kluczowe:** sterowanie i kontrola maszyn, CAN, SAE J1939, ISO 11783, LIN, FLEX, MOST

## 1. Wstęp

We współczesnych ciągnikach i maszynach rolniczych oraz leśnych stosuje się najnowsze technologie elektroniczne i informacyjne zarządzające nie tylko pracą samego silnika, ale również pracą pozostałych podzespołów, w które wyposażone są te urządzenia. Nowoczesne rozwiązania to efekt intensywnych prac badawczo-rozwojowych oraz badań naukowych. Pierwsze układy elektroniczne pojawiły się w ciągnikach rolniczych już w latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia, zaś prawdziwy przełom nastąpił w latach osiemdziesiątych (Fellmeth 2003; Kalmari i in. 2013; Majcher 2014). Do głównych celów stosowa-

nia skomplikowanych podzespołów elektronicznych w ciągnikach i maszynach należą: poprawa wydajności pracy, zmniejszenie zużycia paliwa, zwiększenie funkcjonalności maszyn, podniesienie komfortu pracy operatora, zmniejszenie negatywnego oddziaływania na środowisko dzięki niższej emisji szkodliwych substancji oraz ułatwiona diagnostyka maszyn (Gomółka i in. 2008; Mamala i in. 2008; Majcher 2014; Chomik i Juściński 2017).

Lata rozwoju techniki doprowadziły do powstania szeregu urządzeń kontrolujących prace poszczególnych podzespołów maszyn. Podstawowy problem, z jakim w początkowym okresie wprowadzania elektroniki do wszelkiego rodzaju pojazdów borykali się konstruktorzy, stanowiła zawodność układów elektronicznych (Jantos i Mamala 2007). Z reguły wówczas wprowadzanie elektroniki do maszyn przyczyniało się do zwiększenia awaryjności całego agregatu, co było spowodowane wzrostem liczby połączeń oraz długości przewodów instalacji elektrycznej. Szczególne znaczenie miało to w przypadku ciągników i maszyn rolniczych pracujących często w bardzo trudnych warunkach (wilgotność, zapylenie, duże różnice temperatur, zakurzenie) (Plizga 2008; Majcher 2014; Chomik i Juściński 2017; Paraforos i in. 2019).

Podobne, a często nawet trudniejsze warunki oddziałują na specjalistyczne maszyny wykorzystywane do prac w lesie (Malík i Dvořák 2007; Kalmari i in. 2013). Te niekorzystne czynniki znacznie skracają czas bezawaryjnego działania maszyn, co w konsekwencji powoduje brak możliwości wykonywania zabiegów agrotechnicznych czy prac zaplanowanych do wykonania w lesie w założonych terminach (Plizga 2008; Kalmari i in. 2013).

W obecnych czasach czujniki, układy elektryczne, elektroniczne i systemy informatyczne monitorujące działanie maszyn, pojazdów oraz ich podzespołów stały się nieodłącznym elementem ich funkcjonowania. Jeszcze do niedawna ciągniki rolnicze i leśne posiadały tylko po kilka podstawowych czujników, jak np. temperatury cieczy chłodzącej, ciśnienia powietrza w układzie hamulcowym, świateł stopu czy ciśnienia oleju. Z biegiem czasu producenci maszyn, aby usprawnić i ułatwić pracę operatorom, poszli w ślady koncernów motoryzacyjnych, stale dążących do poprawy bezpieczeństwa i komfortu jazdy samochodami (Michalski 2014; Marx 2015). Taka rozbudowa wiązała się niestety z koniecznością wprowadzania coraz większej liczby czujników i systemów pomiarowych, zastosowania dodatkowego okablowania, na skutek czego standardowy system elektryczny pojazdów się powiększał, gdyż każdy czujnik w tego typu starszych systemach musiał być połączony indywidualnie z jednostką centralną. Rozwiązaniem problemu dużej liczby połączeń, jak również długości przewodów okazało się wprowadzenie do komunikacji między odpowiednimi sterownikami standardu transmisji danych CAN (Controller Area Network), znanego z sieci komputerowych (Szlagowski 2010; Marx 2015). W 1991 roku firma Bosch GmbH opublikowała protokół sieciowego przesyłu danych CAN,

który w 1992 roku firma Mercedes Benz wprowadziła do samochodów własnej produkcji. Również producenci innego typu maszyn zastosowali CAN w swych pojazdach już przed 2000 rokiem (Szlagowski 2010).

Mimo dość powszechnej świadomości istnienia CAN nie do końca jasna jest koncepcja funkcjonowania tego systemu w maszynach roboczych, wykorzystywanych w rolnictwie i leśnictwie, szczególnie w ujęciu obejmującym funkcjonowanie tego systemu w rzeczywistej maszynie. Celem artykułu jest przedstawienie systemów sterowania i kontroli pracy w nowoczesnych ciągnikach oraz maszynach rolniczych i leśnych, z uwzględnieniem szerszych informacji dotyczących protokołu CAN i stosowanych standardów, które są z nim związane.

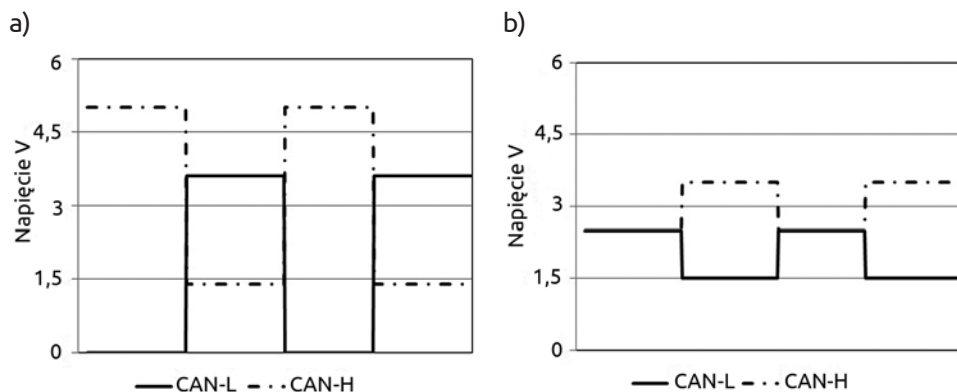
## 2. CAN (Controller Area Network)

CAN to szeregowy protokół komunikacyjny umożliwiający odczyt danych w czasie rzeczywistym z prędkością do 1 Mbit/s, przy wysokim poziomie bezpieczeństwa przesyłu. Przygotowany przez firmę Bosch protokół transmisji danych w tym systemie stał się w ciągu 15 lat od opublikowania wyznacznikiem standardów dla protokołów komunikacyjnych stosowanych w różnego rodzaju obiektach mobilnych, w tym w transporcie morskim, powietrznym i lądowym, w maszynach rolniczych, a także w specjalistycznych pojazdach wojskowych (Bosch 1991; Szlagowski 2010). System ten jest również wykorzystywany w maszynach i ciągnikach wykonujących prace związane z gospodarką leśną oraz w maszynach leśnych (Kalmari i in. 2013). Protokół CAN pozwala na wymianę informacji pomiędzy węzłami, do których dołączone są elektroniczne jednostki kontrolujące ECU (Electronic Control Units), w systemie multi-master (bez jednostki nadrzędnej) (Bosch 1991; Szlagowski 2010). System pozwala dowolnemu ECU, czyli komputerom (jednostkom) sterującym (np. silnikiem, skrzynią biegów, systemami ABS, ESP itp.), na wymianę informacji tak długo, jak długo linia, przez którą następuje wymiana informacji, jest wolna (Bosch 1991; Szlagowski 2010).

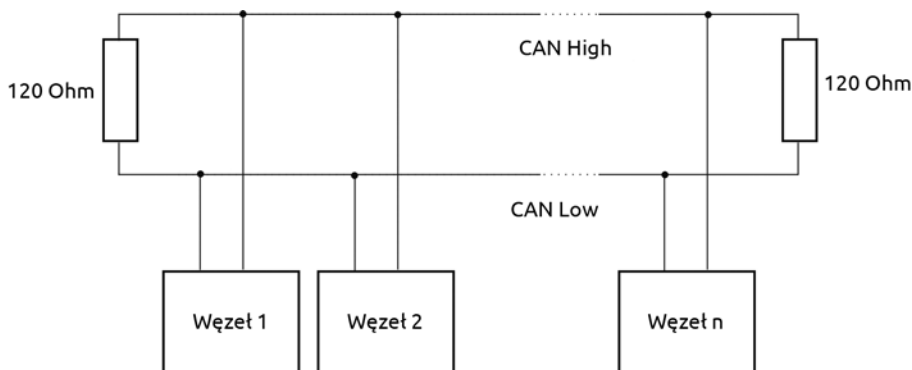
Wymiana informacji pomiędzy węzłami ECU, z których każdy wyposażony jest w nadajnik / odbiornik, odbywa się przez magistralę CAN BUS zamontowaną w pojeździe czy maszynie. Najprostsza magistrala CAN BUS składa się z przynajmniej 2 połączonych ze sobą układów nadajnik / odbiornik (*transceiver*), których parametry muszą być zgodne z przyjętym standardem przesyłu danych (Janotos i Mamala 2007). Magistrala CAN BUS jest dwuprzewodowa; przewody są oznaczone odpowiednio: CAN L (CAN Low) oraz Can H (CAN High). Do przesyłu informacji wykorzystuje się różnice napięć pomiędzy

tymi liniami. Napięcia wynoszą przy małej prędkości przesyłu danych odpowiednio dla linii CAN L – 1,5 V DC, natomiast dla linii CAN H – 3,6 V DC (Majcher 2014). Informacje przesyłane są sygnałami opartymi na 2 poziomach napięć, odpowiadających logicznemu 0 lub 1, generowanymi w układzie nadajnik / odbiornik, odbiornik / nadajnik (Jantos i Mamala 2007) (ryc. 1). Zaletami wysyłania informacji w formie cyfrowej, opartej na sygnale zero-jedynkowym, stosowanym w magistrali CAN BUS, w odróżnieniu od sygnału analogowego, są: brak opóźnień, przekłamań w przekazywanych informacjach oraz łatwość dalszej rozbudowy. Inną ważną cechą magistrali CAN BUS jest odporność na zakłócenia elektromagnetyczne (Majcher 2014). Według normy przewody stosowane w magistrali CAN BUS powinny się charakteryzować nominalną impedancją  $120 \Omega$ , nominalnym opóźnieniem  $5 \text{ ns/m}$ , rezystywnością linii  $10 \Omega/\text{m}$ . Długość maksymalna linii zależna jest od prędkości przesyłu danych. Zarówno ekranowane, jak i nieekranowane przewody połączeniowe powinny być skręcane. Ograniczenia te spowodowane są opóźnieniem sygnałów na liniach magistrali, spadkami amplitudy sygnałów, a także różnicami długości kwantów czasu. Magistrala jest zakończona po obu brzegach odpowiednią impedancją, najczęściej  $120 \Omega$  (ryc. 2) (Szlagowski 2010; Panecki 2015).

Magistrala w pojeździe (traktorze, samochodzie itp.) jest mocno zbliżona do pojedynczej linii (jedna magistrala rozprawadająca sygnał), co pozwala na uniknięcie odbić sygnałów; odgałęzienia stosuje się do podłączania węzłów ECU (ryc. 2). Oparcie CAN BUS tylko na 2 przewodach pozwala na zmniejszenie rozmiarów i liczby przewodów, redukcję liczby łącz i połączeń pomiędzy sterownikami, poprawę diagnostyki ciągnika i maszyny, zmniejszenie zapotrzebowań na moc obliczeniową sterowników, ułatwioną produkcję i skrócenie czasu montażu oraz obniżenie jej kosztów. Stosowanie CAN BUS



Ryc. 1. Napięcia na linii CAN dla: a) niskich i b) wysokich prędkości przesyłu danych (źródło: opracowanie własne)



Ryc. 2. Struktura podstawowa sieci CAN (źródło: Panecki 2015)

umożliwia również zwiększenie udziału sygnałów cyfrowych w wymianie danych oraz zwiększenie odporności na zakłócenia zewnętrzne, jak również zmniejszenie liczby czujników w wyniku ujednocniania przesyłanych danych (Jantos i Mamala 2007), a także wielokrotne wykorzystywanie tych samych informacji z czujników przez różne ECU (Mamala i in. 2008; Cieślowski i in. 2011).

Protokół transmisji danych CAN po magistrali CAN BUS umożliwia wymianę informacji w czasie rzeczywistym nie tylko pomiędzy sterownikami wewnątrz ciągnika rolniczego, ale i wewnątrz całego agregatu, jeśli na ciągniku zawieszona jest lub przyczepiona do niego maszyna współpracująca, wyposażona w system przesyłu danych, który działa, opierając się na protokole CAN. Dzięki temu większość podzespołów ciągnika i maszyny współpracującej jest sterowana i kontrolowana przez wiele sterowników, które będąc powiązane ze sobą wspólną magistralą CAN BUS, pracują na tych samych danych (Jantos i Mamala 2007). W standardzie sieci CAN możliwe jest uzyskanie różnych prędkości transmisji (przewidziano tę możliwość) (ryc. 1), ponieważ dla sterowania np. siłownikiem układu trójpunktowego układu zawieszenia (TUZ) nie potrzeba szybkiej transmisji, a szybkość przesyłu może być  $< 10$  s. W przypadku układu klimatyzacji wymagana jest transmisja już na poziomie ok. 40 kbit/s. Z kolei dla sterowania pracą silnika jest pożądany transfer w czasie rzeczywistym na poziomie 250 kbit/s ÷ 1 Mbit/s. Z kolei przesył dużej ilości danych, jakim charakteryzuje się komunikacja multimedialna, wymaga transferu w granicach od 100 kbit/s do 10 Mbit/s, a tak duże prędkości w maszynach rolniczych wykorzystuje się np. do obserwacji narzędzi pracujących poza zasięgiem pola widzenia operatora (Gomółka i in. 2008) czy – w przypadku leśnego forwardera – do uzyskania pola widzenia z tyłu maszyny zasłoniętego wypełnioną skrzynią ładunkową.



### 3. Standardy J1939 i ISO 11783

Z protokołem transmisji danych CAN ściśle wiąże się powstanie odpowiednich standardów, które ujednocniają systemy sterowania i kontroli działające na jego podstawie. Już we wczesnych latach dziewięćdziesiątych amerykańskie stowarzyszenie SAE (Society of Automotive Engineers), opierając się na standardach firmy Bosch, rozpoczęło działania mające na celu opracowanie standardu przeznaczonego dla ciężkich pojazdów, m.in. ciągników rolniczych. W 1993 roku powstał standard SAE J1939 (The Real-Time CAN Solution for Heavy Duty Applications), proponowany do użycia w rolnictwie (Marx 2015). Standard SAE J1939 specyfikuje szeregową sieć danych służącą do kontroli i komunikacji w leśnictwie i rolnictwie, a składa się z dokumentów, które obejmują 7 podstawowych warstw związanych z tym protokołem (tab. 1) (Voss 2008; Marx 2015).

**Tabela 1.** Główne elementy standardu SAE J1939 (The Real-Time CAN Solution for Heavy Duty Applications)

|  |  |                              |
|--|--|------------------------------|
| Warstwa fizyczne<br><i>Physical layer</i>      | SAE J1939/11, SAE J1939/12, SAE J1939/14, SAE J1939/15 | SAE J1939/01<br>SAE J1939/81 |
| Warstwa łącza danych<br><i>Data link layer</i> | SAE J1939/21   |                              |
| Warstwa sieci<br><i>Network layer</i>          | SAE J1939/31   |                              |
| Transmisja<br><i>Transportation layer</i>      |  |                              |
| Sesja<br><i>Session layer</i>                  |  |                              |
| Prezentacja<br><i>Presentation</i>             |  |                              |
| Warstwa aplikacji<br><i>Application layer</i>  | SAE J1939/71, SAE J1939/73                             |                              |

Źródło: Voss 2008; Marx 2015

*Warstwa fizyczna* deklaruje, że protokół SAE J1939 jest oparty na magistrali CAN i wykorzystuje go jako warstwę fizyczną. Istnieją tu następujące specyfikacje:

1. SAE J1939/11 definiuje szybkie połączenie magistrali CAN zgodnie z ISO/DIS 11898 z ekranowanym kablem skrętkowym i uziemieniem. Szybkość przesyłania danych wynosi 250 kbit/s, maksymalna liczba węzłów wynosi 30, maksymalna długość kabla wynosi 40 m.
2. SAE J1939/12 definiuje wariant z czteroprzewodową linią i aktywnym zakończeniem magistrali, co eliminuje konieczność ekranowania i pozwala na zastosowanie niedrogo kabla.

3. Specyfikacja SAE J1939/14, która podwaja szybkość przesyłania danych z 250 do 500 kbit/s.
4. SAE J1939/15 pozwala na użycie nieekranowanej skrętki komputerowej, przy podłączeniu do sieci nie więcej niż 10 ECU.

*Warstwa łącza danych* (SAE J1939/21) opisuje transmisję danych przez CAN na podstawie specyfikacji CAN w wersji 2.0B.

*Warstwa sieci* (SAE J1939/31) opisuje głównie funkcjonalność mostka (elementu łączącego) w zakresie przesyłania komunikatów między 2 segmentami sieci.

*Warstwa aplikacji* wraz z powiązaniem z dokumentem (SAE J1939/71) opisuje rzeczywiste dane (parametry lub zmienne sieciowe z zakresem wartości, rozdzielczością, jednostką fizyczną i rodzajem transmisji), związane z obsługą aplikacji i użytkownika końcowego.

*Zarządzanie siecią* (SAE J1939/81) – ze względu na zdecentralizowane zarządzanie siecią w J1939 każda jednostka sterująca musi implementować minimalną funkcjonalność (Voss 2008).

Na podstawie standardu amerykańskiego SAE J1934 oraz niemieckiej normy DIN 9685 już w 1992 roku dla potrzeb rolnictwa opracowano jednolity standard transmisji ISO 11783 jako „Protokół komunikacji elektronicznej dla sprzętu rolniczego” (An Electronic Communications Protocol for Agriculture Equipment). Później standard rozszerzono i aktualnie znany jest pod nazwą „Ciągniki i maszyny dla rolnictwa i leśnictwa – Szeregową sieć danych kontrolno-komunikacyjną” (Tractors and Machinery for Agriculture and Forestry — Serial Control and Communications Data Network), zwykle określane jako „ISO Bus” lub „ISOBUS” (Fellmeth 2003). Celem powstania ISO 11783 i jego rozbudowy była standaryzacja transferu danych z ciągnikiem rolniczym, ale również transferu danych między ciągnikiem i maszynami zawieszonymi, ciągnikiem i maszynami zaczepianymi do ciągnika, ciągnikiem i samojezdnymi maszynami współpracującymi. Traktory, które spełniają standard, są zwykle zwane ISOBUS kompatybilnymi (Fellmeth 2003; CAN Newsletter 2010). Standard ISO 11783 (ISOBUS) składa się z 14 warstw (tab. 2).

*Warstwa fizyczna* ISO 11783 wskazuje, iż sieć generalnie pracuje przy skręconym czteroprzewodowym, nieekranowanym przewodzie CAN L i CAN H dla Can Bus oraz TBC\_PWR i TBC\_RTN, dla obwodów zabezpieczenia polaryzacji napięcia (*termination bias circuit*). Sieć jest przystosowana do podłączania i rozłączania ECU w trakcie pracy (*hot*), dlatego też występuje obwód zabezpieczenia polaryzacji. W standardzie przewidziano 3 różne wtyki (gniazda) przyłączeniowe:

- gniazdo wtykowe wewnętrzne, pozwalające – jeśli jest taka potrzeba – na rozszerzenia magistrali traktora (*Bus extension*);

- gniazdo zewnętrzne, które w założeniu powinno być zamontowane na tyle ciągnika, służące do podłączania systemów (maszyn) współpracujących (*Implements*) (*Breakaway connector*);
- gniazdo diagnostyczne, służące do podłączenia przyrządów diagnostycznych (*Diagnostic*).

Transmisja danych w ISOBUS jest oparta na CAN pracujących przy 250 kbit/s, zaś do pojedynczego segmentu magistrali może być podłączone do 30 ECU. Co ważne, ISO 11783 opiera się na 28-bitowej identyfikacji CAN w wersji 2.0B, która jest kompatybilna z SAE J1939 (*High speed ISO*), można więc podłączać sieć bezpośrednio do systemów pracujących w standardzie ASAE J1939. ISOBUS traktora łączy wiele urządzeń i komponenten-

**Tabela 2.** Standard ISO 11783 (Tractors and Machinery for Agriculture and Forestry — Serial Control and Communications Data Network)

|             |   |              |  |
|-------------|---|--------------|--|
| ISO 11783-1 | Ogólny standard mobilnej transmisji danych<br><i>General standard for mobile data communication</i> | ISO 11783-8  | Komunikaty układu napędowego<br><i>Power train messages</i>  |
| ISO 11783-2 | Warstwa fizyczna<br><i>Physical layer</i>   | ISO 11783-9  | ECU ciągnika<br><i>Tractor ECU</i>   |
| ISO 11783-3 | Warstwa łącza danych<br><i>Data link layer</i>  | ISO 11783-10 | Wymiana danych kontrolera zadań i systemu informacji zarządczej<br><i>Task controller and management information system data interchange</i> |
| ISO 11783-4 | Warstwa sieci<br><i>Network layer</i>   | ISO 11783-11 | Słownik elementów danych mobilnych<br><i>Mobile data element dictionary</i>  |
| ISO 11783-5 | Zarządzanie siecią<br><i>Network management</i>   | ISO 11783-12 | Diagnostic<br><i>Diagnostics services</i>  |
| ISO 11783-6 | Terminal wirtualny<br><i>Virtual terminal</i>   | ISO 11783-13 | Serwer plików<br><i>File server</i>  |
| ISO 11783-7 | Komunikaty warstwy aplikacji dotyczące narzędzi<br><i>Implement messages application layer</i>      | ISO 11783-14 | Kontrola sekwencji<br><i>Sequence control</i>  |

tów. Istnieje tu możliwość zamontowania w ciągniku rolniczym wirtualnego terminala (*Virtual Terminal*), który pozwala operatorowi kontrolować parametry maszyn towarzyszących (współpracujących). Eliminuje to konieczność stosowania separowanych, dodatkowych terminali, a jeden terminal pozwala kontrolować wszystkie dołączone urządzenia. Kontroler zadaniowy (*Task Controller*) to oprogramowanie (*software*) w terminalu, które zapisuje dane dla zadania i wspomaga wykonywanie specyficznych zadań terenowych na podstawie informacji z wejściowego systemu zarządzania zadaniem (*Farm Management System*). Zainstalowane z tyłu traktora 9-pinowe złącze pozwala połączyć maszyny współpracujące z traktorem, jak również zasilac urządzenia elektroniczne i systemy informatyczne w maszynie współpracującej z układem elektrycznego traktora. ECU lub komputer zadaniowy (*Task Controller*), zamontowany w maszynie współpracującej, kontroluje tę maszynę, a maszyna może być wyposażona we własną autonomiczną sieć CAN. ECU maszyny odczytuje dane z czujników i wysyła do traktora informacje, które następnie są wyświetlane na wirtualnym terminalu (*Virtual Terminal*). Odbiera również dane wejściowe od operatora w celu kontroli i sterowania nastawnikami w maszynie (*Actuators*). Dzięki zastosowanemu standardowi system informatyczny (elektroniczny) maszyny współpracującej i traktora działa razem, zaś maszyny współpracujące mogą wykorzystywać informacje z systemu informatyczno-elektrycznego traktora (jak np. prędkość jazdy traktora, pozycja TUZ). Standard pozwala maszynie współpracującej (towarzyszącej) sterować niektórymi funkcjami ciągnika, np. prędkością jazdy ciągnika czy zaworami hydraulicznymi w ciągniku (Fellmeth 2003; CAN Newsletter 2010). Poza sterowaniem i kontrolą pracy ciągnika rolniczego czy leśnego przez zainstalowaną magistralę CAN BUS można dokonać również diagnostyki tych maszyn, stosując odpowiednie urządzenia diagnostyczne.

#### 4. Diagnostyka maszyn wyposażonych w CAN

Diagnostyka współczesnych ciągników jest trudna ze względu na stosowanie dużej liczby elementów elektronicznych (Majcher 2014). W maszynach wyposażonych w CAN BUS prace z tego zakresu odbywają się po podłączeniu urządzenia diagnostycznego do gniazda diagnostycznego, które umożliwiła uzyskanie informacji o niesprawności wykrytej przez system diagnostyki pokładowej (samodiagnostyka pojazdu). Takie rozwiązanie pozwala na szybkie wykonanie diagnostyki poszczególnych układów i skrócenie czasu potrzebnego na usunięcie awarii.

Diagnozowanie usterek, odczytywanie kodów błędów oraz wykonywanie testów poprawności działania poszczególnych podzespołów systemu wykony-

wane jest za pomocą komputerowych testerów diagnostycznych, którymi mogą być przyrządy warsztatowe producenta pojazdu lub przyrządy uniwersalne (Michalski 2014; Chomik i Juściński 2017). Poza urządzeniem diagnostycznym niezbędne jest również oprogramowanie firmowe. Szczegółowe dane dotyczące używanego oprogramowania niestety często są dostępne jedynie dla autoryzowanych serwisów (Mamała i in. 2008).

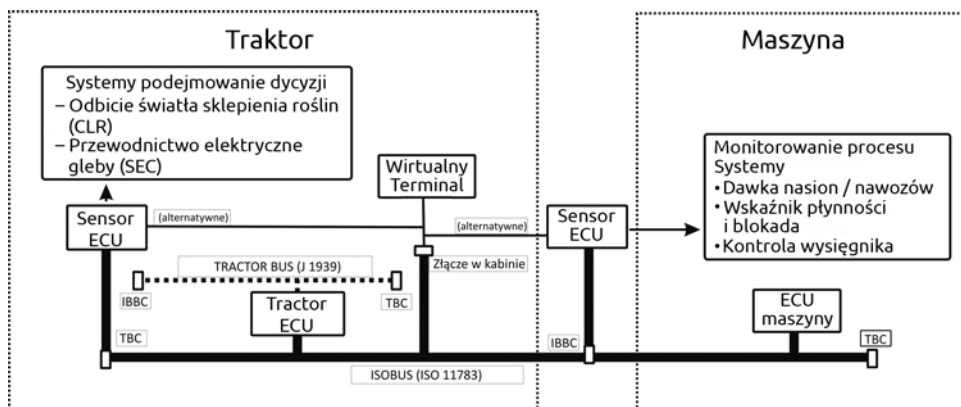
Pierwszy krok w procesie diagnozowania stanowi podłączenie zestawu diagnostycznego do gniazda diagnostycznego ciągnika. Następnie interfejs, bez udziału osoby obsługującej urządzenie, wybiera odpowiedni protokół, aby móc połączyć się z ciągnikiem. Standardowo pojazd współpracuje z wieloma rodzajami oprogramowania o różnych celach diagnostycznych. Zestaw wykonuje automatyczne testy i wyświetla na monitorze uzyskane wyniki. Zadaniem diagnosty jest odczytanie zidentyfikowanego numeru i dokonanie niezbędnych nastaw regulacyjnych lub wymiany uszkodzonego elementu (Michalski 2014; Chomik i Juściński 2017).

## 5. Przykłady zastosowania transmisji danych CAN w rolnictwie i leśnictwie

### 5.1. Przykłady zastosowania transmisji danych CAN w rolnictwie

Podstawowe i nadal najczęstsze zastosowanie sieci CAN w rolnictwie dotyczy kontroli pracy układów w ciągniku oraz diagnostyki ciągnika rolniczego. Dla przykładu, jak podają Chomik i Juściński (2017), ciągniki Fendt oraz Massey Ferguson do 2012 roku posiadały jedną magistralę CAN, służącą do komunikacji pomiędzy modułem silnika a wyświetlaczem, do której można było podłączyć przyrząd diagnostyczny, wykorzystując w tym celu system diagnostyki pokładowej standardu EOBD (European On Board Diagnostic). Kolejne wersje ciągników tych marek zostały wyposażone w dodatkową magistralę CAN wykorzystywaną przez układ SCR (Software Change Request), której zadaniem była komunikacja pomiędzy układem SCR a modułem silnika (Chomik i Chomik 2016; Chomik i Juściński 2017). Z kolei, jak podaje Michalski (2014), w przykładowym ciągniku John Deere 7930 diagnostyka użytkowa zorientowana jest na kontrolowanie czujników i obwodów elektrycznych, w jakie wyposażony został traktor. Taka informacja okazuje się przydatna w serwisie i ogranicza się do identyfikacji rodzaju usterki, a nie przyczyny nie działania. Komunikat o usterce przekazywany jest w formie wyświetlanych kodów błędów na ekranie komputera pokładowego ciągnika.

Z kolei wykorzystanie magistrali CAN zgodnej z ISO 11783 (ISOBUS) przy współpracy ciągnika rolniczego i maszyn odbywa się w 3 podstawowych obszarach (ryc. 3). Pierwszy obszar dotyczy uprawy i siewu, w pracach z tego zakresu



**Ryc. 3.** Dwie grupy systemów kontroli pracy zestawu ciągnik – maszyna (tj. podejmowanie decyzji i monitorowanie procesu), które są wykorzystywane w uprawie roli i siewie oraz w aplikacjach nawozów i ochronie upraw. Schematyczna ilustracja ciągnika i magistrali wraz z głównymi komponentami: ECU ciągnika i maszyny, ECU połączone z sensorami, wirtualny terminal (VT), oraz sposób ich połączenia. Wskazane są również IBBC (złącze zrywalne magistrali) i TBC (obwód terminacji polaryzacji – zabezpieczeń polaryzacji) (źródło: Paraforos i in. 2019)

system jest wykorzystywany w połączonym działaniu ciągnika z pneumatycznymi siewnikami punktowymi. Wykorzystywane są tu mapy terenu, na które naniesiono dane zwężności gleby, wilgotności i konduktywności. Na podstawie tych informacji modyfikowane są nastawy siewnika, jak również głębokości pracy przy zabiegach uprawowych, wykonywanych na polu. Drugi obszar związany jest z nawożeniem i ochroną roślin, w przypadku których wykorzystuje się informacje z czujników o parametrach gleby, ale też o plonie, i na tej podstawie modyfikowane są dawki nawozowe oraz dawki środka ochrony roślin. Trzeci obszar obejmuje monitorowanie plonu w trakcie wykonywania zbiorów, odbywające się głównie na kombajnach zbierających, przede wszystkim tych wyposażonych w ISOBUS. Jako czujniki plonu stosowane są tu czujniki do pomiaru masy materiału roślinnego. Uzyskane wyniki pozwalają na tworzenie map plonu, na podstawie których dokonuje się przede wszystkim zmiany dawek nawozowych dostosowanych do konkretnego miejsca pola (Batbayar i in. 2018; Paraforos i in. 2019).

## 5.2. Przykłady zastosowania transmisji danych CAN w leśnictwie

Współczesne maszyny leśne wykorzystywane do pozyskania i zrywki drewna są skomplikowane i drogie. Z reguły projektuje się je do obsługi przez wyspecjalizowanych operatorów, co wynika z dążenia do uzyskania wysokiej wydajności (Kalmari i in. 2013).

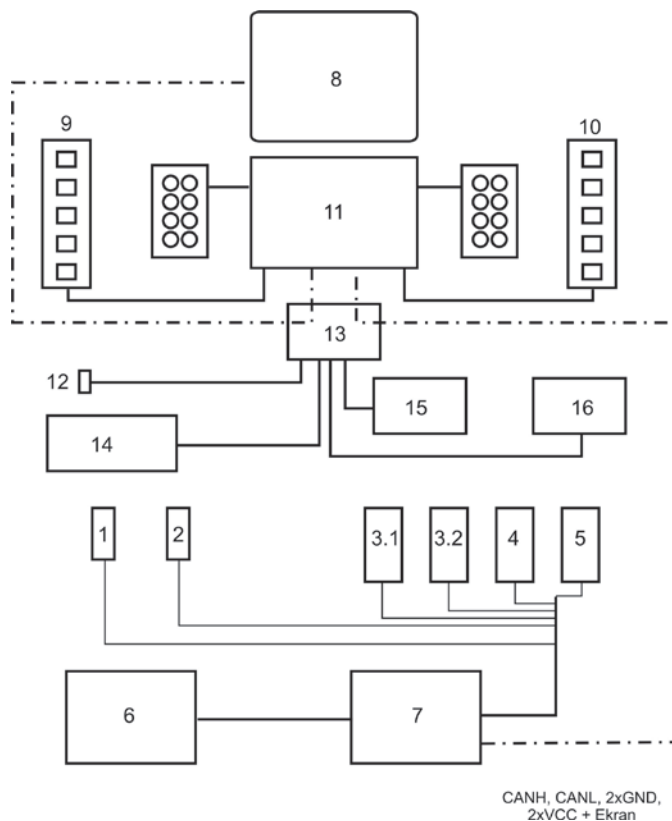


Tę wysoką efektywność osiąga się przez stosowanie skomplikowanych systemów kontroli i sterowania. Systemy te nie tylko odpowiadają za prawidłowe działanie maszyny czy wykrywanie jej usterek (diagnostyka), ale też kontrolują i sterują funkcjami roboczymi urządzenia, związanymi z wykonywaną przez nie pracą. Dla przykładu system sterowania i kontroli pracy harwestera leśnego optymalizuje wyrób drewna zgodnie z potrzebami zleceniodawcy, właściciela lasu czy innych firm kupujących drewno. Jest on wspomagany przez system nawigacji satelitarnej i przenoszenia danych, który pozwala na bieżąco kontrolować wyrabiany sortyment i wymieniać informacje między operatorem harwestera a zleceniodawcą pracy. Głównymi funkcjami takiego systemu operacyjnego w maszynie jest optymalizacja pracy przy wysokiej wydajności, przenoszenie danych i transmisja danych oraz kontrola funkcji technicznych maszyny, tzw. diagnostyka testująca poszczególnych modułów (Malík i Dvořák 2007).

Systemy operacyjne implementowane w maszynach typu harvester najbardziej znanych firm to: MaxiHarvester, Motomit IT, TimberMatic i inne (Malík i Dvořák 2007). Analizując budowę sterownika firmy Motomit IT (ryc. 4), można zauważyć, iż jest to system czteroprzewodowy, oparty na magistrali CAN. Funkcje sterowania w tym systemie są rozproszone między:

- moduł głowicy harwesterowej MCC (Mitron CAN Controller – kontroler CAN firmy Mitron);
- moduł wyświetlacza MCT (Mitron CAN Terminal – terminal CAN firmy Mitron);
- moduł przetwarzania MCTB pracujący w Motomit PC;
- moduł sterowniczy klawiatury MCKC i manipulatory (Mitron CAN Keyboard Controller – sterownik klawiatury CAN firmy Mitron).

Moduły te łączą ze sobą 2 przewody linii sygnałowych CAN, przewody napięcia zasilającego (VCC) i przewody masy (GND). Przewody zasilające są zdublowane w celu zapewnienia maksymalnej niezawodności i obciążalności. Dlatego kabel CAN biegnący z kabiny do głowicy harwesterowej ma 6 przewodów i ekran. Poza tymi 3 modułami występuje także moduł interfejsu MCI (Mitron CAN Interface – interfejs CAN firmy Mitron) oraz moduł wyświetlacza MCT, który steruje modulem MCI. Napięcie zasilające z maszyny bazowej jest doprowadzone do modułu MCI i stamtąd rozprowadzone do innych elementów systemu. Moduł MCI obsługuje również sygnały sterujące pomp hydraulicznych maszyny bazowej. Można również do niego dołączyć elektroniczny system pomiaru do kalibracji systemu pomiarowego (średnicomierz elektroniczny). Poza tym dostępne jest również połączenie drukarki. Przyciski manipulatorów (joysticków) i klawiatury do wprowadzania nastaw są podłączone bezpośrednio do modułu MCKC, które po szynie CAN przesyłają sygnały z przycisków do innych modułów (Materiały Informacyjne Motomit 2006; Malík i Dvořák 2007).

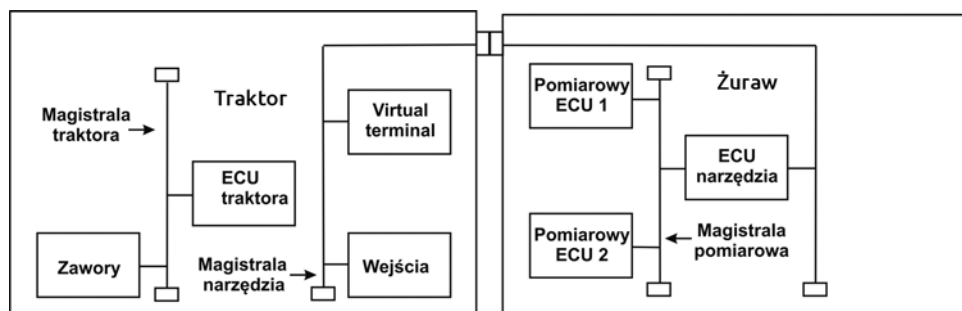


**Ryc. 4.** System sterowania i kontroli harwestera Motomit IT (1 – czujnik krańcowy piły łańcuchowej, 2 – czujnik krańcowy przechyłu, 3.1 i 3.2 – czujniki średnicy drzewa, 4 – impulsy przewodnicy piły, 5 – czujnik długości drzewa, 6 – blok zaworów, 7 – moduł MCC, 8 – moduł MCT, 9 – lewy uchwyt (joystick), 10 – prawy uchwyt (joystick), 11 – moduł MCKT, 12 – złącze do podłączenia średnicomierza (kalibracja układu pomiarowego), 13 – moduł MCI, 14 – drukarka, 15 – pompy hydrauliczne, 16 – akumulator zasilający) (źródło: Materiały Informacyjne Motomit 2006; Malík i Dvořák 2007)

W rolnictwie sieć ISO 11783 (ISOBUS) jest już szeroko wykorzystywana we współczesnych ciągnikach i maszynach współpracujących. Choć istnieje możliwość stosowania tego systemu (standard to przewiduje) w wyspecjalizowanych maszynach leśnych, jak dotąd niewiele maszyn jest kompatybilnych z omawianym standardem. Można natomiast z niego korzystać w pracach leśnych wykonywanych przy użyciu ciągników uniwersalnych, wyposażonych w tego typu standard (Kalmari i in. 2013). Na przykład Kalmari i in. (2013)

proponują układ sterowania i kontroli żurawia Kesla 305T, montowany na układzie trójpunktowym ciągnika uniwersalnego Valtra T132.

Jak piszą autorzy tej propozycji, żurawie leśne, nabudowywane lub zawieszane na ciągniku, są z reguły wyposażone w proste układy hydrauliczne, w których elementy sterujące zaworów montuje się na ciągniku, zaś zawory główne na żurawiu. Tego typu żurawie najczęściej posiadają własną pompę, która pozwala uzyskać przepływ oleju na odpowiednim poziomie. W zaproponowanym rozwiązaniu (ryc. 5) standardowy żuraw doposażono we własną magistralę wymiany danych (magistrala narzędzi), połączoną z magistralą ciągnika (magistrala traktora). Do tej magistrali doprowadzone są informacje z ECU żurawia (ECU narzędzia), który z kolei połączony jest z ECU sprzężonymi czujnikami kontrolującymi jego pracę (pomiarowy ECU1, pomiarowy ECU2). Wewnętrzna magistrala żurawia połączona jest z magistralą ciągnika za pośrednictwem łącza obsługującego połączenie sieciowe w standardzie ISO 11783 (ISOBUS). Jak konkludują Kalmari i in. (2013), takie rozwiązanie opierające się na ISO 11783 pozwala na dodanie bardziej rozwiniętych funkcji standardowemu żurawowi. Zamiast zwykle stosowanej mechaniczno-hydraulicznej kontroli zaworów głównych żurawia, operator urządzenia może przeprowadzić kontrolę zaworów elektrycznie, przy pomocy dodanych manipulatorów (joysticków) na podstawie współrzędnych biegunowych, podając wyłącznie kierunki: góra – dół, lewo – prawo, do przodu – do tyłu. Pozwala to również na zapobieganie kołysaniu i oscylacjom narzędzia, jak przy stosowanej przez operatora kontroli, oraz na wprowadzenie częściowej automatyzacji w standardowym, prostym rozwiązaniu. Dzięki sterowaniu żurawiem z wykorzystaniem CAN możliwe jest bezpośrednie kierowanie zaworami w traktorze, co pozwala na eliminację dodatkowych zaworów stosowanych zwykle w żurawiu. Z kolei takie rozwiązanie przyczynia się do uniknięcia problemu chwilowych braków odpowiedniej ilości oleju dostarczanego do elementów wykonawczych żurawia (silników i siłowników hydraulicznych) i związanej z tym kawitacji (Kalmari i in. 2013).



Ryc. 5. Sterownie i kontrola żurawia hydraulicznego przez ISOBUS (źródło: Kalmari i in. 2013)

## 6. Inne systemy transmisji danych

Jedną z najważniejszych zalet magistrali CAN jest łatwość jej dalszego rozbudowywania. W zależności od potrzeb może ona pracować w topologii szeregowej, równoległej lub drzewiastej. Kolejne sterowniki można dołączać bezpośrednio do magistrali lub przez zastosowanie mostków (*bridge*). Ich wykorzystanie pozwala na połączenie różnych rodzajów sieci, jak i o różnych prędkościach czy też architekturze, również w konfiguracji z jednostką nadrzędną (*master / slave*). Mogą wówczas powstać sieci lokalne, które eliminują problem obciążania magistrali głównej przez urządzenia pobierające lub wysyłające informacje wyłącznie w przypadku zapytania przez dany sterownik (Cieślikowski i in. 2011). Jednym z przykładów takiej sieci lokalnej jest tzw. LIN (Jantos i Mamala 2007; Majcher 2014).

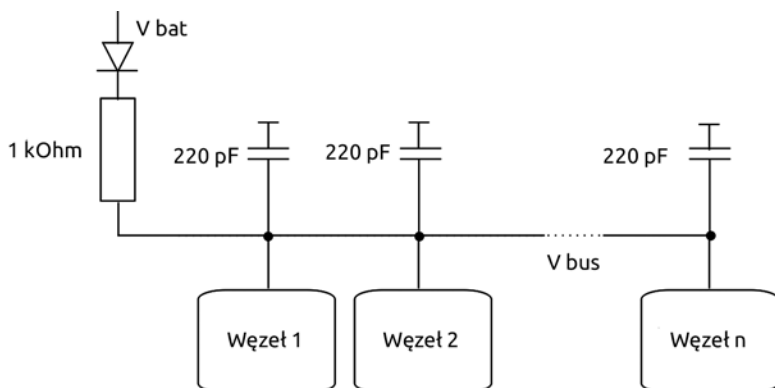
LIN (Local Interconnect Network) jest to rozwiązanie interfejsu zaproponowane przez konsorcjum, które w 1998 roku stworzyły firmy BMW, Volkswagen, Audi, Volvo, Mercedes, Volcano oraz Motorola. Pierwsza wersja LIN 1.1 powstała w 1999 roku, kolejna – 1.3 – w 2002 roku, a obecnie obowiązuje standard 2.1. LIN jest szeregową, tanią magistralą komunikacyjną, składającą się zaledwie z jednego przewodu 12 V, która nie wymaga skręcania przewodów jak w przypadku CAN. LIN stworzono do zastosowań w branży motoryzacyjnej, aby umożliwić transmisję danych w sytuacjach, gdy parametry transmisji danych magistralą CAN są za wysokie i nie jest wymagana duża szybkość transmisji danych, np. komunikacja z czujnikami inteligentnymi. Urządzenia przy pomocy magistrali LIN mogą stworzyć sieć o topologii magistrali. Do przesyłu informacji wykorzystywana jest jedna linia sygnałowa (V bus), która przy układzie master podłączona jest przez diodę i rezystor do napięcia V bat o wartości od 8 do 18 V (typowo 12 V) (ryc. 6). Dodatkowo przy każdym węźle linia V bus powinna być połączona przez kondensator 22 pF z masą. Interfejs LIN pozwala na przesyłanie informacji na dystans do 40 m z prędkością do 20 kbit/s, a pojedyncza sieć może tworzyć nie więcej niż 16 węzłów komunikacyjnych (Jantos i Mamala 2007; Majcher 2014; Panecki 2015) Za pomocą sieci LIN można więc podłączyć niewielką liczbę czujników i elementów wykonawczych oraz jednego nadrzędnego sterownika w magistralę lokalną o uproszczonej strukturze (Cieślikowski i in. 2011).

FlexRay to interfejs, który również opracowano na bazie CAN BUS. Zaproponowało go FlexRay Consorcium utworzone w 2000 roku przez firmy DaimlerChrysler, BMW, Motorola, Philips. Motywacją konsorcjum było stworzenie rozwiązania, które będzie wykorzystywało zalety CAN (głównie charakter zdarzeniowy sieci, a więc pozwalający wysłać węzłom informacje do magistrali od razu, w momencie zajścia potrzeby), a jednocześnie będzie rozwiązywało problem ograniczeń (zbyt niska dla niektórych zastosowań

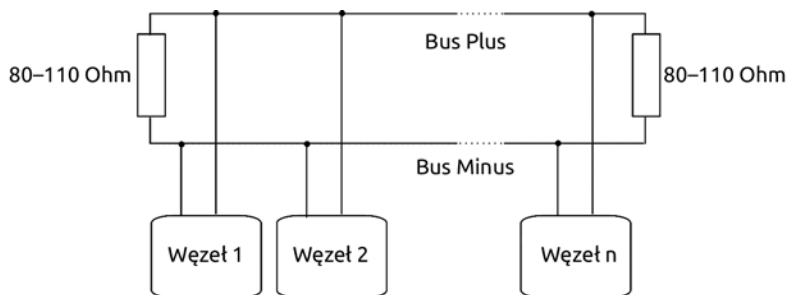
prędkość transmisji, tylko jeden kanał komunikacyjny oraz brak synchronizacji w działaniu węzłów).

FlexRay charakteryzuje się szybszą transmisją danych, wyższym wskaźnikiem przesyłu danych i zwiększoną odpornością na zakłócenia. Warstwę fizyczną tworzy dwukanałowa komunikacja, której bazą jest wielopoziomowa architektura gwiazdzista, a transmisja informacji w tej sieci może osiągnąć prędkości do 10 Mbit/s. Medium transmisyjne dla FlexRay stanowią 2 linie sygnałowe Bus Plus (BP) i Bus Minus (BM), do których musi być dołączony każdy węzeł sieci (ryc. 7). Na końcach linie BP i BM są połączone rezystorem, co zapobiega odbiciom sygnału. Odległość pomiędzy węzłami nie powinna być większa niż 24 m, a całkowita liczba węzłów nie powinna przekraczać 22 (Gomółka i in. 2008; Panecki 2015). Systemy FlexRay stosowane są np. w ciągnikach rolniczych w celach diagnostycznych (Mamała i in. 2008).

MOST (Media Oriented Systems Transport) to interfejs, który powstał pod koniec lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Jako pierwsza wykorzystywała go firma BMW. Obecnie standard ten stosowany jest przez większość produ-

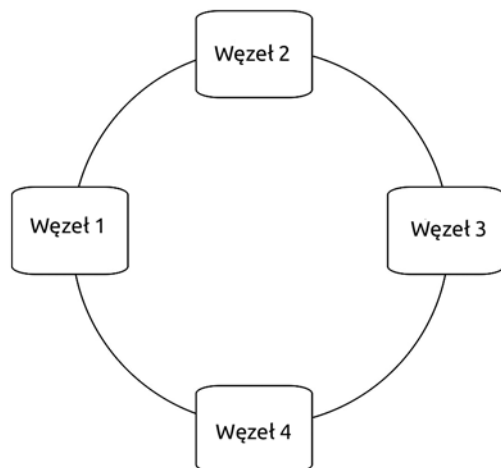


Ryc. 6. Struktura podstawowa sieci LIN (źródło: Panecki 2015)



Ryc. 7. Struktura podstawowa sieci FlexRay (źródło: Panecki 2015)

centów samochodów. MOST jest zorganizowany w konfiguracji pierścieniowej, w której każde urządzenie łączy się wejściem ze swoim poprzednikiem oraz wyjściem z urządzeniem następnym (ryc. 8). System MOST może być zbudowany także w innej konfiguracji, w topologii gwiazdowej, jednak urządzenia w systemie muszą być wewnętrznie uformowane w pierścień logiczny. Dla struktury gwiazdowej może to być spełnione np. przez zastosowanie koncentratora (Panecki 2015).



Ryc. 8. Struktura podstawowa sieci MOST  
(źródło: Panecki 2015)

## 7. Podsumowanie

Systemy sterowania i kontroli pracy w nowoczesnych ciągnikach oraz maszynach rolniczych i leśnych są skomplikowane ze względu na dużą liczbę czujników kontrolujących prace podzespołów maszyn, jak również jednostek sterujących, które korzystają z parametrów mierzonych przez te czujniki. Duża liczba komponentów elektronicznych wymusiła już blisko 30 lat temu zastosowanie sygnałów cyfrowych do wymiany informacji pomiędzy poszczególnymi elementami, zaś do komunikacji pomiędzy nimi użycia odpowiednich protokołów transmisji, przede wszystkim opartych na protokole CAN zaproponowanym przez firmę Bosch. W miarę rozwoju maszyn zastosowanie tego protokołu pozwoliło na wzrost komplikacji układów, ale też na sterowanie maszynami współpracującymi z maszyną bazową i kontrolę maszyny bazowej przez układy w maszynie współpracującej.



## 8. Wnioski

1. Dalszy rozwój maszyn wyposażonych w skomplikowane systemy sterowania niewątpliwie zmierza w kierunku coraz większej automatyzacji i robotyzacji.
2. Stosownie protokołu CAN pozwala współcześnie na automatyzację i robotyzację maszyn rolniczych i leśnych.
3. Protokół CAN ma nadal duże możliwości rozbudowy ze względu na ewentualne uzupełnienia i współpracę z innymi systemami transmisji danych.

### *Źródło finansowania*

*Badania sfinansowane z subwencji przyznanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na działalność naukową.*

## Literatura

- Batbayar E., Munkhbayar S., Tsogt-Ochir S., Oyumaa M., Tumenjargal E., Chung K.T., Ham W. 2018. Design and Analysis of ISO 11783 Task Controller's Functionality in Server – Client ECU for Agricultural Vehicles. Proceedings of the 14th International Conference on Precision Agriculture. 24–27 June, 2018, Montreal, Quebec, Canada. ASABE Annual International Meeting 1800113. DOI:10.13031/aim.201800113.
- Bosch. 1991. CAN specification, ver. 2.0. Robert Bosch GmbH, Stuttgart.
- CAN Newsletter. 2010. Isobus – the CAN-based Network System for Agriculture and Forestry Machines. CAN Newsletter, 1, 44–48.
- Cieślakowski B., Frączek J., Ślipek Z. 2011. Koncepcja kontroli procesów dynamicznych w układzie hydrauliki ciągnika z wykorzystaniem magistrali informatycznej LIN. Autobusy, 10, 114–122.
- Chomik Z., Chomik G. 2016. Nowoczesna obsługa techniczna ciągników. Hortpress, Warszawa.
- Chomik Z., Juściński S. 2017. Wykorzystanie informacji z systemu diagnostyki pokładowej standardu EOBD w obsłudze serwisowej ciągników rolniczych. Technika Rolnicza Ogrodnicza i Leśna, 5, 10–14.
- Fellmeth P. 2003. ISO 11783 a Standardized Tractor – Implement Interface. The International CAN Conference 2003. CAN in Automation, 8–13.
- Gomółka L., Jantos J., Mamala J. 2008. Analiza przebiegu siły napędowej ciągnika rolniczego. Inżynieria Rolnicza, 6(104), 57–62.
- Jantos J., Mamala J. 2007. Identyfikacja protokołu transmisji magistrali CAN w pojazdach rolniczych. Inżynieria Rolnicza, 6(94), 58–63.
- Kalmari J., Pihlajamäki T., Hyyti H., Luomarenta M., Visala A. 2013. ISO 11783 Compliant Forest Crane as a Platform for Automatic Control. IFAC Proceedings, 46(18), 164–169.

- Majcher J.** 2014. Rola magistrali CAN w diagnostyce współczesnych ciągników rolniczych. *Logistyka*, 3, 4083–4088.
- Malík V., Dvořák J.** 2007. Harvestorové technologie a vliv na lesní porosty. *Folia Forestalia Bohemica, Lesnická práce*, 5.
- Mamala J., Jantos J., Augustynowicz A.** 2008. Diagnostyka predykcyjna ciągników rolniczych. *Inżynieria Rolnicza*, 5(103), 97–101.
- Marx S.E.** 2015. Controller Area Network (CAN) Bus J1939 Data Acquisition Methods Parameter Accuracy Assessment Using Nebraska Tractor Test Laboratory Data. *Biological Systems Engineering Dissertation, Thesis and Student Research. University of Nebraska–Lincoln*, 79.
- Materiały Informacyjne Motomit.** 2006. Instrukcja obsługi Motomit IT/PC. Systemy sterowania harwestera. Motomit IT. Vansco Electronics Oy, Forssa, Finlandia.
- Michalski R.** 2014. Red. Diagnostyka uszkodzeń ciągników kołowych. Identyfikacja relacji, modele hardware i software systemu diagnostycznego. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Olsztyn.
- Panecki S.** 2015. Interfejsy komunikacyjne w motoryzacji. *Elektronika Praktyczna*, 6, 58–64.
- Paraforos D.S., Sharipov G.M., Gripentrog H.W.** 2019. ISO 11783 – Compatible Industrial Sensor and Control Systems and Related Research: a Review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 1–14.
- Plizga K.** 2008. Diagnostyka wyposażenia elektrycznego pojazdów rolniczych. *MOTROL – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, 10, 110–121.
- Szlagowski J.** 2010. Red. Automatyzacja pracy maszyn roboczych. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Voss W.** 2008. *A Comprehensive Guide to J1939*. Copperhill Technologies Corporation Greenfield, Massachusetts.



# Zastosowanie pomiaru admitancji do określenia stanu fizjologicznego sadzonek buka pospolitego (*Fagus sylvatica* L.) i dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.)

Łukasz Mateusiak<sup>1</sup>, Paweł Tylek<sup>1</sup>, Mariusz Kormanek<sup>1</sup>,  
Zdzisław Kaliniewicz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kottłataja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków, e-mail: pawel.tylek@urk.edu.pl

<sup>2</sup> Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych, Katedra Maszyn Roboczych i Metodologii Badań, ul. Michała Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn

## Abstrakt

Jakość i żywotność sadzonek w leśnictwie określa się na podstawie cech wzrostowych, tzn. wysokości części nadziemnej, średnicy w szyi korzeniowej oraz długości korzeni szkieletowych. Wynika to z powszechnie znanego i szeroko wykorzystywanego faktu, iż kondycja młodych sadzonek jest pochodną stanu rozwojowego zarówno ich systemu korzeniowego, jak i części nadziemnej. Oprócz cech wzrostowych poddawane analizie są również inne, czasami trudne i dla niektórych osób subiektywne parametry, wymagające od oceniającego dużego doświadczenia w bezbłędnej i szybkiej interpretacji, która z reguły obejmuje ogromną liczbę sadzonek. Uwaga skupiona jest na ocenie wszystkich części rośliny, a czynności wykonywane w trakcie pomiarów są bardzo żmudne, mogą ponadto prowadzić do kolejnych uszkodzeń sadzonek, natomiast cechy biometryczne nie zawsze korelują z żywotnością.

W literaturze coraz częściej przybliżane są inne sposoby ustalenia żywotności i stanu fizjologicznego sadzonek. Jednym z nich jest pomiar i określenie przewodnictwa elektrycznego pędów, noszącego nazwę admitancji. W metodzie tej wykorzystuje się zdolność tkanek roślinnych do przewodzenia prądu elektrycznego, gdzie różne poziomy tego parametru można interpretować jako stan fizjologiczny. W pracy przedstawiono praktyczne zastosowanie szybkiego pomiaru admitancji jako metody oceny stanu fizjologicznego sadzonek w porównaniu z jakością sadzonek określoną przy użyciu obecnie obowiązującej normy. Stwierdzono, że sadzonki buka pospolitego (*Fagus sylvatica* L.)

charakteryzują się większą zmiennością w rozkładzie admitancji niż sadzonki dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.). Sadzonki buka cechowały się zatem bardziej zróżnicowanym stanem fizjologicznym. W przypadku obu gatunków szczególnie wyraźnie zaznacza się przedział admitancji 10–20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , w którym mieściły się niemal wszystkie sadzonki. Średnia wartość przewodnictwa między gatunkami była na podobnym poziomie, tj. 13,56  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dla dębu i 12,70  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dla buka. Współczynniki zmienności parametru długości strzałki i średnicy w szyjce korzeniowej dla buka osiągnęły tę samą wartość (0,31), co potwierdza słuszność rezygnacji w normie europejskiej z pomiaru grubości w szyjce korzeniowej. Skrajne wartości admitancji zarejestrowano jedynie u pojedynczych okazów roślin, co jednak nie zostało potwierdzone w obowiązującej obecnie klasyfikacji materiału sadzeniowego jako materiał pozaklasowy.

**Słowa kluczowe:** konduktometr, żywotność, jakość sadzonek, sadzonka kontenerowa

## 1. Wstęp

W szkółkarstwie leśnym przyjmuje się założenie, że siewki lub sadzonki są żywotne wtedy, gdy w pierwszym sezonie wegetacyjnym po zasadzeniu charakteryzuje je intensywny wzrost (Wesoły 2006). Jakość i żywotność sadzonek w leśnictwie określa się bowiem na podstawie cech wzrostowych, tzn. wysokości części nadziemnej, średnicy w szyi korzeniowej oraz długości korzeni szkieletowych. Szczegółowo określa to Polska Norma PN-R-67025 z 1999 roku oraz Norma Europejska implikowana Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 18 lutego 2004 roku (Rozporządzenie... 2004. Dz. U. Nr 85, poz. 766).

Pomiary, jakie należy wykonać dla określenia wspomnianych cech wzrostowych, są jednak żmudne, a uzyskane wyniki nie zawsze korelują z żywotnością roślin, co więcej, według obowiązującej normy europejskiej, odnoszą się tylko do pomiaru parametrów części nadziemnej (Rozporządzenie... 2004. Dz. U. Nr 85, poz. 766). W związku z powyższym pojawia się potrzeba opracowania szybszej i skuteczniejszej metody kompleksowej oceny żywotności roślin, bazującej jedynie na analizie części nadziemnej (Wesoły i Pukacki 2009).

Bardzo przydatny i prosty w zastosowaniu jest sposób oceny żywotności przez pomiar przewodnictwa elektrycznego (Pukacki 1973; Białobok i Pukacki 1974; Blanchard i Carter 1980; Pukacki 1982; Lindberg i Johansson 1989; Pukacki i Kamińska-Rożek 2005; Wesoły i Pukacki 2009). W metodzie tej wykorzystuje się zdolność tkanek roślinnych do przewodzenia prądu elektrycznego. Podstawowe składniki komórek, jakimi są błony cytoplazmatyczne, stawiają przechodzącemu prądowi największy opór. Naruszenie struktury błon cytoplazmatycznych na skutek działania stresowych czynników środowiska powoduje zakłócenie w stosunkach jonowych i wzrost przewodnictwa elektrycznego (Pukacki 1982; Wesoły i Pukacki 2009). Zjawisko przewodności elektrycznej

występujące w różnych ośrodkach podczas pomiaru przewodnictwa elektrycznego wydaje się być proste w opisie i często znajduje zastosowanie w pomiarze wilgotności różnych jednorodnych materiałów czy też w określaniu warunków mikroklimatycznych środowisk bardziej złożonych, takich jak np. gleby rolnicze. W tym przypadku okazuje się, że wyniki pomiaru przewodności elektrycznej gleb są ściśle powiązane z ich podstawowymi cechami (składem granulometrycznym, zawartością wody i substancji organicznej) i mogą służyć do wyznaczania obszarów charakterystycznych w obrębie danego pola produkcyjnego (Zagórda i in. 2020). W przypadku wielokomórkowych organizmów żywych, tj. roślin, zwierząt czy grzybów, ze względu na występowanie w ich komórkach elementu pojemnościowego, jakimi są głównie błony lipidowe, wartość mierzonego przewodnictwa elektrycznego jest sumą konduktancji i susceptancji tkanek, którą określa się przez admitancję elektryczną wzorem (Wesoły i Pukacki 2009):

$$Y = G + jB \quad (1)$$

gdzie:

$Y$  – admitancja wyrażona w simensach [S],

$G$  – konduktancja wyrażona w simensach [S],

$jB$  – susceptancja wyrażona jako wartość urojona [S].

Susceptancja określana jest jako odwrotność kapacytancji, czyli oporu biernego pojemnościowego. Opór ten jest pozorną rezystancją, jaką stawia element pojemnościowy (kondensator w tym przypadku tworzony przez błony cytoplazmatyczne) pod wpływem przemiennego prądu elektrycznego, a wyraża ją zależność (Kobosko 1966; Libuś i Libuś 1987):

$$jB = \frac{1}{X_C} \quad (2)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3)$$

gdzie:

$jB$  – susceptancja wyrażona jako wartość urojona w odwrotności kapacytancji [ $\Omega^{-1}$ ],

$X_C$  – kapacytancja wyrażona w omach [ $\Omega$ ],

$f$  – częstotliwość prądu przemiennego wyrażona w hercach [Hz],

$C$  – pojemność elektryczna ośrodka wyrażona w faradach [F].

Przepływ prądu elektrycznego jest efektem działania pola elektrycznego przenikającego przez wybrany ośrodek. Pobudzone do ruchu zostają wówczas składniki ośrodka, takie jak jony i elektrony. Przyrządem umożliwiającym



pomiary admitancji w roślinach jest konduktometr pracujący w warunkach stałej, niskiej częstotliwości prądu (80 Hz) i napięcia 0,2 V (Wesoły 2006). Zaletami tej metody są: możliwość wykonania pomiarów w warunkach terenowych, szybkość oraz ograniczona do minimum ingerencja w tkanki sadzonek (igłowe elektrody o długości 1 mm). W zależności od rodzaju materiału, z którego zbudowany jest ośrodek, pole elektryczne w różnym stopniu wpływa na gęstość prądu elektrycznego, ponieważ ośrodek stawia opór o różnym stopniu nasilenia (Kobosko 1966).

Porównanie między sobą materiałów pod względem przewodnictwa elektrycznego w sposób bezwzględny wymaga wzięcia pod uwagę wymiarów badanego ośrodka oraz innych parametrów, tj. temperatury i ciśnienia. W praktyce stosuje się standaryzację do warunków normalnych. Admitancja stanowi wartość zespoloną i parametr charakterystyczny dla poszczególnych materiałów, w warunkach normalnych – niezmienny. Oznacza to, że możliwe jest charakteryzowanie badanych materiałów pod kątem przewodnictwa elektrycznego (Wesoły i Pukacki 2009).

Jak wskazują wyniki badań prowadzonych nad przechowywaniem sadzonek kontenerowych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w różnych warunkach (Wesoły i Hajdasz 2014), bardzo dobrą metodą oceny jakości fizjologicznej sadzonek po przezimowaniu jest pomiar admitancji strzałki w odległości 1,5 cm pod pączkiem szczytowym. Obecnie w praktyce leśnej zaleca się stosowanie pomiaru admitancji zarówno do oceny jakości fizjologicznej sadzonek rosnących w szkółce, jak i na uprawach. Istnieje związek między żywotnością sadzonek a ogólnym stanem biochemicznym i elektrochemicznym, co wprost przekłada się na konduktywność i admitancję. Co istotne, możliwe jest określenie żywotności sadzonek za pomocą tylko jednego pomiaru (Wesoły i Pukacki 2009). Sposób pomiaru, jego terminy oraz wartości porównawcze admitancji zostały opisane w „Instrukcji wykonywania oceny jakości fizjologicznej sadzonek i sposobu postępowania z sadzonkami w okresie od ich wyjęcia do posadzenia na uprawie” z dnia 27 listopada 2001 roku, przesłanej do jednostek organizacyjnych Polskiego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe (PGL LP) przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych. Omawiana metoda, stosowana z powodzeniem dla niektórych gatunków drzew lasotwórczych, jak dotąd nie była użyta do oceny zdrowotności sadzonek dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) i buka pospolitego (*Fagus sylvatica* L.) w produkcji kontenerowej.

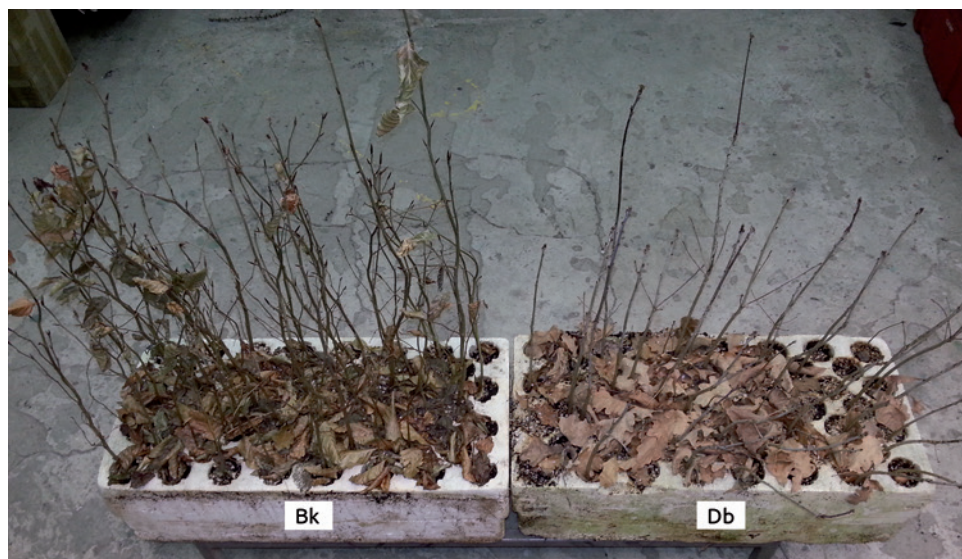
Celem badań była analiza przewodnictwa elektrycznego pędów sadzonek dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) oraz buka pospolitego (*Fagus sylvatica* L.) na podstawie oceny przebiegu i wartości rozkładu admitancji. Admitancja potencjalnie umożliwi określenie klas jakości sadzonek bez przeprowadzania szczegółowych pomiarów biometrycznych, ponieważ jej zmiany charakteryzują stan fizjologiczny sadzonek.

## 2. Materiał i metody

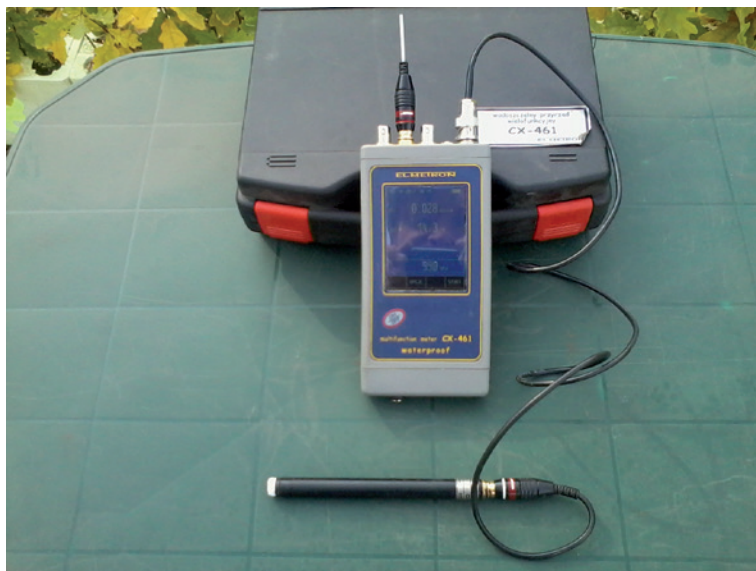
Sadzonki do badań pobrano jesienią 2019 roku ze Szkółki Kontenerowej Sowin znajdującej się na terenie Nadleśnictwa Gidle, gdzie wyhodowano je w pojemnikach styropianowych jako materiał sadzeniowy 1/0k (ryc. 1).

Prace pomiarowe wykonano na 100 sadzonkach, odpowiednio po 50 sztuk dla dębu szypułkowego i buka zwyczajnego, zawartych w 2 osobnych pojemnikach kontenerowych, po ustaleniu pełnego procesu przygotowania do zimowania, czyli zdrewnieniu pędów. Wartość admitancji mierzono za pomocą przyrządu pomiarowego CX-461 (ryc. 2) z dokładnością  $\pm 0,001 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Pomiar długości części nadziemnej (strzałki) wykonano przymiarem liniowym z dokładnością do  $\pm 0,1 \text{ cm}$ , natomiast średnicy w szyjce korzeniowej za pomocą suwmiarki elektronicznej (do  $\pm 0,05\text{mm}$ ).

Stabilny odczyt admitancji uzyskiwano po 7 sekundach pomiaru za pomocą elektrody zakończonej niklowanymi igłami, służącymi do wkłuwania w połowie długości zdrewniałego pędu dla każdej sadzonki osobno (ryc. 3). Pojedyncze odczyty admitancji zapisywano w wewnętrznej pamięci miernika, co ułatwiło dalszą archiwizację i obróbkę matematyczno-statystyczną danych. Pomiar przewodnictwa elektrycznego prowadzono w połowie wysokości zdrewniałego pędu, modyfikując metodę zastosowaną przez Wesołego (2006), ponieważ proponowane przez tego autora wykonywanie pomiaru w połowie ostatniego niezdrewniałego przyrostu było problematyczne ze względu na wiek sadzonek. Następnie



Ryc. 1. Sadzonki kontenerowe buka zwyczajnego (Bk) oraz dębu szypułkowego (Db)  
(fot. Ł. Mateusiak)



Ryc. 2. Przyrząd CX-461 (fot. Ł. Mateusiak)



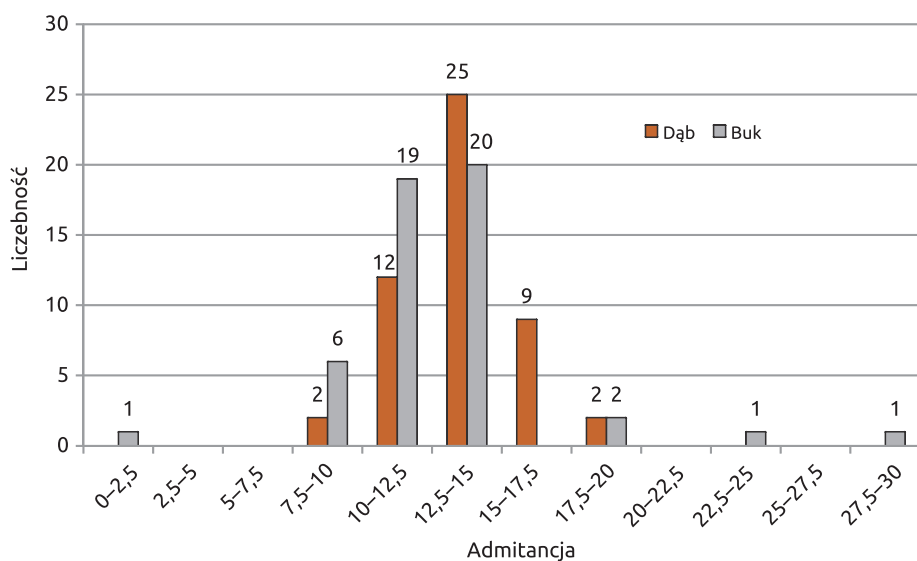
Ryc. 3. Wykonanie pomiaru admittancji w potowie zdrewniałego pędu (strzałki) sadzonki (fot. Ł. Mateusiak)

badany materiał sadzeniowy oceniono za pomocą obecnie stosowanej normy europejskiej, klasyfikując rośliny według następujących kryteriów: dla dębu średnica w szyjce korzeniowej – co najmniej 2 mm, wysokość części nadziemnej – co najmniej 7 cm, natomiast w przypadku buka wysokość – co najmniej 10 cm, zaś średnica w szyjce – dowolna. Ponadto sadzonki musiały charakteryzować się następującymi cechami: mieć nieuszkodzony, zdrowy i dobrze wykształcony pączek szczytowy, nie posiadać więcej niż jednego pędu głównego, nie posiadać uszkodzeń mechanicznych, w szczególności otwartych ran na pędach lub korzeniach sięgających miazgi lub drewna, nie posiadać uszkodzeń korzeni i pędów spowodowanych mrozem, być pozbawione śladów żerowania przez szkodliwe organizmy, nie posiadać oznak przesuszenia, przegrzania, pleśnienia lub gnicia (Rozporządzenie... 2004. Dz. U. Nr 85, poz. 766).

### 3. Wyniki

Uzyskane wyniki pomiarów admitancji, długości części nadziemnej oraz średnicy w szyjce korzeniowej poddano analizie statystycznej (tab. 1) oraz przedstawiono w formie histogramu, gdzie frekwencja zanalizowana została w stałych przedziałach wartości admitancji dla obydwu badanych gatunków jednocześnie (ryc. 4).

Współczynnik zmienności admitancji dla sadzonek dębu szypułkowego był wyraźnie niższy od współczynników uzyskanych z pomiaru długości strzałki oraz średnicy w szyjce korzeniowej. W przypadku buka zwyczajnego współczyn-

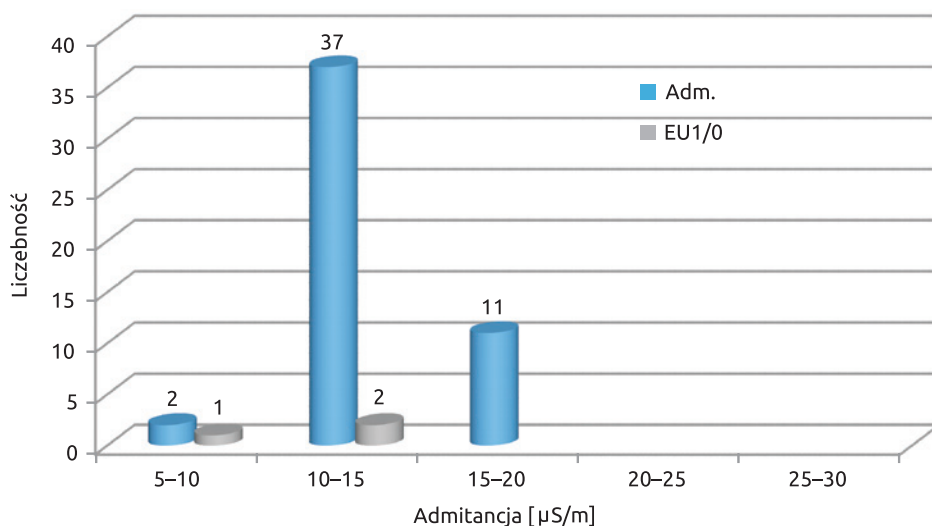


Ryc. 4. Rozkład liczby sadzonek dębu i buka w wyróżnionych przedziałach admitancji

niki zmienności długości i średnicy były identyczne i wynosiły 0,31, natomiast wartość tego parametru dla admitancji była nieco niższa i lepsza w zastosowaniu praktycznym ze względu na możliwość wykonania tylko jednego pomiaru (tab. 1). Kolejny etap analizy stanowiło podzielenie rozkładu admitancji tak, aby szerokość przedziałów mieściła się w granicach wartości podwójnego odchylenia standardowego, oraz zestawienie wyników z uwzględnieniem liczby sadzonek niespełniających normy jakościowej (ryc. 5 i 6). W przypadku obu gatunków

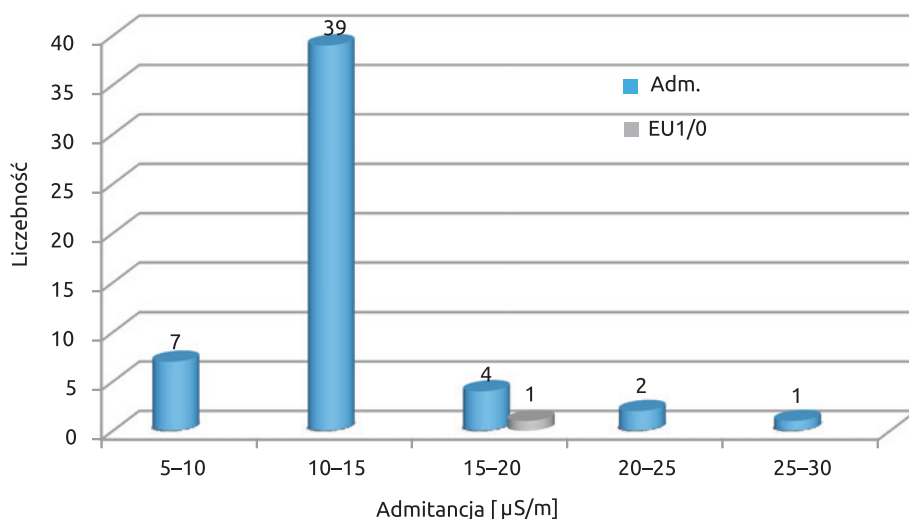
**Tabela 1.** Podstawowe statystyki opisowe analizowanych zmiennych

|  | Średnia        |               | Odchylenie standardowe |               | Współczynnik zmienności |               |
|--|----------------|---------------|------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
|  | Dąb szypułkowy | Buk zwyczajny | Dąb szypułkowy         | Buk zwyczajny | Dąb szypułkowy          | Buk zwyczajny |
| Admitancja [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] | 13,56          | 12,75         | 2,13                   | 3,47          | <b>0,16</b>             | <b>0,27</b>   |
| Długość strzałki [cm]                  | 37,46          | 41,10         | 17,34                  | 12,93         | 0,46                    | 0,31          |
| Średnica w szyjce [mm]                 | 5,11           | 4,35          | 1,48                   | 1,34          | <b>0,29</b>             | 0,31          |



**Ryc. 5.** Udział sadzonek dębu szypułkowego z podziałem na przedziały admitancji (Adm.) względem udziału sadzonek pozaklasowych (EU1/0)





Ryc. 6. Udział sadzonek buka zwyczajnego z podziałem na przedziały admitancji (Adm.) względem udziału sadzonek pozaklasowych (EU1/0)

bardzo wyraźnie zaznaczał się przedział admitancji 10–20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , w którym zawarte były niemal wszystkie sadzonki.

#### 4. Podsumowanie i dyskusja

Sadzenie, będące najpowszechniejszym sposobem odnowienia sztucznego drzewostanu, w praktyce leśnej wykonywane jest z przygotowaniem i bez przygotowania gleby. W przypadku dębu i buka zalecana liczba wysadzanych roślin dla odnowienia sztucznego wynosi od 6 do 8 tys. sztuk na hektar (Haze 2012). W Państwowym Gospodarstwie Leśnym Lasy Państwowe rocznie produkuje się ponad 40 mln sztuk sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym (Wesoły i Hajdasz 2014). Niemniej jednak nie wszystkie sadzonki wykorzystywane są w dalszej produkcji. Jak wiadomo, podstawową miarą przydatności materiału sadzeniowego w początkowym etapie produkcji szkółkarskiej jest ocena zdolności kiełkowania. Badania wskazują również, że istnieje ścisła zależność między objętością żołądka a stanem rozwoju części nadziemnej i podziemnej dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) oraz dębu czerwonego (*Quercus rubra* L.), a także związek między parametrami długości pędu i korzenia głównego oraz całkowitą świeżą i suchą masą siewek (Bednarz 1998). Parametry wyżej wymienione są podstawą do oceny jakości materiału sadzeniowego.

Przydatność produkowanych sadzonek do dalszej uprawy poddawana jest procesowi kwalifikacji jakościowej materiału sadzeniowego, tzn. sortowaniu,



którego się dokonuje przede wszystkim na podstawie tempa wzrostu roślin. Główną metodą oceny przydatności materiału sadzeniowego do dalszej uprawy jest ocena i ich klasyfikacja opierająca się na cechach morfologicznych, a w szczególności wykorzystująca wartości wysokości i średnicy w szyjce korzeniowej. Ocenę tę przeprowadza się na podstawie pomiaru sadzonek dokonywanego bezpośrednio w terenie. W zależności od jakości materiału sadzeniowego wyróżniane są 2 klasy – spełnia lub nie spełnia normy. Ponadto materiał podlega ocenie szczegółowej. Sortowanie materiału sadzeniowego jest zatem czynnością bardzo pracochłonną i wymagającą sporego doświadczenia. Spośród jednorocznych sadzonek dębu szypułkowego do pierwszej klasy zaliczane są te o odpowiedniej długości pędu oraz grubości w szyjce korzeniowej. Zaś w przypadku sadzonek buka pospolitego w tym samym wieku jedyną cechą biometryczną braną pod uwagę jest parametr wysokości.

W przedstawionych badaniach współczynniki zmienności parametru długości strzałki i średnicy w szyjce korzeniowej dla buka osiągnęły tę samą wartość (0,31), co potwierdza słuszność rezygnacji w normie europejskiej z pomiaru grubości w szyjce korzeniowej. Klasyfikacja materiału sadzeniowego dla jednorocznego buka oparta jedynie na kryterium pomiaru wysokości wydaje się być poprawna w kontekście uzyskanego wyniku. Natomiast w prezentowanych badaniach współczynnik zmienności długości strzałki dla dębu osiągnął diametralnie różne wartości w odniesieniu do średnicy w szyi korzeniowej (0,46 długość strzałki i 0,29 średnica w szyjce korzeniowej). Cecha intensywności przyrostu w początkowym okresie życia ma zatem kluczowe znaczenie, szczególnie dla dębu i jego dalszej uprawy. Młode drzewka w pierwszych latach po wysadzeniu narażone są bowiem na negatywne oddziaływanie ze strony czynników pochodzących ze świata ożywionego – konkurencja wewnątrz- i międzyosobnicza, szkodniki pierwotne, zgryzanie przez zwierzynę, jak i czynników abiotycznych, takich jak susza, przymrozki itp.

W analizowanym materiale sadzeniowym nie wystąpiły wady opisywane jako dyskwalifikujące materiał według normy europejskiej (Rozporządzenie... 2004. Dz. U. Nr 85, poz. 766). Kryterium wysokości i długości korzenia sadzonki nie zawsze jednak musi odzwierciedlać stan fizjologiczny rośliny, może być m.in. pochodną braku konkurencji między- i wewnątrzosobniczej czy też efektem cech endogennych samej rośliny. Występuje także głębsza zależność związana ze sposobem przygotowania nasion do siewu, który wpływa na jakość i żywotność sadzonek oraz jeszcze wyraźniej indukuje różnice w przewodności elektrycznej pędów wyhodowanych sadzonek kontenerowych (Tylek i in. 2018). Z punktu widzenia udatności uprawy oraz osiągnięcia sukcesu produkcyjnego, obok cech morfologicznych sadzonki, istotny jest stan fizjologiczny rośliny przed jej dalszym wykorzystaniem w produkcji, który pomimo dogodnych parametrów biometrycznych może być zróżni-

cowany i w dużym stopniu zależy od sposobu przechowywania i procesu produkcji materiału sadzeniowego.

W prezentowanych badaniach, pomimo zaklasyfikowania zdecydowanej większości sadzonek do dalszej produkcji, stwierdzono zróżnicowany stan żywotności na podstawie pomiaru admitancji sadzonek. Wielgosz i Wesoły (2000) dowodzą, że przewodność elektryczna stanowi istotny parametr służący ocenie przydatności materiału sadzeniowego do dalszej uprawy. Metoda oceny żywotności sadzonek na podstawie pomiaru admitancji uznawana jest za jeden z najskuteczniejszych sposobów klasyfikacji materiału sadzeniowego (Wesoły i in. 1998). Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano zróżnicowaną wartość admitancji sadzonek w obrębie gatunku oraz między gatunkami, co może świadczyć o zróżnicowanym stanie fizjologicznym roślin. Najniższe i najwyższe wartości przewodności elektrycznej spośród wszystkich badanych sadzonek wystąpiły u buka, odpowiednio 6,70  $\mu\text{S}/\text{cm}$  i 27,88  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . W przypadku dębu wartości admitancji osiągnęły poziom od 9,24  $\mu\text{S}/\text{cm}$  do 18,61  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Średnia wartość przewodnictwa między gatunkami plasowała się na podobnym poziomie, tj. 13,56  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dla dębu i 12,70  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dla buka. Sadzonki buka charakteryzowały się zatem bardziej zróżnicowanym stanem fizjologicznym.

Skrajne wartości admitancji zarejestrowano jedynie u pojedynczych okazów roślin, co jednak nie zostało potwierdzone w obowiązującej obecnie klasyfikacji materiału sadzeniowego, ponieważ wystąpiła tylko 1 sadzonka pozaklasowa na 100 przebadanych, u której niska wartość admitancji strzałki potwierdziła zaniżone wymiary biometryczne (sadzonka dębu o wysokości 6,9 cm, średnicy w szyjce 2,17 mm i admitancji 9,24  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Należy wspomnieć, iż w przedstawionym doświadczeniu pominięto analizę systemu korzeniowego. Wydaje się, że takie badanie również mogłoby być przeprowadzone metodami elektrycznymi głównie przy wykorzystaniu zjawiska pojemności. Za przykład mogą posłużyć badania wykonane przez Kormanka i in. (2015), w których dla jednorocznych sadzonek buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.) w warunkach laboratoryjnych wykazano istotne korelacje między powierzchnią systemu korzeniowego a prostokątnymi elektrodami pomiarowymi. Wszystko wskazuje na to, że zastosowana metoda oceny stanu fizjologicznego przy wykorzystaniu pomiaru admitancji, pomimo uzyskania zróżnicowanych wyników, wymaga potwierdzenia innymi niż klasyfikacja normatywna metodami, np. oceną przeżywalności materiału sadzeniowego w uprawie.

## 5. Wnioski

1. Analiza rozkładów admitancji sadzonek dębu szypułkowego oraz buka pospolitego ukazuje różnice w przewodności elektrycznej pomiędzy gatunkami należącymi do tej samej rodziny (*Fagaceae*).
2. Sadzonki buka pospolitego charakteryzują się większą rozpiętością wartości admitancji, co oznacza bardziej zróżnicowany stan fizjologiczny w porównaniu z sadzonkami dębu szypułkowego. Nie musi to jednak być tożsame z niską jakością, ponieważ według obowiązujących norm wszystkie sadzonki buka były zaklasyfikowane jako żywotne.
3. Klasyfikacja sadzonek na podstawie obowiązujących norm jakościowych wyłoniła tylko jedną sadzonkę pozaklasową (sadzonka dębu o zaniżonej wysokości strzałki), co potwierdził pomiar admitancji, za pomocą którego zarejestrowano najniższą wartość przewodnictwa dla gatunku.
4. Pomimo różnic w szerokości i wartości rozkładów admitancji badanych gatunków średnia wartość przewodnictwa elektrycznego kształtowała się podobnie, co prawdopodobnie może wynikać z kontrolowanych (identycznych dla obu gatunków) warunków hodowli kontenerowej.
5. Pomiar admitancji sadzonek dostarcza więcej informacji na temat ich stanu fizjologicznego i daje potencjalną możliwość nowej klasyfikacji. W celu pełnego wykorzystania tej metody do oceny jakościowej należy przeprowadzić badania w dłuższym okresie czasu, np. z wykorzystaniem oceny przeżywalności materiału sadzeniowego w uprawie.

## Literatura

- Bednarz B.** 1998. Zależności pomiędzy wielkością nasion a dystrybucją biomasy u siewek dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) i czerwonego (*Quercus rubra* L.). Zeszyty Naukowe AR im. H. Kołłątaja w Krakowie. Seria Leśnictwo, 27, 33–47.
- Białobok B., Pukacki P.** 1974. Relationship Between Measurements of Electrical Admittance of Shoots and Frost Hardiness of *Viburnum* Species. Arboretum Kórnickie, 19, 207–220.
- Blanchard R.O., Carter J.K.** 1980. Electrical Resistance Measurements to Detect Dutch Elm Disease Prior to Symptom Expression. Canadian Journal of Forest Research, 10, 111–114.
- Haze M. Red.** 2012. Zasady hodowli lasu. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Ośrodek Rozwojowo-Wdrożeniowy Lasów Państwowych w Bedoniu, Warszawa.
- Instrukcja wykonywania oceny jakości fizjologicznej sadzonek i sposobu postępowania z sadzonkami w okresie od ich wyjęcia do posadzenia na uprawie z dnia 27 listopada 2001 r. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa.

- Kobosko E. 1966. Inżynieria elektryczna. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Kormanek M., Gołąb T., Klimek-Kopyra A. 2015. Modification of the Tree Root Electrical Capacitance Method Under Laboratory Conditions. *Tree Physiology*, 36(1), 1–7.
- Libuś W., Libuś Z. 1987. Elektrochemia. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Lindberg M., Johansson M. 1989. The Use of Electrical Resistance of Cambium and Floem as a Measure of Tree Vigour. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 7, 547–556.
- PN-R-67025. Polska norma z dnia 28.01.1999 r. Materiał sadzeniowy – Sadzonki drzew i krzewów do upraw leśnych i na plantacje.
- Pukacki P. 1973. Laboratoryjne metody oceny odporności roślin drzewiastych na niskie temperatury. *Arboretum Kórnickie*, 18, 187–198.
- Pukacki P.M. 1982. Influence of Freezing Damage on Impedance Parameters in Magnolia Shoots. *Arboretum Kórnickie*, 27, 219–234.
- Pukacki P.M., Kamińska-Rożek E. 2005. Effect of Drought Stress on Chlorophyll a Fluorescence and Electrical Admittance of Shoots in Norway Spruce Seedlings. *Trees*, 19, 539–544.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 lutego 2004 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakie powinien spełniać leśny materiał rozmnożeniowy. *Dz. U. Nr 85, poz. 766*.
- Tylek P., Mateusiak Ł., Kaliniewicz Z. 2018. Skaryfikacja żołądździ a stan fizjologiczny sadzonek dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.). W: F. Adamczyk i in. *Użytkowanie maszyn rolniczych i leśnych – badania naukowe i dydaktyka: monografia*. Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, Poznań, 47–53.
- Wesoły W. 2006. Ocena jakości fizjologicznej sadzonek. W: *Elementy genetyki i hodowli selekcyjnej drzew leśnych*. J. Sabor Red. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa, 379–386.
- Wesoły W., Berft M. 2014. Szkółkarstwo leśne – co wyrasta z tradycji? *Las Polski*, 11, 10–11.
- Wesoły W., Hajdasz M. 2014. Przechowywanie sadzonek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) przez zimę w różnych warunkach. *Zarządzanie Ochroną Przyrody w Lasach*, 8, 238–245.
- Wesoły W., Pukacki P.M. 2009. Admitancja. W: *Szkółkarstwo leśne od A do Z*. W. Wesoły, M. Hauke. Red. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa, 11–16.
- Wesoły W., Pukacki P.M., Naparty E. 1998. Zastosowanie metod biofizycznych do oceny żywotności sadzonek sosny, świerka i modrzewia. *Sylwan*, 8, 55–64.
- Wielgosz E., Wesoły W. 2000. Metody oceny żywotności sadzonek produkowanych w warunkach szkółek kontenerowych w powiązaniu z uszkodzeniami, powodowanymi czynnikami stresowymi. *Prace Komisji Nauk Rolniczych i Komisji Nauk Leśnych*. Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk, 88, 137–146.
- Zagórda M., Drózd T., Miernik A., Popardowski E., Trzyniec K., Nawara P., Juliszewski T., Kovalyshyn O., Oblicki M. 2020. Analiza przestrzennego zróżnicowania przewodności elektrycznej gleby w zależności od warunków mikroklimatycznych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1, 202–205.



# Porównanie właściwości fizycznych wybranych odmian owoców orzecha włoskiego (*Juglans regia* L.)

## Danuta Owoc

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: danuta.owoc@urk.edu.pl

## Abstrakt

Celem niniejszego badania było określenie wybranych właściwości fizycznych różnych odmian orzecha włoskiego (*Juglans regia* L.). Znajomość właściwości fizycznych jest niezbędna do projektowania procesów technologicznych związanych z przetwarzaniem orzechów do celów konsumpcyjnych. Materiał badawczy stanowiło 6 odmian orzecha włoskiego pochodzących z terenów południowej Polski: 'Mars', 'Young', 'Seifersdorfsky', U01, U13, U17, spośród których przebadano od 30 do 50 owoców.

Określono cechy morfologiczne badanych owoców. Charakteryzują się one znacznym zróżnicowaniem, co jest spowodowane warunkami klimatycznymi i glebowymi. Średnia wilgotność analizowanych skorupki wynosi ok. 10%, a jąderka 15%. Badane odmiany orzechów włoskich (*Juglans regia* L.) możemy zaliczyć do dużych owoców, ponieważ ich masa wynosi powyżej 10 g (12,21 g dla 'Young', 18,48 g dla U17). Procentowy udział masy jądra w masie całego owocu spełnia kryterium hodowlane, ponieważ wynosi powyżej 40–50%, co świadczy również o dobrej wartości użytkowej odmian wykorzystanych w pracy. Na podstawie współczynników sferyczności określono, że badane owoce orzechów włoskich wszystkich odmian mają kształt owalny.

Pomiary grubości skorupki pozwoliły stwierdzić, że większość przebadanych odmian cechuje się skorupką o średniej grubości (U13 – 1,33 mm, 'Mars' – 1,55 mm, 'Young' – 1,58 mm i U01 – 1,72 mm), jedynie 2 odmiany mają skorupkę grubą ('Seifersdorfsky' – 1,85 mm i U17 – 2,21 mm).

Wyznaczenie gęstości skorupki i jąderki pozwoliło podzielić badane odmiany na 2 grupy: pierwsza grupa to owoce, które posiadają większą gęstość skorupki ( $\rho_s$ ) niż jąderka ( $\rho_j$ ), (U01  $\rho_s = 1,005 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\rho_j = 0,988 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 'Young'  $\rho_s = 1,108 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\rho_j = 0,988 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  i 'Mars'  $\rho_s = 1,066 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\rho_j = 0,996 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ); druga grupa to owoce, które charakteryzuje większa gęstość jąderka ( $\rho_j$ ) niż skorupki ( $\rho_s$ ), (U13



$\rho_s = 1,001 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\rho_j = 1,007 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , U17  $\rho_s = 0,999 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\rho_j = 1,032 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  oraz 'Seifersdorfsky'  $\rho_s = 0,966 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\rho_j = 1,020 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ).

Wykonany w ramach zastosowanej analizy wariancji ANOVA test Tukeya – wielokrotnych porównań średnich HSD – wykazał, że odmiany różniły się statystycznie ze względu na badane cechy. Współczynniki korelacji liniowej Pearsona między wybranymi cechami pokazały istotność statystyczną pomiędzy nimi.

**Słowa kluczowe:** cechy morfologiczne, gęstość, siła niszcząca

## 1. Wstęp

Orzech włoski (*Juglans regia* L.) pochodzi z Azji Środkowej. Obecnie jest to popularna roślina uprawna w wielu krajach na świecie. W światowej produkcji orzechów orzechy włoskie zajmują drugie miejsce za migdałami. Wykorzystuje się zarówno drewno tego gatunku, jak i owoce (Ercisli 2004). Do największych producentów owoców orzecha włoskiego na świecie zaliczamy Chiny, Iran, USA czy Turcję, ale także Ukrainę i Chile (Erturk i Dalkilic 2011). Natomiast największymi eksporterami tych owoców są USA, Chile i Ukraina.

Owoce orzecha włoskiego są bardzo bogate w olej, witaminy, minerały i białka (Sze-Tao i Sathe 2000; Anderson i in. 2001; Amaral i in. 2003, 2005; Reiter i in. 2005; Yang i in. 2009; Özcan 2009; Özcan i in. 2010), co czyni je towarem poszukiwanym przez klientów indywidualnych oraz koncerny przemysłowe. Wykorzystywane są zarówno owoce orzecha włoskiego (często wyłuskane), jak i olej.

Charakterystyczna dla orzechów włoskich jest duża zmienność cech morfologicznych, na co wpływają właściwości regionu, w którym drzewa są uprawiane. Zauważa się różnicę np. w rozmiarze, kształcie czy masie owoców. Właściwości te mają wpływ na przechowywanie i przetwarzanie owoców. Pomiarów cech morfologicznych prowadzone były w wielu krajach, m.in. w Turcji (Ozkan i Koyuncu 2005; Altuntaş i Erkol 2009, 2010, 2011; Ercisli i in. 2012), Portugalii (Pereira i in. 2008), Hiszpanii (Tapia i in. 2013), Iranie (Ebrahimi i in. 2009).

Drzewa orzecha włoskiego w Polsce są rozmnażane generatywnie (z nasion) ze względu na chłodny klimat. Otrzymywane w ten sposób drzewa bardzo różnią się cechami biologicznymi, budową morfologiczną, wczesnością wschodzenia w okresie owocowania, plennością, wielkością i kształtem orzechów, grubością i twardością skorupy, a także udziałem jąderka w ogólnej masie orzechów (Majewska i in. 2003; Zdyb 2003).

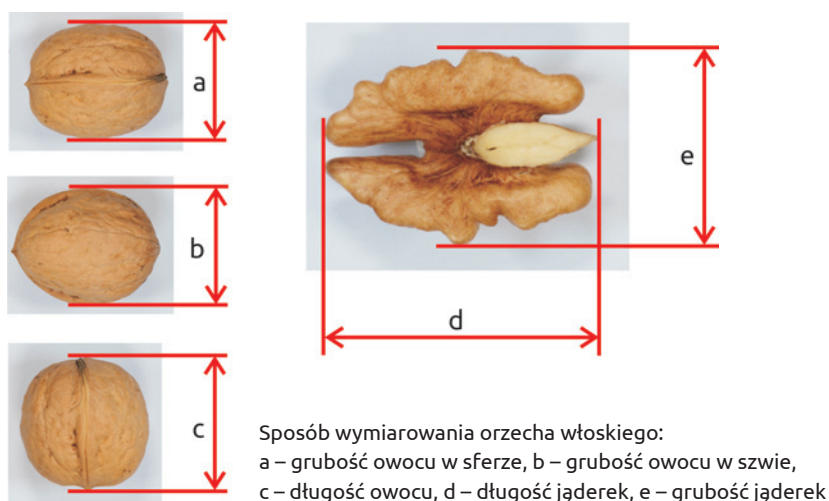
Celem pracy było zbadanie i porównanie wybranych cech fizycznych kilku odmian orzecha włoskiego (*Juglans regia* L.) pochodzących z Polski. Ich znajomość jest niezbędna do projektowania procesów technologicznych, związanych z obróbką orzecha na cele konsumpcyjne.

## 2. Materiał badawczy i metody

Materiał badawczy stanowiło 6 odmian orzecha włoskiego: ‘Mars’, ‘Young’, ‘Seifersdorfsky’, U01, U13, U17, pochodzących z południowej Polski. Przebadano od 30 do 50 owoców każdej z nich.

Określono cechy morfologiczne badanych owoców, wyznaczając:

- masę owocu, jąderka oraz skorupki przy użyciu wagi laboratoryjnej WPS510/C/1 RADWG,
- długość owocu (c), grubość owocu w sferze (a) i w szwie (b), grubość skorupki w sferze i w szwie (trzykrotnie dla każdego owocu), długość (d) i grubość (e) jąderek (ryc. 1). Pomiary wykonano przy pomocy suwmiarki elektronicznej z dokładnością do 0,01mm,
- gęstość jąderek i skorupek.



Ryc. 1. Wymiarowanie orzecha włoskiego (fot. D. Owoc)

W badaniach zastosowano metodę pomiaru wyznaczania gęstości ciał stałych, polegającą na ważeniu badanej próbki w powietrzu (górną szalkę), a następnie w cieczy (dolną szalkę) (ryc. 2).

Gęstość obliczono ze wzoru:

$$\rho = \frac{A}{A - B} \rho_o \quad (1)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość próbki [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ],

A – masa próbki w powietrzu [g],

$B$  – masa próbki w cieczy [g],

$\rho_o$  – gęstość cieczy użytej do pomiaru [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ].

Ważnym kryterium w badaniach był wybór cieczy, w której dokonywano pomiaru. Pierwotnie miała być to woda, lecz okazało się, iż skorupki unoszą się na jej powierzchni, dlatego wybrano alkohol. Ma on mniejszą gęstość niż woda, analizowane próbki tonęły w nim bez dodatkowego obciążenia. Ponadto alkohol lepiej zwilżał badany materiał, dzięki czemu pomiar był szybszy i dokładniejszy.

Ważną kwestię podczas pomiarów stanowiła kontrola gęstości alkoholu. Po pierwsze alkohol wykazuje właściwości lotne i w kontakcie z powietrzem zmieniają się jego właściwości (m.in. pochłania wodę z powietrza). Po drugie rozpuszcza tłuszcz zawarty w orzechach, powodujący zmianę jego gęstości. Założono, że dopuszczalna zmiana gęstości cieczy może wynosić do 5%. Wykonywano kontrolny pomiar masy metalowej kulki, na podstawie którego po każdych 30 zmierzonych orzechach obliczano gęstość alkoholu. Jeżeli gęstość nie spełniała założonego kryterium, ciecz wymieniano na nową.



Ryc. 2. Waga pomiarowa z zestawem do pomiaru gęstości ciał stałych (fot. D. Owoc)

### 3. Wyniki badań i dyskusja

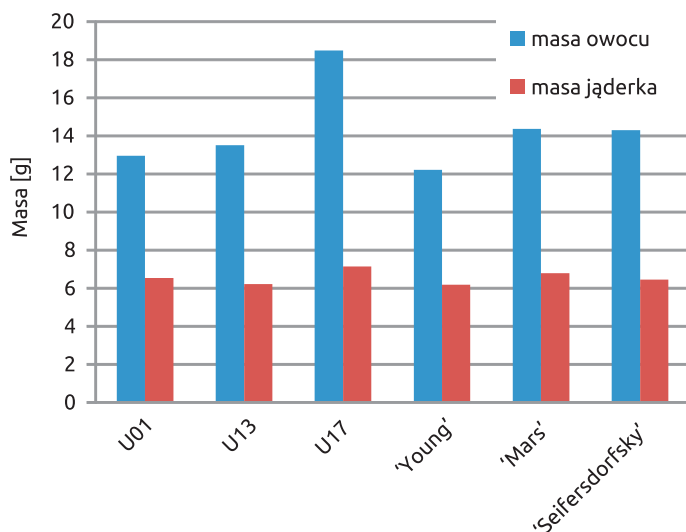
Badania rozpoczęto od wyznaczenia wilgotności zarówno skorupki, jak i jąderka. Dla skorupki średnia wilgotność wynosiła ok. 10%, dla jąderka była większa i wynosiła 15%. Suszenie próbek odbywało się w temperaturze 65°C przez 24 godziny, by olejki zawarte w jąderkach nie wyparowały.

Orzechy ze względu na masę całego owocu dzieli się na 3 grupy: bardzo małe o masie 2–4 g, średniej wielkości – 5–10 g i duże – powyżej 10 g (Majewska i in. 2003). Na podstawie średnich mas przebadanych odmian owoców orzecha włoskiego (ryc. 3) można je zaliczyć do grupy owoców dużych. Największą masą średnią owoców charakteryzuje się odmiana U17 – 18,48 g, zaś najmniejszą ‘Young’ – 12,21 g. Bardzo zbliżoną masę całego owocu mają odmiany ‘Mars’ i ‘Seifersdorfsky’ – ok. 14,4 g.

Masy jąderka badanych odmian wykazują mniejszą zmienność niż skorupki, mieszczą się w przedziale od 6,18 g dla ‘Young’ do 7,15 g dla U17.

Do analizy wykonanych pomiarów zastosowano analizę wariancji ANOVA. Dla cech, których średnie różniły się istotnie statystycznie, zastosowano procedurę Tukeya – test wielokrotnych porównań średnich HSD (Honestly Significant Difference), co pozwoliło wyznaczyć grupy jednorodne.

Wykonana analiza pozwala wnioskować (tab. 1), że odmiany różnią się statystycznie ze względu na masę owocu, jąderka i skorupki. Ze względu na masę owocu i skorupki otrzymano 3 grupy jednorodne, a ze względu na masę jąderka – 2.



Ryc. 3. Masy średnie całego owocu i jąderka badanych odmian orzechów włoskich

**Tabela 1.** Wyniki analizy wariancji oraz grupy jednorodne ( $\alpha = 0,05$ )

| Wyszczególnienie                                    | p value | Grupy jednorodne  |   |                |         |
|---|---------|---|---|----------------|---------|
|   |         | 1   | 2   | 3              | 4       |
| Masa owocu [g]                                      | 0,000   | <b>U01, U13,</b><br>'Seifersdorfsky', 'Mars'                    | 'Young', <b>U01, U13</b>                            | U17            |         |
| Masa jąderka [g]                                    | 0,006   | 'Young', U13,<br><b>'Seifersdorfsky', U01,</b><br><b>'Mars'</b> | <b>'Seifersdorfsky',</b><br><b>U01, 'Mars', U17</b> |                |         |
| Masa skorupki [g]                                   | 0,000   | U13, 'Mars',<br>'Seifersdorfsky'                                | 'Young', U01  | U17            |         |
| Długość owocu [mm]                                  | 0,000   | 'Seifersdorfsky', U01,<br>U13                                   | 'Young'   | 'Mars'         | U17     |
| Grubość w sferze [mm]                               | 0,000   | U01, 'Young'  | 'Mars',<br>'Seifersdorfsky'                         | U13,<br>U17    |         |
| Grubość w szwie [mm]                                | 0,000   | 'Young', 'Mars',<br>'Seifersdorfsky', U01                       | U13, U17  |                |         |
| Długość jąderka [mm]                                | 0,000   | 'Young', <b>U13, U01</b>  | <b>U13, U01,</b><br>'Seifersdorfsky'                | 'Mars',<br>U17 |         |
| Grubość jąderka [mm]                                | 0,000   | 'Mars', 'Seifersdorfsky',<br>'Young', U17, U13                  | U01   |                |         |
| Gęstość skorupy [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ] | 0,000   | 'Seifersdorfsky', <b>U17,</b><br><b>U01</b>                     | <b>U17, U01, U13</b>                                | 'Mars'         | 'Young' |
| Gęstość jąderek [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ] | 0,203   | 'Young', U01, 'Mars',<br>U13, 'Seifersdorfsky',<br>U17          |   |                |         |

Objaśnienia: pogrubioną czcionką wyróżniono odmiany, które są w 2 grupach

Na podstawie uzyskanych wyników masy całego owocu i jąderka obliczono procentowy udział masy jąderek w masie całego owocu, nazywany również współczynnikiem wypełnienia (podawany w procentach [%]):

$$W_w = \frac{m_j}{m_o} 100\% \quad (2)$$

gdzie:

$m_j$  – masa jąderka [g],

$m_o$  – masa całego owocu [g].

Za pomocą współczynnika wypełnienia uzyskujemy informację o przydatności hodowlanej danego gatunku. Przyjmuje się, że powinien on wynosić co najmniej 40–50% (Majewska i in. 2003).

Największym współczynnikiem wypełnienia cechuje się odmiana ‘Young’ (50,6%), a najmniejszym U17 (38,7%) (tab. 2). Zatem przebadane odmiany orzecha włoskiego spełniają kryterium przydatności hodowlanej.

**Tabela 2.** Współczynnik wypełnienia dla badanych odmian orzecha włoskiego

| Odmiana          | Współczynnik wypełnienia |
|------------------|--------------------------|
| U01              | 50,4                     |
| U13              | 46,0                     |
| U17              | 38,7                     |
| ‘Young’          | 50,6                     |
| ‘Mars’           | 47,3                     |
| ‘Seifersdorfsky’ | 45,1                     |

Na podstawie uzyskanych wartości wielkości całych owoców orzechów i ich jąderek (tab. 3) obliczono, że średnio jąderka są o 25% mniejsze od całych owoców.

Przeprowadzona analiza wariancji pokazała, że ze względu na wymiary całego owocu (długość, grubość w sferze i szwie) i jąderka (długość i grubość) odmiany statystycznie się różnią (tab. 1). Ze względu na długość owocu otrzymano 4 grupy jednorodne, grubość w sferze i długość jąderka podzieliła badane odmiany na 3 grupy, a wartości grubości w szwie i grubości jąderka wyznaczyły 2 grupy.

Z uzyskanych wymiarów orzechów obliczono współczynniki sferyczności:

$$K_1 = \frac{a}{c} \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{b}{c} \quad (4)$$

$$K_3 = \frac{a+b}{2c} \quad (5)$$

gdzie:

$a$  – grubość owocu w sferze,

$b$  – grubość owocu w szwie,

$c$  – długość owocu.

Badane odmiany możemy zaliczyć na podstawie wyznaczonych współczynników (ryc. 4) do odmian o kształcie owalnym.

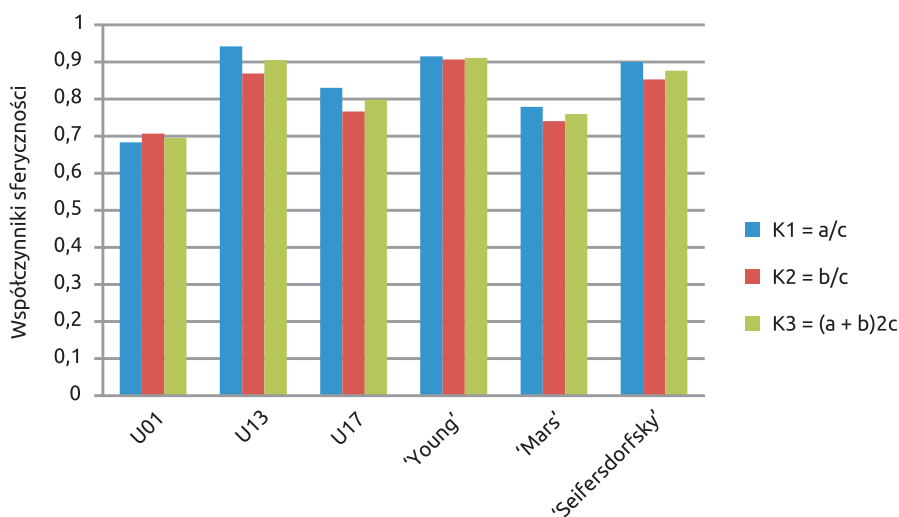


Badania wielkości wybranych odmian orzecha włoskiego podejmowano wielokrotnie w różnych regionach świata. Jednak w związku z tym, że warunki klimatyczne wpływają na cechy tych drzew, zaś każdy kraj posiada swoje odmiany, porównywanie uzyskanych wyników jest trudne.

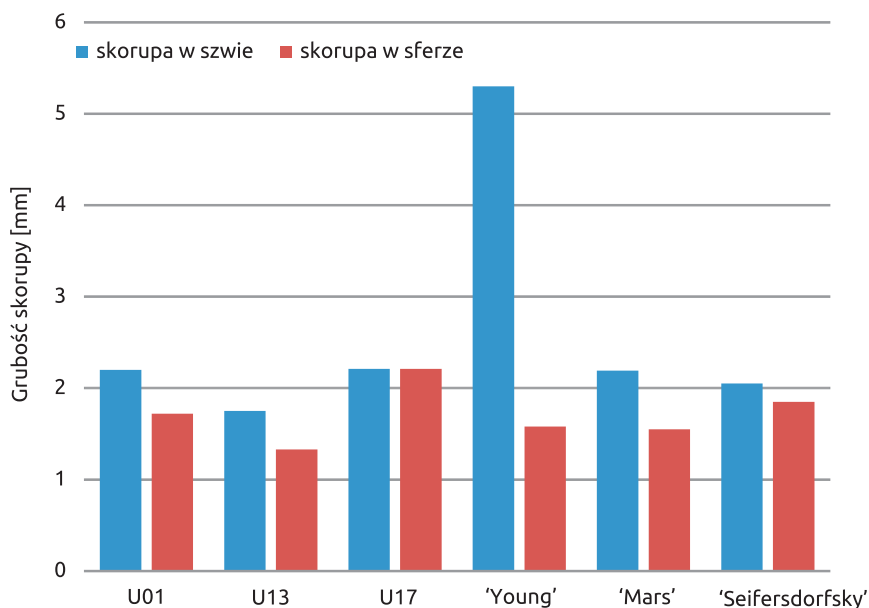
Zmierzono grubość skorupki orzechów włoskich zarówno w sferze, jak i w szwie, wykonując to badanie dla każdego owocu trzykrotnie. Uzyskane wartości średnie prezentuje rycina 5. Dla odmiany U17 grubość skorupki w sferze i w szwie ma taką samą wartość. W przypadku pozostałych odmian grubość skorupki w szwie jest większa od grubości skorupki w sferze. Największą różnicę,

**Tabela 3.** Średnie wymiary owoców i jąderek badanych odmian orzecha włoskiego z odchyleniem standardowym

| Odmiana          | Długość owocu [mm] | Grubość w sferze [mm] | Grubość w szwie [mm] | Długość jąderek [mm] | Grubość jąderek [mm] |
|------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| U01              | 41,17 ± 4,46       | 33,53 ± 1,36          | 34,66 ± 2,05         | 31,07 ± 1,70         | 25,52 ± 1,59         |
| U13              | 42,67 ± 2,59       | 40,17 ± 2,39          | 37,05 ± 2,63         | 30,21 ± 3,43         | 29,22 ± 4,46         |
| U17              | 49,08 ± 2,58       | 40,73 ± 2,09          | 37,62 ± 1,89         | 35,38 ± 2,21         | 28,57 ± 2,95         |
| 'Young'          | 37,27 ± 1,54       | 34,08 ± 1,59          | 33,78 ± 1,38         | 29,55 ± 1,24         | 28,17 ± 1,49         |
| 'Mars'           | 45,81 ± 2,31       | 35,68 ± 1,40          | 33,89 ± 1,56         | 35,12 ± 2,36         | 27,89 ± 2,37         |
| 'Seifersdorfsky' | 40,64 ± 1,54       | 36,56 ± 2,29          | 34,65 ± 1,47         | 31,71 ± 2,20         | 28,16 ± 2,21         |



**Ryc. 4.** Współczynniki sferyczności badanych odmian orzechów włoskich



Ryc. 5. Grubość skorupy w sferze i szwie badanych odmian orzechów włoskich

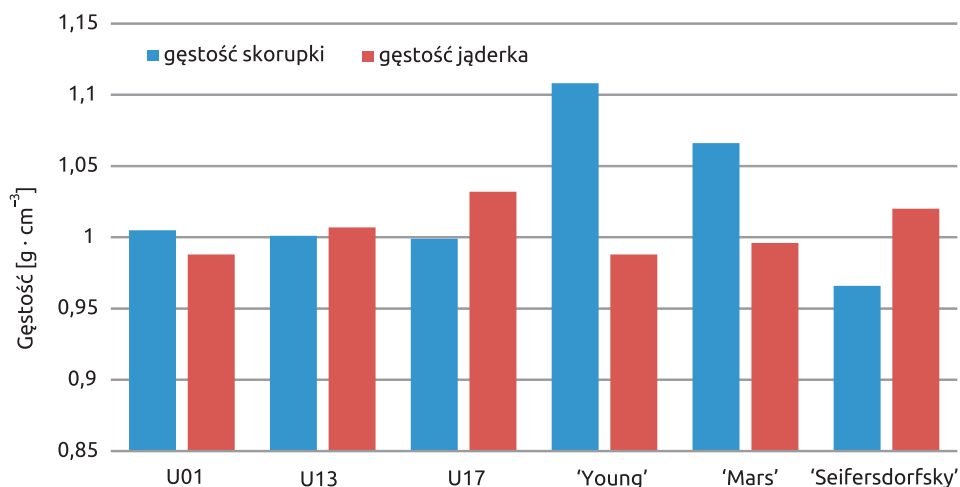
wynoszącą ok. 70%, pomiędzy wartościami grubości w badanych miejscach cechuje się odmiana 'Young'. Wynika to z budowy skorupki tej odmiany, która w miejscu łączenia 2 połówek skorupki (zwanym szwem) wykazuje znaczne zgrubienie. U pozostałych odmian w szwie nie obserwuje się takiego efektu, różnica wartości grubości skorupki w badanych miejscach utrzymuje się na poziomie od 10% do 29%.

Grubość skorupy jest zróżnicowana, co ma ogromne znaczenie podczas wyłuskiwania orzechów. Za bardzo cienką uznaje się skorupę o grubości poniżej 1,2 mm, średniej grubości – 1,2–1,8 mm, natomiast wartość powyżej 1,8 mm charakteryzuje skorupę grubą (Rejman 1976) – pomiary w sferze. Spośród przebadanych odmian 2 zaliczamy do odmian o skorupie grubej: 'Seifersdorfsky' – 1,85 mm i U17 – 2,21 mm. Pozostałe odmiany mają skorupy o średniej grubości: U13 – 1,33 mm, 'Mars' – 1,55 mm, 'Young' – 1,58 mm i U01 – 1,72 mm.

Ważną cechą rozdzielczą przy separacji stanowi gęstość. Jej znajomość jest niezbędna w projektowaniu procesów technologicznych związanych z obróbką orzecha na cele konsumpcyjne.

Ze względu na uzyskane wartości gęstości możemy wyróżnić 2 grupy (ryc. 6):

- pierwsza grupa to owoce, które posiadają większą gęstość skorupy niż jąderka, należą do niej odmiany U01, 'Young' oraz 'Mars',
- druga grupa to owoce, które posiadają większą gęstość jąderka niż skorupki, należą do niej odmiany U13, U17 oraz 'Seifersdorfsky'.



Ryc. 6. Gęstość skorupki i jąderka badanych odmian orzechów włoskich

Największą gęstością skorupy charakteryzuje się odmiana 'Young', wynosząca  $1,108 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , natomiast najmniejszą gęstość mają skorupy odmiany 'Seifersdorfsky' –  $0,966 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Największą gęstość jąderka ma odmiana U17 –  $1,032 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , a najmniejszą uzyskano dla 2 odmian: U01 i 'Young' –  $0,988 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Najmniejszą różnicą pomiędzy gęstością skorupy i jąderka cechuje się odmiana U13, utrzymując się na poziomie 1%, natomiast największa różnica wartości gęstości charakteryzuje odmianę 'Young' – 11%, następnie 'Mars' – 7% i 'Seifersdorfsky' – 6%, dla której jednak w przeciwieństwie do pozostałych większa jest gęstość jąderka.

Analiza wariancji ANOVA pokazała, że ze względu na gęstość skorupy odmiany statystycznie się różnią (tab. 1). Nie było podstaw do odrzucenia hipotezy o równości średnich gęstości jąderka dla badanych odmian.

W literaturze nie znaleziono wyników badań gęstości dla orzechów włoskich. Wartość tego parametru była jedynie wyznaczona dla orzechów afrykańskich (Ndukwu i Ejirika 2016).

Oszacowano współczynniki korelacji liniowej Pearsona między wybranymi cechami i zweryfikowano ich istotność statystyczną (tab. 4).

Masa jąderka w przypadku wszystkich badanych odmian jest istotnie skorelowana zarówno z długością jąderka, jak i z masą owocu (tab. 4). Korelacja tej cechy z grubością skorupy w szwie dla odmian 'Mars' i 'Seifersdorfsky' nie jest istotna statystycznie, w przeciwieństwie do korelacji tej cechy z grubością skorupy w sferze dla odmian U01 oraz 'Mars'.

Z kolei masa owocu jest istotnie skorelowana z długością owocu w przypadku odmian U01, U17, 'Young' i 'Seifersdorfsky'.

**Tabela 4.** Współczynniki korelacji liniowej Pearsona

| Wyszczególnienie         | Odmiana |         |         |         |         |                  |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|
|                          | U01     | U13     | U17     | 'Young' | 'Mars'  | 'Seifersdorfsky' |
| Masa jąderka             |         |         |         |         |         |                  |
| masa owocu               | 0,645** | 0,929** | 0,843** | 0,955** | 0,964** | 0,939**          |
| długość jąderka          | 0,422*  | 0,854** | 0,515** | 0,513*  | 0,627** | 0,531*           |
| grubość skorupy w szwie  | 0,326*  | 0,406*  | 0,647** | 0,840** | 0,340   | 0,338            |
| grubość skorupy w sferze | 0,171   | 0,565** | 0,646** | 0,784** | 0,042   | 0,366*           |
| Masa owocu               |         |         |         |         |         |                  |
| długość owocu            | 0,324*  | 0,213   | 0,693** | 0,645** | 0,224   | 0,567*           |

Objaśnienia: \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$

#### 4. Wnioski

Przebadane owoce 6 odmian orzechów włoskich (*Juglans regia* L.) charakteryzowały się znacznym zróżnicowaniem cech morfologicznych.

Badane orzechy możemy zaliczyć do dużych owoców, ponieważ ich masa wynosi powyżej 10 g (12,21–18,48 g).

We wszystkich przebadanych odmianach procentowy udział masy jądra w masie całego owocu wynosi powyżej 40–50%, spełnia więc kryterium hodowlane, co świadczy o dobrej wartości użytkowej analizowanego materiału.

Z obliczonych współczynników sferyczności wynika, że badane odmiany mają kształt owalny.

Pomiary grubości skorupy pozwoliły stwierdzić, że większość przebadanych odmian cechuje się skorupą o średniej grubości, jedynie 2 spośród nich mają skorupę grubą.

Wyznaczenie gęstości skorup i jąderki pozwoliło podzielić badane odmiany na 2 grupy: pierwsza grupa to owoce, które posiadają większą gęstość skorupki niż jąderka (U01, 'Young' i 'Mars'), a druga grupa to owoce, które posiadają większą gęstość jąderka niż skorupki (U13, U17 oraz 'Seifersdorfsky').

Wykonany w ramach analizy wariancji ANOVA test Tukeya – wielokrotnych porównań średnich HSD pokazał, że odmiany różnią się statystycznie ze względu na badane cechy.

Współczynniki korelacji liniowej Pearsona między wybranymi cechami pokazały istotność statystyczną pomiędzy nimi.

## Literatura

- Altuntaş E., Erkol M. 2009. The Effects of Moisture Content on Colour Characteristics of Walnuts. *International Journal of Food Engineering*, 5(2), 1–9.
- Altuntaş E., Erkol M. 2010. Physical Properties of Shelled and Kernel Walnuts as Affected by the Moisture Content. *Czech Journal of Food Sciences*, 28(6), 547–556.
- Altuntaş E., Erkol M. 2011. The Effects of Moisture Content, Compression Speeds, and Axes on Mechanical Properties of Walnut Cultivars. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 1288–1295.
- Amaral J.S., Alves M., Seabra R., Oliveira B.P.P. 2005. Vitamin E Composition of Walnuts (*Juglans regia* L.): a 3-Year Comparative Study of Different Cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 5467–5472.
- Amaral J.S., Casal S., Pereira J.A., Seabra R.M., Oliveira B.P.P. 2003. Determination of Sterol and Fatty Acid Compositions, Oxidative, Stability and Nutritional Value of Six Walnut (*Juglans regia* L.) Cultivars Grown in Portugal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 7698–7702.
- Anderson K.J., Teuber S.S., Gobeille A., Cremin P., Waterhouse A.L., Steinberg F.M. 2001. Walnut Polyphenolics Inhibit *in vitro* Human Plasma and LDL Oxidation. *Journal of Nutrition*, 131, 2837–2842.
- Ebrahimi A., Zarei A., Fatahi R., Ghasemi-Varnamkhasti M. 2009. Study on Some Morphological and Physical Attributes of Walnut Ised in Mass Models. *Scientia Horticulturae*, 121, 490–494.
- Ercisli S. 2004. A Short Review of the Fruit Germplasm Resources of Turkey. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 51(4), 419–435.
- Ercisli S., Sayinci B., Kara M., Yildiz C., Ozturk I. 2012. Determination of Size and Shape Features of Walnut (*Juglans regia* L.) Cultivars Using Image Processing. *Scientia Horticulturae*, 133, 47–55.
- Erturk U., Dalkilic Z. 2011. Determination of Genetic Relationship among Some Walnut (*Juglans regia* L.) Genotypes and Their Early-Bearing Progenies Using RAPD Markers. *Romanian Biotechnological Letters*, 16(1), 5944–5952.
- Majewska K., Kopytowska J., Lojko R.E., Zadernowski R. 2003. Wybrane cechy fizyczne dojrzałych owoców orzecha włoskiego. *Acta Agrophysica*, 2(3), 597–609.
- Ndukwu M.C., Ejirika C. 2016. Physical Properties of the African Walnut (*Tetracarpidium conophorum*) from Nigeria. *Cogent Food and Agriculture*, 2, 1–11.
- Özcan M.M. 2009. Some Nutritional Characteristics of Fruit and Oil of Walnut (*Juglans regia* L.) Growing in Turkey. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 28, 57–62.
- Özcan M.M., İman C., Arslan D. 2010. Physico-Chemical Properties, Fatty Acid and Mineral Content of Some Walnuts (*Juglans regia* L.) Types. *Agricultural Sciences*, 1(2) 62–67.
- Ozkan G., Koyuncu M.A. 2005. Physical and Chemical Composition of Some Walnut (*Juglans regia* L.) Genotypes Grown in Turkey. *Grasas y Aceites*, 56(2), 141–146.

- Pereira J.A., Oliveira I., Sousa A., Ferreira I.C.F.R., Bento A., Estevinho L.** 2008. Bioactive Properties and Chemical Composition of Six Walnut (*Juglans regia* L.) Cultivars. *Food and Chemical Toxicology*, 46(6), 2103–2111.
- Reiter R.J., Manchester L.C., Tan D.-X.** 2005. Melatonin in Walnuts: Influence on Levels of Melatonin and Total Antioxidant Capacity of Blood. *Nutrition*, 21, 920–924.
- Rejman A.** Red. 1976. *Pomologia*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Sze-Tao K.W.C., Sathe S.K.** 2000. Walnuts (*Juglans regia* L.): Proximate Composition, Protein Solubility, Protein Amino Acid Composition and Protein *in vitro* Digestibility. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 1393–1401.
- Tapia M.I., Sanchez-Morgado J.R., Garcia-Parra J., Ramirez R., Hernández T., Gonzalez-Gomez D.** 2013. Comparative Study of the Nutritional and Bioactive Compounds Content of Four Walnut (*Juglans regia* L.) Cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*, 31, 232–237.
- Yang J., Liu R.H., Halim L.** 2009. Antioxidant and Antiproliferative Activities of Common Edible Nut Seeds. *LWT – Food Science and Technology*, 42(1), 1–8.
- Zdyb H.** 2003. *Orzech włoski*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.





# Eksplatacyjno-ekonomiczne badania piły do przycinania gałęzi Pronar GP200

Krzysztof Słowiński

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: krzysztof.slowinski@urk.edu.pl

## Abstrakt

Rosnące zapotrzebowanie na ilość wykonywanej pracy w ciągu dnia roboczego oraz mniejsza liczba osób chętnych do pracy przyczynia się do powstawania nowych technologii we wszystkich gałęziach gospodarki. Obserwuje się wzrost liczby maszyn pracujących przy wszystkich pracach związanych z leśnictwem. Jedną ze specjalistycznych maszyn wykorzystywanych do utrzymywania dróg leśnych jest piła do przycinania gałęzi Pronar GP200 umieszczona na wysięgniku zagregowanym z ciągnikiem. W warunkach terenowych określono dla tej maszyny wybrane parametry eksploatacyjne: prędkość, wydajność, koszty pracy. Analizowano pracę maszyny na odcinkach o długości 100 m, na których mierzono czas przejazdu. Jakość cięcia konarów przy pomocy analizowanej piły jest dobra, nieposzarpana, brak pęknięć wzdłuż włókien, przez co drzewa są mniej narażone na infekcje po zabiegu przycinania. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że maszyna Pronar GP200 posiada dużo wyższą wydajność pracy (1,2 km/h) w stosunku do pracy ręcznej. Przy wykorzystaniu rocznym 40 godzin koszty wynoszą ponad 750 zł/h i zbliżają się do kosztów pracy ręcznej.

**Słowa kluczowe:** piła, przycinanie gałęzi, utrzymanie pasa drogi, wydajność, koszty, chronometraż

## 1. Wstęp

Rozwój mechanizacji w leśnictwie przyczynił się do stosowania nowoczesnych maszyn, które w coraz większym stopniu poprawiają wydajność, bezpieczeństwo oraz zmniejszają koszty wykonywanych prac. W obecnej sytuacji poli-

tyczno-gospodarczej oraz przy rosnącej świadomości pracowniczej, brak już przyzwolenia na ciężką i niebezpieczną pracę (Sowa 2007; Nowacka i Moskalik 2012). Rosnące zapotrzebowanie na większą efektywność pracy w ciągu dnia roboczego przyczynia się do powstawania nowych technologii we wszystkich gałęziach gospodarki. Analizowana w niniejszej pracy maszyna do przycinania gałęzi powstała w celu poprawy bezpieczeństwa użytkowników dróg. Leśnicy jako zarządcy od lat utrzymują swój teren, dbając w szczególności o hodowlę, użytkowanie, urządzenie lasu. Ponadto zwracają również uwagę na kwestie zagospodarowania dróg, turystykę oraz utrzymywanie stosunków wodnych w lasach. W obecnej sytuacji ostrej rywalizacji rynkowej przedsiębiorstw świadczących usługi w leśnictwie, wydajność pracy i szeroko rozumiana produktywność są czynnikami determinującymi sukces firmy. Współczesne leśnictwo staje przed wymaganiami nie tylko krajowymi, ale przed globalnymi wyzwaniami i uwarunkowaniami (Moskalik 2002; Moskalik i in. 2006).

## 2. Cel i zakres pracy

Brak w literaturze przedmiotu podstawowych danych dotyczących maszyn służących do utrzymania dróg leśnych, takich jak: prędkość robocza, wydajność, zapotrzebowanie mocy, które pozwoliłyby na dokonanie obliczeń wskaźników eksploatacyjnych i racjonalne agregowanie tych maszyn. Luki te spowodowały, że zaczęto badać pracę tego sprzętu w warunkach terenowych.

Jedną ze specjalistycznych maszyn wykorzystywaną do utrzymywania dróg leśnych jest piła do gałęzi. Określono dla niej takie parametry eksploatacyjne, jak:

- średnia prędkość robocza,
- średnia prędkość przejazdu między powierzchniami,
- wydajność efektywna,
- wydajność operacyjna,
- wydajność w czasie roboczym zmiany,
- czas agregowania maszyny z ciągnikiem,
- koszty jednostkowe i godzinowe eksploatacji agregatu: ciągnik z piłą do gałęzi zawieszoną na wysięgniku.

## 3. Przedmiot badań

Piła do gałęzi Pronar GP200 charakteryzuje się szerokością roboczą, która wynosi 2 m, długością transportową – 64 cm, szerokością transportową – 210 cm, wysokością transportową – 50 cm, maksymalną głębokością cięcia – 17 cm, a jej

masa własna wynosi 232 kg. Wyposażona jest w cztery piły tarczowe o średnicy 60 cm. Parametry hydrauliczne piły: wymagane nominalne ciśnienie robocze oleju to 22 MPa, a nominalny przepływ oleju to 60 litrów na minutę (ryc. 1).

Piła zawieszana jest na hydraulicznym wysięgniku produkcji OTL Jarocin – W43-S. W ofercie firmy wysięgnik ten przeznaczony jest do rozdrabniania



**Ryc. 1.** Piła do gałęzi Pronar GP200: a) rysunek poglądowy: 1 – rama, 2 – piła tarczowa, 3 – osłona transportowa, 4 – silnik hydrauliczny, 5 – pokrywa, 6 – osłona silnika hydraulicznego, 7 – belka nośna, 8 – szybkozłącza przewodów hydraulicznych, 9 – zestaw kluczy specjalistycznych; b) widok elementów roboczych (fot. K. Słowiński)

RBR o masie 250 kg, który ma zastosowanie przy wykaszaniu rowów i poboczy. Wysięgnik sterowany hydraulicznie pozwala na pracę w odległości do 4 m od osi ciągnika. Masa własna wysięgnika wynosi 1100 kg. Parametry hydrauliczne wysięgnika: nominalne ciśnienie robocze oleju to 16 MPa, a maksymalny przepływ oleju to 30 litrów na minutę. Sterowanie pracą odbywa się z kabiny ciągnika za pośrednictwem specjalnego manipulatora wykorzystującego przekaźniki elektroniczne i kierującego pracą układu hydraulicznego na rozdrabniaczu (ryc. 2).

Producent wysięgnika zaleca pracę z ciągnikiem o mocy od 110 do 130 KM, wyposażonym w przekładnię biegów pełzających. Wysięgnik wyposażony jest we własną hydraulikę, która jest napędzana z WOM ciągnika o prędkości obrotowej 1000 obrotów na minutę. Pojemność zbiornika oleju hydraulicznego wynosi 190 litrów, typ oleju HL 46.

Parametry techniczne użytego ciągnika Valtra T214: sześciocylindrowy silnik o mocy 169 kW (230KM), maksymalny moment obrotowy 910 Nm, masa własna – 7300 kg, rozkład ciężaru – przód 40%, tył 60%. Bezstopniowy zakres prędkości od 0 do 43 km/h. Pojemność zbiornika paliwa 380 litrów, pojemność zbiornika dodatku AdBlue 70 litrów.



Ryc. 2. Miejsce pracy, sterowania narzędziem tnącym oraz wysięgnikiem (fot. K. Słowiński)

#### 4. Miejsce i metody badań

Badania prowadzono na terenie Nadleśnictwa Oleszyce w czerwcu 2019 roku. Mierzono parametry eksploatacyjne głowicy do gałęzi zagregatowanej przez wysięgnik z ciągnikiem. Pomiarami objęto drogę leśną o długości 2000 m, przy której prowadzone były prace polegające na przycinaniu konarów zbyt wchodzących w pas drogi. Drogę podzielono na 20 odcinków po 100 m, na których mierzono czas przejazdu oraz czas poszczególnych etapów składających się na czas pracy. Do wyznaczenia długości drogi użyto taśmy geodezyjnej – pomiar wykonano z dokładnością do 10 cm.

Przy pomocy kamery rejestrowano przebieg pracy agregatu na wszystkich odcinkach drogi. W czasie analizy ilościowej odtwarzano film w zwolnionym tempie. Na ekranie monitora z wyświetlonym licznikiem czasu mierzono długość trwania poszczególnych faz pracy agregatu zgodnie z normą BN-76/9195-01, określoną przez Krajowy System Maszyn Leśnych (Botwin 1993).

Określono następujące składowe czasu pracy agregatu:  $T_1$  – efektywny czas pracy,  $T_2$  – czas pomocniczy,  $T_3$  – czas obsługi technicznej,  $T_4$  – czas usuwania usterek,  $T_{02}$  – operacyjny czas pracy maszyny,  $T_{04}$  – roboczy czas zmiany. Na podstawie badań bilansu czasu pracy maszyny oraz znanej długości analizowanego odcinka, korzystając z poniższych wzorów, obliczono wydajności:

$W_1$  – wydajność efektywna,

$$W_1 = \frac{Q}{T_1} \quad (1)$$

gdzie:

$Q$  – długość analizowanego odcinka drogi,

$W_{02}$  – wydajność operacyjna.

$$W_{02} = \frac{Q}{T_{02}} \quad (2)$$

$W_{04}$  – wydajność w czasie roboczym zmiany,

$$W_{04} = \frac{Q}{T_{04}} \quad (3)$$

Wykorzystując zmierzoną długość analizowanych odcinków drogi i badania bilansu czasu pracy, obliczono średnią prędkość agregatu w czasie jednego przejazdu przez analizowaną drogę.

$V$  – średnia prędkość ciągnika w czasie jednego przejazdu,

$$V = \frac{L}{T_1} \quad (4)$$



gdzie:

$L$  – długość analizowanego odcinka drogi.

Koszty jednostkowe pracy agregatu obliczono, korzystając ze wzoru (Więsik 1998):

$$k_j = \frac{C_m}{W_r \cdot T_{lat}} \left[ 1 + k_n + 0,5 \left( 1 + \frac{C_o}{C_n} \right) (i_{kr} + i_{ub}) \right] + \frac{Z_p \cdot C_p (1 + k_{sm})}{W_{04}} + \frac{C_r (1 + \beta_p)}{W_{04}} + K \cdot k_g \quad (5)$$

gdzie:

$C_m$  – cena maszyny: Piła do gałęzi Pronar GP200 z wyciętnikiem W43-S produkcji OTL Jarocin – 104 500 zł, ciągnik Valtra T214 – 490 000 zł,

$C_o$  – cena zbytu maszyny po okresie użytkowania [zł], przyjęto 10% wartości,

$C_p$  – cena paliwa [zł/dm<sup>3</sup>], przyjęto 5,00 zł za 1 dm<sup>3</sup>,

$C_r$  – płaca operatora, przyjęto 16 zł/h,

$i_{kr}$  – stopa oprocentowania kredytu bankowego na zakup maszyny, przyjęto 0,25,

$i_{ub}$  – stopa kosztów ubezpieczenia maszyny, przyjęto 0,10,

$k_n$  – wskaźnik kosztów naprawy maszyny do ceny jej zakupu, przyjęto 1,0,

$k_{sm}$  – wskaźnik kosztów zużycia olejów i smarów do kosztów paliwa, przyjęto 0,3,

$T_{lat}$  – lata amortyzacji (użytkowania) maszyn, przyjęto 10 lat,

$W_r$  – wydajność roczna maszyny [km],

$Z_p$  – zużycie paliwa, 5,6 dm<sup>3</sup>/h,

$\beta_p$  – wskaźnik narzutów na płace operatora, np. ubezpieczenie, przyjęto 0,49,

$K$  – kubatura pomieszczenia garażowego [m<sup>3</sup>], przyjęto 70 m<sup>3</sup>,

$k_g$  – koszt eksploatacji garażów, przyjęto 24,7 zł/m<sup>3</sup> kubatury garażu drewnianego.

Obliczono koszty godzinowe [zł/h]:

$$k_h = k_j \cdot W_{04} \quad (6)$$

## 5. Wyniki badań i dyskusja

W większości przypadków piła odcinała w trakcie badań gałęzie gatunków liściastych (buk, dąb, grab). Zmierzona średnica odcinanych gałęzi zawierała się w przedziale od 1 do 10 cm. Na rycinie 3 przedstawiono analizowany agregat

a)



b)



Ryc. 3. Agregat z piłą do gałęzi Pronar GP200 w czasie pracy: a) widok z przodu, b) widok z tyłu (fot. K. Słowiński)

w czasie pracy. Na rycinie 4 przedstawiono efekty pracy piły – odcięte gałęzie. Pole cięcia konaru jest gładkie, nieposzarpane, brak pęknięć wzdłuż włókien, dzięki czemu drzewa po tak wykonanym zabiegu będą mniej narażone na infekcje powodowane przez patogeny.

W tabeli 1 zamieszczono składowe czasy pracy badanego agregatu. Średni czas pokonania odcinka o długości 100 m wyniósł 319 s, współczynnik zmienno-



**Ryc. 4.** Gałęzie wycięte podczas pracy piły: a) widok ogólny; b) pole cięcia odciętej gałęzi (fot. K. Słowiński)



ści wyniósł 22%. Minimalny czas przejazdu wyniósł 210 s, a maksymalny 460 s. Prędkość zestawu w czasie pracy wynosiła średnio 0,328 m/s, a w ciągu godziny zestaw przemieścił się o ok. 1200 m (tab. 1).

**Tabela 1.** Składowe czasu pracy oraz parametry eksploatacyjne piły Pronar GP200.

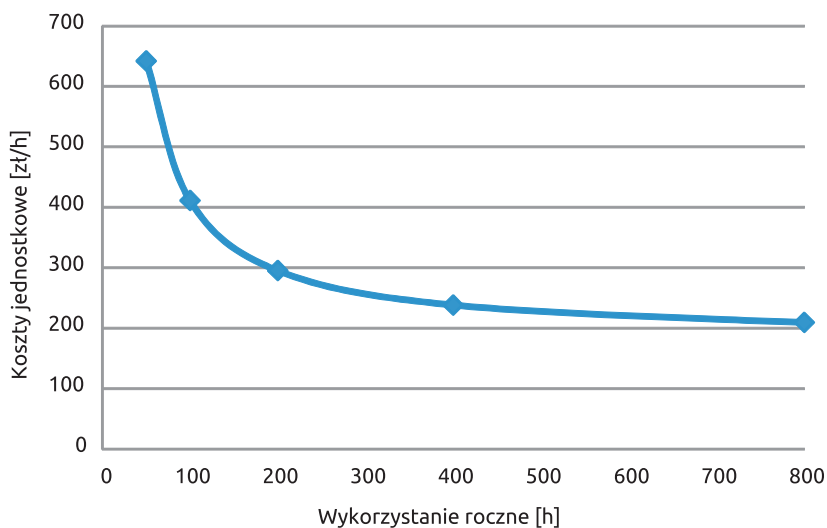
$T_1$  – efektywny czas pracy,  $T_2$  – czas pomocniczy,  $T_3$  – czas obsługi technicznej,  $T_4$  – czas usuwania usterek,  $T_{02}$  – operacyjny czas pracy maszyny,  $T_{04}$  – roboczy czas zmiany,  $V_1$  – średnia prędkość przejazdu przez odcinek pomiarowy,  $V_2$  – średnia prędkość przejazdu między odcinkami pomiarowymi,  $W_1$  – wydajność efektywna,  $W_2$  – wydajność operacyjna,  $W_3$  – wydajność w czasie operacyjnym zmiany

| Nr odcinka              | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_{02}$ | $T_{04}$   | $V_1$ | $V_2$ | $W_1$ | $W_2$ | $W_3$ |
|-------------------------|-------|-------|-------|----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | [s]   |       |       |          |            | [m/s] |       | [m/h] |       |       |
| 1                       | 180   | 40    | 60    | 220      | 280        | 0,357 | 2,50  | 2000  | 1636  | 1286  |
| 2                       | 269   | 26    | 35    | 295      | 330        | 0,303 | 3,85  | 1338  | 1220  | 1091  |
| 3                       | 304   | 33    | 43    | 337      | 380        | 0,263 | 3,03  | 1184  | 1068  | 947   |
| 4                       | 149   | 55    | 46    | 204      | 250        | 0,400 | 1,82  | 2416  | 1765  | 1440  |
| 5                       | 150   | 48    | 32    | 198      | 230        | 0,435 | 2,08  | 2400  | 1818  | 1565  |
| 6                       | 177   | 43    | 40    | 220      | 260        | 0,385 | 2,33  | 2034  | 1636  | 1385  |
| 7                       | 383   | 42    | 35    | 425      | <b>460</b> | 0,217 | 2,38  | 940   | 847   | 783   |
| 8                       | 236   | 38    | 36    | 274      | 310        | 0,323 | 2,63  | 1525  | 1314  | 1161  |
| 9                       | 189   | 48    | 33    | 237      | 270        | 0,370 | 2,08  | 1905  | 1519  | 1333  |
| 10                      | 267   | 32    | 41    | 299      | 340        | 0,294 | 3,13  | 1348  | 1204  | 1059  |
| 11                      | 219   | 35    | 36    | 254      | 290        | 0,345 | 2,86  | 1644  | 1417  | 1241  |
| 12                      | 189   | 37    | 24    | 226      | 250        | 0,400 | 2,70  | 1905  | 1593  | 1440  |
| 13                      | 326   | 39    | 45    | 365      | 410        | 0,244 | 2,56  | 1104  | 986   | 878   |
| 14                      | 359   | 43    | 38    | 402      | 440        | 0,227 | 2,33  | 1003  | 896   | 818   |
| 15                      | 220   | 34    | 26    | 254      | 280        | 0,357 | 2,94  | 1636  | 1417  | 1286  |
| 16                      | 135   | 50    | 25    | 185      | <b>210</b> | 0,476 | 2,00  | 2667  | 1946  | 1714  |
| 17                      | 311   | 35    | 44    | 346      | 390        | 0,256 | 2,86  | 1158  | 1040  | 923   |
| 18                      | 237   | 48    | 35    | 285      | 320        | 0,313 | 2,08  | 1519  | 1263  | 1125  |
| 19                      | 201   | 43    | 46    | 244      | 290        | 0,345 | 2,33  | 1791  | 1475  | 1241  |
| 20                      | 310   | 38    | 42    | 348      | 390        | 0,256 | 2,63  | 1161  | 1034  | 923   |
| Średnia                 | 240,6 | 40,4  | 38,1  | 280,9    | 319,0      | 0,33  | 2,56  | 1634  | 1355  | 1182  |
| Odchylenie standardowe  | 72,6  | 7,1   | 8,4   | 69,6     | 71,5       | 0,07  | 0,46  | 487   | 311   | 251   |
| Współczynnik zmienności | 30,2  | 17,6  | 22,2  | 24,8     | 22,4       | 21,2  | 18,1  | 30,0  | 23,0  | 21,2  |

Średni czas agregatowania maszyny z ciągnikiem wyniósł jedną godzinę, natomiast odczepianie maszyny zajęło pół godziny.

Na rycinie 5 przedstawiono koszty jednostkowe pracy agregatu z piłą Pronar GP200 w zależności od wykorzystania rocznego. Z danych udostępnionych przez Nadleśnictwo Oleszyce wynika, że w 2018 roku maszyna przepracowała 134 godziny przy konserwacji dróg leśnych. Dla takiego wykorzystania rocznego koszty wynoszą ok. 360 zł za godzinę pracy agregatu.

Wysoka średnia prędkość agregatu podczas pracy wpływa na dużą wydajność – średnio 1182 m/h. Koszt pracy ręcznej na odcinku 1 km wynosi ok. 800 zł, a koszt pracy analizowanego agregatu przy wykorzystaniu rocznym 300 godzin wynosi ok. 300 zł/km, czyli jest ponad dwuipółkrotnie niższy. Porównując jakość wykonanej pracy oraz bezpieczeństwo, maszyna wydaje się lepszym rozwiązaniem. Koszty jednostkowe pracy maszyny zmniejszają się wraz ze wzrostem jej wykorzystania w roku. Przy wykorzystaniu rocznym 40 godzin, koszty wynoszą ponad 750 zł/h i zbliżają się do kosztów pracy ręcznej. Zakup piły Pronar GP200 jest uzasadniony ekonomicznie przy wykorzystaniu rocznym powyżej 50 godzin pracy.



Ryc. 5. Wykres jednostkowych kosztów eksploatacji agregatu z piłą Pronar GP200 w zależności od wykorzystania rocznego

## 6. Stwierdzenia i wnioski

1. Pole cięcia konaru piłą Pronar GP200 jest nieposzarpane, brak pęknięć przemawia za stosowaniem tej maszyny do konserwacji pasa drogowego.
2. Średnia prędkość zestawu w czasie pracy wynosi 0,328 m/s i jest zależna od liczby gałęzi wchodzących w pas drogi. Minimalna prędkość podczas pracy wyniosła 0,217 m/s, a maksymalna 0,476 m/s.

### *Podziękowania*

*Składam serdeczne podziękowania Panu mgr. inż. Januszowi Kuzarowi za pomoc w wykonaniu badań terenowych.*

## Literatura

- Botwin M. 1993. Podstawy użytkowania maszyn leśnych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Moskalik T. 2002. Rozwój technik i technologii maszynowego pozyskiwania drewna. Sylwan, 146(10), 31–37.
- Moskalik T., Nowacka W.Ł., Paschalis P., Zastocki D., Bigot M., Cuchem E., Le-Net E. 2006. The Socio-Economic Impact of Forest Mechanization in France and Poland. Folia Forestalia Polonica. Series A-Forestry, 48, 75–88.
- Norma branżowa: BN-76/9195-01. Maszyny rolnicze. Podział czasu pracy. Symbole i określenia.
- Nowacka W.Ł., Moskalik T. 2012. Las miejscem pracy – nowy zawód, nowe możliwości. Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej, 14(3).
- Sowa J.M. 2007. Kierunki ewolucji humanizacji pracy w polskim leśnictwie. XI Konferencja Ergonomiczna, Ergonomia i Ochrona Pracy w Leśnictwie, Drzewnictwie i Produkcji Rolnej. Polskie Towarzystwo Ergonomiczne o/ Poznań, Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk, Katedra Użytkowania Lasu AR Poznań, 3.
- Więsik J. 1998. Czynniki decydujące o wyborze maszyn do pozyskiwania drewna w Polsce. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej, 6, 6–9.





# Udatność przesadzania jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) w zależności od jej wysokości i wielkości bryły korzeniowej

Krzysztof Słowiński

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: krzysztof.slowinski@urk.edu.pl

## Abstrakt

Do projektowania konstrukcji maszyn i urządzeń potrzebne jest poznanie wymagań biologicznych materiału będącego przedmiotem pracy maszyny. W niniejszej pracy opisano przebieg doświadczenia procesu przesadzania jodeł do innego siedliska niż pierwotne. Analizowano kryteria, które mają wpływ na udatność procesu przesadzania. Monitorowano warunki atmosferyczne. Po zakończeniu wegetacji w celu przeanalizowania skuteczności przesadzania powrócono na powierzchnię badawczą. Celem przeprowadzonego doświadczenia była analiza stopnia przyjęcia się sadzonek jodły pospolitej *Abies alba* Mill. w zależności od stopnia rozwoju drzewa (wysokości) i wielkości posiadanej bryły korzeniowej oraz określenie, w jakim stopniu występowanie tych parametrów wpływa na zmienność i dalszy rozwój. Materiał roślinny stanowiły drzewa rosnące na łące sąsiadującej z lasem. Sadzonki pochodziły z samosiewu bocznego. Obsiew dokonał się na łące, na której wcześniej rosły porzeczki utrzymywane przez herbicydy, w ugorze czarnym. Rozwój był możliwy z uwagi na brak wystąpienia okrywy roślinnej, co pozwoliło na swobodne kiełkowanie nasion oraz ich późniejszy wzrost. Sadzonki rosły w bardzo gęstej więźbie, dlatego też na zewnątrz odnowienia panowały korzystniejsze warunki świetlne niż wewnątrz. Wysokość młodych drzew była dosyć zróżnicowana: najmniejsze okazy – 20 cm, a największe – 250 cm. Obecność bryły korzeniowej zwiększała udatność przesadzania sadzonek jodły pospolitej. Wraz ze wzrostem wielkości bryły korzeniowej wzrastał proces udatności przesadzania sadzonek. Przesadzone sadzonki jodły w pierwszym roku osiągały znacznie mniejszy przyrost roczny w porównaniu z sadzonkami nieprzesadzonymi. W miarę wzrostu wielkości przesadzanych sadzonek skuteczność ich przesadzania malała. Przesadzanie sadzonek jodły o wysokości powyżej 2 m okazało się nieefektywne.

**Słowa kluczowe:** sztuczne odnowienie, *Abies alba* Mill., bryła korzeniowa, udatność, przyrost

## 1. Wstęp

Jodła pospolita (*Abies alba* Mill.) należy do gatunków, których występowanie na terenach bezleśnych jest w znacznym stopniu ograniczone, a samoistne odnowienia zachodzą pod okapem drzew. Często określa się ją jako gatunek klimaksowy, rosnący w znacznym rozproszeniu, dlatego też działania resustytucyjne prowadzi się głównie w sposób mający na celu nasadzenia o bardzo bliskim sąsiedztwie, aby kolejne pokolenia mogły się swobodnie krzyżować (Barzdajn 2006). Jodła pospolita to gatunek drzewa z rodziny sosnowatych, występujący głównie w Europie. W Polsce największe skupisko borów jodłowych występuje w Górach Świętokrzyskich i Karpatach. Jodła, mimo swoich dużych zdolności regeneracyjnych, cienioznośności i w miarę dużej odporności na zmienne warunki abiotyczne, jest gatunkiem, którego odnawianie stanowi duże wyzwanie, często trudne do przeprowadzenia. Duży wpływ na proces przyjęcia drzew mają czynniki takie, jak obecność oraz wielkość bryły korzeniowej, wielkość przesadzanej sadzonki, warunki atmosferyczne panujące po przesadzeniu, dobór nowego siedliska oraz sposób przesadzenia sadzonki. Znajomość wymagań biologicznych materiału, który jest przedmiotem pracy maszyny, ułatwia trafne projektowanie konstrukcji maszyn i urządzeń. Warunki świetlne w znacznym stopniu determinują powstawanie nowych drzewostanów. Zależą one od stopnia zwarcia wszystkich wyższych warstw lasu: runa, podszytów, podrostów oraz samego drzewostanu (Jaworski 2004). Opady i temperatura istotnie wpływają na przyrost drzew, dlatego też zmiany warunków informują o reakcjach przyrostowych drzew. U wszystkich drzew przyrost roczny widoczny jest w postaci szerokich i wąskich słojuw. O szerokości słojuw decyduje również położenie geograficzne (Bis i Dobrowolska 2012). Istotne dla sadzonek jodły jest nie tylko natężenie światła słonecznego, ale również jego skład spektralny. Poprawa warunków świetlnych często nie jest spowodowana zwiększeniem oświetlenia sadzonek, lecz zmianą składu spektralnego światła. Siewki jodły rozwijają się najlepiej w świetle ze znacznym udziałem niebieskiej części spektrum świetlnego (otwarta powierzchnia pod zachmurzonym niebem, cień, osłona drzewostanu iglastego). Mały udział światła niebieskiego, a duży czerwonego i zielonego nie sprzyjają rozwojowi sadzonek jodły (Jaworski 2004). Obecność bryły korzeniowej odgrywa istotną rolę w procesie przesadzania sadzonek. Bryła korzeniowa zawiera znaczne ilości drobnoustrojów (bakterie i grzyby), które podczas przesadzania sadzonki przenoszone są w nowe miejsce. Mikroorganizmy te wspomagają vegetację rośliny i wpływają na udatność procesu przesadzania. Przycinanie korzeni poniżej 80% ich długości negatywnie wpływa na udatność. Wraz ze wzrostem wysokości przesadzanego drzewa maleje szansa na jego przyjęcie się. Związane jest to z szokiem przesadzeniowym, którego negatywna rola

rośnie wraz ze wzrostem przesadzanego drzewa. Szok u małych sadzonek jest niewielki i rośnie wraz z wielkością sadzonki. Jodła pospolita należy do gatunków, które dobrze znoszą proces przesadzania. Należy zadbać, aby siedlisko, do którego zostanie przesadzone drzewo, było prawidłowo dobrane (Kubiak 2005). Nieodpowiednia gospodarka leśna oraz zanieczyszczenia środowiska negatywnie wpływają na jodłę, ponieważ ma małą odporność na te czynniki. Zamieranie jodły obserwowane jest w Europie od początku lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Proces obumierania jodły dotyczył głównie drzew dorosłych, a rozpoczynał się od przerzedzenia dolnej części korony, następnie zaś objawiał się utratą igieł obejmującą stopniowo górną część korony drzewa. Zamieranie jodły jako zjawisko coraz szerzej rozprzestrzeniające się nie zostało dokładnie zbadane (Szymura 2008). Siewki jodły pospolitej odnowione na siedliskach, gdzie wykształciła się próchnica typu kwaśny mull, posiadają ograniczone zdolności odnawiania się. Odwrotnie sytuacja ma się na zbiorowiskach z próchnicą moder-mor. Tam siewki posiadają znacznie większe zdolności przeżywania. Związane jest to z alleopatycznym oddziaływaniem dorosłych drzew na siewki. Igły, opadając z drzewa na glebę, ulegają rozkładowi. Substancje w nich zawarte (koliny) pod wpływem wody wnikają w próchnicę i bezpośrednio oddziałują na kiełkowanie i wzrost siewek (Jaworski 2004). Istotnym zagrożeniem są mrozy z racji, że jodła jest bardzo wrażliwa na ten czynnik, temperatury poniżej  $-30^{\circ}\text{C}$  powodują przemarzanie jedno-, trzyletnich igieł. Częstym zjawiskiem pojawiającym się na drzewach o mocno rozwiniętych koronach jest powstawanie rys mrozowych (Jaworski 2004). Wysoka temperatura także może znacznie skrócić czas przyrostu tego gatunku. Suche lata mogą powodować rozwój różnego rodzaju chorób (Rolland 1993). Jodła jest gatunkiem bardzo chętnie uszkodzanym przez zwierzyne (zgryzanie i spałowanie). Spałowanie powoduje powstanie martwicy, która w znacznym stopniu przyczynia się do pogorszenia kondycji drzewa. Bardzo duża zdolność do regeneracji powoduje, że szkody te są niwelowane (Jaworski 2004). Zagrożeniem dla gatunku jest również jego występowanie w znacznym rozproszeniu, co utrudnia swobodne krzyżowanie się. Powoduje to spadek liczby samoistnych nasadzeń, a tym samym przyczynia się do zaniku gatunku (Barzdajn 2006).

## 2. Materiały i metody

W niniejszej pracy opisano przebieg doświadczenia procesu przesadzania jodeł do zupełnie innego siedliska niż pierwotne, stosując kryteria, które mają wpływ na udatność procesu przesadzania. Celem przeprowadzonego doświadczenia była analiza stopnia przyjęcia się sadzonek jodły pospolitej *Abies alba* Mill. w zależ-

ności od stopnia rozwoju drzewa i wielkości posiadanej bryły korzeniowej oraz określenie, w jakim stopniu występowanie tych parametrów wpływa na zmienność i dalszy rozwój. Wyniki tych badań mogą być wykorzystane w praktyce.

Materiał roślinny stanowiły drzewa z gatunku jodła pospolita *Abies alba* Mill., rosnące na łące sąsiadującej z lasem. Sadzonki pochodziły z samosiewu bocznego (ryc. 1). Nasiona jodeł rosnących na granicy lasu obsiewane były naturalnie na łące, na której wcześniej rosły porzeczki utrzymywane przez herbicydy w ugorze czarnym. Rozwój możliwy był dzięki temu, że nie występowała tam okrywa roślinna, co umożliwiło swobodne kiełkowanie nasion oraz ich późniejszy wzrost. Sadzonki rosły w bardzo gęstej więźbie, dlatego też na brzegu odnowienia panowały korzystniejsze warunki świetlne niż wewnątrz. Wysokość młodych drzew była dosyć zróżnicowana: najmniejsze okazy miały wysokość 20 cm, a największe 250 cm (ryc. 2).

Różne terminy odnawiania się poszczególnych jodeł miały wpływ na duże zróżnicowanie ich wysokości. Powierzchnię badawczą założono w powiecie nowosądeckim, w gminie Łososina Dolna, we wsi Bilsko o współrzędnych geograficznych 49°43'49"N, 20°37'9"E, na wysokości 274 m n.p.m., w odległości 200 m od rzeki Łososina. Typem siedliskowym był las górski świeży (LGśw), charakteryzujący się umiarkowanym lub wyraźnym wpływem wody glebowo-opadowej i stokowej. Gmina Łososina Dolna leży w zasięgu klimatu umiarkowanego, zimnego. Obszar ten charakteryzuje się znaczącymi opadami deszczu, których liczba wynosi ok. 700 mm rocznie. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi 8,5°C (<https://dane.imgw.pl>). W ramach przeprowadzonego doświadczenia założono grupę kontrolną, którą stanowiły jodły na powierzchni otwartej, nieprzesadzone ze swojego pierwotnego miejsca odnowienia (nieprzesadzone do lasu górskiego świeżego LGśw). Do grupy kontrolnej wybrano 40 drzew, z różnych przedziałów wysokości, dla których ustalono roczny przyrost wysokości.

W dniu 19 marca 2016 roku przesadzono 203 jodły z powierzchni naturalnego odnowienia pod okap drzewostanu. Drzewa wykopano za pomocą łopaty. Starano się, aby zostały pozyskane wraz z bryłą korzeniową. Pozyskanych zostało 188 sadzonek z bryłą oraz 15 bez bryłki. Po wykopaniu sadzonki zostały pomierzone. Analizowano takie cechy, jak wysokość części nadziemnej sadzonki, wymiary bryły korzeniowej (średnica i głębokość). Do pomiaru pierwszych dwóch została wykorzystana taśma miernicza zwijana. Średnicę szyi korzeniowej mierzono przy pomocy suwmiarki. Następnie młode drzewa przenoszono ręcznie bądź ładowano na taczki i transportowano pod okap drzewostanu. Jodły pod osłoną górną drzewostanu sadzono do wcześniej przygotowanych jamek, które rozlokowano w nieregularnej więźbie. Starano się, aby podczas sadzenia korzenie nie uległy podwinięciu – w przypadku, gdy były one długie, podcinano je.





Ryc. 1. Łąka, z której przesadzano jodły (fot. K. Słowiński)



Ryc. 2. Wykopana sadzonka transportowana na powierzchnię badawczą (fot. K. Słowiński)



Ukształtowanie terenu, ze względu na swoje zróżnicowanie, znacznie wpłynęło na wybór sposobu rozmieszczenia drzew. Znajdowały się na nim liczne skarpy i nierówności. Wszystkie drzewa w miarę możliwości zostały rozlokowane w najkorzystniejszych do tego miejscach. Bryłki wkopano na równo z powierzchnią terenu.

Warunki atmosferyczne odgrywają ważną rolę w procesie rozwoju drzew. Jodła pospolita jest gatunkiem, u którego wzrost wysokości w sezonie wegetacyjnym następuje w okresie między majem a lipcem. Dlatego od 1 maja 2016 r. do 31 lipca 2016 r. analizowano warunki pogodowe w gminie Łososina Dolna. Uwzględniano następujące aspekty meteorologiczne: temperatura (minimalna, maksymalna), ilość opadów. Dane meteorologiczne uzyskano ze strony internetowej Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (<https://dane.imgw.pl>).

W celu oceny efektów na teren badań powrócono 11 listopada 2016 r. Okres wegetacyjny zakończył się, co umożliwiło zidentyfikowanie analizowanych cech i porównanie z wcześniejszymi (przed przesadzeniem). Zmierzono długość ostatniego okółka, co dało informacje o przyroście rocznym każdego przesadzonego drzewa. Rezultaty oceniono zarówno w grupie badawczej, jak i kontrolnej.

### 3. Wyniki badań i dyskusja

W toku prowadzonych badań wykorzystano 203 sztuki drzew. Pierwszym kryterium była obecność bryły korzeniowej lub jej brak. Wśród 203 sztuk drzew 188 posiadało bryłę, a 15 nie. Z przesadzanych z bryłą 188 sztuk sadzonek 27 się nie przyjęło. Stanowi to jedynie 15% wszystkich przesadzonych drzew. Aż 5 drzew z 15 zasadzonych bez bryły korzeniowej nie przyjęło się. Można więc zauważyć, że obecność bryły korzeniowej znacznie zwiększa szanse na udatność sadzenia. Liczba wypadów w przypadku braku bryły korzeniowej okazała się dwa razy większa niż w przypadku, gdy drzewko przesadzane było wraz z nią. Zależność ta pokazuje, jak istotną rolę w procesie przesadzania odgrywa bryłka korzeniowa. Tylko co trzecia sadzonka bez bryłki przyjęła się. Różny stopień przyjmowania się sadzonek wynika z tego, że sadzonki, które posiadają bryłkę korzeniową, podczas przesadzania doznają mniejszego szoku przesadzeniowego.

Kolejnym kryterium brany pod uwagę przy określaniu stopnia udatności przesadzania jodeł była szerokość bryły korzeniowej. Z powodu tego, że każde drzewo posiadało taką samą długość bryły korzeniowej, nie była ona analizowana. Szerokości brył podzielono na cztery zakresy wielkości. W każdym przedziale wysokości sadzonki określono liczbę drzew, przyporządkowując je do poszczególnych stopni szerokości bryłki. Przeprowadzono analizę liczby wypadów w zależności od posiadanej przez nie wielkości bryłki. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

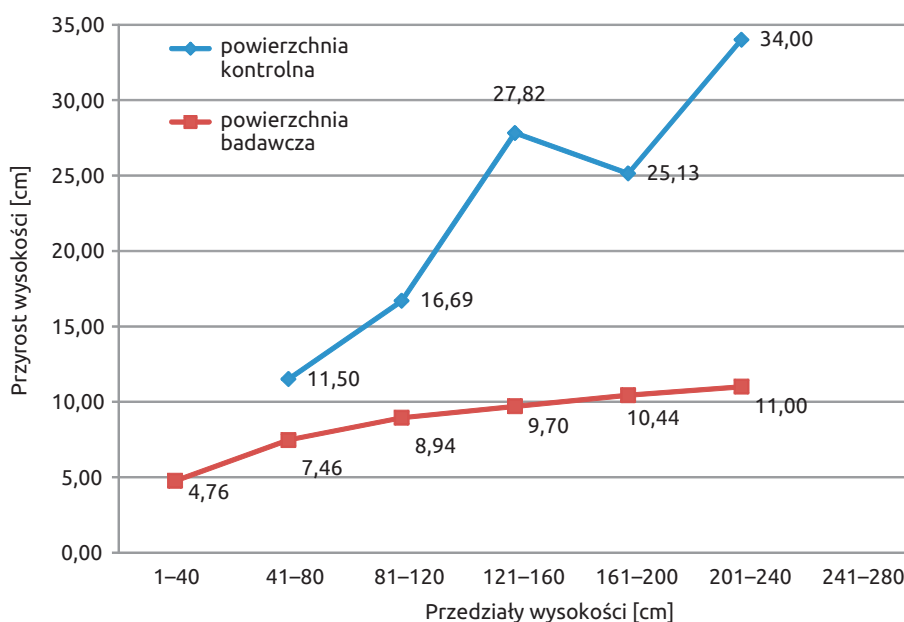
**Tabela 1.** Liczba sadzonek przyjętych i wypadów w zależności od szerokości bryły korzeniowej dla poszczególnych przedziałów wysokości sadzonek

| Sadzonki                         | Szerokość bryłki [cm] |       |       |       |
|----------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|
|                                  | 10–19                 | 20–29 | 30–39 | 40–49 |
| Przedział wysokości 1–40 [cm]    |                       |       |       |       |
| Liczba sadzonek                  | 9                     | 30    | 0     | 0     |
| Liczba wypadów                   | 1                     | 0     | 0     | 0     |
| Przedział wysokości 41–80 [cm]   |                       |       |       |       |
| Liczba sadzonek                  | 7                     | 22    | 21    | 3     |
| Liczba wypadów                   | 3                     | 1     | 0     | 0     |
| Przedział wysokości 81–120 [cm]  |                       |       |       |       |
| Liczba sadzonek                  | 4                     | 12    | 19    | 4     |
| Liczba wypadów                   | 2                     | 2     | 1     | 0     |
| Przedział wysokości 121–160 [cm] |                       |       |       |       |
| Liczba sadzonek                  | 0                     | 15    | 13    | 3     |
| Liczba wypadów                   | 0                     | 5     | 2     | 1     |
| Przedział wysokości 161–200 [cm] |                       |       |       |       |
| Liczba sadzonek                  | 2                     | 3     | 10    | 4     |
| Liczba wypadów                   | 1                     | 0     | 1     | 1     |
| Przedział wysokości 201–240 [cm] |                       |       |       |       |
| Liczba sadzonek                  | 0                     | 0     | 5     | 0     |
| Liczba wypadów                   | 0                     | 0     | 5     | 0     |
| Przedział wysokości 241–280 [cm] |                       |       |       |       |
| Liczba sadzonek                  | 0                     | 0     | 0     | 2     |
| Liczba wypadów                   | 0                     | 0     | 0     | 2     |

Kolejnym kryterium wziętym pod uwagę w trakcie doświadczenia była wysokość drzew. W ramach analizy tego kryterium założono również powierzchnię kontrolną, na której rosło 40 sztuk sadzonek. Liczbę sadzonek na obu powierzchniach w poszczególnych przedziałach wysokości przedstawiono w tabeli 2. Na powierzchni kontrolnej brakowało sadzonek z przedziału wysokości 1–40 cm oraz 241–280 cm. Zauważono, że drzewa rosnące na powierzchni kontrolnej, czyli te, które nie były przesadzane, odznaczały się znacznie większym przyrostem rocznym w porównaniu z drzewami na powierzchni badawczej, gdzie rosły drzewa przesadzone. W niektórych przypadkach ta różnica była nawet ponad dwukrotna (ryc. 3).

**Tabela 2.** Liczba sadzonek na powierzchniach

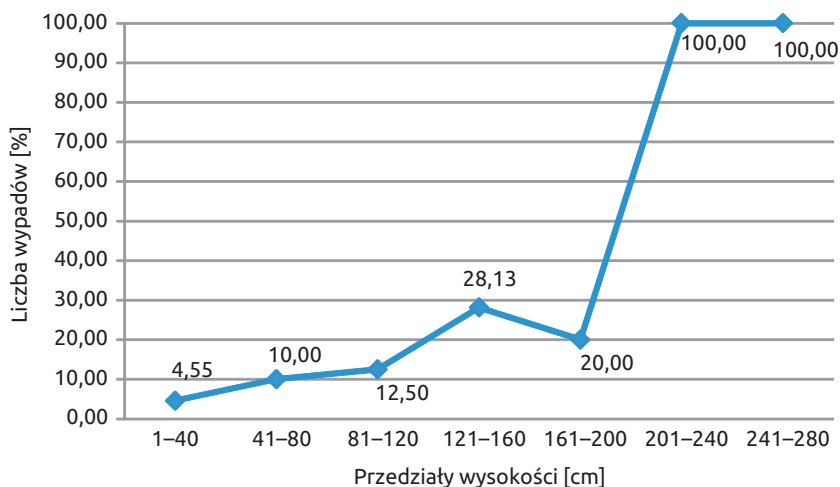
| Przedział wysokości [cm] | Powierzchnia kontrolna | Powierzchnia badawcza |
|--------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1–40                     | brak                   | 44                    |
| 41–80                    | 6                      | 60                    |
| 81–120                   | 13                     | 40                    |
| 121–160                  | 11                     | 32                    |
| 161–200                  | 8                      | 20                    |
| 201–240                  | 2                      | 5                     |
| 241–280                  | brak                   | 2                     |

**Ryc. 3.** Przyrost roczny jodły pospolitej na powierzchni badawczej i kontrolnej w poszczególnych przedziałach wysokości

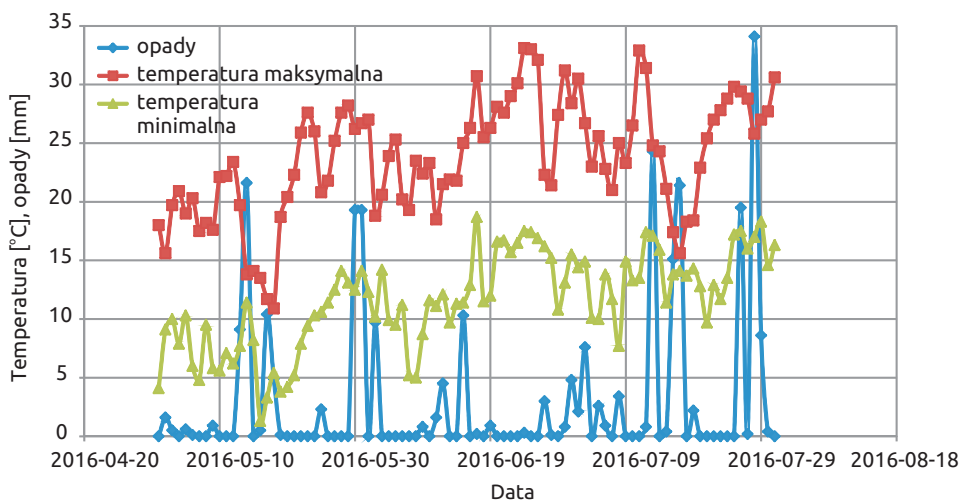
Analizie poddano również udział wypadów w zależności od przedziału wysokości sadzonki w momencie przesadzania jej w nowe miejsce (ryc. 4). Spośród wszystkich drzew najwyższy stopień udatności (95,45%) osiągnęły sadzonki z zakresu wysokości 1–40 cm. W przypadku sadzonek z przedziału 41–80 cm wystąpiło ponad dwa razy więcej wypadów niż u sadzonek z zakresu wysokości 1–40 cm. W przypadku sadzonek z przedziału wysokości 81–120 cm wystąpiło blisko trzy razy więcej wypadów niż u sadzonek z zakresu wysokości 1–40 cm, a u sadzonek w przedziale wysokości 121–200 cm wystąpiło ponad pięć razy

więcej wypadów w porównaniu z sadzonkami najmniejszymi. Z przedziału 201–240 cm oraz z zakresu 241–280 cm nie przyjęła się ani jedna sadzonka.

Z powodu tego, że wymagania termiczne jodły pospolitej są większe niż innych drzew iglastych, dla jej prawidłowego rozwoju temperatura w lipcu nie powinna spadać poniżej 13°C (Jaworski 2011). Podczas przeprowadzanych badań zaobserwowano spadek temperatury poniżej 13°C w lipcu aż osiem razy (4, 5, 8, 15, 20, 21, 22, 23 lipca), co mogło mieć znaczący wpływ na przyrost jodeł (ryc. 5).



Ryc. 4. Zależność wypadów sadzonek jodły pospolitej od przedziału wysokości sadzonek



Ryc. 5. Zestawienie danych meteorologicznych dla terenu badań z okresu wzrostu jodły pospolitej

Na wielu jodłach pochodzących z powierzchni badawczej zauważono ślady aktywności zwierzyny: spalowanie i zgryzanie. Zjawiska tego nie zauważono na powierzchni kontrolnej, gdzie dzięki gęstej więźbie zwierzyna miała utrudniony dostęp do drzew.

#### 4. Wnioski

1. Obecność bryły korzeniowej zwiększa udatność przesadzania sadzonek jodły pospolitej.
2. Wraz ze wzrostem wielkości bryły korzeniowej proces udatności przesadzania sadzonek jodły wzrasta.
3. Przesadzone sadzonki jodły w pierwszym roku osiągają znacznie mniejszy przyrost roczny w porównaniu z sadzonkami nieprzesadzonymi.
4. W miarę wzrostu wielkości przesadzanych sadzonek ich udatność maleje.
5. Przesadzanie sadzonek jodły powyżej 2 m jest nieefektywne.

#### Podziękowania

Składam serdeczne podziękowania Panom: mgr. inż. Bogdanowi Fudale oraz mgr. inż. Adamowi Napierajowi za pomoc w wykonaniu badań terenowych.

#### Literatura

- Barzdajn W. 2006. Restytucja jodły pospolitej w Sudetach. Dotychczasowe osiągnięcia. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo Leśnej*, 8, 1, 69–84.
- Bis R., Dobrowolska D. 2012. Przyrost radialny jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) w Puszczy Iłżeckiej. *Leśne Prace Badawcze (Forest Research Papers)*, 73(3), 201–208. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy. <https://dane.imgw.pl> (dostęp: 15.01.2020).
- Jaworski A. 2004. Podstawy przyrostowe i ekologiczne odnawiania oraz pielęgnacji drzewostanów. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Jaworski A. 2011. Hodowla lasu. Charakterystyka hodowlana drzew i krzewów leśnych. Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Kubiak J., Księżniak A. 2005. Przyrodnicze uwarunkowania zadrzewień na obszarach zurbanizowanych. Teza Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych – O.L. PAN, 168–176.
- Rolland C. 1993. Tree-Ring and Climate Relationships for *Abies alba* in the Internal Alps. *Tree-Ring Bulletin*, 53, 1–12.
- Szymura T. 2008. Zmiany żywotności drzew oraz wielkości i struktury wiekowej wybranych populacji jodły pospolitej na północnej granicy zasięgu w zachodniej Polsce. W: Zakres, tempo i mechanizmy zmian w przyrodzie terenów chronionych w Polsce. Cz. 2. J. Holesky. Red. *Studia Naturae*, 54(2). Instytut Ochrony Przyrody PAN, Kraków, 185–198.

# Mechanizacja i automatyzacja zabiegu przedsewnej skaryfikacji żołądki

Paweł Tylek<sup>1</sup>, Józef Walczyk<sup>1</sup>, Tadeusz Juliszewski<sup>2</sup>,  
Paweł Kiełbasa<sup>2</sup>, Zdzisław Kaliniewicz<sup>3</sup>, Florian Adamczyk<sup>4</sup>,  
Jan Szczepaniak<sup>4</sup>, Ryszard Tadeusiewicz<sup>5</sup>, Mirosław Jabłoński<sup>6</sup>,  
Jakub Klocek<sup>7</sup>, Adam Piłat<sup>6</sup>, Łukasz Mateusiak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków, e-mail: rtylek@cyf-kr.edu.pl

<sup>2</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Katedra Eksploatacji Maszyn, Ergonomii i Procesów Produkcyjnych, ul. Balicka 116 b, 30-149 Kraków

<sup>3</sup> Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych, Katedra Maszyn Roboczych i Metodologii Badań, ul. Oczapowskiego 11, 10-719 Olsztyn

<sup>4</sup> Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych w Poznaniu, ul. Starołęcka 31, 60-963 Poznań

<sup>5</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, al. A. Mickiewicza 30, Pawilon B-1, 30-059 Kraków

<sup>6</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Automatyki i Robotyki, al. A. Mickiewicza 30, Pawilon B-1, 30-059 Kraków

<sup>7</sup> Optister Kraków, ul. Jałowcowa 50, 31-329 Kraków

## Abstrakt

Intensywna hodowla sadzonek w kontenerach wymaga stosowania wyselekcjonowanego materiału siewnego o jak najwyższej zdolności kiełkowania, który dodatkowo charakteryzuje się wyrównaniem terminu wschodów. Zastosowanie skaryfikacji mechanicznej przyspiesza wzrost osi zarodka, intensyfikując tym samym proces kiełkowania nasion, jak i wzrost siewek. W warunkach naturalnych skaryfikacja przebiega samoistnie, dzięki oddziaływaniu na opadłe na glebę nasiona takich czynników, jak zmiany wilgotności i temperatury czy też ingerencja mikroorganizmów glebowych. Czynniki te, osłabiając okrywą nasienną, umożliwiają wymianę gazową oraz przenika-



nie wody do zarodka. W przypadku żołądzi dębów powszechnie stosuje się skaryfikację mechaniczną, polegającą na odcięciu od strony znamienia (dystalnej) ich końców wraz z liścieniami (od 1/5 do 1/3 długości). Wartością dodaną tego rodzaju skaryfikacji jest możliwość analizy zmian mumifikacyjnych żołądzi, które są określane wzrokowo. Stwierdzono możliwość zwiększenia połowej zdolności kiełkowania o ok. 30% dzięki przedświnnemu odrzuceniu nasion nekrotycznych. W pracy dokonano przeglądu aktualnego stanu zmechanizowania i zautomatyzowania procesu skaryfikacji żołądzi, uwzględniając także określanie stopnia zmian chorobowych, bazując na kolorze i intensywności pikseli obrazu przekroju. W dalszym przebiegu tego procesu następuje szacowanie za pomocą metod widzenia maszynowego zdrowotności każdego z przetwarzanych nasion, co daje podstawy do ich automatycznego sortowania na zepsute, nadpsute oraz zdrowe, tj. takie, które można przeznaczyć do siewu kontenerowego. Po zastosowaniu metod uczenia maszynowego z klasyfikatorem Bayesa osiągnięto skuteczność funkcjonowania na poziomie 95,6%. Podane efekty potwierdzają wyprowadzone wcześniej przypuszczenie, że barwa i intensywność pikseli obrazu przekroju poprzecznego nasion stanowią istotną cechę rozdzielczą żołądzi zdrowych i nekrotycznie zmienionych.

**Słowa kluczowe:** nasiona dębu, sortowanie, szkółka kontenerowa, analiza obrazu, automatyzacja

## 1. Wstęp

Skaryfikacja to uszkodzenie bądź też osłabienie okrywy nasiennej, której celem jest zainicjowanie kiełkowania nasion dzięki ułatwieniu im dostępu do wody i powietrza. W warunkach leśnych proces skaryfikacji opadłych na glebę nasion przebiega w wyniku zmian temperatury i wilgotności oraz oddziaływania mikroorganizmów glebowych (Tylkowski 2016). W warunkach sztucznych można prowadzić skaryfikację (Grzesik i in. 2012): (1) termiczną – polegającą na poddaniu nasion działaniu podwyższonej temperatury, której źródłem może być ogień, promieniowanie mikrofalowe lub gorąca woda, (2) chemiczną – polegającą na traktowaniu nasion kwasem siarkowym degradującym okrywy nasienne, (3) mechaniczną – uszkadzającą okrywy nasienne poprzez ich ścieranie, zgniatanie lub przecinanie. W odniesieniu do żołądzi właśnie ta ostatnia metoda znalazła zastosowanie gospodarcze. Polega ona na odcięciu od strony dystalnej (znamienia) 20–30% długości żołądzia (Andrzejczyk 2009; Giertych i Suszka 2011; Tadeusiewicz i in. 2017 b). Z uwagi na wysoką pracochłonność zabiegu jest on stosowany przede wszystkim przy produkcji sadzonek metodą kontenerową. W tym przypadku dąży się do tego, aby do każdej celi kasety szkółkarskiej wysiać jedno nasiono, które poddane wcześniejszym zabiegom sortowania będzie źródłem sadzonki o oczekiwanych cechach morfologicznych. Przy sortowaniu nasion wykorzystuje się wiedzę z zakresu zależności stanu

zdrowotnościowego nasion od ich własności fizycznych (cech rozdzielczych) (Kaliniewicz i in. 2013, 2016). Sortowanie żołądzi zwiększa koszty produkcji szkółkarskiej, jednak wyeliminowanie tego zabiegu skutkuje wyższym udziałem sadzonek małych, niespełniających norm leśnego materiału rozmnożeniowego (Shi i in. 2019). Zatem wymierne korzyści skaryfikacji żołądzi, to: (1) przyspieszenie wschodów (zwykle o ok. 2 tygodnie), (2) wyrównanie terminu kiełkowania (uzyskanie jednorodnego materiału szkółkarskiego), (3) możliwość odrzucenia nasion zepsutych i nadpsutych (sortowanie) (Grabska-Chrzastowska i in. 2017; Adamczyk i in. 2018 a; Tylek i in. 2018; Walczyk i in. 2018; Skrzyszewska i in. 2019).

## 2. Sposoby skaryfikacji żołądzi

### 2.1. Skaryfikacja ręczna z wykorzystaniem sekatora

Obecnie wysiewa się w Polsce w kontenerach szkółkarskich ok. 6 mln sztuk żołądzi rocznie. Oznacza to, że liczba skaryfikowanych nasion musi być znacząco większa, ponieważ nie wszystkie nasiona są przydatne do wysiewu. Znaczna część, niekiedy nawet ponad 50%, może być uszkodzona przez owady, gryzonie lub zmumifikowana (Bystrowski i Wójcik 2009).

Skaryfikacja prowadzona ręcznie (ryc. 1) to żmudna i monotonna praca, wymagająca zatrudnienia od kilku do kilkunastu osób w każdej szkółce produkującej sadzonki. Ergonomiczna uciążliwość pracy polega na powtarzalnym ruchu rąk w cyklu: (1) sięgnięcie do pojemnika i pobranie nasiona (lub kilku nasion) do dłoni, (2) uchwycenie w palce z zachowaniem właściwej orientacji żołądzia, (3) odcięcie fragmentu nasiona sekatorem, (4) ocena wzrokowa przydatności nasiona do kiełkowania na podstawie topografii zmian mumifikacyjnych i stopnia wypełnienia okrywy nasiennej liścieniami, (5) przeniesienie nasiona do odpowiedniego zbiornika. Nawet posługiwanie się nowoczesnym sekatorem powoduje zmęczenie układu nerwowo-mięśniowego dłoni i rąk ze względu na ciągłe powtarzanie tych samych czynności.

Czas trwania manualnego cyklu pracy wynosi ok. 3 s (Adamczyk i in. 2018 a), a zatem skaryfikacja 1 mln nasion wymaga ponad 100 dni pracy po 8 godzin dziennie. Te szacunkowe obliczenia obrazują, jak wysoka musi być liczba personelu, aby sprostać temu zadaniu. Ręczna skaryfikacja nasion dębu nie jest ciężką pracą, jest jednak monotonna, co po dłuższym czasie jej wykonywania ma negatywne konsekwencje (znużenie i zniechęcenie do pracy). Obecnie coraz trudniej znaleźć pracowników, którzy z zaangażowaniem podejmą się tak nudnej pracy. Niekiedy skaryfikator ręczny jest zastępowany innymi narzędziami i urządzeniami, jak np. gilotyna do przecinania nasion czy zmodyfikowana szlifierka stołowa. Są to rozwiązania trochę bezpieczniejsze



Ryc. 1. Skaryfikacja żołądźi przy użyciu sekatora ręcznego (fot. P. Tylek)

sze w użytkowaniu niż sekator, niemniej jednak praca nimi wykonywana jest równie monotonna.

Należy podkreślić, że ocena potencjalnej zdolności do kiełkowania wykonana przez doświadczonych pracowników bezpośrednio po skaryfikacji jest zazwyczaj bardzo trafna. Średnia różnica pomiędzy oceną a polowym wynikiem kiełkowania wynosi 0,5–3,4% (Walczyk i Tylek 2015; Walczyk i in. 2018). Jednak konieczność przygotowania dużej liczby nasion w krótkim czasie powoduje, że oprócz dłoni pracowników obciążeniu podlegają także zmysły dotyku i wzroku, szczególnie podczas szacowania długości żołądźi przed skaryfikacją oraz podczas oceny ich zdrowotności na podstawie obserwacji przekroju już po odcięciu części dystalnej. Chociaż badania autorów potwierdzają skuteczność organoleptycznej metody oceny nasion, to można oczekiwać, że zmęczenie spowodowane powtarzalnością czynności i spotęgowane zmiennymi warunkami oświetleniowymi może być przyczyną błędów wzrokowej oceny stanu zdrowotności żołądźi (Jabłoński i in. 2018).

## 2.2. Obcinarka żołądźi

Urządzeniem umożliwiającym mechanizację procesu skaryfikacji jest obcinarka wyprodukowana przez firmę Gidpol i użytkowana w Gospodarstwie Szkółkarskim Sowin w Nadleśnictwie Gidle. Obcinarka ma zbiornik zasypowy z rynną, z której pracownicy pobierają ręcznie żołądźie i umieszczają w podajniku karuzelowym. Podajnik przesuwają żołądźie w obszar pracy noża tarczowego, który odcina część szypułkową, a zasadniczą część kieruje do pojemnika

zbiorczego (ryc. 2). Takie rozwiązanie zwiększa bezpieczeństwo pracy operatora, ponieważ uniemożliwia kontakt dłoni z ostrzami zespołu tnącego.

Podajnik karuzelowy ma uchwyty dostosowane do przytrzymania żołądzi o trzech sortymentach wymiarowych. Operator musi zatem nie tylko umieścić nasiono w uchwycie właściwą stroną, ale również dokonać wyboru uchwytu. Obcinarka nie zapewnia stałej proporcji długości odcinanej części w stosunku do wielkości nasiona. Pewnym ułatwieniem obsługi urządzenia może być poddanie nasion wcześniejszej kalibracji wymiarowej na sortowniku sitowym. Kolejną wadą rozwiązania jest brak możliwości bezpośredniej oceny stanu zdrowotnego nasion. Zabieg ten musi być przeprowadzony później, przez co stanowi oddzielną czynność technologiczną.



Ryc. 2. Karuzelowa obcinarka żołądzi (fot. P. Tylek)



### 2.3. Półautomat do skaryfikacji, oceny zdrowotności i sortowania żołądzi

W Ośrodku Szkółkarsko-Nasiennym Nadleśnictwa Jarocin jest testowana maszyna o nazwie Quercomat Q1, wyprodukowana przez firmę EMDE Zakład Elektroniczny. Służy ona do obcinania, oceny zdrowotności i sortowania żołądzi dębu szypułkowego oraz bezszypułkowego. Maszyna posiada dwa niezależne moduły i jest obsługiwana przez dwóch pracowników. Możliwe jest też funkcjonowanie z uruchomionym jednym modulem (ryc. 3).

Każdy operator skaryfikatora ma do obsłużenia komplet trzech przysawek pojawiających się cyklicznie w oknie urządzenia. Rola operatora polega na pobraniu z tacy żołądzi i podaniu ich właściwą stroną do przysawek umieszczonych na podajniku karuzelowym znajdującym się pod obudową maszyny. Przyssane żołądzie są przemieszczane cyklicznie w obszar funkcjonowania noży obcinających. Długość cięcia, ustawiana przed uruchomieniem skaryfikatora, może być regulowana bezstopniowo w przedziale 3–6 mm. Po wykonaniu cięcia karuzela z nasionami przemieszcza się w strefę pracy kamery, która w danym cyklu roboczym dokonuje rejestracji barwnego widoku trzech zeszkaryfikowanych żołądzi. System optyczny wykrywa, czy barwa liścieni poszczególnych żołądzi zawiera się w predefiniowanym zakresie chromatycznym. Operator może zdefiniować własne przestrzenie barw oraz dopuszczalny udział nekroz. W kolejnym cyklu jest dokonywane automatyczne



Ryc. 3. Skaryfikator półautomatyczny, model Quercomat Q1 (fot. P. Tylek)

sortowanie żołądździ, wykonywane na bazie wyniku analizy obrazu. Żołądździe są upuszczane na jeden z dwóch przenośników taśmowych i transportowane do pojemników.

Urządzenie prowadzi skaryfikację w sposób bezpieczny i umożliwia obiektywny podział żołądździ na frakcje zdrowotnościowe. Niestety, wymaga prowadzenia stałych i żmudnych czynności obsługowych, a system pneumatycznych chwytaków nie sprawdza się w przypadku żołądździ z pofałdowanymi lub pękniętymi okrywkami nasiennymi. Żołądździe takie nie są przytrzymywane bądź też siła uchwytu jest zbyt słaba i nasiona odpadają w trakcie cięcia lub są przekrzywane, co utrudnia analizę obrazu. Ponadto dla danej partii nasion długość obcięcia jest niezależna od wielkości poszczególnych żołądździ, co prowadzi do zróżnicowania intensywności zabiegu skaryfikacji. Również proces sortowania jest nieco ułomny, ponieważ dzieli nasiona tylko na dwie frakcje – zdrowe i pozostałe – podczas gdy w tej ostatniej mogą znajdować się żołądździe nadpsute, ale wciąż o dużym potencjale kiełkowania.

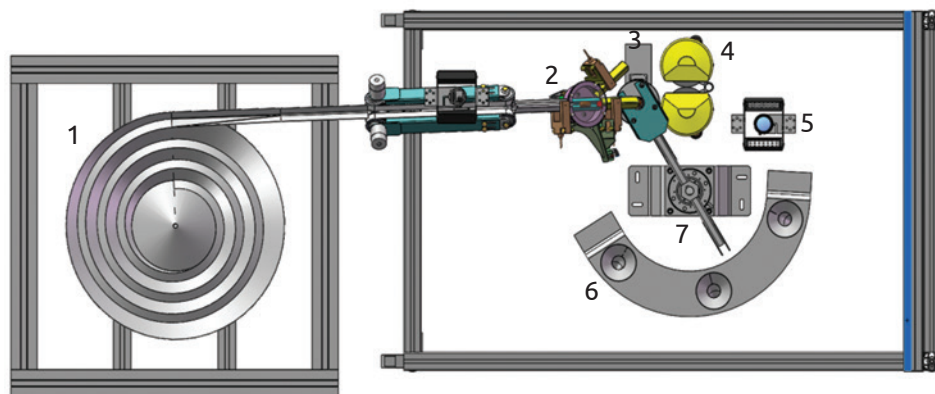
#### 2.4. Automat do skaryfikacji żołądździ z systemem wizyjnym do oceny zdrowotności na podstawie topografii zmian mumifikacyjnych

Podanych wcześniej wad jest pozbawiony model automatu (ryc. 4, 5), który powstał w wyniku prac badawczo-rozwojowych prowadzonych przez konsorcjum, a jego uczestnikami były następujące instytucje naukowe i przedsiębiorstwa: (1) Uniwersytet Rolniczy w Krakowie (pełniący rolę Lidera Konsorcjum),



Ryc. 4. Widok funkcjonalnego modelu automatu do skaryfikacji żołądździ (fot. P. Tylek)





**Ryc. 5.** Model 3D zasadniczych podzespołów automatu (widok z góry): 1 – zespół podający, 2 – zespół detekcji długości i orientacji, 3 – zespół chwytaka, 4 – zespół skaryfikacji, 5 – zespół detekcji zmian mumifikacyjnych, 6 – zespół sortujący, 7 – obrotnica (źródło: opracowanie własne)

(2) Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, (3) Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych w Poznaniu, (4) Przedsiębiorstwo Wielobranżowe „PROMAR” z Poznania. Badania finansowano z grantu PBS3/A8/34/2015, przyznanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu PBS pt. „Funkcjonalny model automatu z systemem wizyjnym do skaryfikacji oraz oceny żywotności żołądźi na podstawie automatycznego rozpoznawania topografii zmian mumifikacyjnych”.

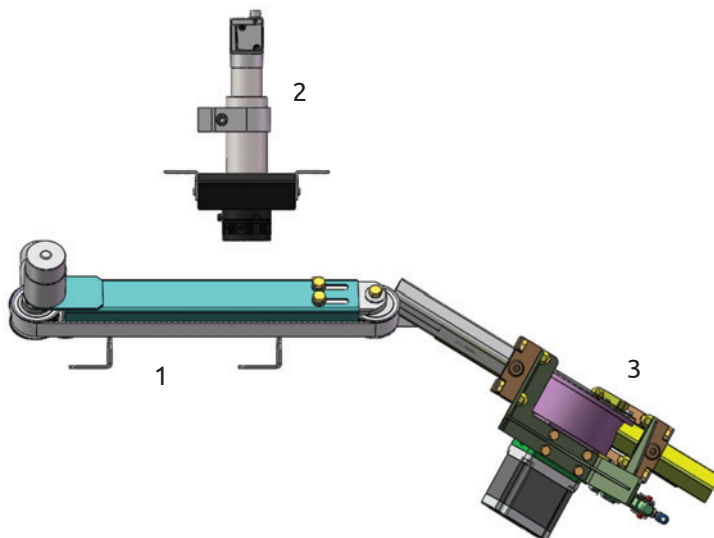
Według założeń automat ma pełnić następujące funkcje:

1. Pobranie pojedynczego żołądźi ze zbiornika. W tym przypadku zastosowano podajnik wibracyjny, którego działanie zapewnia pobieranie poszczególnych żołądźi i transportowanie ich po pochyłej spiralnej ścieżce do miejsca, w którym mogą one być pojedynczo upuszczone na transporter dwutaśmowy.
2. Sprawdzenie orientacji, która wynika z losowego podawania żołądźi przez podajnik wibracyjny. Nasiona mogą pojawiać się w dwóch położeniach, z których właściwe jest tylko jedno. Wspecjalizowany, komputerowy system wizyjny z zaimplementowanym algorytmem rozpoznania orientacji nasion, wykorzystujący detektor Harrisa, sprawdza ich ułożenie (Pawlik i in. 2017). System wizyjny do kontroli orientacji żołądźi ma jeszcze dodatkową, ważną funkcję, którą jest pomiar długości żołądźi. Informacja ta jest później wykorzystywana do określenia miejsca przecięcia żołądźi, aby zapewnić tę samą intensywność skaryfikacji, niezależnie od wielkości żołądźi.
3. Rotację, wykonywaną w przypadku, gdy żołądź jest transportowany w nieprawidłowym położeniu. Nasiona zorientowane poprawnie (kiedy

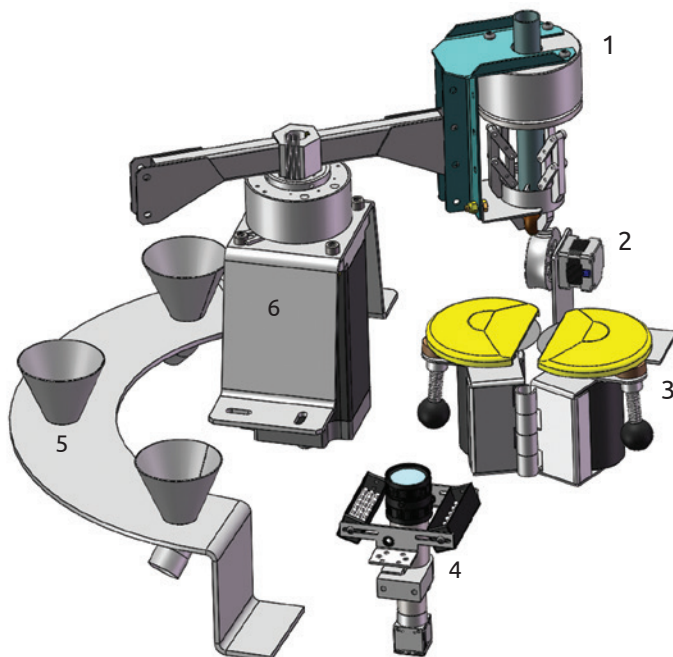
korzeń zarodkowy znajduje się za środkiem nasiona w kierunku ruchu na podajniku taśmowym) przechodzą przez kanał rotatora bezpośrednio do pozycjonera. Żołądźcie zorientowane nieprawidłowo są obracane przez rotator o 180°. Rotator (ryc. 6) może także całkowicie odrzucić żołądźcia, jeżeli system wizyjny sprawdzania orientacji nie zdoła go zidentyfikować. Żołądźcie sklasyfikowane jako nierozpoznane są kierowane do oddzielnego zasobnika, jako nienadające się do automatycznej skaryfikacji.

4. Pochwycenie – jest realizowane przez chwytak trójpalcowy (Adamczyk i in. 2018 b) z napędem elektromagnetycznym, zamontowany na obrotnicy (ryc. 7). Jednak zanim żołądź zostanie pochwycony jest odpowiednio ustawiany z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanej krzywki pozycjonera, która podnosi lub opuszcza go w taki sposób, aby miejsce, w którym powinien zostać przecięty, znajdowało się zawsze na właściwej wysokości każdego żołądźcia, mimo znacznych różnic w ich długości. Kąt obrotu krzywki jest obliczany na podstawie długości konkretnego żołądźcia, zmierzonej podczas operacji sprawdzania jego orientacji (Adamczyk i in. 2018 a).
5. Prowadzenie skaryfikacji, która jest realizowana przez wirujące przeciwbieżne noże tnące. Taki sposób cięcia daje gładką powierzchnię ułatwiającą funkcjonowanie zespołu rozpoznawania zmian chorobowych.
6. Kontrolowanie zdrowotności, które odbywa się przez identyfikację względnej wielkości zmian mumifikacyjnych metodami wizji komputerowej (Bubliński i in. 2017; Jabłoński i in. 2016, 2018). Metody komputerowe oparte na uczeniu maszynowym są równie dokładne jak ocena organoleptyczna dokonana przez pracowników szkółki, ale jednocześnie zdecydowanie szybsze. Procedura uczenia maszynowego jest czasochłonna, ale jest wykonywana jednorazowo na podstawie wybranych próbek przekrojów żołądźci poprawnie sklasyfikowanych przez ludzi. Natomiast po nauczeniu algorytmu każdorazowe wykonanie zadania rozpoznania i interpretacji obrazu przekrojów nowych żołądźci zajmuje średnio 68 ms (Przybyło i Jabłoński 2019).
7. Sortowanie nasion na trzy kategorie (ryc. 8): zdrowe (do siewu), zepsute (do wyrzucenia) oraz nadpsute (wątpliwe, do dodatkowej oceny przez pracowników) jest realizowane na podstawie sygnałów płynących z systemu oceny automatycznej kontroli zdrowotności. Odbywa się to w ten sposób, że chwytak upuszcza poszczególne żołądźcie nad odpowiednimi kolektorami połączonymi ze zbiornikami. Nasion wątpliwych zwykle nie wysiewa się w kasetach, ale przeznaczają do siewu w szkółce gruntowej.

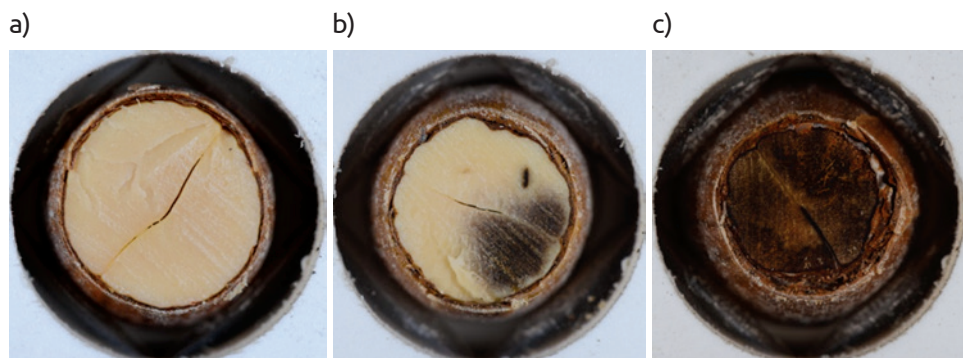
Zespołami napędowymi oraz wykonawczymi automatu steruje sterownik PAC (ang. *Programmable Automation Controller*), który jest przemysłowym sterownikiem automatyki i umożliwia realizowanie różnych zadań z zakresu pomiarów, rejestracji i sterowania (Tadeusiewicz i in. 2017 a). Pełen cykl przetwarzania nasiona żołądźcia od detekcji orientacji aż po sortowanie trwa



Ryc. 6. Model 3D zespołu detekcji długości i orientacji żyłki (widok z boku): 1 – zespół przenośników taśmowych, 2 – kamera z oświetlaczem, 3 – rotator (źródło: opracowanie własne)



Ryc. 7. Model 3D zespołów skaryfikacji, detekcji zmian mumifikacyjnych i sortowania (widok z boku): 1 – chwytak, 2 – pozycjoner, 3 – noże skaryfikujące, 4 – kamera z oświetlaczem, 5 – kolektory sortownika, 6 – suport z obrotnicą (źródło: opracowanie własne)



Ryc. 8. Widok liścieni po zabiegu skaryfikacji u nasion: a – zdrowych, b – nadpsutych, c – zepsutych (fot. J. Walczyk)

od 11 do 16 s w zależności od sekwencji czynności, którym jest poddawane nasiono. W wersji komercyjnej cykl ten powinien być znacząco skrócony poprzez równoległe działanie poszczególnych podzespołów oraz zmultiplikowanie chwytaków – z jednego do sześciu.

### 3. Wyniki badań polowych

Na terenie Gospodarstwa Nasiennie-Szkółkarskiego ZAPORA w Nadleśnictwie Bielsko założono doświadczenie polowe polegające na obsianiu kontenerów styropianowych żołądździ poddanych skaryfikacji (obcięcie 20% długości nasienia) oraz bez skaryfikacji. Wykorzystano kontenery o oznaczeniu V300/53, mające następujące parametry: długość  $650 \pm 2$  mm, wysokość  $180 \pm 2$  mm, szerokość  $312 \pm 3$  mm, liczba gniazd w kasecie 53 szt. (obsiewano 50 cel), objętość pojedynczego gniazda  $0,275 \pm 0,015$  dm<sup>3</sup>. W doświadczeniu przygotowano osiem kaset, po cztery z każdego wariantu. Napelnione substratem na linii technologicznej i obsiane kasy umieszczono w namiocie foliowym. Kontrolą klimatu oraz nawadnianiem sterował system komputerowy według standardowego reżimu technologicznego. Raz w tygodniu rejestrowano proces kiełkowania, przy czym obserwacje przerwano po 12 tygodniach, kiedy już nie stwierdzono kolejnych wschodów. Po zakończeniu sezonu wegetacyjnego przystąpiono do oceny jakości wyhodowanych sadzonek. Dla każdej sadzonki określono cechy morfologiczne oraz suchą masę pędu, aparatu asymilacyjnego oraz systemu korzeniowego, z wykorzystaniem suszarki laboratoryjnej (65°C, 48 godzin) oraz wagi analitycznej. Dodatkowo przeprowadzono pomiar admitancji sadzonek z wykorzystaniem przyrządu wielofunkcyjnego CX-461 – w celu określenia ich żywotności.

Po zakończeniu sezonu wegetacyjnego określono liczebność sadzonek w poszczególnych kasetach oraz procentową udatność siewu. Wyraźnie więcej

sadzonek wyhodowano w wariantcie, w którym do kaset wsiewano nasiona skaryfikowane (średnio wyhodowano 40,25 sztuk sadzonek, a średnia udatność wyniosła 80,5%) w stosunku do wariantu z wysiewem nasion nieskaryfikowanych (średnio wyhodowano 34,5 sztuk sadzonek, a średnia udatność wyniosła 69,0%).

W tabeli 1 przedstawiono zbiorcze zestawienie parametrów wysokości i średnicy w szyjce korzeniowej sadzonek oraz wartości admitancji. W wariantcie 1, w którym sadzonki wyrosły z nasion skaryfikowanych, zarówno średnie wysokości pędów, jak i średnie średnice w szyjkach korzeniowych były wyższe od tych wyznaczonych dla wariantu 2 z sadzonkami wyrosłymi z nasion nieskaryfikowanych. Sadzonki z nasion skaryfikowanych posiadają także większą średnią admitancję od nieskaryfikowanych, oznacza to większą żywotność tych pierwszych. Średnie wartości admitancji są jednak niższe od przytaczanych w literaturze (Wesoły i Hauke 2009). Jest to rezultatem przeprowadzenia pomiarów na końcu okresu wegetacji i oznacza gotowość sadzonek do okresu spoczynku.

**Tabela 1.** Wyniki pomiarów cech morfologicznych oraz admitancji sadzonek

| Wariant przygotowania nasion | Analizowana cecha               |                   |   |
|------------------------------|---------------------------------|-------------------|---|
|                              | średnia szyjki korzeniowej [mm] | długość pędu [cm] | admitancja sadzonek [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] |
| Skaryfikowane                | 5,39 ± 0,32                     | 21,5 ± 1,7        | 14,60 ± 3,04                                    |
| Nieskaryfikowane             | 5,00 ± 0,53                     | 18,62 ± 2,45      | 13,32 ± 2,46                                    |

Podobnie jak w przypadku cech morfologicznych również pomiary suchej masy sadzonek wykazały wyższe wartości dla tych wyhodowanych z nasion poddanych skaryfikacji. Średnia sucha masa sadzonki wynosiła 7,76 g, podczas gdy analogiczna masa sadzonek wyrosłych z nasion nieskaryfikowanych była o 1,59 g mniejsza. Różnice były widoczne również w rozbiciu na poszczególne fragmenty sadzonek: pęd, liście oraz korzenie (tab. 2).

Przeprowadzone pomiary oraz analiza uzyskanych wyników wykazały, że proces skaryfikacji wpłynął pozytywnie na udatność siewu oraz większość cech morfologicznych sadzonek. Udatność sadzonek wyhodowanych w wariantcie 1 wynosiła 80,5% i była wyższa od uzyskanej w wariantcie 2 o 11,5%. Należy zauważyć, że w wariantcie ze skaryfikacją wysiewano wszystkie nasiona, również te, które w wyniku wizualnej oceny stanu liścieni powinny zostać wyeliminowane. Jak wykazała analiza, sadzonki wyrosłe z nasion skaryfikowanych były dorodniejsze oraz mniej zróżnicowane, współczynniki zmienności cech morfologicznych były ok. dwukrotnie mniejsze. Cechy morfologiczne sadzo-

**Tabela 2.** Wyniki pomiarów suchej masy sadzonek

| Wariant przygotowania nasion | Analizowana cecha           |                              |                                |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
|                              | średnia sucha masa pędu [g] | średnia sucha masa liści [g] | średnia sucha masa korzeni [g] |
| Skaryfikowane                | 1,37 ± 0,75                 | 1,17 ± 0,04                  | 5,22 ± 2,50                    |
| Nieskaryfikowane             | 1,12 ± 0,66                 | 0,99 ± 0,03                  | 4,06 ± 2,13                    |

nek są istotne z punktu widzenia oceny przydatności materiału sadzeniowego do odnowień. Europejska norma oceny leśnego materiału rozmnożeniowego bierze pod uwagę takie morfologiczne cechy, jak średnica szyi korzeniowej oraz długość części nadziemnej. W zależności od wieku sadzonek przedstawia wartości minimalne, dzieląc sadzonki na dopuszczone do obrotu i niedopuszczone. W przypadku jednorocznych sadzonek dębu szypułkowego minimalna średnica szyi korzeniowej wynosi 2 mm, a długość pędu 7 cm. Biorąc pod uwagę parametry morfologiczne, Normę Europejską spełnia 93% sadzonek wyhodowanych z nasion poddanych skaryfikacji. W przypadku sadzonek pochodzących z nasion nieskaryfikowanych analogiczna wartość wynosi 87%.

#### 4. Dyskusja i podsumowanie

Żołądźcie charakteryzują się bardzo nierównomiernymi wschodami. Pierwsze siewki zaczynają pojawiać się już po okresie 2–3 tygodni od siewu, a ostatnie nawet 13–15 tygodni później (Andrzejczyk 2009; Löff i in. 2019). Różnicuje to wzrost siewek, te pojawiające się później znajdują się pod osłoną siewek większych, z dobrze rozwiniętymi liśćmi, co znacząco ogranicza dostęp światła i wody. Skaryfikacja żołądźci zwiększa dynamikę i równomierność wschodów, a także wpływa na polepszenie jakości wyhodowanych sadzonek (Skrzyszevska i in. 2019). Jednak zbyt intensywna skaryfikacja skutkuje pogorszeniem parametrów morfologicznych materiału sadzeniowego, w tym zmniejszeniem suchej masy oraz powierzchni systemów korzeniowych (Shi i in. 2017). Jest to wynikiem usunięcia znacznej części liścieni wypełniających niemal całe wnętrze nasienia i pełniących funkcję spichrzową (Francisco i in. 2003; Giertych i Suszka 2011). Na wzrost sadzonek w fazie juvenilnej istotny wpływ ma masa nasion – siewki wyrosłe z nasion cięższych charakteryzują się większym stosunkiem długości korzeni do długości pędu, co przemawia za ich lepszą jakością hodowlaną. Nie zauważono natomiast korelacji między wielkością sadzonek i wielkością osi zarodkowych (Giertych i Chmielarz 2019). Z kolei skaryfikacja, nawet



o bardzo małej intensywności, wpływa korzystnie na efektywność wykorzystania środków ochrony w postaci fungicydów (Giertych i Suszka 2010).

Nasiona dębu szypułkowego charakteryzują się dużym zróżnicowaniem morfologicznym – od smukłych (elipsoida obrotowa) do pękatych (kula) (Tylek 2012; Tylek i in. 2015). Przewidywana kalibracja żołądź zwiększa liczbę nasion kiełkujących oraz podnosi wartość hodowlaną wyhodowanych sadzonek (Skrzyszevska i in. 2019; González-Rodríguez i in. 2020). Najgorsze efekty kiełkowania odnotowano w przypadku nieskaryfikowanych żołądź o średnicy poniżej 15 mm, a najlepsze – u skaryfikowanych żołądź o średnicy powyżej 15 mm. Również masa żołądź jest skorelowana dodatnio z rozmiarem sadzonek (Tilki 2010; Yi 2015), dlatego żołądź o podobnych wymiarach, ale odmiennej masie powinny być wysiewane oddzielnie, aby sprzyjać wyrównaniu wschodów. Związek między wielkością nasion a wymiarami sadzonek ulega zatarciu w przypadku wydłużenia okresu wegetacyjnego (Clark i Schlarbaum 2018). Należy przy tym pamiętać, że wielkość żołądź jest także ściśle związana z lokalnymi warunkami klimatycznymi (Bonito i in. 2011; Llanderal-Mendoza i in. 2017), jak również z wiekiem drzewostanu macierzystego (Kaliniewicz i Tylek 2018), przy czym w tym ostatnim przypadku nie stwierdzono korelacji wieku drzewostanu z połową zdolnością do kiełkowania nasion.

Z dotychczasowych badań dotyczących żołądź dębu szypułkowego wynika, że gęstość oraz w bardzo ograniczonym stopniu masa, a także własności aerodynamiczne oraz mechaniczne zależą od ich żywotności (Tylek 2012; Tylek i in. 2015; Kaliniewicz i Tylek 2018; Skrzyszevska i in. 2019). Cechy te nie dają jednak możliwości wydzielenia wyłącznie nasion zdrowych, a jedynie możliwe jest wyodrębnienie klasy nasion zdrowych łącznie z nasionami nieco nadpsutymi i oddzielenie ich od pozostałych nasion (całkowicie zepsutych). Niska efektywność separacji nasion dębów z wykorzystaniem klasycznych cech fizycznych skłania do poszukiwania innych cech rozdzielczych. Należą do nich m.in. cechy optyczne, przy czym w klasycznym rozumieniu chodzi o barwę i połysk okrywy nasiennej (Tylek 2010; Kaliniewicz i in. 2014; Novikov i Ivetic 2019; Novikov i in. 2019), która niekiedy różnicuje nasiona pod względem zdolności kiełkowania. W przypadku żołądź analiza dotyczy zmian nekrotycznych uwidocznionych na liścieniach (Bubliński i in. 2017; Grabska-Chrzastowska i in. 2017; Przybyło i Jabłoński 2019). Analiza ta jest pochodną ustandaryzowanej, destrukcyjnej metody oceny żywotności (Załęski 2000), którą kwalifikuje się wśród przybliżonych (orientacyjnych) metod oceny nasion. Dokonuje się w tym przypadku makroskopowych oględzin rozwoju zarodka, stanu tkanki liścieni i zawiązków korzonka oraz wewnętrznych uszkodzeń spowodowanych przez grzyby i owady, uwidocznionych na wzdłużnym przekroju przez tkankę żołądź. Nieco inaczej jest w przypadku oceny zdrowotności na podstawie przekroju poprzecznego, obserwator lub system akwizycji obrazu ma bowiem

wgląd jedynie w obszar liścieni i to tylko w miejscu przekroju. Mogą zatem wystąpić dwa rodzaje pomyłek. Po pierwsze, żołądźcie z częściowo zmumifikowanymi liścieniami mogą zostać zakwalifikowane jako zepsute, mimo że w rzeczywistości, będą nasionami nadpsutymi z dość dużym potencjał kiełkowania. Po drugie, żołądźcie bez widocznych nekroz w oglądanym obszarze przekroju liścieni mogą być uznane za zdrowe, mimo że mumifikacja niewidocznego dla obserwatora korzonka zarodkowego powinna całkowicie dyskwalifikować je z wysiewu. Dodatkowo wiarygodna ocena zdrowotności żołądźci przechowywanych przez okres np. dwóch lat może być utrudniona z uwagi na zmiany barwy liścieni (Bubliński i in. 2017; Adamczyk i in. 2018 a). Jednak niezależnie od wspomnianych ograniczeń, zautomatyzowanie separacji żołądźci i wyeliminowanie subiektywnej oceny ich zdrowotności przez pracowników szkółki leśnej może spowodować, że własności optyczne przekrojów żołądźci staną się innowacyjną cechą rozdzielczą o zadowalającej efektywności i dużym potencjale wdrożeniowym.

Projekt automatu do skaryfikacji wpisuje się w działania mające na celu zwiększenie poziomu automatyzacji i robotyzacji prac w gospodarce leśnej. W konstrukcji urządzenia zastosowano dużą liczbę gotowych komponentów i podzespołów, co może znacząco obniżyć koszt jego komercjalizacji. Na omawiany automat do skaryfikacji uzyskano patent krajowy (Patent nr 228904) oraz międzynarodowy (European patent 3172954). Urządzenie było też wielokrotnie nagradzane na wystawach i targach innowacji i nowych technologii, m.in.: Złotym Medalem – 11th International Warsaw Invention Show IWIS 2017; Złotym Medalem – VII Międzynarodowe Targi Rolnicze POLAGRA-PREMIERY 2018; Złotym Medalem „Wybór Konsumentów” – Międzynarodowe Targi Poznańskie 2019; I miejscem w Ogólnopolskim Konkursie SIMP na „Najlepsze osiągnięcie techniczne 2018 r.”.

## Literatura

- Adamczyk F., Frąckowiak P., Jabłoński M., Juliszewski T., Kielbasa P., Piłat A., Szaroleta M., Szczepaniak J., Tadeusiewicz R., Tylek P., Walczyk J. 2018 a. Automat do skaryfikacji żołądźci wraz z identyfikacją zmian chorobowych. Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, Poznań.
- Adamczyk F., Szczepaniak J., Szaroleta M., Tylek P., Walczyk J., Juliszewski T., Kielbasa P., Jabłoński M., Piłat A., Tadeusiewicz R., Fajfer J. 2018 b. Chwytnik żołądźci – przebieg zmian konstrukcyjnych. W: Użytkowanie maszyn rolniczych i leśnych – badania naukowe i dydaktyka. Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, Poznań, 19–27.
- Andrzejczyk T. 2009. Dąb szypułkowy i bezszypułkowy. Hodowla. Powszechne Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.

- Bonito A., Varone L., Gratani L. 2011. Relationship between acorn size and seedling morphological and physiological traits of *Quercus ilex* L. from different climates. *Photosynthetica*, 49(1), 75–86.
- Bubliński Z., Grabska-Chrzastowska J., Jabłoński M., Kwiecień J., Mikrut Z., Pawlik P., Przybyło J., Tadeusiewicz R., Tylek P., Walczyk J. 2017. Ocena zdrowotności automatycznie skaryfikowanych żołądki za pomocą komputerowej analizy obrazów. Akademyka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
- Bystrowski C., Wójcik G. 2009. Próba użycia insektycydów z grupy neonikotynoidów do ochrony żołądki na plantacji nasiennej dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) w Nadleśnictwie Leżajsk. *Leśne Prace Badawcze*, 70(3), 271–275.
- Clark S.L., Schlarbaum S.E. 2018. Effects of Acorn Size and Mass on Seedling Quality of Northern Red Oak (*Quercus rubra*). *New Forests*, 49, 571–583.
- European patent No. 3172954. 2018. A system for automatic scarification and assessment of vitality of seeds and a method for automatic scarification and assessment of vitality of seeds.
- Francisco G.C., Jordán E.M., Eustaquio G.P. 2003. Influence of Cotyledon Removal on Early Seedling Growth in *Quercus robur* L. *Annals of Forest Science*, 60, 69–73.
- Giertych M.J., Chmielarz P. 2019. Trees. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01941-3>.
- Giertych M.J., Suszka J. 2010. Influence of Cutting Off Distal Ends of *Quercus robur* Acorns on Seedling Growth and Their Infection by the Fungus *Erysiphe alphitoides* in Different Light Conditions. *Dendrobiology*, 64, 65–70.
- Giertych M.J., Suszka J. 2011. Consequences of Cutting Off Distal Ends of Cotyledons of *Quercus robur* Acorns Before Sowing. *Annals of Forest Science*, 68(2), 433–442.
- González-Rodríguez V., Navarro-Cerrillo R.M., Villar R. 2020. Artificial Regeneration with *Quercus ilex* L. and *Quercus suber* L. by Direct Seeding and Planting in Southern Spain. *Annals of Forest Science*, 68(3), 637–646. DOI 10.1007/s13595-011-0057-3.
- Grabska-Chrzastowska J., Kwiecień J., Drożdż M., Bubliński Z., Tadeusiewicz R., Szczepaniak J., Walczyk J., Tylek P. 2017. The Comparison of Selected Classification Methods in Automated Oak Seed Sorting. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 62(1), 31–33.
- Grzesik M., Janas R., Górnik K., Romanowska-Duda Z. 2012. Biologiczne i fizyczne metody stosowane w produkcji i uszlachetnianiu nasion. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 57(3), 147–152.
- Jabłoński M., Tylek P., Walczyk J., Tadeusiewicz R., Piłat A. 2016. Colour-Based Binary Discrimination of Scarified *Quercus robur* Acorns under Varying Illumination. *Sensors*, 16(8), 1319. DOI:10.3390/s16081319.
- Jabłoński M., Tadeusiewicz R., Piłat A., Tylek P., Walczyk J., Adamczyk F., Szczepaniak J., Kiełbasa P., Juliszewski T. 2018. Zastosowanie wizji maszynowej w zautomatyzowanej ocenie żywotności żołądki. W: Użytkowanie maszyn rolniczych i leśnych – badania naukowe i dydaktyka. Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, Poznań, 38–46.
- Kaliniewicz Z., Tylek P. 2018. Influence of Scarification on the Germination Capacity of Acorns Harvested from Uneven-Aged Stands of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.). *Forests*, 9, 100.

- Kaliniewicz Z., Tylek P., Markowski P., Anders A., Rawa T., Głazewska E. 2014. Analysis of Correlations Between Selected Physical Properties and Color of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seeds. Technical Sciences, 17(3), 259–274.
- Kaliniewicz Z., Tylek P., Anders A., Markowski P., Rawa T., Oldakowski M., Wasowski L. 2016. An Analysis of the Physical Properties of Seeds of Selected Deciduous Tree Species. Baltic Forestry, 22(1), 169–174.
- Kaliniewicz Z., Tylek P., Markowski P., Anders A., Rawa T., Józwiak K., Fura S. 2013. Correlations Between the Germination Capacity and Selected Physical Properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seeds. Baltic Forestry, 19(2), 201–211.
- Llenderal-Mendoza J., Gugger P.F., Oyama K., Uribe-Salas D., González-Rodríguez A. 2017. Climatic Determinants of Acorn Size and Germination Percentage of *Quercus rucosa* (Fagaceae) Along a Latitudinal Gradient in Mexico. Botanical Sciences, 95, 37–45.
- Löf M., Castro J., Engman M., Leverkus A.B., Madsen P., Reque J.A., Villalobos A., Gardiner E.S. 2019. Tamm Review: Direct Seeding to Restore Oak (*Quercus* spp.) Forests and Woodlands. Forest Ecology and Management, 448, 474–489.
- Novikov A., Ivetić V. 2019. The Effect of Seed Coat Color Grading on Height of One-Year-Old Container Grown Scots Pine Seedlings Planted on Post-Fire Site. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 226, 012043.
- Novikov A., Sokolov S., Drapalyuk M., Zelikov V., Ivetić V. 2019. Performance of Scots Pine Seedlings from Seeds Graded by Colour. Forests, 10, 1064.
- Patent nr PAT.228904. 2017. System do automatycznej skaryfikacji i oceny żywotności nasion oraz sposób automatycznej skaryfikacji i oceny żywotności nasion.
- Pawlik P., Jabłoński M., Bubliski Z., Tadeusiewicz R., Walczyk J., Tylek P., Juliszewski T., Adamczyk F. 2017. Use of Harris Detector for Determination of Orientation of Acorns in the Process of Automated Scarification. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 62(1), 163–165.
- Przybyło J., Jabłoński M. 2019. Using Deep Convolutional Neural Network for Oak Acorn Viability Recognition Based on Color Images of Their Sections. Computers and Electronics in Agriculture, 156, 490–499.
- Shi W., Bloomberg M., Li G., Su S., Jia L. 2017. Combined Effects of Cotyledon Excision and Nursery Fertilization on Root Growth, Nutrient Status and Outplanting Performance of *Quercus variabilis* Container Seedlings. PLOS ONE, 12(5), e0177002.
- Shi W., Villar-Salvador P., Li G., Jiang X. 2019. Acorn Size Is More Important than Nursery Fertilization for Outplanting Performance of *Quercus variabilis* Container Seedlings. Annals of Forest Science, 76, 22. DOI:10.1007/s13595-018-0785-8.
- Skrzyszewska K., Banach J., Bownik G. 2019. Wpływ sposobu przedsięwziętego przygotowania żołądździ i terminu siewu na kiełkowanie nasion i wzrost sadzonek dębu szypułkowego. Sylwan, 163(9), 716–725.
- Tadeusiewicz R., Klocek J., Piłat A., Jabłoński M., Tylek P., Walczyk J., Adamczyk F., Szaroleta M. 2017 a. Sterowanie napędem zespołu chwytно-pozycjonującego w automacie skaryfikującym nasiona dębu. Napędy i Sterowanie, 11(223), 82–87.

- Tadeusiewicz R., Tylek P., Adamczyk F., Kielbasa P., Jabłoński M., Pawlik P., Piłat A., Walczyk J., Szczepaniak J., Juliszewski T., Szaroleta M. 2017 b. Automation of the Acorn Scarification Process as a Contribution to Sustainable Forest Management. Case Study: Common Oak. Sustainability, 9, 2276. DOI:10.3390/su9122276.
- Tilki F. 2010. Influence of Acorn Size and Storage Duration on Moisture Content, Germination and Survival of *Quercus petraea* (Mattuschka). Journal of Environmental Biology, 31(3), 325–328.
- Tylek P. 2010. Fizyczne i biologiczne aspekty mechanicznej separacji nasion buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.). Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego, Kraków.
- Tylek P. 2012. Wielkość i kształt jako cechy rozdzielcze nasion dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.). Acta Agrophysica, 19(3), 673–687.
- Tylek P., Mateusiak Ł., Kaliniewicz Z. 2018. Skaryfikacja żołądździ a stan fizjologiczny sadzonek dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.). W: Użytkowanie maszyn rolniczych i leśnych – badania naukowe i dydaktyka. Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, Poznań, 47–53.
- Tylek P., Kaliniewicz Z., Kielbasa P., Zagrobelny T. 2015. Mass and Density as Separation Criteria of Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) Seeds. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 18(4), 05.
- Tylkowski T. 2016. Przedsięwzięcie traktowanie nasion drzew, krzewów, pnączy i krzewinek. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Walczyk J., Tylek P. 2015. Efektywność wzrokowej oceny żywotności żołądździ poddanych skaryfikacji. W: Utilization of Agricultural and Forest Machinery in Research and Teaching. Prace Komisji Nauk Rolniczych, Leśnych i Weterynaryjnych PAU, 22, 41–50.
- Walczyk J., Tylek P., Jabłoński M., Juliszewski T., Adamczyk F., Szczepaniak J., Tadeusiewicz R. 2018. Skuteczność wizualnej oceny zdolności kiełkowania żołądździ skaryfikowanych. W: Użytkowanie maszyn rolniczych i leśnych – badania naukowe i dydaktyka. Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, Poznań, 28–37.
- Wesoły W., Hauke M. Red. 2009. Szkółkarstwo leśne od A do Z. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa, 11–16.
- Yi X., Zhang J., Wang Z. 2015. Large and Small Acorns Contribute Equally to Early-Stage Oak Seedlings: A Multiple Species Study. European Journal of Forest Research, 134(6), 1019–1026.
- Załęski A. 2000. Zasady i metodyka oceny nasion w Lasach Państwowych. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.

# Koncepcja automatycznej sadzarki do sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym

Paweł Tylek<sup>1</sup>, Józef Walczyk<sup>1</sup>, Janusz M. Sowa<sup>1</sup>,  
Grzegorz Szewczyk<sup>1</sup>, Mariusz Kormanek<sup>1</sup>, Marcin Pietrzykowski<sup>2</sup>,  
Tadeusz Juliszewski<sup>3</sup>, Paweł Kiełbasa<sup>3</sup>, Marek Szychta<sup>4</sup>,  
Florian Adamczyk<sup>4</sup>, Jan Szczepaniak<sup>4</sup>, Tomasz Szulc<sup>4</sup>,  
Ryszard Tadeusiewicz<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kottłataja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Użytkowania Lasu, Inżynierii i Techniki Leśnej, al. 29 Listopada 46,  
31-425 Kraków, e-mail: rltylek@cyf-kr.edu.pl

<sup>2</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kottłataja w Krakowie, Wydział Leśny,  
Katedra Ekologii i Hodowli Lasu, al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

<sup>3</sup> Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kottłataja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji  
i Energetyki, Katedra Eksploatacji Maszyn, Ergonomii i Procesów Produkcyjnych,  
ul. Balicka 116 b, 30-149 Kraków

<sup>4</sup> Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych w Poznaniu,  
ul. Starołęcka 31, 60-963 Poznań

<sup>5</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej,  
al. A. Mickiewicza 30, Pawilon B-1, 30-059 Kraków

## Abstrakt

Wprowadzanie zautomatyzowanych systemów technologicznych sprzyja wyeliminowaniu ludzi z ciężkich prac w leśnictwie i jest nieuniknione wobec prognozowanych problemów demograficznych i społecznych, które prowadzą do trudności przy zatrudnianiu nisko wykwalifikowanych robotników i do wzrastających kosztów takich działań. Wspomniana automatyzacja wpisuje się także idealnie w założenia tzw. przemysłu 4.0. Leśnictwo UE nie dysponuje obecnie automatycznymi sadzarkami, stąd poszukiwane są innowacyjne technologie do zakładania upraw leśnych oraz zalesiania terenów porolnych i rekułtywowanych, zwłaszcza hodowanymi w szkółkach kontenerowych sadzonkami z zakrytym systemem korzeniowym. Zabieg sadzenia w obecnych realiach wykonywany jest zwykle ręcznie. Niekiedy stosuje się sadzarki sprzężone



z ciągnikami uniwersalnymi. Sporadycznie wykorzystuje się sadzarki montowane na nośnikach dużej mocy. Niestety, w przypadku tych form mechanizacji trudno mówić o pełnej automatyzacji prac, ponieważ zawsze sadzonki są wyjmowane z kaset ręcznie i wkładane do zasobnika sadzarki. W przypadku pracy ręcznej stosuje się różnego rodzaju kostury wycinające w glebie jamkę o kształcie bryłki korzeniowej lub rozchylające glebę przed wsunięciem sadzonki (kostury rurowe). Związana z tym wielkość wydatku energetycznego pracy fizycznej wykonywanej w ciągu zmiany roboczej sytuuje sadzenie ręczne w grupie prac ciężkich i bardzo ciężkich. Dodatkowych nakładów czasu pracy wymaga roznoszenie sadzonek po zalesianej powierzchni. Zmęczenie pracowników jest przyczyną planowanych i ukrytych przerw w pracy, co zmniejsza wydajność. Wysoki udział przerw w zmianie roboczej sprawia, że poziom wykorzystania zmiany w czasie operacyjnym jest dla niezaawansowanych technologii stosunkowo niski i wynosi ok. 70%. Zastąpienie pracy ludzkiej zautomatyzowaną pracą maszynową będzie miało następujące zalety: (1) zwiększy wydajność pracy przy zalesianiu i (2) poprawi jej jakość.

Celem tego opracowania jest określenie założeń konstrukcyjnych i identyfikacja granicznych warunków eksploatacji automatycznej sadzarki. Przyjęto następujące założenia: (1) ręczną pracę przy zalesianiu, tj. (a) przygotowanie placówki do sadzenia, (b) umieszczenie na placówce sadzonki, (2) rozmieszczenie sadzonek na zakładanej plantacji leśnej można odwzorować w strukturze mechanicznej i w postaci algorytmów implementowanych w systemie sterowania robota sadzącego. Automat będzie posiadał samopoziomujący układ trakcyjny, system kierowania z modułem nawigacji satelitarnej, wspomagający autonomiczne nawigowanie i wybór miejsca sadzenia, mechanizm przygotowania placówki, zespół sadzący, inteligentne ramię robota podające sadzonki z kaset do zespołu sadzącego według zadanego algorytmu, magazyn kaset z zautomatyzowanym podajnikiem, zespół napędowy z elektrohydraulicznym systemem sterowania, moduł kontrolny oraz system zdalnego sterowania. Grupy docelowe dla proponowanego rozwiązania to zwłaszcza: przedstawiciele zarządców lasów państwowych i prywatnych, przedsiębiorstwa podejmujące rewitalizację terenów przemysłowych, porolnych i rekultywowanych, przedsiębiorcy leśni, producenci leśnego materiału rozmnożeniowego.

**Słowa kluczowe:** automatyzacja, sadzarka, szkółka kontenerowa, odnowienie lasu, przemysł 4.0

## 1. Wstęp

Wprowadzanie nowoczesnych, zautomatyzowanych systemów technologicznych wychodzi, dzięki eliminowaniu pracy ręcznej, naprzeciw postulatam humanizacji pracy w leśnictwie (Tadeusiewicz i in. 2017). Stosowanie zaawansowanych technicznie systemów technologicznych jest również wymuszone koniecznością funkcjonowania podmiotów gospodarczych w realiach gry rynkowej i wynikającej z tego konieczności obniżania kosztocłonności

produkcji. Prace ręczne w zagospodarowaniu lasu, w tym również sadzenie, cechuje bardzo wysoki poziom wydatku energetycznego (Józefaciuk i Nowacka 1993; Sowa i Kulak 2000; Grzywiński 2005). Przy korzystaniu z pracy ręcznej wydatek energii niezbędny do pokonania „oporu pracy” jest niewspółmiernie duży w stosunku do pozostałych składników obciążenia fizycznego – wysiłku statycznego i monotypowości pracy. Ten ostatni czynnik stanowi o specyfice obciążeń na stanowiskach pracy w technologiach na półautomatycznym poziomie techniki (Sowa 2009). Wielkość wydatku energetycznego w ciągu zmiany roboczej sytuuje sadzenie ręczne w grupie prac ciężkich i bardzo ciężkich (Kowal 2002; Grzywiński 2005, 2007). Jednym z najważniejszych czynników kształtujących i niwelujących poziom zmęczenia w czasie jest rozkład i długość przerw w pracy (Grandjean 1991; Kowal 2002; Gallis 2013). Jednak wysoki udział przerw w zmianie roboczej sprawia, że jej poziom wykorzystania w czasie operacyjnym jest dla niezaawansowanych technologii stosunkowo niski i wynosi ok. 70% (Sabo i Poršinsky 2005; Horvat i in. 2007; Marčeta i in. 2014). W przeciwieństwie do tego technologie maszynowe cechuje wysoka wydajność będąca pochodną nie tylko wysokiej efektywności, ale również mniejszego udziału czasu przerw (Ghaffarian i in. 2009).

Sadzenie sadzonek drzew leśnych wyprodukowanych w szkółkach kontenerowych w warunkach kontrolowanych wykonywane jest na ogół ręcznie przy pomocy kostura strzemiączkowego lub rurowego. Ręczne umieszczenie w glebie tak dużej liczby sadzonek wymaga jednak wysokich nakładów pracy, według katalogu norm czasu dla prac leśnych ręczne zdarcie pokrywy i przekopanie gleby na talerzach o średnicy 0,4 m wymaga w średnich warunkach ok. 38 rbh/ha, zaś sadzenie przy pomocy kostura wymaga ok. 34 rbh/ha. Dodatkowych nakładów czasu pracy wymaga roznoszenie sadzonek po zalesianej powierzchni. Jest to zatem sposób działania prowadzący do małej wydajności pracy, a ponadto wykonywany dużym kosztem biologicznym personelu. Monotonia i znaczny odsetek obciążeń statycznych podczas pracy powodują, że coraz trudniej znajduje się robotników do wykonywania tej pracy. Ponadto zmęczenie na skutek wykonywania pracy przyczynia się do tego, iż wykonywana jest ona niestarannie i niedbale.

## 2. Sposoby mechanizacji prac odnowieniowych

Zabieg sadzenia obecnie wykonywany jest zwykle ręcznie. Niekiedy stosuje się sadzarki sprzężone z ciągnikami uniwersalnymi lub sporadycznie prowadzi się go z wykorzystaniem sadzarek montowanych na nośnikach dużej mocy. Trudno przy tym mówić o pełnej mechanizacji czy automatyzacji, ponieważ sadzonki są wyjmowane z kaset ręcznie i wkładane do zasobnika sadzarki (Więsik i Aniszewska 2011; Ersson 2014).

W przypadku pracy ręcznej stosuje się różnego rodzaju kostury: wycinające w glebie jamkę o kształcie bryłki korzeniowej (ryc. 1 a) lub rozchylające glebę przed wsunięciem sadzonki (kostury rurowe) (ryc. 1 b). Można spotkać także kostury karuzelowe agregowane z ciągnikami uniwersalnymi (ryc. 1 c).



Ryc. 1. Kostury do sadzonek z bryłką: a) strzemiączkowy; b) rurowy; c) karuzelowy (fot. P. Tylek, J. Walczyk)



W każdym przypadku kasy z sadzonkami muszą być jednak przenoszone przez robotników.

Zwykle obszary pod odnowienie ręczne przygotowywane są całopowierzchniowo lub pasowo. Półautomatyczne sadzarki agregowane z ciągnikami stosowane w hodowli roślin o krótkim okresie rotacji, na powierzchniach utrzymanych w kulturze (rolnictwo, ogrodnictwo), przy obecnym rozwoju techniki wymagają permanentnej obsługi polegającej na podawaniu i odbieraniu kaset z rozsadą. Sadzarki przeznaczone na tereny trudne, do zakładania upraw leśnych na powierzchniach uprzednio nieutrzymywanych w kulturze agrotechnicznej, używane są niemal wyłącznie do sadzonek z odkrytym systemem korzeniowym i wymagają wysokonakładowego przygotowania gleby (Więsik i Aniszewska 2011). Funkcjonalnym, sporadycznie stosowanym rozwiązaniem jest półautomat sadzący (ryc. 2) zawieszany na wysięgniku koparki lub harwestera (Laine 2017).

W zależności od zastosowanej opcji wydajność sadzenia wynosi 140–350 sadzonek na godzinę, jednak ich ekonomiczna opłacalność jest wątpliwa, stosunkowo niewielkie urządzenie jest bowiem montowane na wielotonowych pojazdach bazowych o dużej mocy. Urządzenia o takiej konstrukcji przygotowują placówkę w formie kopczyka, a możliwość sadzenia jest zwykle ograniczona do niewielkich wymiarowo sadzonek sosny. Zasobnik może pomieścić jednorazowo kilkadziesiąt sadzonek. Głowica może być rozbudowana o podajnik karuzelowy zwiększający pojemność zasobnika, jednak sadzonki są narażone na przesychnanie i uszkodzenie mechaniczne, ponieważ zasobnik jest przemieszczany razem z mechanizmem sadzącym o uderowym charakterze pracy (Ersson 2014).



Ryc. 2. Agregat sadzeniowy Bracke Planter zamontowany na wysięgniku koparki gąsienicowej (fot. J. Walczyk)

Nieco zbliżoną koncepcję proponują Japończycy. W tej koncepcji pojazdem bazowym jest mikrociągnik gąsienicowy (ryc. 3). Głowica półautomatu zamontowana jest na wysięgniku. W pierwszej fazie pracy głowica ta przygotowuje placówkę przy użyciu dwóch frezów nożowych, a następnie umieszcza w glebie sadzonkę, wykorzystując kostur rurowy. Trzecia faza to ugniecenie gleby stemplem dociskany pneumatycznie. Wadą tego rozwiązania jest ręczne podawanie sadzonek przez operatora. Sadzonki są umieszczane w kolektorze wewnątrz kabiny i pneumatycznie transportowane do głowicy.

Na Uniwersytecie Wiktorii w Kanadzie powstał projekt oraz model funkcjonalny zdalnie sterowanego mini automatu sadzącego o nazwie TreeRover



Ryc. 3. Prototyp głowicy sadzącej zamontowanej na mikrociągniku gąsienicowym (fot. J. Sowa)

(<https://www.uvic.ca>). Urządzenie to posiada napęd elektryczny układu trakcyjnego, natomiast napęd i sterowanie podzespołów roboczych są pneumatyczne. Automat ten może poruszać się wyłącznie po płaskim terenie. Sadzenie odbywa się bez przygotowania placówki, z wykorzystaniem kostura rurowego i stempla do przygniatacia sadzonki. Sadzonki opadają z zasobnika grawitacyjnie, a czas pojedynczego cyklu wynosi ok. 15 s. W obecnej, prototypowej formie robot może przewozić jednocześnie zaledwie 10 sadzonek.

Innym rozwiązaniem jest kroczący robot do sadzenia lasu. Projekt ten jednak nie wyszedł poza fazę koncepcji, a proponowany układ trakcyjny w postaci kroczących podpór, stosowany wcześniej jako platforma osadzenia maszyn wielooperacyjnych do pozyskania drewna, nie spełnił dotychczas oczekiwań leśników. Charakteryzuje się bowiem wyjątkowo skomplikowaną trajektorią podpór i rozbudowanym systemem sterowania oraz większymi (w porównaniu z systemami kołowymi) oporami ruchu. Zasobnik mieści 320 sztuk sadzonek i wymaga ręcznego załadunku. Sadzonki są umieszczane w glebie razem z podlegającą biodegradacji doniczką.

### 3. Mobilny automat do leśnych prac odnowieniowych

Wskazanych powyżej wad ma być pozbawiony automat do leśnych prac odnowieniowych, który powstaje w wyniku prac badawczo-rozwojowych prowadzonych przez konsorcjum naukowo-przemysłowe w składzie: (1) Uniwersytet Rolniczy w Krakowie (pełniący funkcję lidera konsorcjum), (2) Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, (3) Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych w Poznaniu, (4) Ośrodek Techniki Leśnej w Jarocinie. Celem projektu **RoboFoR** jest opracowanie konstrukcji autonomicznego robota oraz innowacyjnej technologii do zakładania upraw leśnych oraz zalesiania terenów rekultywowanych i porolnych. Leśnictwo europejskie nie dysponuje obecnie automatycznymi sadzarkami, które umożliwiłyby zakładanie upraw leśnych. Prace koncepcyjne wykazały, że istnieje możliwość technologiczna i techniczna opracowania autonomicznego robota do zalesiania, niemającego odpowiednika w światowej technice leśnej. Robot będzie posiadał:

- samopoziomujący układ trakcyjny;
- system nawigacji satelitarnej wspomagający autonomiczne nawigowanie w terenie niekarczowanym i wybór miejsca sadzenia;
- mechanizm przygotowania placówki;
- zespół sadzący;
- inteligentne ramię robota, tj. działające według zalgorytmizowanych procedur, podające sadzonki z kaset do zespołu sadzącego;
- magazyn kaset ze zautomatyzowanym transporterem kaset;



- kompaktowy zespół napędowy spalinowo-hydrauliczny z elektrohydraulicznym systemem sterowania;
- moduł pomiarowo-sterujący;
- system bezprzewodowego, zdalnego sterowania.

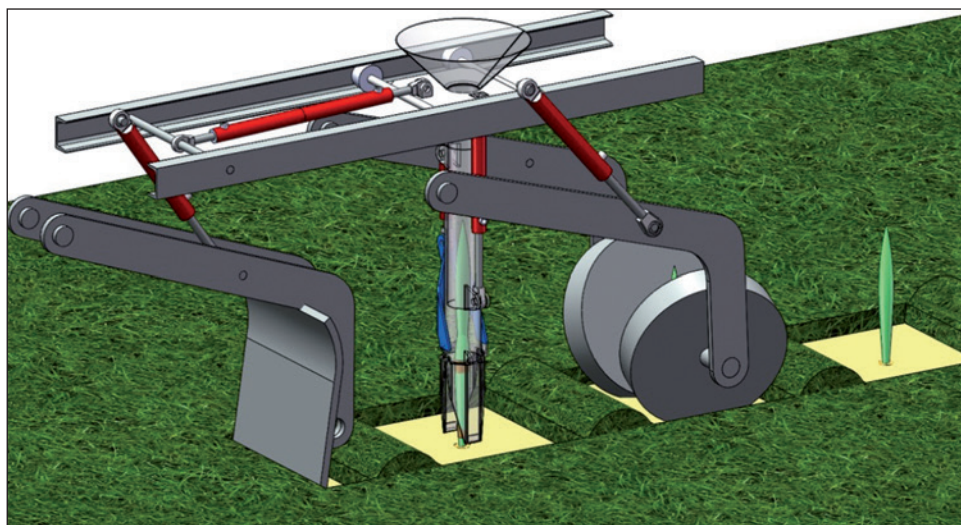
Sadzonki wyhodowane w szkółce kontenerowej w standardowych kasetach będą wysadzone do gleby w systemie automatycznym (bez konieczności ich wcześniejszego wyjmowania, powodującego szkodliwe przesuszanie i osypywanie bryłki korzeniowej). Autonomiczny robot będzie wyposażony we własny układ jezdny pozwalający na pracę w trudnych warunkach terenowych, mechanizm likwidujący konkurencyjną roślinność wokół miejsca sadzenia (placówki) i spulchniający glebę w miejscu pracy elementu sadzącego oraz zespół ugniatający glebę wokół sadzonki, aby ją ustabilizować i wyeliminować kieszenie powietrzne utrudniające przerastanie systemu korzeniowego do calizny. Sadzonki do kostura (urządzenia wysadzającego) będzie podawało inteligentne ramię robota, które będzie wyjmowało sadzonki z kaset według określonego algorytmu. Następnie kostur będzie wyciągnięty, a sadzonka zostanie dociśnięta z siłą regulowaną przez mechanizm ugniatający wokół niej glebę.

Robot do sadzenia będzie posiadał zasobnik kaset, przemieszczany w sposób zaprogramowany do zastąpienia opróżnionej kasety kolejną pełną kasetą. Pozwoli to na obsadzenie danej powierzchni do zalesienia bez konieczności ręcznego podawania sadzonek i bez nadzoru. Robot będzie poruszał się po powierzchni roboczej przy pomocy systemów nawigacyjnych lub przy wsparciu operatora, omijając przeszkody terenowe. Podczas pracy będą rejestrowane ścieżki przejścia i współrzędne geograficzne rozmieszczenia sadzonek. Zarejestrowane dane pozwolą opracować mapę zalesionego terenu do dalszej kontroli rozwoju uprawy leśnej w czasie wegetacji. W przyszłości, przy wykorzystaniu opracowanego systemu wizyjnego sterowania, można będzie takie mapy wykorzystać do automatyzacji dalszych zabiegów hodowlanych (pielęgnacji i trzebieżenia drzewostanu), a nawet do pozyskania drewna przez automatycznie sterowane harwestery. Parametry sadzenia (głębokość, kształt placówki, więźba) i skład gatunkowy będą programowane zgodnie z wymogami zasad hodowli lasu przy pomocy przyjaznego interfejsu obsługi. Energię do zasilania zespołów roboczych i układu jezdnygo robota zapewnią układy hydrauliki siłowej napędzanej kompaktowym silnikiem spalinowym. Modułowa konstrukcja robota umożliwi jego dalszą rozbudowę. Rewolwerowa głowica robocza będzie mogła być doposażona w sensory np. do identyfikacji mikrosiedlisk, rejestracji ścieżki przejścia i rozmieszczenia sadzonek, co ułatwi inwentaryzację udatności prac odnowieniowych oraz wzbogaci bazy danych leśnych systemów informacji przestrzennej, a także umożliwi automatyzację dalszych zabiegów hodowlanych.

#### 4. Właściwości projektowanego automatu i stopień zaawansowania prac

Automat jako produkt końcowy będzie skupiał rozwiązania techniczne i aplikacje informatyczne funkcjonujące dotychczas w odległych od siebie obszarach technologii informacyjnych przemysłu, leśnictwa i kształtowania środowiska naturalnego. Będzie zawierał rozwiązania w zakresie rozpoznawania otoczenia robota (stan podłoża, w którym umieszczane będą sadzonki) i podejmowania decyzji w zależności od uzyskanych informacji. Połączenie metod nawigacji satelitarnej (GPS) oraz konieczność uwzględniania informacji z innych źródeł, niezbędne do prawidłowej pracy robota, pozwoli pokonać trudności, jakie rodzi różnorodność możliwych warunków glebowych i konfiguracji terenu (istnienie różnorodnych, trudnych do określenia przeszkód). Wszystko to sprawia, że opracowane w trakcie realizacji projektu metody i algorytmy będą prawdopodobnie na tyle ogólne, by mogły stanowić podstawę do przenoszenia ich do innych obszarów zastosowań, np. w transporcie realizowanym w terenie pozbawionym dróg jezdnych.

Na obecnym etapie projektu opracowano zespół roboczy automatu do sadzenia drzew z zakrytym systemem korzeniowym. Składa się on z: 1) narzędzia do przygotowania placówki, 2) zespołu sadzącego oraz 3) elementu dogniatającego (ryc. 4). Narzędzie do przygotowania placówki zamontowane jest wahliwie do ramy zespołu roboczego za pośrednictwem pierwszego wahacza oraz siłownika umożliwiającego regulację położenia i siły docisku narzędzia do gruntu, natomiast element dogniatający zamocowany jest do ramy przegubowo poprzez drugi wahacz, którego położenie i siła docisku regulowane są za pomocą



Ryc. 4. Model 3D zespołu przygotowania placówki i sadzenia (źródło: opracowanie własne)

drugiego siłownika. Jednocześnie stanowi on połączenie ramienia wahacza z wózkiem zespołu sadzącego, przy czym główny element zespołu sadzącego ma postać cylindrycznego kostura połączonego z wózkiem zamocowanym przesuwnie do prowadnicy połączonej z ramą. Cylinder zamocowany jest do wózka poprzez napęd, za pomocą którego przesuwany jest w osi pionowej, natomiast wózek zamocowany jest suwliwie względem ramy i przemieszczany jest względem niej w osi poziomej za pomocą drugiego napędu umożliwiającego przemieszczanie zespołu sadzącego wzdłuż ramy pojazdu bazowego.

## 5. Podsumowanie i dyskusja

Stosowane obecnie techniki i technologie zalesiania są pracochłonne i kosztochłonne. Polityka leśna państw Unii Europejskiej stawia za cel zwiększenie areału drzewostanów wielogatunkowych i odnowienia terenów leśnych (po ścinie i zrywce drewna). Przeznacza się także pod zalesianie tereny rekultywowane (poprzemysłowe) i tereny rolnicze, które z różnych względów nie są przewidywane pod dalsze wykorzystanie rolnicze (Paschalis-Jakubowicz 2012). Zwiększenie areału drzewostanów przy równoczesnym stosowaniu technik i technologii pracochłonnych, mało wydajnych, jest trudne do zrealizowania. Trudności te niweluje proponowane, innowacyjne rozwiązanie – automat do sadzenia sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym, hodowanych w szkółkach kontenerowych. Jest to szczególnie istotne w czasie spiętrzenia prac odnowieniowych spowodowanych klęskami żywiołowymi.

Wprowadzanie maszyn pracujących w systemie automatycznym lub półautomatycznym jest niezbędne w związku z prognozowanymi problemami zatrudniania nisko wykwalifikowanych robotników, jak również w związku z wzrastającymi kosztami takich działań (Sowa 2009; Kocel 2013). W krajach Europy Zachodniej, Skandynawii i w Kanadzie szkółkarstwo z zakrytym systemem korzeniowym, a potem szkółkarstwo kontenerowe pojawiło się przede wszystkim z powodów ekonomicznych. Technologia ta pozwala na większą intensyfikację produkcji, mechanizację i automatyzację prac, co daje wymierne efekty w postaci obniżenia kosztów produkcji w porównaniu z sadzonkami wytwarzanymi w tradycyjny sposób (Szabla i Pabian 2003; Neruda 2013). W Polsce szkółkarstwo kontenerowe wprowadzono z powodów przyrodniczych, kiedy to pod koniec XX w. polskie leśnictwo potrzebowało skutecznego narzędzia do odnawiania lasu po pożarach i rekultywacji zdegradowanych terenów przemysłowych (Kowalski 2007; Wesoly 2009). W Polsce produkcja sadzonek tego typu wynosi ok. 10%, czyli kilkadziesiąt milionów sztuk rocznie i systematycznie wzrasta dzięki rozbudowie sieci szkółek kontenerowych produkujących sadzonki z zakrytym systemem korzeniowym w kasetach

plastikowych lub styropianowych. Produkcja ta wystarcza na obsadzenie blisko 20 tys. ha powierzchni rocznie.

Również w innych krajach UE pożary nie są rzadkością – w Portugalii, Hiszpanii, Francji, Włoszech i Grecji w samym tylko roku 2007 strawiły łącznie blisko 600 tys. ha lasów, które do odnowień wymagały zastosowania sadzonek z zakrytym systemem korzeniowym (Paschalis 2012). Taka technologia hodowli materiału sadzeniowego jest najodpowiedniejsza do szczepienia biopreparatem mikoryzowym pełniącym funkcje fizjologiczne i ochronne. Sadzonki mikoryzowane powinny być hodowane nie tylko na potrzeby zalesiania gleb leśnych zdegradowanych przez pożary wielkopowierzchniowe, ale także na obszary o wielopokoleniowej niezgodności biocenozy z biotopem oraz do celów rekultywacji gruntów trudnych, takich jak poligony czy obszary przy autostradach (Kowalski 2007; Tylek i Walczyk 2007).

Jeszcze istotniejszym problemem jest rekultywacja terenów pogórnicznych. Zalesienie jest potencjalnie najlepszą strategią zrównoważonego przywracania terenów górniczych do dawnej postaci. W umiarkowanych strefach klimatycznych, np. w Europie, Ameryce Północnej, Ameryce Południowej i Azji, duża część terenów poprzemysłowych zostaje rewitalizowana zalesianiem. W Polsce powierzchnię zajmowaną przez przemysł szacuje się na ok. 100 000 ha, a przez górnictwo na ok. 45 000 ha, z czego 25 000 ha zostało odzyskanych przez zalesienie. W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie optymalną technologią rekultywacji, selekcją gatunków drzew, dostosowaniem ich do terenów poprzemysłowych. Jakkolwiek miejsca pokopalniane różnią się istotnie od naturalnych (ograniczenia wody i składników odżywczych, zakłócenia relacji składników pokarmowych, pH gruntów i silna zmienność w pionie i poziomie gleby), to możliwym scenariuszem jest wprowadzenie sadzonek z bryłką na początku procesu tworzenia terenów leśnych właśnie na terenie byłych kopalni (Pietrzykowski i in. 2015).

Jednak rynek zapotrzebowania na autonomiczne urządzenia do sadzenia sadzonek drzew leśnych z zakrytym systemem korzeniowym na świecie jest dużo większy. Tylko w Szwecji odnowienia wynoszą ok. 200 000 ha/rok i w większości wykonywane są z wykorzystaniem tego rodzaju sadzonek, podobnie jest też w tak dużych gospodarkach leśnych, jakie posiadają Finlandia, Niemcy, Hiszpania, Francja czy Norwegia (Bernadzki 2006; Central Statistical Office 2012).

Zalesienie 1 ha powierzchni wymaga średnio ponad 40 roboczogodzin (sadzenie, roznoszenia sadzonek). Jest to zatem praca wymagająca co najmniej 5 robotników w ciągu ośmiogodzinnego dnia pracy. Wysoki stopień uciążliwości pracy sprawia, że coraz trudniej znaleźć pracowników. Co więcej, jak wspomniano wyżej, z uwagi na wymagający charakter pracy i zmęczenie jakość pracy robotników jest często nieodpowiednia. Dodatkowo stosowanie herbi-

cydów i repelentów naraża personel na ekspozycję na te szkodliwe substancje. Nasze przewidywania i szacunki pozwalają przypuszczać, że wydajność robota zwiększy się przynajmniej pięciokrotnie w terenie leśnym (po ścince i zrywce). Na terenach porolniczych i rekultywowanych wydajność pracy robota może być jeszcze większa.

Zalety proponowanego nowatorskiego zautomatyzowanego systemu, których nie posiadają klasyczne metody sadzenia, to: (1) eliminacja pracy ręcznej – pracownik jedynie kontroluje zdalnie pracę automatu, (2) zwiększenie wydajności – wydłużenie czasów operacyjnych, wybór optymalnej trajektorii jazdy, (3) zmniejszenie nakładów energetycznych – eliminacja powierzchniowego przygotowania gleby na rzecz wykonania placówki, (4) skrócenie procesu technologicznego – zakładanie upraw z sadzonkami hodowanymi w standardowych kasetach, (5) zwiększenie udatności uprawy związane z ograniczeniem stresu poprzasadzeniowego poprzez (a) eliminację wcześniejszego wyjmowania sadzonek z kaset powodującego przesuszanie i osypywanie bryłki korzeniowej, (b) optymalizację pionizowania sadzonki i zaciśnięcia bryłki, (6) dostosowanie do pracy w terenie niekarczowanym oraz o dużym nachyleniu – zastosowanie systemów nawigacji satelitarnej oraz automatycznego poziomowania, (7) potencjał rozbudowy systemu (Adamczyk i in. 2019).

### *Źródło finansowania*

*Prace badawczo-rozwojowe zrealizowano w ramach badań zamawianych nr EO.271.3.11.2019, pt. „Mobilny automat do leśnych prac odnowieniowych oraz zalesiania terenów porolnych i rekultywowanych (RoboFoR)”, finansowanych przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych w Warszawie.*

### Literatura

- Adamczyk F., Wojciechowski J., Tylek P., Sowa J. M., Walczyk J., Tadeusiewicz R. 2019. The Concept of Construction of a Mobile Automatic Device for Forest Regeneration Tasks and Afforestation of Former Farmland and Reclaimed Areas. W: Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture: X International Scientific Symposium FMPMSA 2019. E. Lorencowicz, J. Uziak, B. Huyghebaert. Red. Instytut Naukowo-Wydawniczy „Spatium”, Lublin, 13–18. DOI:10.24326/fmpmsa.2019.1.
- Bernadzki E. Red. 2006. Lasy i leśnictwo krajów Unii Europejskiej. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Central Statistical Office 2012. Forestry. Warsaw.
- Dvořák J., Bystrický R., Hořková P., Hrib M., Jarkovská M., Kováč J., Krilek J., Natov P., Natovová L. 2011. The Use of Harvester Technology in Production Forests. Folia Forestalia Bohemica, Kostelec nad Černými lesy.



- Ersso**n B.T. 2014. Concepts for Mechanized Tree Planting in Southern Sweden. Faculty of Forest Sciences, Department of Forest Biomaterials and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå.
- Gallis** C. 2013. Increasing Productivity and Controlling of Work Fatigue in Forest Operations by Using Prescribed Active Pauses: a Selective Review. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 34(1), 103–113.
- Ghaffarian** M.R., **Stampfer** K., **Sessions** J. 2009. Comparison of Three Methods to Determine Optimal Road Spacing for Forwarder-Type Logging Operations. *Journal of Forest Science*, 55(9), 423–431.
- Grandjean** E. 1991. *Physiologische Arbeitsgestaltung*. Ott Verlag Thun.
- Grzywiński** W. 2005. Koszt energetyczny pracy w leśnictwie. *Zastosowania Ergonomii*, 1–3, 259–267.
- Grzywiński** W. 2007. *Ergonomia i ochrona pracy w leśnictwie*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań.
- Horvat** D., **Zečić** Ž., **Šušnjar** M. 2007. Morphological Characteristics and Productivity of Skidder ECOTRAC 120V. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 28(1), 11–25.
- Józefaciuk** J., **Nowacka** W. 1993. *Ćwiczenia z ergonomii i ochrony pracy*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 14–36.
- Kocel** J. 2013. *Firmy leśne w Polsce*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Kowal** E. 2002. *Ekonomiczno-społeczne aspekty ergonomii*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Poznań.
- Kowalski** S. Red. 2007. *Ektomikoryzy – Nowe biotechnologie w polskim szkółkarstwie leśnym*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Laine** T. 2017. *Mechanized Tree Planting in Finland and Improving Its Productivity*. *Dissertationes Forestales*, 239. Department of Forest Sciences Faculty of Agriculture and Forestry University of Helsinki, Finland.
- Marčeta** D., **Petković** V., **Košir** B. 2014. Comparison of Two Skidding Methods in Beech Forests in Mountainous Conditions. *Nova mehanizacija šumarstva*, 35(1), 51–62.
- Neruda** J. 2013. *Technika a technologie v lesnictví*. Lesnická a dřevařská fakulta. Mendelova univerzita v Brně.
- Paschalis-Jakubowicz** P. 2012. *Uwarunkowania strategii rozwoju Lasów Państwowych*. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Pietrzykowski** M., **Socha** J., **van Doorn** N.S. 2015. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Site Index in Relation to Physico-Chemical and Biological Properties in Reclaimed Mine Soils. *New Forests*, 46, 247–266.
- Sabo** A., **Poršinsky** T. 2005. Skidding of Fir Roundwood by Timberjack 240C from Selective Forests of Gorski Kotar. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 26(1), 13–27.
- Sowa** J.M. 2009. *Współczesne pożytki z lasu. Leśnictwo w górach i regionach przemysłowych*. Monografia. Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków, 129–152.
- Sowa** J.M., **Kulak** D. 2000. Związki techniki pracy z poziomem techniki z poziomem wydatku energetycznego operatorów pilarek spalinowych. W: *Stan i perspektywy*



- badań z zakresu użytkowania lasu. III Konferencja Leśna, Sękocin Las. M. Suwała, S. Rzadkowski, Red. IBL, Warszawa, 425–432.
- Szabla K., Pabian R.** 2003. Szkółkarstwo kontenerowe. Nowe technologie i techniki w szkółkarstwie leśnym. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Tadeusiewicz R., Tylek P., Adamczyk F., Kielbasa P., Jabłoński M., Pawlik P., Piłat A., Walczyk J., Szczepaniak J., Juliszewski T., Szaroleta M.** 2017. Automation of the Acorn Scarification Process as a Contribution to Sustainable Forest Management. Case Study: Common Oak. Sustainability, 9, 2276. DOI:10.3390/su9122276.
- Tylek P., Walczyk J.** 2007. Mechanization of Production of Seedlings with Mycorrhiza in Foil Tents. W: Logging and Wood Processing in Central Europe. CULS, Prague, 129–133.
- Więsik J., Aniszewska M.** 2011. Urządzenia techniczne w produkcji leśnej. T. 1. Urządzenia do hodowli i ochrony lasu. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Wesoły W. Red.** 2009. Szkółkarstwo Leśne od A do Z. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Zarządzenie Nr 99 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych. Katalogi norm czasu pracy dla prac leśnych. 2004. Ośrodek Rozwojowo-Wdrożeniowy Lasów Państwowych w Bedoniu.