



## Oszacowanie skali wpływu pozyskiwania drewna na wybrane elementy środowiska we wschodniej części polskich Karpat

### *Estimating the impact of logging on selected elements of the environment in the eastern part of the Polish Carpathians*

Andrzej Norbert Affek<sup>1</sup> • Alina Gerlée<sup>2</sup> • Agnieszka Sosnowska<sup>2</sup> • Maria Zachwatowicz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN

ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa

<sup>2</sup>Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych

ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa

<sup>3</sup>Uniwersytet Warszawski, Wydział Biologii

ul. Miecznikowa 1, 02-096 Warszawa

[a.affek@twarda.pan.pl](mailto:a.affek@twarda.pan.pl) • [a.gerlee@uw.edu.pl](mailto:a.gerlee@uw.edu.pl) • [a.sosnowska@uw.edu.pl](mailto:a.sosnowska@uw.edu.pl) • [m.zachwatowicz@uw.edu.pl](mailto:m.zachwatowicz@uw.edu.pl)

**Zarys treści.** W artykule dokonano oszacowania wpływu pozyskiwania drewna na wybrane procesy naturalne i elementy środowiska w 15 nadleśnictwach w Karpatach Wschodnich, w tym na strukturę gleby i tempo erozji oraz na reakcję hydrologiczną w skali stoku i zlewni. Główny nacisk położony został na oszacowanie gęstości i przestrzennego układu dróg leśnych i szlaków zrywkowych oraz intensywności ich wykorzystania, ponieważ z przeglądu literatury wynika (por. Affek, 2019), że zrywka jest tym elementem procesu pozyskiwania drewna, który w największym stopniu oddziałuje na glebę i reakcję hydrologiczną zlewni górskich. Do badań wykorzystano wysokorozdzielcze dane LiDAR i dane leśne. Uzyskane wyniki wskazują, że ok. 5% analizowanego obszaru ma naruszoną strukturę gleby na skutek stosowanej naziemnej zrywki, przeważająca część powierzchni analizowanych oddziałów leśnych może być zagrożona skutkami efektu brzegowego powodowanego przez drogi, a gęstość dróg leśnych, z uwzględnieniem szlaków zrywkowych, należy do najwyższych notowanych w literaturze.

**Słowa kluczowe:** drogi leśne, zrywka, LiDAR, erozja, efekt brzegowy, Karpaty Wschodnie.

## Wstęp

Jednym z głównych wyzwań współczesnej gospodarki leśnej jest prowadzenie działań w zgodzie z zasadami zrównoważonego rozwoju, czyli takich, które prowadzą do wydajnego wykorzystywania zasobów, a równocześnie minimalizują negatywne oddziaływanie na strukturę i funkcje wszystkich sfer środowiska: atmosfery, biosfery, hydrosfery i litosfery (Heinimann, 2007).

Wydajność pracy związana ze zrywką drewna zwiększyła się znacząco od momentu, gdy konie pociągowe zostały zastąpione przez ciężki sprzęt. Kosztem efektywnej, zmechanizowanej zrywki, możliwej do prowadzenia w niemal każdych warunkach, jest jednak większy negatywny wpływ na środowisko (Shrestha i inni, 2008; Dudek i Sosnowski, 2011).

Skutkiem stosowanych w Karpatach trzebieży i rębni stopniowych gniazdowych jest z jednej strony tworzenie zróżnicowanej struktury wiekowej i przestrzennej drzewostanów (co w porównaniu ze zrębem zupełnym jest zjawiskiem pozytywnym), z drugiej jednak strony wymaga znacznie częstszego wjazdu ciężkiego sprzętu do lasu. Poszczególne wydzielania są wolne od cięć przez stosunkowo krótki czas, a pozyskanie drewna jest rozproszone na całym obszarze nadleśnictwa.

Zmechanizowane naziemne metody zrywki (transportu drewna z miejsca ścinki do składnicy przyrzębowej) są obecnie szeroko stosowane na płaskim lub lekko pochyłym terenie, ponieważ z reguły zapewniają względnie bezpieczne środowisko pracy i wysoką jej wydajność (Camb i inni, 2015). Do zrywki drewna wykorzystywane są m.in. ciężkie pojazdy kołowe (z różną liczbą osi i kół, charakterystyką opon i ciśnieniem roboczym) i gąsienicowe, takie jak skidery, forwardery czy ciągniki rolnicze (Seixas i McDonald, 1997; Jansson i Johansson, 1998; Bygdén i inni, 2004). W praktyce gospodarstwa leśnego stosowana jest najczęściej zrywka wleczona (z reguły ciągnikami rolniczymi), zrywka półpodwieszona (skiderami) i zrywka nasiębierna nazywana także zrywką podwieszoną (forwarderami) (*Encyklopedia Leśna*, 2018). Każda z nich z zasady zakłada intensywną penetrację lasu przez pojazdy mechaniczne, które z roku na rok charakteryzują się coraz większą mocą i wydajnością. Pomimo udoskonalania technicznego pojazdów, w tym ograniczania nacisku jednostkowego na glebę poprzez wprowadzanie np. opon niskociśnieniowych, wpływ stosowanych do zrywki pojazdów na środowisko naturalne jest nadal znaczny i zależy nie tylko od parametrów technicznych używanego sprzętu, ale również od rodzaju gleby, liczby przejazdów, wilgotności podłoża i pory prowadzenia prac zrywkowych (Sadowski i inni, 2016).

Celem ogólnym badań było oszacowanie skali wpływu pozyskiwania drewna we wschodniej części polskich Karpat na wybrane komponenty środowiska i procesy przyrodnicze, w tym głównie na glebę, obieg wody i materii oraz na intensywność efektu brzegowego<sup>1</sup>, będącego skutkiem fragmentacji. Wyniki pierwszego etapu prac zostały opublikowane w *Forest Ecology and Management* (Affek i inni, 2017). Niniejszy artykuł przybliży polskiemu czytelnikowi tezy tam zawarte, stanowiąc jednocześnie rozszerzenie i inne ujęcie poruszanych zagadnień. Szczegółowy przegląd literatury przedmiotu pokażał (zob. Affek, 2019), że spośród różnych aspektów gospodarowania i eksploatacji lasów górskich to właśnie drogi leśne, ich gęstość, położenie względem rzeźby terenu, sposób i częstotliwość użytkowania mają największy wpływ na właściwości gleby, wielkość erozji, przepływy szczytowe oraz objętość materiału wynoszonego ze zlewni. Jednym ze skutków fragmentacji powodowanej przez drogi jest także generowanie efektu brzegowego oddziałującego na strukturalne, funkcjonalne i behawioralne cechy gatunków i ekosystemów (por. np. Forman i Alexander, 1998; Trombulak i Frissell, 2000; Coffin, 2007).

Na tej podstawie sformułowano następujące cele szczegółowe badań:

1. oszacowanie gęstości dróg leśnych i szlaków zrywkowych z większą niż do tej pory dokładnością,
2. określenie zależności między rzeźbą terenu a gęstością dróg leśnych i ich położeniem,
3. oszacowanie zasięgu potencjalnego efektu brzegowego powodowanego przez drogi leśne,
4. scharakteryzowanie metod i intensywności pozyskania drewna w Karpatach.

<sup>1</sup> Efekt brzegowy – zaburzenie związane z przerwaniem ciągłości przestrzennej siedliska i tworzeniem nowych, sztucznych granic w obrębie płatów leśnych w wyniku działalności człowieka (por. Rogan i Lacher, 2018).

Dla poprawności metodycznej zasięg przestrzenny analizy ograniczono do terenów leśnych znajdujących się pod zarządem Lasów Państwowych.

## Teren badań

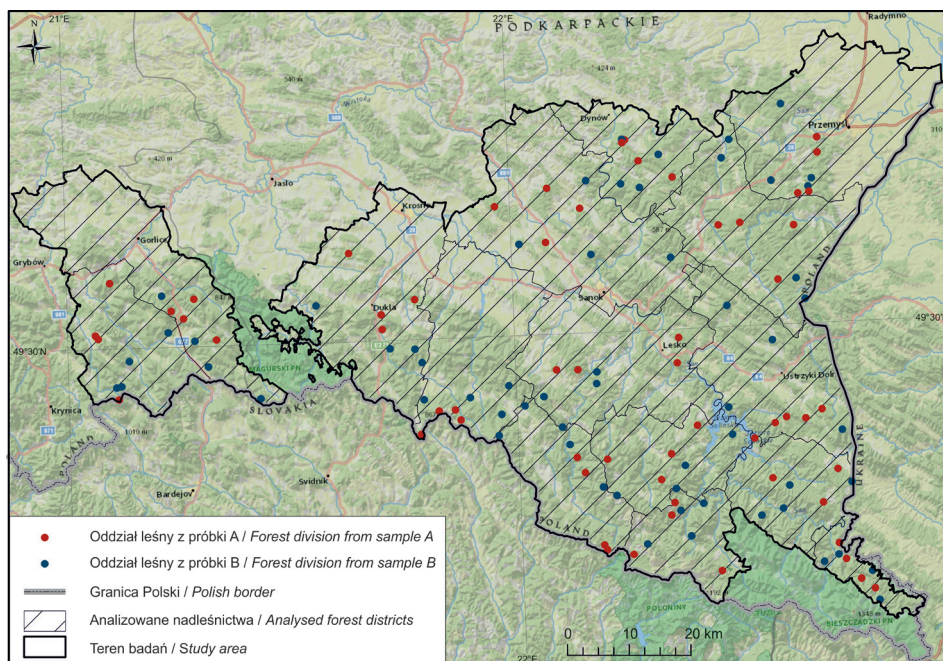
Karpaty stanowią unikatowy pod względem ekologicznym, kulturowym i historycznym region górski Europy, objęty wielopoziomowym mechanizmem zarządzania przewidzianym w Ramowej Konwencji o ochronie i zrównoważonym rozwoju Karpat, która weszła w życie w 2006 r. (UNEP, 2007; Anfodillo i inni, 2008). Góry te są ostoją dużych ssaków i stanowią największy zwarty kompleks leśny strefy umiarkowanej w Europie (UNEP, 2007). Obszary najcenniejsze przyrodniczo, o szczególnie wysokiej różnorodności biologicznej, są objęte ochroną w ramach parków narodowych i rezerwatów, natomiast na pozostałym terenie prowadzona jest typowa dla obszarów górskich gospodarka leśna i rolnicza.

Teren badań obejmuje wschodnią część Beskidu Niskiego, Bieszczady, Góry Sanocko-Turczańskie i częściowo przyległe pogórza znajdujące się w granicach 15 nadleśnictw (tab. 1, ryc. 1). Na obszarze tym znajduje się 55 rezerwatów, 6 parków krajobrazowych, 3 obszary Natura 2000 (29 obszarów siedliskowych, 3 – ptasie i jeden – Bieszczady – będący jednocześnie obszarem ptasim i siedliskowym). Sumarycznie wymienione formy ochrony przyrody zajmują 53% obszaru nadleśnictw. Tereny pięciu nadleśnictw przylegają

**Tabela 1.** Nadleśnictwa w granicach terenu badań  
*Forest Districts in the study area*

Lp. No.	Nadleśnictwo <i>Forest District</i>	Powierzchnia (km <sup>2</sup> ) <i>Area (km<sup>2</sup>)</i>	RDLP <i>Regional Directorate</i>
1	Baligród	305,79	Krosno
2	Bircza	503,49	Krosno
3	Brzozów	726,35	Krosno
4	Cisna	221,69	Krosno
5	Dukla	612,45	Krosno
6	Dynów	268,03	Krosno
7	Gorlice	516,93	Kraków
8	Komańcza	285,57	Krosno
9	Krasiczyn	605,88	Krosno
10	Lesko	535,19	Krosno
11	Lutowiska	274,44	Krosno
12	Łosie	332,03	Kraków
13	Rymanów	466,87	Krosno
14	Stuposiany	96,85	Krosno
15	Ustrzyki Dolne	469,62	Krosno
Łączna powierzchnia		6221,16	-

Opracowanie własne na podstawie Banku Danych o Lasach (2018) / *Authors' own elaboration based on the Forest Data Bank (2018)*



**Ryc. 1.** Rozmieszczenie wylosowanych do analizy 120 oddziałów leśnych z 15 nadleśnictw w terenie badań (8 na nadleśnictwo) na tle podkładu bazowego ArcGIS (National Geographic World Map) *Spatial distribution of 120 randomly-selected forest divisions (8/forest division) from the 15 Forest Districts in the study area, as set against the ArcGIS Basemap (National Geographic World Map)* Opracowanie własne (A. Affek), tak samo pozostałe ryciny / *Author's own elaboration (A. Affek), like remaining figures.*

bezpośrednio do dwóch parków narodowych – Bieszczadzkiego i Magurskiego. Większość lasów w polskich Karpatach (78%) jest własnością państwa, w tym 66% administrowanych jest przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe (PGL LP), a pozostałe 12% zarządzane jest przez parki narodowe (Kozioł, 2007).

Wysokości bezwzględne na obszarze badań wynoszą od 150 do 1350 m n.p.m. Warunki klimatyczne są charakterystyczne dla gór niskich i średnich strefy umiarkowanej ze średnią roczną temperaturą 4–7°C i średnią roczną sumą opadów 800–1300 mm. Wspomniane pasma górskie zbudowane są ze skał osadowych (z tzw. fliszu karpackiego). Na ich gliniastych i ilastych zwierzelinach wytworzyły się przeważnie dość żyzne i dobrze rozwinięte, jak na warunki górskie, gleby brunatne. Gleby te charakteryzują się znaczną zawartością frakcji mniejszej niż 0,002 mm, co przekłada się na ich wysoką spoistość i plastyczność (Zawadzki, 1999). Teren badań porastają głównie lasy liściaste i mieszane. Dominującym typem potencjalnej roślinności naturalnej jest las mieszany z przewagą buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.) i jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) w górnych partiach oraz dębu (*Quercus robur* L.) i grabu (*Carpinus betulus* L.) w dolnych (Matuszkiewicz, 2008).

Obecną roślinność w znacznej mierze ukształtowała działalność człowieka. Las o naturalnym charakterze zajmował 80–90% powierzchni Bieszczadów jeszcze w drugiej połowie XVI w. (Schramm, 1958). Szeroko zakrojona akcja kolonizacyjna prowadzona w XIII i XIV w.

zapoczątkowała masowe wylesianie dolin, a dalszy, postępujący rozwój osadnictwa, rolnictwa i pasterstwa skutkowałam systematycznym kurczeniem się pokrywy leśnej (Fastnacht, 1962). W połowie XIX w. lasy zajmowały już tylko 35% tego obszaru (Kozak i Kaim, 2016). W tym czasie obserwowano także zmiany gatunkowe w drzewostanie – na całym obszarze badań odnotowano wypieranie jodły przez buka (Marszałek, 2011). Z kolei na początku XX w. intensywnie eksploatowano buka, a w jego miejsce zakładano monokultury świerkowe (*Picea abies* L.).

Do drugiej wojny światowej północno-wschodnie Karpaty stanowiły gęsto zaludnione polsko-ukraińskie pogranicze etniczne (Maryański, 1963; Soja, 2012). Od lat 40. XX w., w wyniku przesunięcia granic i przesiedlenia ludności ukraińskojęzycznej (Eberhardt, 2011), powierzchnia lasów zaczęła się zwiększać. Gęstość zaludnienia po polskiej stronie nowo wyznaczonej granicy spadła o ponad połowę (Maryański, 1963; Soja, 2012), a na porzucone obszary wkroczył las, który łącznie pokrywał w 2013 r. aż 72% powierzchni (Kozak i Kaim, 2016). Stąd aktualnie około 36% lasów w Bieszczadach stanowią lasy porolne, zarówno nasadzone (głównie monokultury sosnowe), jak i powstałe w wyniku spontanicznej sukcesji, z dominacją sosny zwyczajnej – *Pinus sylvestris* L. i olszy szarej – *Alnus incana* (L.) Moench (Marszałek, 2011).

Na obszarze 15 badanych nadleśnictw lasy zarządzane przez LP zajmują 2639 km<sup>2</sup>. Prawie wszystkie (92%) z tych drzewostanów zostały sklasyfikowane jako lasy ochronne (glebo- i/lub wodochronne). Najczęściej reprezentowanymi typami siedliskowymi lasu są: las górski świeży (70% powierzchni) i las wyżynny świeży (23%). Najpopularniejszym systemem użytkowania jest obecnie rębnia gniazdowa IVd (stopniowa, udoskonalona) mająca w założeniu kształtować złożoną budowę pionową i poziomą drzewostanów i zapewniać utrzymanie ładu przestrzenno-organizacyjnego (*ePoradnik RĘBNIE*, 2003; Kozioł, 2007; Leibundgut, 2007; *Bank Danych o Lasach*, 2018; *Encyklopedia Leśna*, 2018). Dominującymi klasami wieku drzewostanów bukowych są klasy V i VI (81–120 lat), jodłowych – VI (101–120 lat), a sosnowych – IV (61–80 lat) (*Bank Danych o Lasach*, 2018).

## Materiały i metody

Współcześnie najbardziej skuteczną i wydajną metodą wykrywania i mapowania drobnych elementów rzeźby terenu w lasach na większych obszarach jest interpretacja danych LiDAR (ang. *Light Detection and Ranging*), pochodzących z lotniczego skanowania laserowego (ang. Airborne Laser Scanning – ALS) (Sittler i inni, 2007; Ferraz i inni, 2016). Technologia ta była już wykorzystywana na świecie do mapowania dróg leśnych, zdarzało się to jednak najczęściej w regionach tropikalnych, bądź w celu opracowywania, testowania lub walidacji nowych metod przetwarzania danych (White i inni, 2010; d’Oliveira i inni, 2012; Ellis i inni, 2016; Ferraz i inni, 2016). W Polsce wykorzystanie LiDAR do identyfikacji rzeczywistej sieci dróg leśnych i szlaków zrywkowych zainicjował S. Kucharzyk (2015), natomiast pierwszej próby oszacowania gęstości dróg leśnych na bazie danych LiDAR w skali całego regionu (Karpāt Wschodnich) podjęli się A. Affek i inni (2017). Niniejszy artykuł jest rozwinięciem i kontynuacją wówczas rozpoczętych prac.

Na potrzeby prowadzonych badań droga leśna została zdefiniowana jako pas terenu na działce leśnej o minimalnej szerokości 2 m, wykorzystywany głównie do naziemnej zrywki i transportu drewna. Definicja ta obejmuje zarówno właściwe drogi leśne w rozu-



mieniu LP<sup>2</sup>, w tym utwardzone i nieutwardzone, jak i szlaki zrywkowe<sup>3</sup>. Oddział leśny był traktowany jako podstawowa przestrzenna jednostka analizy. Na pierwszym etapie badań do oszacowania gęstości dróg leśnych wylosowano 60 oddziałów leśnych (tutaj próbka A), po 4 z każdego nadleśnictwa (por. Affek i inni, 2017). Uzyskany wówczas przedział ufności dla średniej był stosunkowo szeroki, więc w celu weryfikacji wyniku i doprecyzowania szacunku zdecydowano się na wylosowanie kolejnych 60 oddziałów (próbka B). W efekcie analizowano sieć dróg leśnych łącznie w 120 oddziałach, po 8 z każdego nadleśnictwa (ryc. 1 i 2). Podobnie jak na pierwszym etapie badań, do określenia wartości, pomiędzy którymi mieści się rzeczywista gęstość dróg leśnych w całym terenie badań, zastosowano estymację przedziałową (z 95% przedziałem ufności wokół średniej).

Do identyfikacji i mapowania dróg leśnych wykorzystano numeryczny model terenu (NMT) o rozdzielczości 1 m, wygenerowany z danych LiDAR, a w szczególności cieniowaną rzeźbę terenu udostępnioną online bezpłatnie na krajowym Geoportalu jako usługa WMTS (*Web Map Tile Service*) ISOK Cieniowanie<sup>4</sup>. Dane te, pozyskane w wyniku nalotu lotniczego prowadzonego w latach 2013–2014, pochodzą z krajowego zasobu o ogólnopolskim zasięgu, wytworzonego w ramach projektu „Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami” (ISOK). Źródłowe chmury punktów na obszarach leśnych charakteryzują się gęstością rzędu 4 punktów na metr, przy czym właśnie taka gęstość uznawana jest za minimalną wartość progową przydatności danych LiDAR do analizy rzeźby terenu pod zwartymi koronami drzew w terenie górskim (Leitold i inni, 2015).

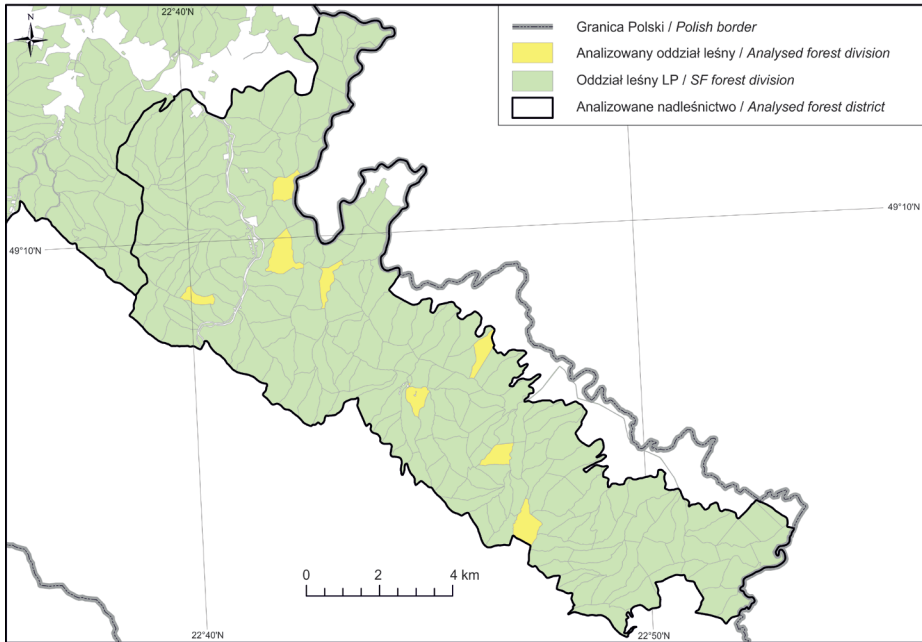
Wszystkie zidentyfikowane drogi leśne w 120 wytypowanych oddziałach leśnych zostały zdigitalizowane ręcznie na ekranie jako obiekty liniowe. Zastosowano procedurę proponowaną przez P. Ellisa i innych (2016). Przyjęto, że manualna detekcja będzie skuteczniejsza i w efekcie szybsza niż automatyczna, która i tak wymaga późniejszej weryfikacji i korekty badacza (Quackenbush, 2004), zwłaszcza, że była wykonywana przez osobę dobrze znającą teren badań z licznych wizji terenowych i posiadającą doświadczenie w identyfikowaniu cech mikrotopograficznych z danych LiDAR (Affek, 2014, 2016). W kolejnym kroku obliczono gęstość, całkowitą długość i łączną powierzchnię dróg leśnych oddzielnie dla każdego analizowanego oddziału leśnego. Do obliczenia całkowitej powierzchni terenu pokrytej drogami leśnymi przyjęto średnią szerokość drogi równą 4 m, która najlepiej odzwierciedla obserwowaną zmienność (od 2 do 6 m).

Wykonano także analizę ilościową zasięgu efektu brzegowego powodowanego przez drogi leśne w obrębie oddziałów leśnych. W tym celu posłużono się wskaźnikami zaproponowanymi przez T. Riutta i innych (2014), zmodyfikowanymi na potrzeby niniejszej analizy, tj. średnia i maksymalna odległość do najbliższej drogi. W analizach przyjęto wielkość piksela równą 4 m, nawiązując do założonej średniej szerokości dróg leśnych i posłużono się algorytmem odległości euklidesowej oraz narzędziem *Zonal Statistics* dostępnymi w rozszerzeniu *Spatial Analyst* programu ArcGIS 10.5. Zbadano również, jaki procent powierzchni

<sup>2</sup> Droga leśna – wydzielony pas terenu znajdujący się na powierzchni gruntów leśnych, przeznaczony do ruchu lub postoju pojazdów oraz do ruchu pieszych, wraz z leżącymi w ciągu drogi mijankami, składnicami przyrzębowymi oraz technicznymi urządzeniami służącymi organizacji i zabezpieczeniu ruchu oraz technologii prac leśnych niebędąca drogą publiczną (PGL LP, 2006).

<sup>3</sup> Szlak zrywkowy (operacyjny) – pas terenu, po którym odbywa się zrywka drewna z miejsca pozyskania do drogi wywozowej (składnicy przyrzębowej) oraz służący realizacji innych procesów technologicznych związanych z gospodarką leśną. Wyróżnia się szlaki zrywkowe stałe, czasowe (wykorzystywane w okresie czyszczeń) i zbiorcze (od których odgałęziają się inne szlaki) (PGL LP, 2006).

<sup>4</sup> [http://mapy.geoportal.gov.pl/wss/service/WMTS/guest/wmts/ISOK\\_CIEN](http://mapy.geoportal.gov.pl/wss/service/WMTS/guest/wmts/ISOK_CIEN).



**Ryc. 2.** Położenie wylosowanych oddziałów leśnych w jednym z nadleśnictw (Stuposiany)  
*Location of randomly-selected forest divisions in one of the analysed Forest Districts (Stuposiany)*

analizowanych oddziałów znajduje się w uzyskanej z powyższych analiz średniej odległości do drogi leśnej oraz w odległości do 20 m (raportowany w literaturze zasięg efektu brzegowego obserwowanego dla zmian struktury i kompozycji gatunkowej zbiorowisk roślinnych: Avon i inni, 2013) i do 100 m (raportowany w literaturze minimalny zasięg efektu brzegowego oddziałującego na behavior dużych ssaków oraz ptaków związanych z wnętrzem lasu: Forman i Alexander, 1998). Obliczenia wykonano dla próby 110 oddziałów leśnych (z analizy wyłączono 10 oddziałów, w których fragmenty należące do tego samego oddziału były od siebie znacznie oddalone, co sztucznie podwyższało maksymalne odległości do dróg).

Dodatkowo, przeanalizowano lokalizację dróg leśnych w zależności od nachylenia terenu. Wykorzystano do tego cyfrowy model terenu DTD o rozdzielczości 26 m. Zależności między gęstością dróg leśnych, nachyleniem drogi a nachyleniem stoku przeanalizowano przy pomocy współczynnika korelacji r-Pearsona.

Aby określić wpływ pozyskiwania drewna na erozję i obieg wody, oprócz samej charakterystyki sieci dróg leśnych, istotne jest także rozpoznanie sposobu jej użytkowania (rodzaje pojazdów, częstotliwość itp.). W tym celu przeanalizowano oficjalne dane z 15 nadleśnictw znajdujących się na terenie badań (tab. 1), udostępnione na portalu Banku Danych o Lasach (<https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/>) oraz bazę danych przestrzennych, zawierającą informacje o planowanych zabiegach i pozyskaniu drewna dla poszczególnych wydziałów leśnych w latach 2013–2016. Ponadto, dokonano szerokiego przeglądu opracowań tematycznych dotyczących współczesnej gospodarki leśnej, w tym obowiązujących planów urządzenia lasu, aktów prawnych (np. Ustawa o lasach, 1991), krajowych i międzynarodowych specyfikacji branżowych (Caterpillar, 2017; John Deere,

2017; LKT, 2017), wytycznych i poradników (Dzikowski i inni, 2006; Czerniak, 2013; PGL LP, 2015), raportów (PGL LP, 2014; FOREST EUROPE, 2015) oraz literatury naukowej (np. Kocel, 2005; Gil, 2007; Rist i inni, 2012; Gołąb i Plewniak, 2014).

## Wyniki

### Charakterystyka i gęstość dróg leśnych w terenie badań

Przeprowadzona analiza danych LiDAR pozwoliła na rozpoznanie łącznie 572,1 km dróg leśnych (w tym dróg utwardzonych, nieutwardzonych i szlaków zrywkowych) w 120 wytypowanych oddziałach leśnych (całkowity obszar analizy – 4758 ha, średnia powierzchnia oddziału – 40 ha) (ryc. 3 i 4). Średnia gęstość dróg w próbkce B (12,50 km/km<sup>2</sup>) była nieco wyższa niż w próbkce A (12,46 km/km<sup>2</sup>), przy równocześnie węższym uzyskanym przedziale ufności (tab. 2, ryc. 5). Średnia ze wszystkich 120 analizowanych oddziałów leśnych wyniosła 12,48 km/km<sup>2</sup>. Ekstrapolacja na cały teren badań (obszary leśne we wschodniej części polskich Karpat zarządzane przez Lasy Państwowe) daje średnią gęstość w przedziale od 11,43 do 13,53 km/km<sup>2</sup> (z 95% prawdopodobieństwem). Przedział ufności uzyskany z analizy 120 oddziałów zmniejszył się więc w stosunku do pierwotnie otrzymanego z analizy 60 oddziałów z próbki A o 35%. Najniższe wartości (<5 km/km<sup>2</sup>) uzyskano dla oddziałów leśnych położonych w pobliżu granicy państwowej (np. oddział 150 w Nadleśnictwie Rymanów, 61A i 223 w Nadl. Stuposiany) lub w rezerwach przyrody (np. oddział 105 w Nadl. Bircza, w rezerwacie Na Opalonym), gdzie pozyskiwanie drewna jest bardziej ograniczone. Z kolei najwyższą, znacznie odstającą od pozostałych wartość (42,51 km/km<sup>2</sup>) odnotowano dla oddziału, przez który przebiega główny szlak wywozu drewna z sąsiednich oddziałów (93 w Nadl. Lesko, na północnych stokach góry Czulnia). Szlak ten nie jest utwardzony i prowadzi po rozległym grzbiecie. Długość całej sieci drogowej na gruntach leśnych Lasów Państwowych na terenie badań szacuje się na 30166–35706 km. To przekłada się na całkowite pokrycie drogami leśnymi (przy założonej średniej szerokości drogi równej 4 m) na poziomie 121–143 km<sup>2</sup> (17 000–20 000 boisk piłkarskich), co oznacza, że około 4,6–5,4% powierzchni lasów LP ma naruszoną strukturę gleby w wyniku prowadzonej gospodarki leśnej.

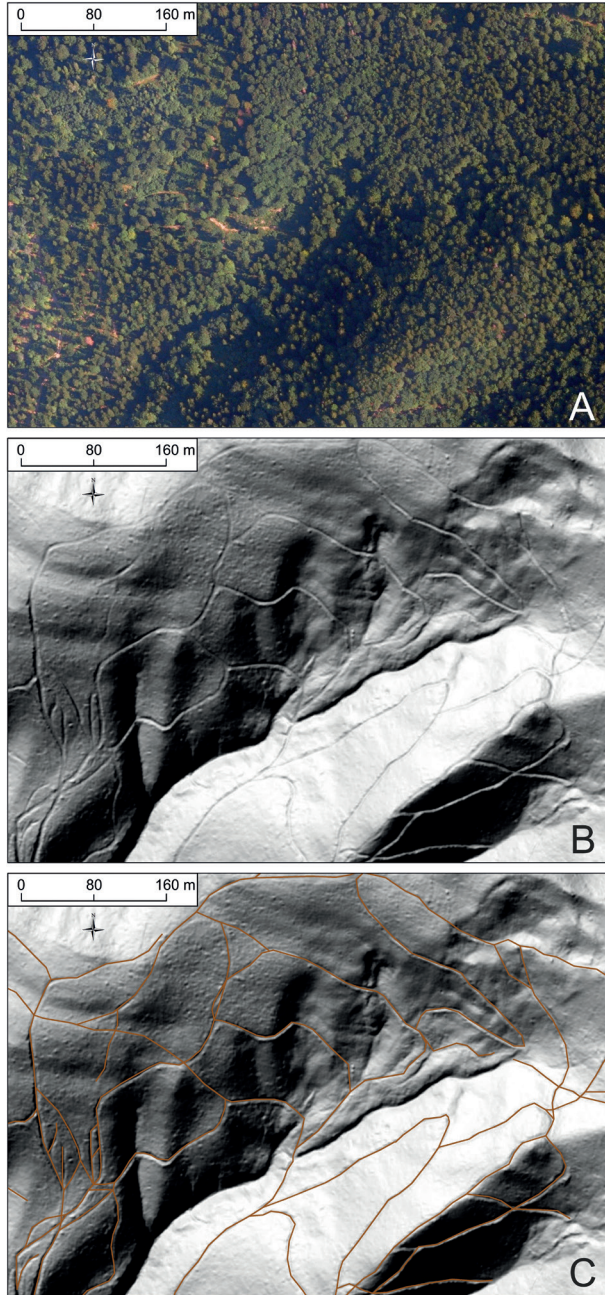
Wyniki analizy zasięgu efektu brzegowego przedstawiono w tabeli 3. Średnia odległość do najbliższej drogi wynosi 50 m. W odległości do 50 m od drogi leży ponad 65% powierzchni analizowanych oddziałów leśnych. W zależności od założonego dla danej grupy organizmów zasięgu efektu brzegowego od 38% do 86% powierzchni analizowanych oddziałów potencjalnie znajduje się w odległości oddziaływania dróg leśnych.

Analiza wykazała, że średnie nachylenie drogi w oddziale leśnym waha się od 2,5° do 15°, przy czym najwięcej oddziałów charakteryzuje się średnim nachyleniem dróg w granicach 4–7° (ryc. 6). Odnotowane maksymalne nachylenia odcinków dróg (przy rozdzielczości modelu terenu ok. 26 m) w poszczególnych oddziałach wynosiły od 9° do 38° (ryc. 6).

Ciekawych informacji dostarcza też analiza nachylenia stoków, po których poprowadzone są drogi leśne. Analiza zbiorcza wykazała, że ok 8% dróg leśnych we wschodniej części polskich Karpat przebiega po stokach o nachyleniu powyżej 20° (ryc. 7).

Badanie związków między poszczególnymi charakterystykami oddziałów i dróg leśnych wykazało, że gęstość dróg nie koreluje istotnie z nachyleniem terenu w oddziale leśnym ( $r=0,044$ ;  $p=0,631$ ;  $r=-0,026$ ;  $p=0,779$ ), ani ze średnim nachyleniem dróg ( $r=0,073$ ;

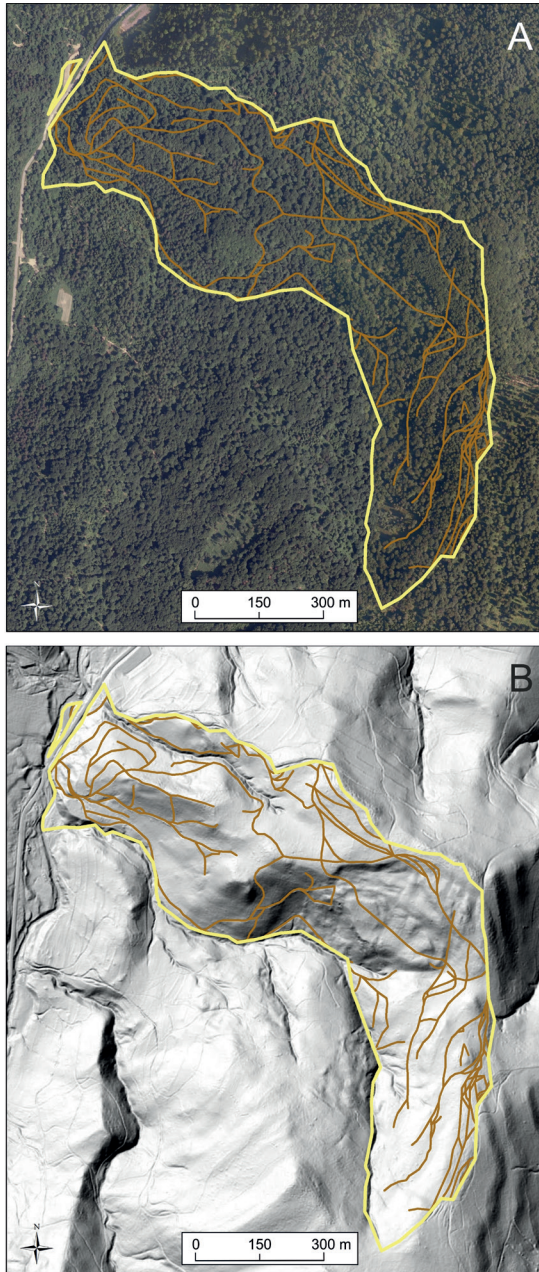




**Ryc. 3.** Fragment oddziału 106 w Nadleśnictwie Cisna (południowo-zachodnie stoki góry Krzemienna w Bieszczadach)

A – ortofotomapa, B – cieniowany model terenu wygenerowany z danych LiDAR, C – zdigitalizowana sieć dróg leśnych

*Part of the forest division 106 in Cisna Forest District (SW slopes of Mount Krzemienna, Bieszczady Mountains)*  
A – orthophoto, B – shaded LiDAR-derived DTM, C – digitised forest-road network



**Ryc. 4.** Oddział 120 w Nadleśnictwie Baligród (południowo-zachodnie stoki góry Kamień w masywie Korbani w Bieszczadach) ze zdigitalizowaną siecią dróg leśnych  
A – na podkładzie ortofotomapy, B – na podkładzie cieniowanego modelu terenu wygenerowanego z danych LiDAR  
*Forest division 120 in Baligród Forest District (SW slopes of Mt. Kamień in the Bieszczady Mountains' Korbania Massif) with digitised forest-road network*  
A – overlain on orthophoto, B – overlain on shaded LiDAR-derived DTM

**Tabela 2.** Szacunkowa gęstość dróg leśnych (ze szlakami zrywkowymi) we wschodniej części polskich Karpat. Zakres wartości odpowiada 95% przedziałowi ufności dla średniej. Gęstość dróg obliczona jest jako łączna długość dróg w oddziale dzielona przez jego powierzchnię  
*Estimated density of forest roads (including skid trails) in the eastern part of the Polish Carpathians. Range of values corresponds with 95% confidence interval either side of the mean. Road density calculated as total road length in the division divided by its area*

Próbka Sample	Liczebność próbek (l. oddziałów leśnych) Sample size (No. of forest divisions)	Gęstość dróg leśnych [km/km <sup>2</sup> ] Forest-road density [km/km <sup>2</sup> ]				
		Min. Min.	Maks. Max.	Średnia Mean	Przedział ufności dla średniej (95%) Confidence interval around the mean	Odchylenie standardowe Standard deviation
A	60	3,34	42,51	12,46	10,85–14,07	6,22
B	60	4,94	26,74	12,50	11,08–13,92	5,42
A+B	120	3,34	42,51	12,48	11,43–13,53	5,82

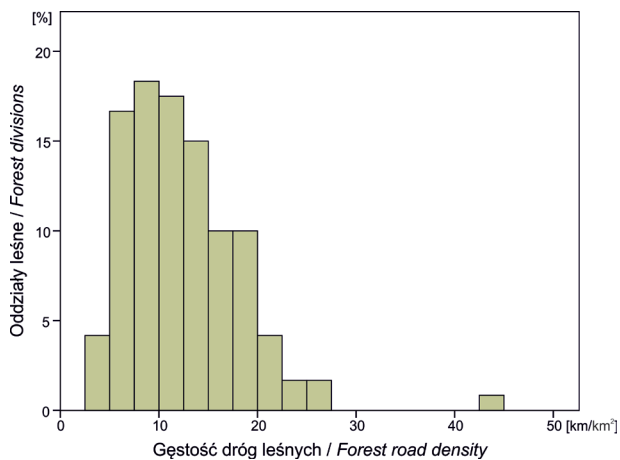
Opracowanie własne, tak samo tabela 3 / Authors' own elaboration, like table 3.

**Tabela 3.** Zasięg oraz udział powierzchniowy potencjalnego efektu brzegowego powodowanego przez drogi leśne

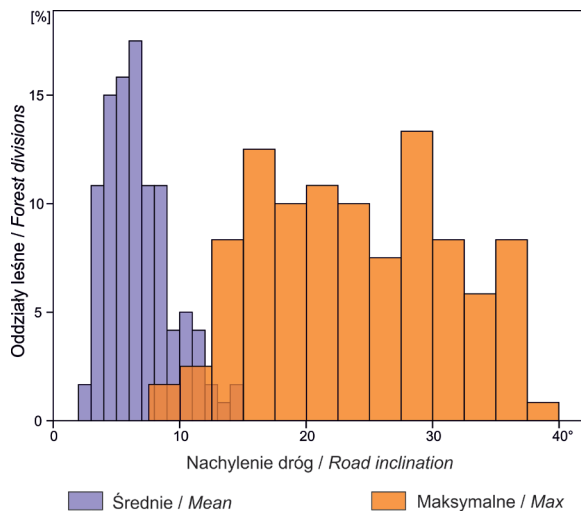
*Range and percentage spatial share of potential edge effect due to forest roads*

Liczebność próby (l. oddziałów leśnych) Sample size (No. of forest divisions)	Odległość do najbliższej drogi [m] Distance to the nearest forest road [m]				% powierzchni terenu znajdującego się w danej odległości od drogi % of area within a given distance from the road		
	Min. Min.	Maks. Max.	Średnia* Mean*	Średnia maks.* Max. mean*	Do 20 m Up to 20 m	Do 50 m Up to 50 m	Do 100 m Up to 100 m
110	0	817	50	219	38,0	65,6	86,3

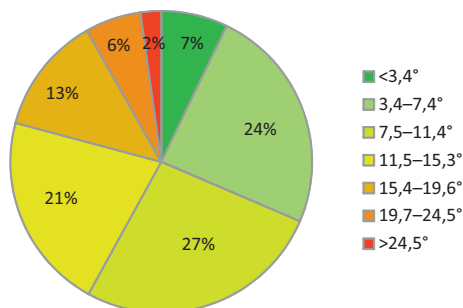
\*Średnią oraz maksymalną odległość do drogi liczono niezależnie dla każdego oddziału; na tej podstawie wyliczono średnią oraz średnią maksymalną dla wszystkich analizowanych oddziałów leśnych  
*Mean and maximum mean distance from the road calculated independently for each forest division; on this basis the mean and max. mean were calculated for all the analysed forest divisions*



**Ryc. 5.** Rozkład gęstości dróg leśnych (włącznie ze szlakami zrywkowymi) w 120 testowych oddziałach leśnych  
*Distribution of forest-road density (including skid trails) in the 120 tested forest divisions*



**Ryc. 6.** Rozkład średniego i maksymalnego nachylenia dróg w oddziałach leśnych  
*Distribution of mean and maximum road inclination among forest divisions*

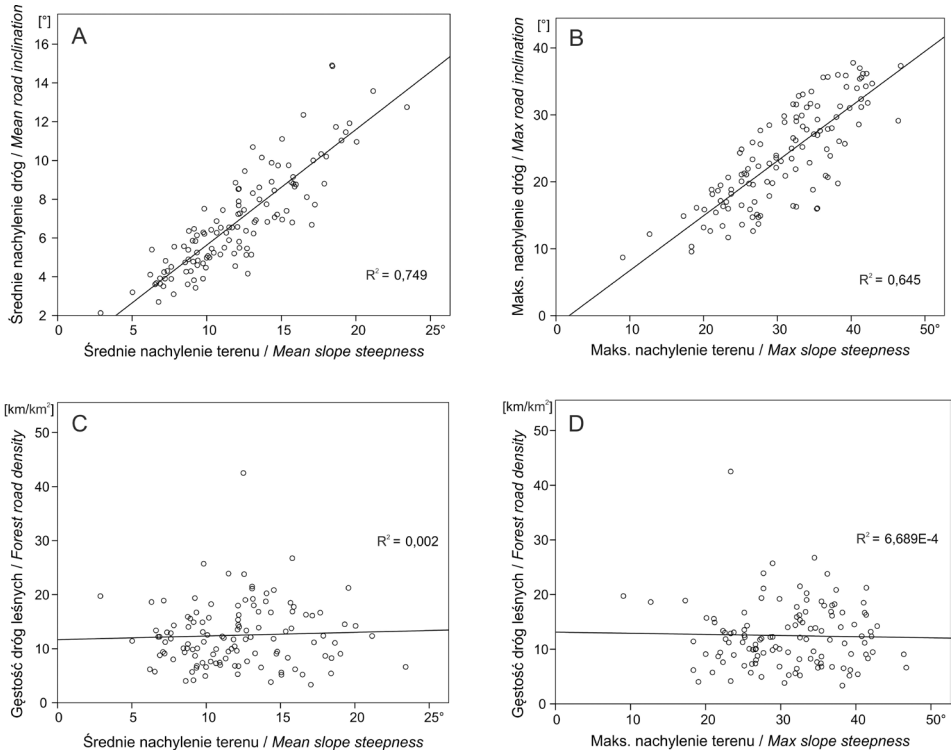


**Ryc. 7.** Udziały procentowe dróg (w badanych oddziałach), prowadzących przez teren o różnych klasach nachylenia (w stopniach)  
*Percentage share of roads leading through slopes of different classes of steepness (in degrees)*

$p=0,428$ ) (ryc. 8C i 8D), natomiast jest istotnie, choć słabo dodatnio związana z maksymalnym nachyleniem dróg ( $r=0,23$ ;  $p=0,011$ ).

Zaobserwowano przy tym silny związek nachylenia dróg z nachyleniem powierzchni terenu w oddziałach leśnych, zarówno w obrębie średnich, jak i maksymalnych nachyleń ( $r$  od 0,64 do 0,86;  $p=0,000$ ) (ryc. 8A i 8B). Oznacza to, że wpływ dróg leśnych na erozję wynikającą z samego profilu podłużnego dróg jest większy na stromych fragmentach stoków, charakterystycznych dla wyższych partii gór.

Ponieważ współczesne działania związane z pozyskiwaniem drewna są prowadzone równolegle w wielu oddziałach leśnych i na dużych przestrzeniach, to rozległe obszary lasów są regularnie penetrowane przez ciężki sprzęt leśny, tworząc nowe bądź „odświeżając” istniejące już drogi leśne i szlaki zrywkowe. Z uwagi na specyfikę fliszu karpackiego i wynikające z niej niekorzystne właściwości wytrzymałościowe gruntów (PGL LP, 2006),



**Ryc. 8.** Związki nachylenia i gęstości dróg leśnych z nachyleniem terenu w analizowanych oddziałach leśnych  
*Relationships between forest-road inclination and density and slope steepness in the analysed forest divisions*

w terenie badań wielokrotnie zaobserwowano zjawisko równoległych dróg leśnych (por. Affek i inni, 2017), mimo że w poradniku technicznym dotyczącym dróg leśnych stwierdzono wprost, że ze względu na wymogi ochrony środowiska leśnego, szerokość całego pasa drogowego i szerokości wszystkich jego elementów należy ograniczać do niezbędnego minimum (PGL LP, 2006, s. 31).

### Metody i intensywność pozyskiwania drewna w Karpatach

Lasy karpackie poza obszarami parków narodowych i rezerwatów podlegają intensywnej eksploatacji. Zgodnie z informacjami zawartymi w planach urządzenia lasu dla 15 analizowanych nadleśnictw, całkowita wielkość pozyskania drewna w 2016 r. planowana była na poziomie 1 230 153 m<sup>3</sup>, co daje średnie pozyskanie równe 4,62 m<sup>3</sup>/ha (dla porównania – średnia w 28 państwach członkowskich UE w 2010 r. wynosiła 3,3 m<sup>3</sup>/ha; FOREST EUROPE, 2015). W południowo-wschodniej Polsce przyrost bieżący roczny wynosi 9 m<sup>3</sup>/ha, podczas gdy zapas drewna na pniu nieznacznie przekracza 300 m<sup>3</sup>/ha (IBL, 2015). Od czasu pierwszej inwentaryzacji stanu lasów przeprowadzonej w Lasach Państwowych w 1967 r. stale wzrasta ich zasobność (PGL LP, 2014).

Ciężki sprzęt leśny (głównie skidery i ciągniki rolnicze) ma duże zastosowanie w pozyskiwaniu drewna w Lasach Państwowych. Analiza oficjalnych danych LP pokazuje, że naj-



bardziej rozpowszechnionymi rodzajami zabiegów planowanych na obecny dziesięcioletni okres<sup>5</sup> są: trzebież późna i wczesna (odpowiednio 38,5% i 2,7% powierzchni) oraz rębnia stopniowa gniazdowa udoskonalona IVd (planowana na 35,6% obszaru). Inne zabiegi, obejmujące czyszczenie wczesne i późne, przewidziane są na 7% powierzchni. Pomimo faktu, że na terenie badań prawie wszystkie (92%) lasy zarządzane przez PGL LP podlegają ochronie (lasy wodo- i glebochronne), to intensywność pozyskania drewna jest prawie taka sama jak w pozostałych lasach. Zaledwie 7,4% powierzchni lasów w analizowanych nadleśnictwach jest wyłączona z użytkowania w aktualnej dziesięcioletce. Zabiegi pielęgnacyjne planowane są w 94% wydziałów leśnych, z tego 85% wydziałów będzie objętych cięciami. Na podstawie analizy danych przestrzennych dotyczących planowanych zabiegów stwierdzono, że wielkość powierzchni, na której prowadzone będą cięcia, każdego roku będzie mniej więcej jednakowa (ok. 1/10 obszaru planowanego w dziesięcioletce). Przykładowo, na terenie badań w 2014 r. planowano prowadzić zabiegi na 9,5% powierzchni leśnej we władaniu PGL LP, a w 2015 – na 10,5%. Na tej podstawie można oczekiwać, że ciężki sprzęt do pozyskiwania drewna będzie operować każdego roku na ok. 10% ogólnej powierzchni lasów, w których zaplanowano cięcia przedrębne i rębne. W konsekwencji oznacza to, że większość szlaków zrywkowych jest użytkowana intensywnie co 10 lat, natomiast drogi leśne są użytkowane znacznie częściej, a częstotliwość zależy od statusu drogi (główna, boczna), a dokładniej od liczby obsługiwanych wydziałów/oddziałów leśnych.

W najbliższej przyszłości można spodziewać się, że aktywność ciężkiego sprzętu będzie najbardziej intensywna na będących w zarządzie LP obszarach wsi wysiedlonych po II wojnie światowej, które następnie znacjonalizowano, a dawne grunty orne zalesiono (głównie sosną zwyczajną). Wynika to z faktu, że drzewostan sosnowy na tych terenach osiąga właśnie wiek rębności (70, 80 lub 90 lat, w zależności od nadleśnictwa) ([www.bdl.lasy.gov.pl](http://www.bdl.lasy.gov.pl)). Przeprowadzona analiza wykazała, że grunty porolne porośnięte sosną w wieku 41–80 lat stanowią prawie 17% lasów na obszarze badań (będących w zarządzie LP). Według E. Marszałka (2011) udział drzewostanów na gruntach porolnych w bieszczadzkich nadleśnictwach wynosi średnio 36%, z maksymalnym udziałem rzędu 45% w Nadleśnictwie Lutowiska.

W praktyce zarówno sieć drogowa, jak i natężenie ruchu ciężkiego sprzętu, zależą przede wszystkim od możliwości technicznych pojazdów. Skidery stosowane w lasach karpaccich są najczęściej napędzane silnikami Diesla, z bezpośrednim wtryskiem paliwa i turbodoładowaniem, co jest niezbędne przy prowadzeniu prac na terenach o znacznym nachyleniu stoków. Według danych pochodzących od producentów (Caterpillar, 2017; John Deere, 2017; LKT, 2017) waga pojazdów waha się od 4400 do nawet 12 000 kg, a moc silników od 40 do 110 kW. Rozstaw osi tych maszyn wynosi od 2050 mm do 3250 mm, natomiast szerokość opon – od 200 mm do 850 mm. Niektórzy producenci oferują także ciągniki rolnicze przystosowane do zrywki, które ze względu na niższą cenę i niekiedy lepsze dostosowanie osprzętu do warunków górskich są powszechnie stosowane w Polsce (Kocel, 2005), szczególnie w Karpatach Wschodnich (Gil, 2007). Szacuje się, że w polskich lasach wykorzystywanych jest ok. 3000 dostosowanych do zrywki ciągników rolniczych oraz ok. 1500 skiderów i forwardeków (Kocel, 2005). Zrywkę drewna w miejscach trudno dostępnych prowadzi się również za pomocą kolejek linowych. Jest to metoda dość wydajna i względnie bezpieczna, a równocześnie wyrządzająca mniejsze szkody w środowisku przyrodniczym niż pozostałe metody (ciągniki, skidery) (Dudek, 2010; Dudek i Sosnowski,

<sup>5</sup> Plan urządzenia lasu obowiązujący przez 10 kolejnych lat przygotowany jest oddzielnie i w różnym czasie dla każdego nadleśnictwa. Dane pochodzą z planów aktualnych na 2017 r.



2011). Niemniej, jest ona stosunkowo rzadko stosowana (0,1–0,2% pozyskania drewna w Polsce) ze względu na wysoki koszt jednostkowy (instalowanie masztów i zespołu wyciągarek na ciągnikach, przyczepach lub samochodach ciężarowych) (Suwała, 2000; Gil i Motyka, 2014).

## Dyskusja wyników

### LiDAR jako narzędzie do delimitacji dróg leśnych

Przeprowadzone badania wykazały, że LiDAR jest techniką, dzięki której można wygenerować numeryczny model terenu odpowiedni do detekcji dróg leśnych i szlaków zrywkowych pod koronami drzew w urozmaiconej, górskiej rzeźbie terenu. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że nie wszystkie drogi leśne wpływające na mikrorzeźbę i gleby są odzwierciedlane w modelu terenu.

Głównym ograniczeniem przy rekonstrukcji sieci dróg leśnych za pomocą danych LiDAR jest to, że w przypadku gęstej pokrywy roślinnej wiele emitowanych impulsów nie dociera do powierzchni ziemi, co w konsekwencji powoduje, że gęstość sieci drogowej może być niedoszacowana. Skalę tego efektu można zaobserwować, gdy przyrówna się gęstość dróg otrzymaną z danych LiDAR z gęstością uzyskaną na podstawie terenowych pomiarów GPS (Affek i inni, 2017). Niemniej, niektóre różnice w strukturze sieci wynikają także z tego, że część dróg widocznych w terenie wcale nie jest odzwierciedlona w rzeźbie, ponieważ powstała na gruncie odpornym na odkształcenia.

Ponadto, widoczne na modelu niektóre formy liniowe łądząco podobne do wcięć drogowych są w rzeczywistości wcięciami erozyjnymi powstałymi bez ingerencji człowieka (debrze, wciosa, wąwozy itp.). Poza tym można natknąć się także na inne antropogeniczne formy liniowe odzwierciedlone w rzeźbie pod koronami drzew, które nie wynikają wprost z prowadzonej gospodarki leśnej. Należą do nich m.in. rowy melioracyjne i podziemne rurociągi, ale także formy powstałe w przeszłości, niepełniące aktualnie żadnej funkcji na rzecz człowieka, takie jak linie okopów i obwałowania, ale także nasypy niegdyś oddzielające grunty różnej własności czy skarpy dawnych teras rolniczych (Affek, 2016). Niektóre obiekty w lasach prawidłowo zinterpretowane jako ciągi komunikacyjne w rzeczywistości nigdy nie służyły do zmechanizowanego transportu drewna. W terenie badań są to zwykle stare, nieużytkowane już trakty komunikacyjne będące pozostałością po dawnych mieszkańcach i ówczesnej strukturze krajobrazu, służące niegdyś przede wszystkim jako szlaki handlowe do transportu dalekobieżnego. Na NMT wygenerowanych z danych LiDAR można je dość łatwo odróżnić od szlaków zrywkowych, ponieważ charakteryzują się zwykle głębokim, U-kształtnym profilem o wyrównanej, dość płaskiej nawierzchni, bez śladów kolein.

Podobnie okopy, dawne miedze czy skarpy teras rolniczych znaczące historyczne podziały własnościowe nie mogą być przez wprawnego badacza zidentyfikowane jako drogi, gdyż ich rzut pionowy składa się z prostych odcinków ułożonych względem siebie przeważnie pod kątem 90 stopni lub nawet mniejszym i nie nosi typowych dla dróg cech, jak łagodne łukowate krzywizny.

Zwarta pokrywa roślinna powoduje, że na NMT widoczne są często jedynie wybrane segmenty dróg, i to w znacznie gorszej szczegółowości. To właśnie w takich sytuacjach badacz-człowiek, ze swoją zdolnością do odtworzenia całych kształtów z zaledwie fragmentów (poprzez percepcję typu *Gestalt*) ma przewagę nad automatyczną detekcją i może

lepiej modelować rzeczywistość. Autorzy wykorzystujący zautomatyzowane algorytmy detekcji dróg leśnych często zgłaszają słabą jakość efektu końcowego (zarówno w zakresie poprawności, jak i kompletności), szczególnie w przypadku gęstej roślinności i niewielkich deniwelacji terenu (Azizi i inni, 2014; Ferraz i inni, 2016). Ponadto, w części cytowanych powyżej badań (Ferraz i inni, 2016) nie badania terenowe, a jedynie zdjęcia lotnicze służyły jako materiał referencyjny.

### Gęstość dróg leśnych w terenie badań i na świecie

W skali globalnej las liściasty i mieszany strefy umiarkowanej jest biotem charakteryzującym się największą gęstością dróg, a tym samym najmniejszym udziałem obszarów wolnych od dróg (ang. *roadless areas*) – 41% (Ibisch i inni, 2016). Autorzy w powyższych obliczeniach wzięli pod uwagę wszystkie drogi oznaczone na OpenStreetMap, w tym ścieżki spacerowe. Pobieżny przegląd zawartości tej bazy dla obszaru Karpat wykazał, że obejmuje ona większość utwardzonych dróg leśnych i głównych szlaków turystycznych, natomiast nie uwzględniła w ogóle dróg nieutwardzonych i szlaków zrywkowych. Według CIA World Factbook (CIA, 2017) łączna długość dróg (w tym dróg utwardzonych i nieutwardzonych) we wszystkich krajach karpaccyckich (Czechy, Węgry, Polska, Rumunia, Serbia, Słowacja i Ukraina) wynosi 1,1 mln km, co odpowiada średniej gęstości 0,76 km/km<sup>2</sup>. Liczba ta jest znacznie mniejsza od tych podawanych w pracach relacjonujących badania gęstości sieci drogowych w górskich lasach gospodarczych z wykorzystaniem danych LiDAR. Na przykład w Wogezach (pasmo górskie we wschodniej Francji) Ferraz i inni (2016) na ekranie monitora zidentyfikowali 320 km dróg na powierzchni nieco ponad 100 km<sup>2</sup> (3,2 km/km<sup>2</sup>). Z kolei White i inni (2010) rozpoznali 30 km dróg leśnych w zlewni o pow. 526 ha w Górach Santa Cruz w Kalifornii, co dało 5,7 km/km<sup>2</sup>. W innym badaniu przeprowadzonym w Górach Apuseni w Rumunii i wykorzystującym dane LiDAR uzyskano gęstość dróg leśnych równą 7,25 km/km<sup>2</sup> (72,5 km dróg na obszarze 10 km<sup>2</sup>) (Roman i inni, 2017). Z kolei S. Kucharzyk (2015) obliczył, że średnia gęstość dróg leśnych i szlaków zrywkowych w Bieszczadzkim Parku Narodowym wynosi 4,23 km/km<sup>2</sup>. Autor ten zwrócił uwagę na dużą zmienność przestrzenną tego parametru, wynoszącą od 0 do 22,87 km/km<sup>2</sup>. Podane w przytoczonych wyżej pracach średnie gęstości są jednak nadal znacznie niższe niż te uzyskane w prezentowanym badaniu (11,43–13,53 km/km<sup>2</sup>). Te wyniki bowiem są porównywalne tylko z wynikami uzyskanymi przez P. Ellisa i innych (2016) w intensywnie eksploatowanych lasach tropikalnych na Borneo. Korzystając z danych LiDAR, wspomniani autorzy wytyczyli 728,6 km dróg leśnych i szlaków zrywkowych na testowym obszarze 5620 ha, co odpowiada gęstości 12,96 km/km<sup>2</sup>.

Ponieważ wszystkie wspomniane wyżej badania oparte na danych LiDAR prowadzone są na względnie niewielkich powierzchniach testowych, nie dają one podstawy do ekstrapolacji wyników na większy obszar. Zastosowanie techniki losowego próbkowania obszarów testowych i dostępność jednorodnych danych LiDAR dla niemalże całego kraju spowodowały, że w odróżnieniu od innych badań możliwe było oszacowanie gęstości dróg leśnych i skali ich oddziaływania na środowisko na rozległym obszarze, obejmującym wszystkie lasy zarządzane przez LP we wschodniej części polskich Karpat (2639 km<sup>2</sup>).

## Optymalna vs rzeczywista gęstość dróg leśnych w Karpatach

Według S. Antończyka i J. Dzikowskiego (1984), optymalna gęstość sieci drogowej w Karpatach powinna wynosić od 1,84 do 2,78 km/km<sup>2</sup>. Wskaźnik ten uwzględnia wszystkie drogi związane z technologią transportu leśnego (publiczne i niepubliczne, bez szlaków zrywkowych), nie obejmuje on jednak dróg prowadzących do szkótek leśnych, osiedli mieszkaniowych, obiektów turystycznych i rekreacyjnych, a także dróg służących tylko ochronie przeciwpożarowej. Z kolei J. Piekutin i inni (2015), kierując się jedynie względami ekonomicznymi, określili optymalną gęstość dróg dla nadleśnictwa Komańcza na 0,93–1,20 km/km<sup>2</sup> (w zależności od przyjętych założeń). Uzyskana w prezentowanym badaniu szacunkowa gęstość dróg leśnych (łącznie ze szlakami zrywkowymi) dla całego obszaru badań rządu 11,43–13,53 km/km<sup>2</sup> (8,62 km/km<sup>2</sup> dla 6 oddziałów wylosowanych z Nadl. Komańcza) wskazuje, że gęstość sieci dróg odzwierciedlonej na modelu terenu znacznie przekracza wartości optymalne. Maksymalna zarejestrowana wartość (42,51 km/km<sup>2</sup>) jest ponad 15 razy wyższa od zalecanej górnej granicy gęstości dróg. Skala rozbieżności z pewnością w jakiejś części wynika ze stosowania odmiennych definicji dróg leśnych, niemniej warto zwrócić uwagę, że funkcje i wpływ na środowisko nieuwzględnianych w powyższych pracach szlaków zrywkowych są podobne do klasycznych dróg leśnych (Kucharzyk, 2015).

Uzyskane wyniki pokazują, w jak małym stopniu zalecenia dotyczące budowy i użytkowania dróg leśnych są wprowadzane w życie (por. Dzikowski i inni, 2006; Czerniak, 2013; Gołąb i Plewniak, 2014; PGL LP, 2015; *Zarządzenie...*, 2018). Odległości między drogami stokowymi są często zbyt małe, a wiele szlaków zrywkowych biegnie bezpośrednio korytem potoku, co powoduje intensyfikację procesów erozji. W wielu miejscach drogi charakteryzują się nadmierną szerokością lub biegną jedna obok drugiej, co jest konsekwencją trudności poruszania się ciężkim sprzętem po pierwotnie wyznaczonym szlaku. Dzieje się tak na skutek zbiegu kilku czynników, w tym wysokiej plastyczności podłoża, stosunkowo wysokiej sumy rocznej opadów i wysokiej częstotliwości opadów nawalnych, dużego nacisku na oś i intensywnego użytkowania dróg przy braku ich systematycznej konserwacji. Istotnym czynnikiem, podobnie jak na Borneo (por. Ellis i inni, 2016), jest też zatrudnianie do prowadzenia zrywki drewna firm zewnętrznych, które ograniczają do minimum nakłady na utrzymanie użytkowanych przez nich szlaków zrywkowych.

## Interpretacja wyników i ograniczenia wnioskowania

Uzyskane w terenie badań wyjątkowo wysokie wartości gęstości dróg leśnych mogą wynikać z kilku powodów. Najprostszym wytłumaczeniem jest to, że stosowane w polskich Karpatach praktyki gospodarowania lasami (tj. system zrębni gniazdowej stopniowej, intensywność cięć oraz dobór sprzętu i techniki zrywki) najzwyczajniej wymagają niezwykle gęstej sieci dróg leśnych. Wysokie wartości można jednak wytłumaczyć również w inny sposób. Po pierwsze, zastosowana definicja drogi leśnej i subiektywny próg interpretowania obiektów widocznych na NMT jako drogi, z pewnością rzutują na ostateczne wyniki. Można sobie wyobrazić, że inni badacze, mając te same dane, wyznaczyliby mniej gęstą sieć dróg, choć równie dobrze mogliby wyznaczyć jeszcze gęstszą. Po drugie, wykorzystany NMT mógł zawierać więcej szczegółów niż inne modele wygenerowane z baz danych LiDAR o teoretycznie zbliżonych parametrach skanera i procesu skanowania, choćby dlatego, że z powodu mniej zwartej pokrywy roślinnej lub korzystniejszych warunków at-

mosferycznych więcej impulsów dotarło do powierzchni ziemi i zostało zarejestrowanych w klasie „grunt”. Po trzecie, nieużytkowane dawne drogi wiejskie i trakty obecnie ukryte pod gęstą roślinnością mogły nie zostać odpowiednio odróżnione od współczesnych szlaków zrywkowych. Choć P. Ellis i inni (2016) twierdzą, że 2 lata to górny limit czasowy, po którym nieużytkowana droga leśna na Borneo staje się niewidoczna dla promieni lasera, to m.in. na podstawie przeprowadzonych badań z dużym stopniem pewności można stwierdzić, że takie tempo jest nieosiągalne w lasach strefy umiarkowanej.

Trwałość wcięć drogowych potwierdzają również wyniki badań przeprowadzonych w lasach karpaccich, które początkowo były intensywnie eksploatowane, zanim zostały włączone do parku narodowego i zamknięte dla ruchu kołowego kilkadziesiąt lat temu (Wolski, 2007). Niemniej, stosunkowo dobrze widoczne na NMT różnice między przekrojami poprzecznymi starych, nieużywanych dróg (w kształcie litery U lub V) a współczesnymi szlakami zrywkowymi z widocznymi koleinami, dają podstawę by sądzić, że większość dróg rzeczywiście została zaklasyfikowana prawidłowo. Wreszcie, uzyskana wysoka gęstość dróg może również wynikać ze specyficznych właściwości fliszu karpacciego. Obserwacje terenowe pokazują bowiem, że w plastycznym i podatnym na kompaktację podłożu nawet pojedynczy przejazd skidera może czasami pozostawić wykrywalne dla skanera koleiny. Ta właściwość fliszu między innymi właśnie skutkuje nagminnym występowaniem zjawiska dróg równoległych na terenie badań.

Warto także wspomnieć, że porównanie sieci drogowych z danych LiDAR i pomiarów terenowych wykazało, że łączna długość dróg z inwentaryzacji terenowej była 2,6 razy większa od tej opracowanej na bazie danych LiDAR (Affek i inni, 2017). Różnica ta jednoznacznie wskazuje, że rzeczywiste gęstości dróg leśnych są *de facto* jeszcze wyższe, niż przedstawione szacunki z danych LiDAR. W konsekwencji, podobnej tendencji można się spodziewać dla wyników szacowania efektu brzegowego powodowanego przez drogi, choć faktyczny jego zasięg zależy od specyficznych cech organizmów będących obiektem analiz, cech środowiska abiotycznego oraz natężenia oddziaływań antropogenicznych. Czynnikiem limitującym wnioskowanie może być również fakt, że granice oddziaływań leśnych, w których prowadzono analizy zasięgu potencjalnego efektu brzegowego, są tworami sztucznymi, cechującymi się sztucznie nadanym kształtem i wielkością, jednak i ta okoliczność stanowi przesłankę jeszcze większego niż szacowane natężenia efektu brzegowego.

O ile przeprowadzone w niniejszym opracowaniu badania sieci dróg leśnych dają możliwość oszacowania powierzchni gleby, która charakteryzuje się naruszoną w wyniku prac leśnych strukturą (4,6–5,4% lasów PGL LP), to już na ich podstawie nie ma możliwości nawet przybliżonego oszacowania wzrostu natężenia procesów erozyjnych czy wielkości przepływów szczytowych. Autorom nie są znane badania, które choćby dla niewielkiego, testowego wycinka polskich Karpat wiarygodnie szacowałyby wpływ pozyskiwania drewna na reżim hydrologiczny czy natężenie erozji wodnej i ruchów masowych. Do takich badań bowiem potrzebne są wieloletnie i wszechstronne obserwacje zlewni bliźniaczych (tzw. *paired watershed studies*) ze z góry założonym planem cięć eksperymentalnych.

Nie ma też możliwości przełożenia wprost wartości uzyskanych w innych częściach świata (w tym w najlepiej pod tym względem zbadanych Górach Kaskadowych) na Karpaty, gdyż mimo pewnych podobieństw zarówno środowisko przyrodnicze, jak i prowadzona gospodarka leśna, zbytnio się między poszczególnymi regionami różnią. Można jedynie sformułować dość ogólne przypuszczenia wynikające z zestawienia danych literaturowych (por. Affek, 2019) z otrzymaną bardzo wysoką gęstością dróg leśnych. Tak rozumując moż-

na spodziewać się także na badanym terenie co najmniej kilkukrotnie większej aktywności osuwisk i ich powierzchni także kilkukrotnie większej w pobliżu dróg leśnych w stosunku do terenów położonych z dala od nich. Na tej podstawie można wyciągnąć wniosek, że gęsta sieć dróg leśnych w Karpatach istotnie przyczynia się do zwiększenia powierzchni i intensywności ruchów masowych. Warto przy tym zaznaczyć, że Karpaty zbudowane są ze skał fliszowych, które cechuje niska nośność i zwiększona podatność na erozję, a szczególnie na osuwanie się ziemi (Gołąb i Plewniak, 2014). Występująca tutaj gęsta sieć potoków wcinających się głęboko w stok jest również ważnym czynnikiem zwiększającym erozję (Soja, 2002).

Podobnie, na podstawie przeglądu literatury można spodziewać się, że tak gęsta sieć dróg leśnych może przyczyniać się do zwiększenia natężenia przepływów maksymalnych (tzw. powodzi błyskawicznych) nawet o kilkanaście procent. Również w związku z tym, że w stromym terenie z dróg leśnych i szlaków zrywkowych wynoszone są największe ilości osadów na jednostkę powierzchni w zlewni (co najmniej trzy rzędy wielkości więcej niż w sąsiadującym drzewostanie), można wnioskować, że materiał wynoszony z gęstej sieci dróg leśnych w Karpatach stanowi znaczny odsetek całościowej objętości osadów w karpackim transporcie fluwialnym.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania dróg leśnych w Karpatach dają podstawę do sformułowania następujących wniosków:

1. technologia lotniczego skanowania laserowego jest odpowiednim narzędziem do mapowania sieci dróg leśnych i szlaków zrywkowych pod koronami drzew,
2. gęstość dróg leśnych w Karpatach (łącznie ze szlakami zrywkowymi) należy do najwyższych notowanych w literaturze,
3. gęstość dróg leśnych nie ma związku z nachyleniem terenu, ale ta sama gęstość dróg w stromym terenie ma znacznie większy wpływ na erozję i transport osadów niż w terenie łagodnym,
4. w wyniku stosowanej naziemnej zrywki drewna ok. 5% analizowanego obszaru ma naruszoną strukturę gleby, a przeważająca część powierzchni analizowanych oddziałów leśnych narażona jest na skutki efektu brzegowego powodowanego przez drogi leśne i szlaki zrywkowe,
5. aktualnie stosowane metody zrywki w Karpatach są dalekie od optymalnych i nie spełniają wymogów gospodarki zrównoważonej.

Na podstawie przeglądu dostępnych planów urządzenia lasu dla karpackich nadleśnictw można stwierdzić, że planowane zabiegi pielęgnacyjne są rozproszone i obejmują co roku duże obszary. Jest to bez wątpienia sytuacja korzystniejsza niż stosowanie rębni zupełnej, jednak w efekcie takich działań żaden większy obszar przez dłuższy czas nie jest wolny od cięć i związanego z nimi ruchu pojazdów. Rębnia stopniowa gniazdowa udoskonalona (IVd) zaplanowana na ponad 35,6% powierzchni leśnej w bieżącej dekadzie pozwala na różne rodzaje cięć, pozostawiając zarządzającemu lasem dużą elastyczność w zakresie sposobów reagowania na potrzeby odnowienia drzewostanów. Jest więc szansa, choć z pewnością nie ma gwarancji, że w wyniku prowadzonych zabiegów uzyska się drzewostan o zróżnicowanej strukturze wiekowej i przestrzennej (Haze, 2012). Stanie się

to jednak kosztem regularnej penetracji ekosystemów leśnych przez ciężki sprzęt i wszystkich konsekwencji z tym związanych opisanych szczegółowo w tym artykule. Jednym z możliwych rozwiązań prowadzących do bardziej zrównoważonej gospodarki zasobami leśnymi w górach jest zastąpienie zrywki naziemnej środowiskooszczędnyimi kolejkami linowymi.

---

Badania zostały sfinansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki (grant nr 2012/05/N/ST10/03520) i WWF Polska za pośrednictwem Fundacji Dziedzictwo Przyrodnicze.

## Piśmiennictwo

- Affek A., 2014, *Lotnicze skanowanie laserowe (ALS) w modelowaniu rzeźby terenu – nowe możliwości i pułapki*, Problemy Ekologii Krajobrazu, 38, s. 217–236.
- Affek A., 2016, *Past Carpathian landscape recorded in the microtopography*, Geographia Polonica, 89, s. 415–424.
- Affek A., 2019, *Wpływ gospodarki leśnej na terenach górskich na wybrane elementy środowiska – aktualny stan wiedzy*, Przegląd Geograficzny, 91, 1, s. 63–81
- Affek A., Zachwatowicz M., Sosnowska A., Gerlée A., Kiszka K., 2017, *Impacts of modern mechanised skidding on the natural and cultural heritage of the Polish Carpathian Mountains*, Forest Ecology and Management, 405, s. 391–403.
- Anfodillo T., Carrer M., Valle E., Giacoma E., Lamedica S., Pettenella D., 2008, *Programme Carpathian Project: Current State of Forest Resources in the Carpathians*, Universita Delgi Studi Di Padova, Padova.
- Antończyk S., Dzikowski J., 1984, *Tabele optymalnych wskaźników gęstości dróg na powierzchni leśnej*, Sylwan, 128, s. 23–34.
- Avon C., Dumas Y., Bergès L., 2013, *Management practices increase the impact of roads on plant communities in forests*, Biological Conservation, 159, s. 24–31.
- Azizi Z., Najafi A., Sadeghian S., 2014, *Forest road detection using LiDAR data*, Journal of Forestry Research, 25, s. 975–980.
- Bank Danych o Lasach, 2018, <https://www.bdl.lasy.gov.pl> (03.03.2019).
- Bygdén G., Eliasson L., Wästerlund I., 2004, *Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks*, Journal of Terramechanics, 40, s. 179–190.
- Cambi M., Certini G., Neri F., Marchi E., 2015, *The impact of heavy traffic on forest soils: A review*, Forest Ecology and Management, 338, s. 124–138.
- Caterpillar, 2017, *Industry solutions: forestry*, [http://www.cat.com/en\\_GB/by-industry/forestry.html](http://www.cat.com/en_GB/by-industry/forestry.html) (03.03.2019).
- CIA, 2017, *The World Factbook*, <https://www.cia.gov/library/publications/resources/the-world-factbook/rankorder/2085rank.html> (03.03.2019).
- Coffin A., 2007, *From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads*, Journal of Transport Geography, 15, s. 396–406.
- Czerniak A. (red.), 2013, *Wytyczne prowadzenia robót drogowych w lasach*, Ośrodek Rozwoju-Wdrożeniowy Lasów Państwowych w Bedoniu, Bedoń.



- d'Oliveira M.V.N., Reutebuch S.E., McGaughey R.J., Andersen H.E., 2012, *Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon*, Remote Sensing of Environment, 124, s. 479–491.
- Dudek T., 2010, *Badanie wydajności technologii zrywki drewna w lasach górskich. Część 1. Drzewostany przedrębne*, Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna, 5.
- Dudek T., Sosnowski J., 2011, *Ocena środowiskooszczędności wybranych technologii zrywki drewna w lasach górskich*, Sylwan, 155, s. 413–420.
- Dzikowski J., Szarlłowicz A., Burzyński S., Rajsman M., Satoła J., Wiązowski Z., 2006, *Drugi leśne: poradnik techniczny*, Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa – Bedoń.
- Eberhardt P., 2011, *Political Migrations on Polish Territories (1939–1950)*, IGIPIZ PAN, Warszawa.
- Ellis P., Griscom B., Walker W., Gonçalves F., Cormier T., 2016, *Mapping selective logging impacts in Borneo with GPS and airborne lidar*, Forest Ecology and Management, 365, s. 184–196.
- Encyklopedia Leśna, 2018, [https://www.encyklopedialesna.pl/\(03.03.2019\)](https://www.encyklopedialesna.pl/(03.03.2019)).
- ePoradnik RĘBNIE, 2003, <http://rebnie.wl.sggw.pl> (03.03.2019).
- Fastnacht A., 1962, *Osadnictwo ziemi sanockiej w latach 1340–1650*, Ossolineum, Wrocław.
- Ferraz A., Mallet C., Chehata N., 2016, *Large-scale road detection in forested mountainous areas using airborne topographic lidar data*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 112, s. 23–36.
- FOREST EUROPE, 2015, *State of Europe's Forests 2015*, <https://www.foresteurope.org/docs/full-soef2015.pdf> (03.03.2019).
- Forman R.T.T., Alexander L.E., 1998, *Roads and Their Major Ecological Effects*, Annual Review of Ecology Evolution and Systematics, 29, s. 207–231.
- Gil W., 2007, *Badania porównawcze ciągników rolniczych jako środków zrywkowych w wybranych zakładach usług leśnych*, Wydawnictwo AR, Kraków.
- Gil W., Motyka J., 2014, *Systemy linowe do zrywki drewna – wczoraj i dziś*, Studia i Materiały CEPL w Rogowie, 39, s. 20–27.
- Gołąb J., Plewniak J., 2014, *Aktualne uwarunkowania kształtowania sieci dróg leśnych w górach*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 2, s. 195–206.
- Haze M. (red.), 2012, *Zasady hodowli lasu*, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Heinimann H., 2007, *Forest operations engineering and management – the ways behind and ahead of a scientific discipline*, Croatian Journal of Forest Engineering, 28, s. 107–121.
- Ibisch P.L., Hoffmann M.T., Kreft S., Pe'er G., Kati V., Biber-Freudenberger L., DellaSala D.A., Vale M.M., Hobson P.R., Selva N., 2016, *A global map of roadless areas and their conservation status*, Science, 354.
- IBL, 2015, *Stan zdrowotny lasów Polski w 2014 roku*, Sękocin Stary.
- Jansson K., Johansson J., 1998, *Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine: a case study on a silt loam in Sweden*, Forestry, 71, s. 57–66.
- John Deere, 2017, *Skidders*, [https://www.deere.co.uk/en/skidders/\(03.03.2019\)](https://www.deere.co.uk/en/skidders/(03.03.2019)).
- Kocel J., 2005, *Prywatny sektor usług leśnych w latach 1999–2003*, Leśne Prace Badawcze, s. 17–34.
- Kozak J., Kaim D. (red.), 2016, *FORECOM: podręcznik użytkownika*, Kraków, <http://www.geo.uj.edu.pl/publikacje,000222> (03.03.2019).
- Kozioł C., 2007, *National Policy on Forests in Poland and forest management in the Carpathians, [w:] First Meeting of the Carpathian Convention Working Group on SARD and Forestry 9–10 July 2007*, VIC, Vienna.
- Kucharzyk S., 2015, *Dawne oraz współczesne drogi leśne i szlaki zrywkowe w waloryzacji naturalności ekosystemów leśnych w Bieszczadzkiem Parku Narodowym*, Roczniki Bieszczadzkie, 23, s. 95–109.

- Leibundgut H., 2007, *Naturalne odnowienie lasu*, PWRiL, Warszawa.
- Leitold V., Keller M., Morton D.C., Cook B.D., Shimabukuro Y.E., 2015, *Airborne lidar-based estimates of tropical forest structure in complex terrain: opportunities and trade-offs for REDD+*, Carbon Balance Management, 10, 3.
- LKT, 2017, *Produkty*, <http://www.lktrstena.sk/produkty> (03.03.2019).
- Marszałek E., 2011, *Gospodarka leśna w karpackiej części Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Krośnie i jej wpływ na ochronę przyrody*, Roczniki Bieszczadzkie, 19, s. 59–75.
- Maryński A., 1963, *Współczesne migracje ludności w południowej części pogranicza polsko-radzieckiego i ich wpływ na rozmieszczenie sił wytwórczych tego obszaru*, Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Krakowie, Kraków.
- Matuszkiewicz J.M., 2008, *Potencjalna roślinność naturalna Polski*, [https://www.igipz.pan.pl/tl\\_files/igipz/ZGiK/opracowania/roslinnosc\\_potencjalna/prn\\_opracowanie.pdf](https://www.igipz.pan.pl/tl_files/igipz/ZGiK/opracowania/roslinnosc_potencjalna/prn_opracowanie.pdf) (03.03.2019).
- PGL LP, 2006, *Drogi leśne: poradnik techniczny*, Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa – Bedoń.
- PGL LP, 2014, *Forests in Poland 2013*, <http://www.lasy.gov.pl/publikacje/in-english/forests-in-poland-2013> (03.03.2019).
- PGL LP, 2015, *Instrukcja wyznaczania docelowej sieci drogowej nadleśnictwa*, Ośrodek Rozwoju-Wdrożeniowy Lasów Państwowych w Bedoniu, Bedoń.
- Piekutin J., Kłapeć B., Orzechowski M., 2015, *Gęstość sieci dróg leśnych – ekonomiczny punkt widzenia*, Sylwan, 159, 3, s. 179–187.
- Quackenbush L.J., 2004, *A review of techniques for extracting linear features from imagery*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70, s. 1383–1392.
- Rist L., Shanley P., Sunderland T., Sheil D., Ndoye O., Liswanti N., Tieguhong J., 2012, *The impacts of selective logging on non-timber forest products of livelihood importance*, Forest Ecology and Management, 268, s. 57–69.
- Riutta T., Slade E., Morecroft M., Bebbler D., Malhi Y., 2014, *Living on the edge: Quantifying the structure of a fragmented forest landscape in England*, Landscape Ecology, 29, 6, s. 949–961.
- Rogan J.E., Lacher T.E., 2018, *Impacts of Habitat Loss and Fragmentation on Terrestrial Biodiversity, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier.
- Roman A., Ursu T.M., Fărcaș S., Lăzărescu V.A., Opreanu C.H., 2017, *An integrated airborne laser scanning approach to forest management and cultural heritage issues: a case study at Porolissum, Romania*, Annals of Forest Research, 60, s. 127–143.
- Sadowski J., Moskalić T., Zastocki D., 2016, *Ochrona gleby leśnej przy pozyskiwaniu i zrywce drewna*, Studia i Materiały CEPL w Rogowie, 46, s. 172–180.
- Schramm W., 1958, *Lasy i zwierzyzna Gór Sanockich*, wyd. II, Olszanica.
- Seixas F., McDonald T., 1997, *Soil compaction effects of forwarding and its relationship with 6- and 8-wheel drive machines* Forest Products Journal, 47, s. 46–52.
- Shrestha S.P., Lanford B.L., Rummer R., Dubois M., 2008, *Soil disturbances from horse/mule logging operations coupled with machines in the Southern United States*, International Journal of Forest Engineering, 19, s. 17–23.
- Sittler B., Weinacker H., Gültlinger M., Koupaliantz L., 2007, *The potential of Lidar in assessing elements of cultural heritage hidden under forests* [w:] Z. Bochenek (red.), *New Developments and Challenges in Remote Sensing*, Millpress, Rotterdam, s. 539–548.
- Soja M., 2012, *Demographic development and changes of land-use in the Beskid Niski Mountains, Poland, between 1869 and 2009*, Bulletin of Geography. Socio-economic Series, 18, s. 109–116.

- Soja R., 2002. *Hydrologiczne aspekty antropopresji w Polskich Karpatach*, Prace Geograficzne, 186, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Suwała M. (red.), 2000, *Poradnik użytkowania lasu dla leśników praktyków*, Wydawnictwo Świat, Warszawa.
- Trombulak S.C., Frissell C.A., 2002, *Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities*, Conservation Biology, 14, s. 18–30.
- UNEP, 2007, *Carpathians Environment Outlook*, United Nations Environment Programme, Geneva.
- Ustawa z dnia 28 września 1991 r. o lasach. Dz.U. 1991 nr 101 poz. 444.
- White R.A., Dietterick B.C., Mastin T., Strohmman R., 2010, *Forest roads mapped using LiDAR in steep forested terrain*, Remote Sensing, 2, s. 1120–1141.
- Wolski J., 2007, *Przekształcenia krajobrazu wiejskiego Bieszczadów Wysokich w ciągu ostatnich 150 lat*, Prace Geograficzne, 214, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Zarządzenie nr 28 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 27 kwietnia 2018 r. w sprawie wprowadzenia „Instrukcji wyznaczania docelowej sieci drogowej nadleśnictwa”, Biuletyn Informacyjny Lasów Państwowych 6, 306, s. 5–11.
- Zawadzki S. (red.), 1999, *Gleboznawstwo*, PWRiL, Warszawa.

## Summary

Although ground mechanised skidding is an economically efficient method of timber extraction, it brings several negative consequences to the natural environment. According to the literature, out of all the different forest operations, it is timber extraction (skidding) and the associated presence of forest roads and skid trails that contribute most to soil compaction, increased erosion, surface runoff and flash floods (see Affek 2019 for review). The objective of our study was thus to assess the size of environmental impacts of logging in the eastern part of the Polish Carpathians with more accuracy and a broader scope than has been achieved before (the results of the first phase of this work being published in *Forest Ecology and Management*; Affek et al., 2017). To this end, we took twice as large a sample of forest divisions and calculated the density of forest roads and its links to topography. We also estimated the range of any potential edge effect caused by forest roads, and supplemented our analysis with a description of the methods and intensity of timber harvesting in the study area.

Within the 15 Forest Districts analysed (comprising 2639 km<sup>2</sup> of forested area), we randomly selected 120 Forest divisions (covering 48 km<sup>2</sup> in total) for analysis. We used the national LiDAR dataset of countrywide coverage (point density of 4 per m<sup>2</sup>) to detect forest roads and skid trails. The total length, mean density, mean and maximum inclination, and mean coverage of forest roads were calculated, while the potential combined edge effect of these was also determined. These data were linked with official forest spatial data regarding forest management practices, forest types, age of stands and planned cuts, as well as relevant policy documents, reports and scientific literature.

We demonstrated that the mean density of forest roads in the 120 forest divisions selected is 12.48 km/km<sup>2</sup>, including paved and unpaved roads and skid trails. The estimated density for the eastern part of the Polish Carpathians is in the range 11.43–13.53 km/km<sup>2</sup> (with 95% probability). The obtained confidence interval was lower by 35% when set against the one derived from the analysis of 60 Forest Districts. The length of the entire road

network was an estimated 30166–35706 km, equating to some 4.6–5.4% of the forest area being covered by roads. Maximum road inclination in the sampled forest divisions ranges from 9 to 38°, while about 8% of forest roads lead through slopes of more than 20°. Ground skidding by means of skidders, forwarders and agricultural tractors adapted for logging is the most common method of timber extraction in the Polish Carpathians. The total volume of the harvest in the analysed 15 Forest Districts in 2016 was of a planned 1,230,153 m<sup>3</sup>, equating to an average harvest of 4.62 m<sup>3</sup>/ha. The most common types of treatment for the current 10-year period are: late and early thinning (38.5% of the area), gradual thinning improved (35.6%) and early and late cleaning (7%).

We concluded that the LiDAR-assessed density of Carpathian logging roads (including skid trails) is among the highest reported in the literature, which translates into disturbed soil structure over approx. 5% of the entire area analysed. The density of forest roads is not related to slope steepness, but the same density of roads in steep terrain obviously has a far greater impact on erosion and sediment transport than is the case in more gentle terrain. The selective harvesting method used today in the Carpathians requires frequent entry of heavy equipment (skidders, forwarders or tractors) into large forest areas, hence skidding now appears to be a bottleneck for sustainable forest management in the Carpathians. One of the possible solutions leading to a more sustainable management of forest resources in the mountains is thus the replacement of ground skidding with environment-friendly cable cars.