



Stan i prawidłowości wykształcenia dróg leśnych w Tatrzańskim Parku Narodowym i jego otoczeniu

Condition and formation regularities characterising forest roads in Poland's Tatra National Park and its surroundings

Agnieszka Wojtaszowicz¹  Joanna Fidelus-Orzechowska² 

¹ Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN
ul. św. Jana 22, 31-018 Kraków

² Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie

Instytut Biologii i Nauk o Ziemi

ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków

a.wojtaszowicz@twarda.pan.pl (autor korespondencyjny) • joanna.fidelus-orzechowska@up.krakow.pl

Zarys treści. Głównym celem artykułu było wykazanie prawidłowości wykształcenia wybranych dróg leśnych w Tatrzańskim Parku Narodowym oraz na obszarze graniczącym z TPN. Kartowanie geomorfologiczne obszaru badań przeprowadzono w drugiej połowie 2022 r. Pod uwagę wzięto drogi leśne użytkowane w okresie prowadzenia badań, jak również te, na których zaprzestano prac zrywkowych. Z badań wynika, że procesem mającym największy wpływ na powstawanie wcięć drogowych i rozwój rozcięć w obrębie drogi jest spłukiwanie. Największe nasilenie rozwoju form erozyjnych w obrębie badanych dróg leśnych i szlaków zrywkowych obserwowano w obrębie odcinków wytyczonych na stokach o nachyleniu powyżej 10°, przebiegających zgodnie ze spadkiem stoku. Ważnym aspektem jest projektowanie i budowa drogi z uwzględnieniem warunków naturalnych obszaru oraz odpowiednie zabezpieczenie dróg nieużytkowanych w celu ograniczenia erozyjnej działalności wody.

Słowa kluczowe: gospodarka leśna, wpływ człowieka, drogi leśne, przekształcenia rzeźby, Tatrzy.

Keywords: forest management, human impact, forest roads, transformation of relief, Tatra Mountains, Poland.

Wstęp

W artykule przedstawione zostały przekształcenia rzeźby terenu w obrębie wybranych dróg leśnych zlokalizowanych w Tatrzańskim Parku Narodowym i w jego otoczeniu. Drogi leśne wraz ze szlakami zrywkowymi tworzą sieć komunikacyjną w lasach (Plewniak i Gołąb, 2017). Zgodnie z Ustawą o lasach (1991) są to drogi na terenach leśnych, które nie są uznawane za drogi publiczne. Służą one głównie do transportu drewna, dojazdu pracowników leśnych i służby leśnej. Sosnowski (1996, 2002) dodaje, że są to pasy terenu w postaci trwałych budowli inżynierskich, przeznaczone głównie do wywozu drewna. Gucinski et al. (2001) podkreślają rolę dróg leśnych w prowadzeniu działań ochronnych, m.in. w gaszeniu pożarów, dzięki łatwiejszej dostępności oraz tworzeniu granic zasięgu ognia.

Dotychczasowe badania presji antropogenicznej w Tatrach ukierunkowane były głównie na zmiany geomorfologiczne w obrębie stoków użytkowanych turystycznie (Skawiński, 1993; Barančok i Varsavova, 1996; Krusiec, 1996; Czochoński i Szydarowski, 2000; Górczyca, 2000; Górczyca i Krzemień, 2002, 2005, 2006a, b, 2009, 2010; Rączkowska i Kozłowska,

2002, 2010; Hreško et al., 2009; Fidelus-Orzechowska et al., 2017, 2021). Badania dróg leśnych w Tatrach prowadzono w niewielkim zakresie (Skawiński, 1996; Rojan, 2015; Fidelus-Orzechowska, 2018, 2020, 2023). Dlatego niniejsze dane pozwalają szerzej spojrzeć na prawidłowości ich wykształcenia. Znacznie szersze badania w zakresie dróg leśnych i polnych prowadzone były w Sudetach (Parzóch, 2002; Kasprzak, 2005; Dąbek et al., 2014), na Pogórzu Ciężkowickim (Kroczak, 2010; Kroczak i Soja, 2011; Kroczak i Bryndal, 2017; Bryndal i Kroczak, 2019), w Gorcach (Wałydkowski i Krzemień, 2013) czy w Beskidzie Śląskim (Łukasik et al., 2016).

Funkcjonowanie dróg leśnych ściśle zależy od uwarunkowań naturalnych oraz intensywności oddziaływania antropogenicznego (Reid i Dunne, 1984; Yu et al., 2024a, b). Niezwykle istotne są również zabiegi przeciwoerozyjne, które znacząco przyczyniają się do ograniczania skutków procesów erozyjnych (Elliot et al., 2023). Drogi leśne i gospodarce na obszarach górskich są narażone na liczne przekształcenia, szczególnie podczas ekstremalnych zdarzeń hydrometeorologicznych. Efektem takich zdarzeń może być rozwój głębokich rynien erozyjnych, uaktywnienie ruchów masowych, a w konsekwencji wyłączenie drogi z użytkowania (Nyssen et al., 2002; Gorczyca, 2008; Gorczyca i Krzemień, 2008; Sidle et al., 2011, 2014; Wang et al., 2022; Fidelus-Orzechowska et al., 2023). Niezbędne są badania w różnych skalach przestrzennych i czasowych, które pozwalają szerzej spojrzeć na prawidłowości przekształceń rzeźby na obszarach, gdzie prowadzona jest gospodarka leśna (Ramos-Scharrón i MacDonald, 2007; Soulis et al., 2015; Kastridis, 2020; Yu et al., 2024a, b). Poszerzenie wiedzy w tym zakresie jest niezwykle istotne, gdyż funkcjonowanie i postępujące przekształcenia rzeźby mogą zachodzić nawet po zaprzestaniu użytkowania dróg leśnych (Fidelus-Orzechowska et al., 2023). W aspekcie wzrastającej roli ekstremalnych zdarzeń opadowych kluczowe staje się wytyczanie i utrzymywanie dróg zgodnie z zasadą *Best Management Practices*, tak aby nie doszło do zmniejszania bioróżnorodności (Wemple et al., 2018). Staje się to szczególnie istotne na obszarach chronionych, gdzie jednym z zasadniczych zadań jest zachowanie równowagi pomiędzy użytkowaniem antropogenicznym a naturalnym funkcjonowaniem (Şakar et al., 2022).

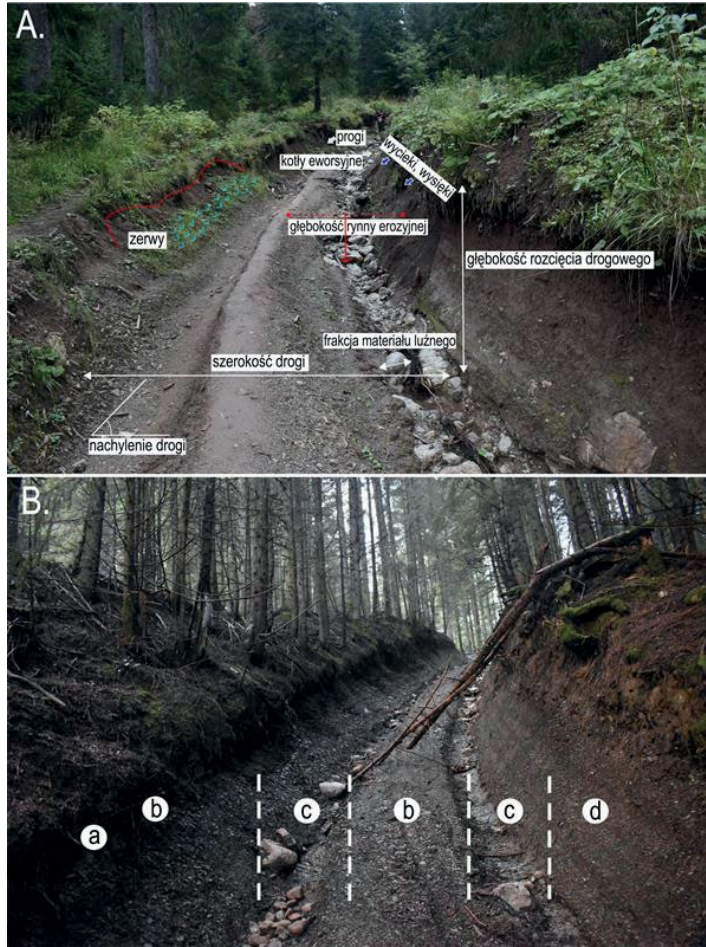
Celem badań było wykazanie prawidłowości wykształcenia wybranych dróg leśnych w Tatrzańskim Parku Narodowym oraz na obszarze graniczącym z TPN.

Materiały i metody

Badania terenowe zostały przeprowadzone w sierpniu i wrześniu 2022 r. Analizie poddanych zostało 7 dróg leśnych, położonych w terenie Wspólnoty Leśnej Uprawnionych 8 Wsi w Witowie. Wyboru dróg dokonano ze względu na status ich użytkowania. Wybrano drogi zarówno aktualnie użytkowane (droga w Wielkich Koryciskach, Dolinie Długiej, Wyżniej Chochołowskiej i w rejonie Molkówki) lub częściowo wykorzystywane (drogi w Jarońcu i Dolinie Huciańskiej), jak również wyłączone z prac leśnych (droga w Dolinie Lejowej). Wybór został oparty na obserwacjach terenowych oraz przeglądzie dostępnej literatury (Fidelus-Orzechowska et al., 2018). W celu porównania różnic w użytkowaniu dróg leśnych w obrębie TPN i w jego otoczeniu, przeanalizowano również drogę poza granicami Parku, w rejonie Molkówki.

Podczas badań terenowych wykorzystano metodę kartowania geomorfologicznego. Wyznaczone do badań drogi leśne o łącznej długości 11 km zostały podzielone na 127 od-

ciników. Głównymi kryteriami wydzielenia odcinków dróg była liczba rozcięć i rynien erozyjnych występujących w dnie drogi oraz znaczne zmiany nachylenia terenu. W ramach kartowania zebrano informacje na temat parametrów morfometrycznych, położenia morfologicznego, rodzaju podłoża, występujących form erozyjnych i akumulacyjnych, takich jak rozcięcia i rynny erozyjne, progi, kotły eworsyjne, zerwy, nisze i stożki napływowe. Ponadto identyfikowano również wycieki i wysięki w obrębie rozcięć drogowych, będące efektem nacięcia i przerwania дренаżu wód śródpokrywowych (ryc. 1A, B). Wszystkie



Ryc. 1. A – parametry morfometryczne określone w ramach kartowania geomorfologicznego oraz przykłady form na analizowanych drogach, B – wybrane strefy morfodynamiczne w obrębie badanych dróg zrywkowych i sposób ich modelowania: a – działalność lodu włóknistego, b – spltukiwanie rozproszone, c – spltukiwanie linijne oraz przekształcanie dna drogi wskutek transportu pni drzew, d – modelowanie podcięcia drogowego w wyniku transportu pni drzew (fot. M. Wojtaszowicz)

A – morphometric parameters determined by geomorphological mapping and examples of forms on the analysed roads, B – selected morphodynamic zones within the studied skid roads and ways in which they were modelled: a – action of fibrous ice, b – diffuse flushing, c – linear flushing and road-bed transformation due to the transport of logs, d – modelling of road undercutting in connection with the transport of logs (fot. M. Wojtaszowicz)

zebrane dane zostały zestawione w zmodyfikowanym formularzu terenowym opracowanym w Zakładzie Geomorfologii UJ oraz używanym w licznych pracach ukierunkowanych na poznanie przekształceń rzeźby w obrębie dróg i ścieżek turystycznych (m.in. [Gorczyca i Krzemień, 2010](#); [Fidelus-Orzechowska et al., 2017](#)). Dla każdego z wyznaczonych odcinków dróg wykonano dokumentację fotograficzną. Punkty początkowe i końcowe odcinków drogi oraz dokładny ich przebieg oznaczono w terenie za pomocą urządzenia GPS (Garmin 64s). Wartości nachyleń każdego z fragmentów drogi określono przy użyciu klizymetru. Pozyskane dane wektorowe opracowano przy użyciu oprogramowania QGIS.

Obszar badań

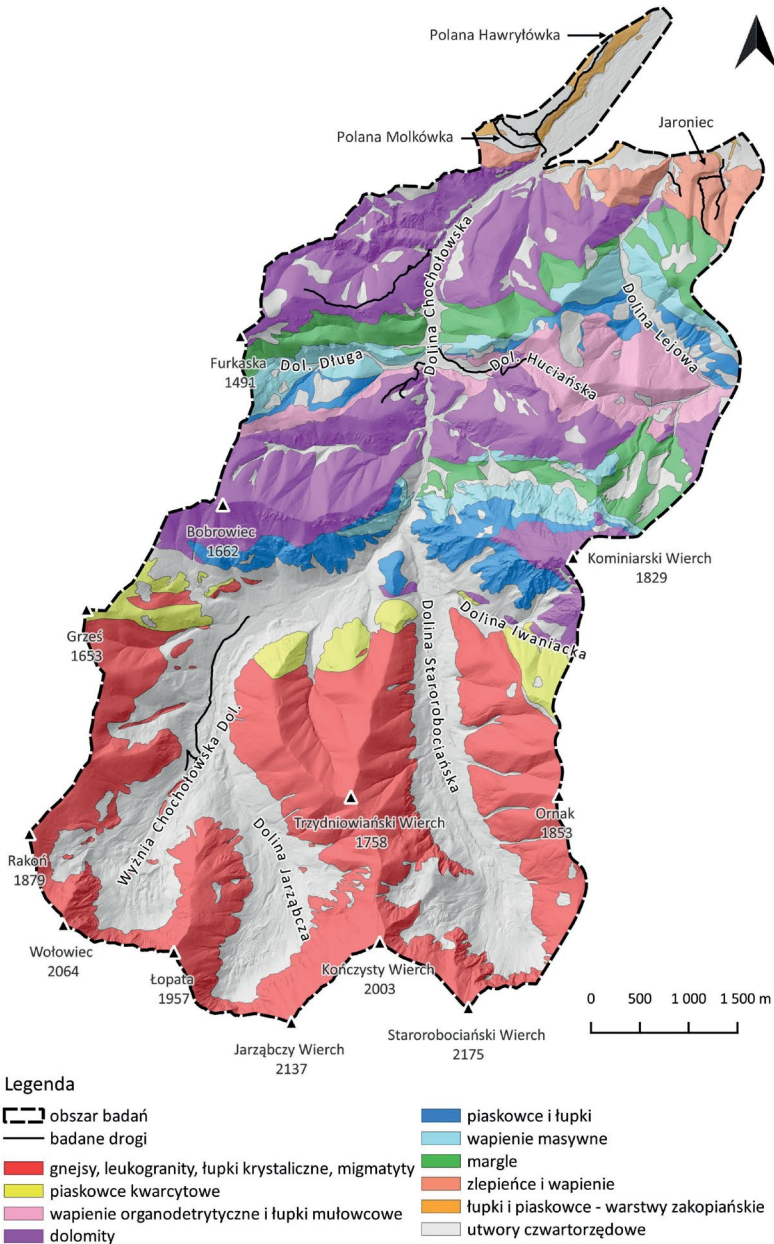
Analizowane drogi leśne zlokalizowane są w obrębie kilku jednostek tektonicznych. Są to od północy: dwie płaszczowiny regłowe (górną i dolną), płaszczowina wierchowa, pokrywa osadowa trzonu krystalicznego oraz trzon krystaliczny Tatr Zachodnich ([Klimaszewski, 1988](#); [Passendorfer, 1996](#)). Drogi leśne Jarońca i Doliny Lejowej zlokalizowane zostały na podłożu z przewagą zlepieńców, wapieni i piaskowców. Rejon polany Molkówka, położony poza TPN, stanowią osady wodno-lodowcowe, torfy oraz warstwy fliszu podhalańskiego z soczewami dolomitów żelazistych. Podłoże w dolinie Wielkie Koryciska obejmuje u wylotu warstwy wapieni, natomiast największa część badanej drogi położona jest na stokach oraz grzbiecie, których podłoże stanowią dolomity. Kolejna droga, położona w Dolinie Huciańskiej, przebiega od wylotu po osadach czwartorzędowych, a następnie, na odcinkach stokowych, po warstwach dolomitów oraz łupków mułowcowych. Droga zrywkowa położona w rejonie Doliny Długiej, podobnie w dolnych odcinkach, została wycięta w materiale stożka napływowego. Natomiast odcinki drogi wyżej położone zostały poprowadzone w obrębie łupków oraz dolomitów. Droga prowadząca do Wyżniej Doliny Chochołowskiej przebiega w całości po utworach czwartorzędowych – torfach, materiale akumulacyjnym teras i stożków napływowych oraz glinach i rumoszach morenowych (ryc. 2).

Roczne sumy opadów na stacji Kościelisko-Kiry, położonej w pobliżu badanego obszaru, w latach 2013-2022, sięgały ponad 1100 mm. Najwyższe sumy opadów, przekraczające 1600 mm, odnotowano w latach 2016 i 2017 (dane z IMGW-PIB).

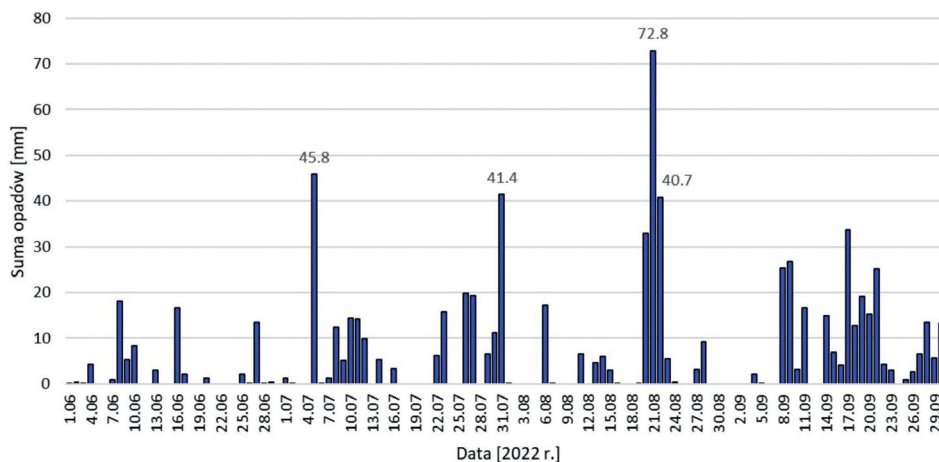
W okresie prowadzenia badań terenowych oraz w okresie poprzedzającym (tj. od czerwca do września 2022 r.) na stacji Polana Chochołowska wystąpiły 73 dni z opadem (ryc. 3). Suma opadu wyniosła w tym czasie 767 mm, co stanowi ponad połowę całkowitej sumy opadu w okresie poprzedzających 12 miesięcy (od października 2021 do września 2022), z czego najwyższa, 255,3 mm, dotyczy września (dane z IMGW-PIB). W podanym czasie można wyróżnić sześć dni, w których sumy dobowe opadów były wyższe niż 30 mm. Wystąpiły również okresy kilkudniowych, ciągłych opadów, które mogą prowadzić do przepejzenia gruntu wodą oraz mieć charakter przygotowujący przed opadem nawalnym i nasilający działanie procesów morfogenetycznych, szczególnie spłukiwania, w obrębie dróg leśnych.

Uwzględniając okres zimowy poprzedzający badania terenowe, na Polanie Chochołowskiej pokrywa śnieżna zalegała przez 144 dni, od 23 listopada do 21 kwietnia, z maksymalnie trzydniowymi przerwami bez pokrywy śnieżnej. W tym czasie wystąpiły 3 maksima przyrostu pokrywy śnieżnej, po których następowało szybkie jej topnienie. Dłuższe zale-

ganie pokrywy śnieżnej wpływa na warunki wilgotnościowe gleby, co przy zwiększonym oddziaływaniu antropogenicznym w obrębie wysoko uwilgotnionych pokryw, może być znaczące dla wielkości powstających tam przekształceń.



Ryc. 2. Obszar badań – budowa geologiczna i położenie analizowanych dróg leśnych
Study area – geological structure and locations of analysed forest roads
 Opracowanie własne na podstawie szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50000 (Piotrowska et al., 2017).



Ryc. 3. Dobowe sumy opadów na stacji Polana Chochołowska w okresie od 1.06.2022 r. do 30.09.2022 r.
Daily precipitation totals at the Polana Chochołowska station in the period from 1.06.2022 to 30.09.2022
 Opracowanie własne na podstawie danych z IMGW-PIB.

Wyniki badań

Prawidłowości wykształcenia badanych dróg leśnych

Na podstawie badań terenowych wyznaczono 75 odcinków stokowych, co stanowi 56% długości wszystkich badanych dróg, 28 położonych w dnach dolin (19%) oraz 24 odcinki grzbietowe (25%). 97% badanych dróg leśnych istnieje na mapie topograficznej w układzie 1992, której opracowanie topograficzne jest z 1997 r.

W rejonie Jarońca droga przebiegała przeważnie po stoku, a odcinek zlokalizowany w dolinie pokrywał się z korytem potoku. Brak prowadzenia prac zrywkowych oraz wkraczająca roślinność w odcinkach drogi zlokalizowanych w górnych częściach stoku (odcinki nr 6, 7, 8) sugerują zaprzestanie jej użytkowania w ostatnich sezonach. Jedynie w dolnych częściach można było zidentyfikować sporadyczne ślady użytkowania. Droga osiągała maksymalną szerokość 6 m na zakrętach, natomiast odcinki nieużytkowane, z roślinnością wkraczającą na strefy zdegradowane, miały mniejszą szerokość (do 2,2 m) oraz płytsze rozcięcie drogowe (ryc. 4E). Najgłębsze wcięcie drogowe – 1,2 m – występowało w odcinku 9 (ryc. 4E), gdzie dodatkowo wykształcone było rozcięcie erozyjne o głębokości 0,6-0,7 m.

Droga w rejonie Doliny Huciańskiej w części dolinnej ma nachylenie od 1° do 7°, a głębokości rozcięć erozyjnych wynosiły średnio 0,1 m. Droga charakteryzowała się też różną głębokością wcinania w teren, przy czym głębokości te były większe w miejscach wzrostu nachylenia i maksymalnie wynosiły 1,2 m (ryc. 4C). Wycieki i wysięki zaobserwowano od 15 do 17 odcinka drogi, gdzie w strefach o większym spadku wykształcone były kotły eworsyjne i odsłaniał się grubszy materiał skalny. Dolne stokowe odcinki drogi nie są już użytkowane, o czym świadczyła wkraczająca roślinność. Nachylenie drogi w tych odcinkach wzrasta maksymalnie do 23°, co przyczynia się do nasilenia erozji liniowej, przez co lokalnie występowały odcinki z odsłoniętym litym skalnym podłożem (odcinek drogi 25). W górnej części stoku, gdzie droga biegnie równolegle do ścieżki turystycznej, lokalnie była ona głęboko wcięta, maksymalnie osiągając 1,9 m. W tym obszarze widoczne były ślady użytkowania

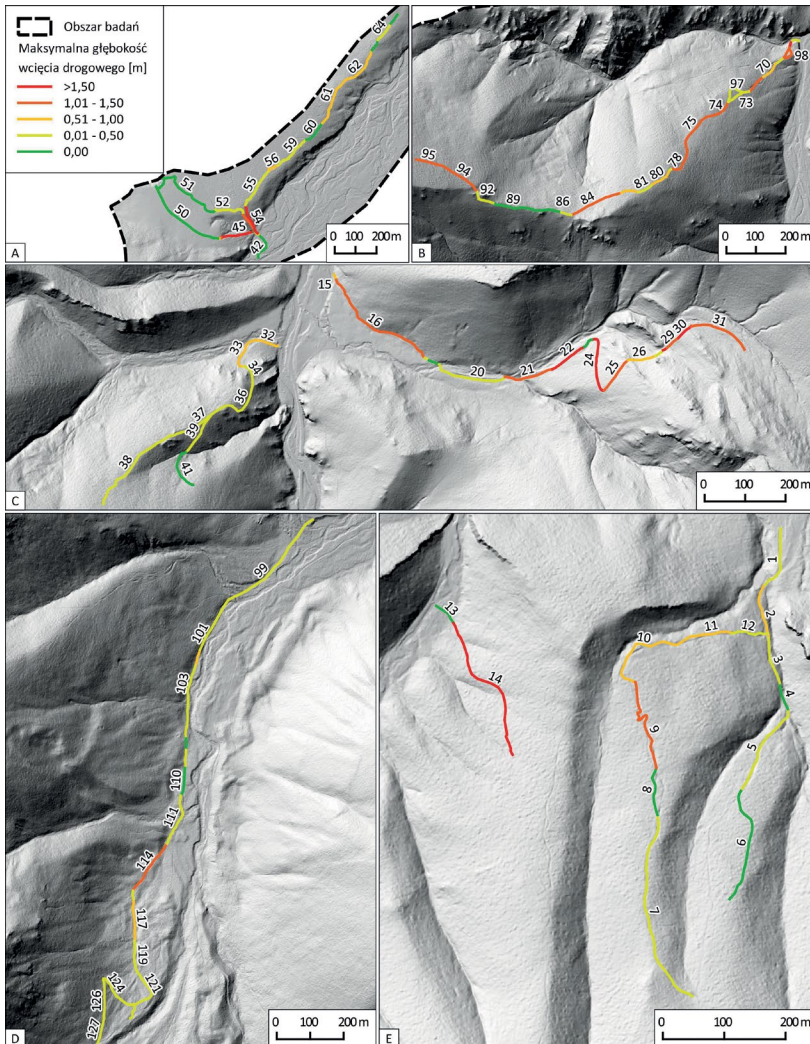
Tabela 1. Parametry badanych dróg leśnych
Parameters of the surveyed forest roads

Parametry \ Obszar			Jarowiec	Dolina Lejowa	Dolina Huciańska	Dolina Długa	Molkówka	Wielkie Koryciska	Wyznia Chochołowska Dolina	RAZEM
długość drogi [m]			1569	295	1380	956	2866	1795	2075	10936
liczba odcinków drogi			12	2	17	10	24	33	29	127
wysokość [m n.p.m.]		min	939	926	1022	973	922	894	1145	–
		max	1128	1005	1205	1159	980	1324	1280	–
długość odcinka [m] mediana		średnia	131	147	81	96	119	54	72	86
		mediana	98	147	42	83	107	34	50	58
szerokość drogi [m]	dolina	max	3,5	8,4	4,0	2,6	3,7	3,5	8,5	8,5
		średnia	3,5	8,4	3,3	2,2	3,1	3,5	3,6	3,6
	stok	max	3,5	3,3	4,0	3,0	2,7	5,0	2,8	5,0
		średnia	3,0	3,3	3,1	2,8	2,1	3,0	2,3	2,8
	grzbiet	max	brak	brak	brak	4,1	5,0	3,8	brak	5,0
		średnia	brak	brak	brak	4,1	2,7	2,8	brak	2,8
	razem	średnia	3,0	5,9	3,2	2,8	2,6	3,0	3,0	3,0
		mediana	3,1	5,9	3,1	2,7	2,5	2,9	2,5	2,8
nachylenie drogi [°]	dolina	max	7	5	12	16	5	5	8	16
		średnia	7	5	6	10	3	5	3	4
	stok	max	17	17	18	21	15	22	12	22
		średnia	11	17	11	15	11	15	7	12
	grzbiet	max	brak	brak	brak	14	12	17	brak	17
		średnia	brak	brak	brak	14	3	8	brak	5
	razem	średnia	11	11	9	14	5	13	5	9
		mediana	11	11	11	15	3	14	5	7
maksymalna głębokość wcięcia drogowego [m]	dolina	max	0	0	1,2	1	0,1	0,5	0,8	1,2
		średnia	0	0	0,6	0,5	0,1	0,5	0,2	0,6
	stok	max	1,2	1,6	3,1	0,6	2,0	2,9	1,1	3,1
		średnia	0,5	1,6	1,3	0,3	1,4	0,9	0,4	0,8
	grzbiet	max	brak	brak	brak	0,3	1	0,5	brak	1
		średnia	brak	brak	brak	0,3	0,3	0,1	brak	0,3
	razem	średnia	0,4	0,8	1,1	0,3	0,5	0,7	0,3	0,6
		mediana	0,4	0,8	1,2	0,3	0,3	0,6	0,3	0,4
głębokość rozcięć [m]		średnia	0,31	2,10	0,37	0,37	0,24	0,26	0,13	0,26
		mediana	0,28	2,10	0,30	0,20	0,16	0,21	0,13	0,20

*brak – nie zidentyfikowano odcinków dróg w danym położeniu morfologicznym

przejawiające się mechanicznym oddziaływaniem pni drzew podczas transportu, a w obrębie rozcięć drogowych zidentyfikowano liczne zerwy oraz pojedyncze wycieki.

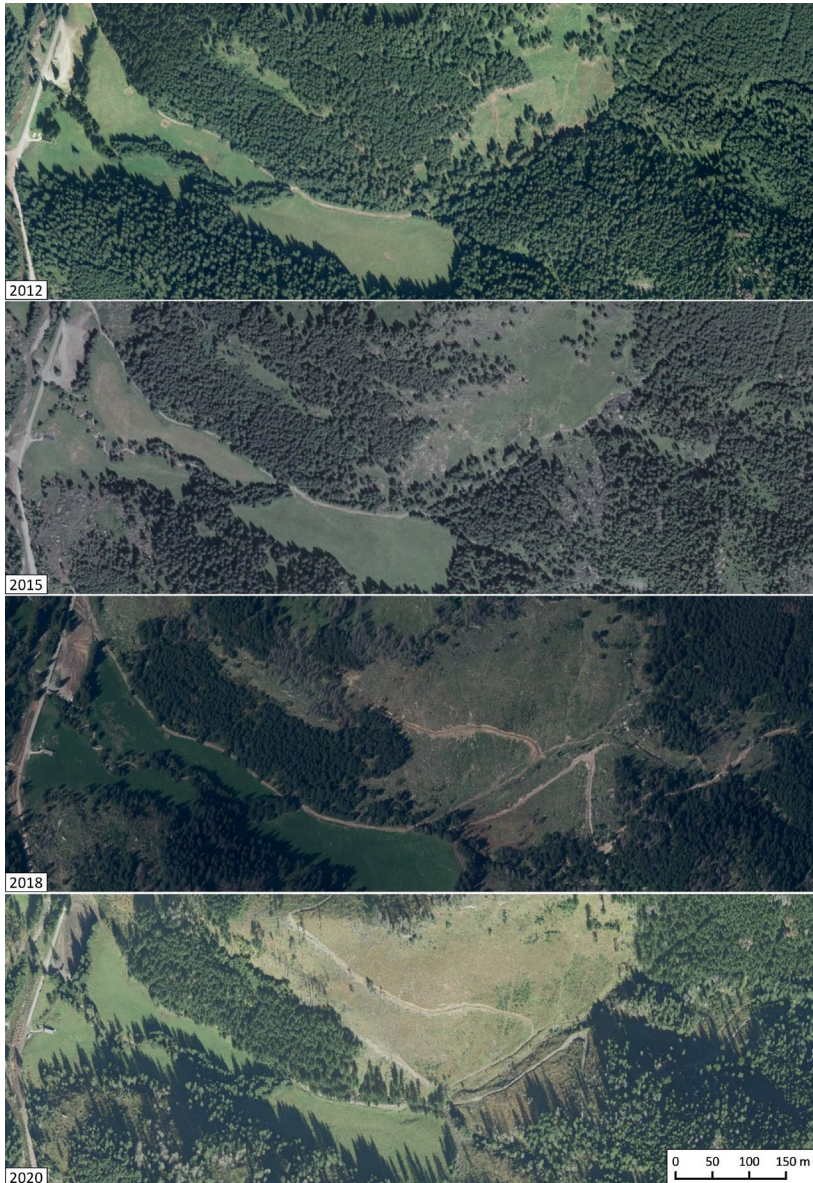
W Dolinie Huciańskiej od 2012 r. widoczne jest znaczne zmniejszenie powierzchni lasu. Wytyczenie nowych dróg w tym obszarze znacząco wpłynęło na lokalną zmianę odpływu wód ze stoku i przechwytywanie spływu śródpokrywowego przez powierzchnię drogi. Skutki przekierowania spływu wody na drogę leśną dobrze obrazuje 20 odcinek drogi, który po 2018 r. został znacznie przekształcony (ryc. 5).



Ryc. 4. Maksymalne głębokości rozcięcia drogowego w obrębie badanych dróg: A – rejon Molkówki, B – Wielkie Koryciska, C – Dolina Długa i Dolina Huciańska, D – Dolina Chochołowska i Wyżnia Chochołowska Dolina, E – Dolina Lejowa i Jaronec (liczby na rycinach oznaczają numery odcinków drogi)

Maximum depths of road indentation among the surveyed roads: A – Molkówka area, B – Wielkie Koryciska, C – Długa Valley and Huciańska Valley, D – Chochołowska Valley and Wyżnia Chochołowska Valley, E – Lejowa Valley and Jaronec (the numbers in the figures indicate the numbers of road sections)

W Dolinie Długiej największą głębokością rozcięcia drogowego odznaczał się dolinny odcinek drogi. Stokowe odcinki drogi charakteryzowały się nachyleniem przekraczającym miejscami 25° , co przekładało się na mniejsze szerokości drogi wynikające z ograniczenia możliwości manewrowania sprzętem zrywkowym. W tej części przeważały płytkie rynny



Ryc. 5. Przekształcenia terenu Doliny Huciańskiej spowodowane przez gospodarkę leśną w okresie od 2012 do 2020 r.

Transformation of the Huciańska Valley area due to forest management in the 2012-2020 period
Źródło: Ortofotomapa obszaru Doliny Huciańskiej (<https://tpn.oblview.com/>).

erozyjne przyjmujące często postać kolein o układzie zmieniającym się podczas kolejnych przejazdów sprzętu zrywkowego.

Odcinki stokowe dróg w Dolinie Długiej oraz w Wielkich Koryciskach osiągają najwyższe średnie wartości nachyleń (ponad 15°) spośród wszystkich analizowanych w obszarze badań. W dolnej części stoku, w 67 odcinku drogi w Wielkich Koryciskach, wciną się ona najgłębiej w podłoże. Odślonięte podcięcia drogi w stromych odcinkach są narażone na erozję spowodowaną splukiwaniem, działaniem lodu włóknistego czy ruchami masowymi. W dalszej części stoku droga została wytyczona zgodnie z jego spadkiem, przez co głębokość rozcięcia drogowego w większości przekraczała 1 m (ryc. 6A). Natomiast poprzeczne odcinki drogi, o mniejszym nachyleniu, charakteryzowały się płytszym rozcięciem drogowym, sięgającym średnio do 0,4 m (ryc. 6C, D). W miejscach o większym nachyleniu szerokości stokowych odcinków drogi były bardziej ograniczone ze względu na trudne warunki terenowe. W odcinkach drogi zlokalizowanych na grzbiecie zarówno rozcięcia drogowe, jak i rozcięcia erozyjne w dnie drogi nie przekraczały głębokości 0,1 m. Droga osiągała maksymalne szerokości na zakrętach (odcinki drogi: 74, 92 i 97) oraz w miejscach składowania drewna (81). Wartości te wynosiły odpowiednio: do 6,4 m oraz 7,1 m.

Kolejna z analizowanych dróg zlokalizowana była w Dolinie Wyżniej Chochotowskiej. Pierwsze 15 odcinków drogi przebiega w dnie doliny. Najwyższe szerokości (14 m) droga osiągała w strefie składowania drewna i w miejscu krzyżowania się z innymi drogami leśnymi. Droga w dolinie jest wcięta średnio 0,28 m (ryc. 4D), występują płytkie (do 0,1 m) rozcięcia erozyjne, w obrębie których wykształciły się zagłębienia bezodpływowe. Na drodze występowały drewniane rynny ograniczające skutki splukiwania liniowego i ukierunkowujące odpływ wody do potoku. W odcinkach stokowych średnia głębokość rozcięcia drogowego wynosiła 0,4 m, a maksymalna 1,1 m (ryc. 4D).

Kolejne drogi analizowane były w terenie przylegającym do TPN, w rejonie polany Molkówka. Średnia i maksymalna szerokość odcinków drogi w tym terenie wyniosły odpowiednio 3,5 m i 8,2 m. Rozcięcia drogowe w dnie doliny nie jest widoczne, a rozcięcia erozyjne są płytkie. W części stokowej, w miarę wzrostu nachylenia, droga wciną się do 1,4-2 m, a głębokość rynien erozyjnych wynosiła 0,08-0,5 m. Lokalnie występują odcinki z odśloniętym litym podłożem. Na polanie Molkówka drogi są mniej wcięte w podłoże (ryc. 4A), a ich szerokości dochodzą do 7,8 m. Rozcięcia erozyjne w części NE polany, na terenach podmokłych, powstają głównie w wyniku przejazdów quadów i motocykli. W kierunku Hawryłówki drogi zwężają się średnio do 2,5 m i były płytko wcięte (ok. 0,2 m). Rynny erozyjne w drodze były płytkie, z wyjątkiem odcinków 64 i 62, gdzie ich głębokość sięgała 0,9 m. Odcinki grzbietowe cechują się występowaniem licznych zagłębień bezodpływowych, których omijanie prowadzi do powstawania alternatywnych dróg. Brak obserwacji działań zrywkowych sugeruje, że przekształcenia te są wynikiem przejazdów quadów i motocykli, a nie gospodarki leśnej.

Przykład niewłaściwego wytyczenia drogi widać na prawym zboczu Doliny Lejowej. Droga zbudowana w 2014 r. została wyłączona z użytkowania w wyniku bardzo dużych przekształceń. Skartowany fragment drogi przebiega po mało odpornych zlepieńcach, wzdłuż stoku o nachyleniu średnim 17°. W drodze zidentyfikowano liczne rynny erozyjne o głębokości do 2,1 m.



Ryc. 6. Badana droga leśna w rejonie Wielkich Korycisk – przekształcenia w obrębie odcinków poprowadzonych na stokach (S) i grzbiecie (G) (fot. Agnieszka Wojtaszowicz)

A – rozcięcie drogowe na odcinku położonym zgodnie ze spadkiem stoku, B – przylegająca do drogi strefa zniszczona przez ciągnięte dłużyce, C – odcinek położony w poprzek stoku, D – nisze w podcięciu stoku oraz zniszczone drzewo podczas zwózki drewna, E – szeroki odcinek grzbietowy bez rozcięcia drogowego, F – wychodnie skał podłoża w podcięciu stoku

A surveyed forest road in the area of the Wielkie Koryciska Valley – transformations within sections routed along slopes (S) or a ridge (G) (fot. Agnieszka Wojtaszowicz)

A – notch of the road in the section running along the slope, B – zone adjacent to the road destroyed by timber skidding, C – section running across the slope, D – niches in the undercut of the slope and a tree destroyed during timber skidding, E – wide ridge section without notch of the road, F – rock outcrops in the undercut of the slope

Wykształcenie dróg leśnych w zależności od podłoża geologicznego

Na podłożu dolomitowym przebiegają grzbietowe oraz stokowe odcinki dróg (wyłączając odcinek 67) w rejonie Wielkich Korycisk, w Dolinie Huciańskiej – stokowe odcinki drogi od 22 do 29 oraz w Dolinie Długiej – odcinek drogi nr 37.

Największe przekształcenia dotyczyły odcinków zgodnych ze spadkiem, gdzie średnie nachylenie przekraczało 10°. Tak wytyczone drogi są szczególnie narażone na splukiwanie.

W odcinkach dróg z wykształconymi koleinami spływ koncentrował się w ich obrębie, pogłębiał je, przemieszczając drobny materiał w dół stoku i odsłaniając większą zwietrzelinę i skały podłoża. Proces ten obserwowano na drogach Wielkich Korycisk oraz Doliny Długiej. Dalsze wcinanie było ograniczane w strefach, gdzie dochodziło do odsłaniania litego podłoża skalnego, co zidentyfikowano w Dolinie Huciańskiej (odcinek drogi 25). W obrębie podcięć drogowych stwierdzono liczne zerwy oraz nisze erozyjne.

W obrębie mało odpornych łupków mułowcowych położone są dolne odcinki stokowe Doliny Długiej i Huciańskiej oraz końcowe odcinki w górnej części Doliny Huciańskiej. W porównaniu do dróg wykształconych w obrębie dolomitów, drogi te głębiej wcinały się w podłoże (do 1,6 m), a rynny erozyjne w ich obrębie sięgały 0,9 m, mimo że średnie nachylenie nie przekracza 11° . Na drogach tych zidentyfikowano wycieki i wysięki, które dodatkowo potęgowały skutki erozji liniowej oraz występowanie kotłów eworsyjnych o głębokości dochodzącej do 0,5 m. Na 20 odcinku drogi w Dolinie Huciańskiej, gdzie w podłożu występuje grubofrakcyjna zwietrzelina dolomitowa, zidentyfikowano głęboką rynnę wykształconą w skutek przekierowania przepływu wód z potoku na nieużytkowany odcinek drogi.

Utwory czwartorzędowe (torfy, materiał akumulacyjny teras, utwory morenowe oraz materiał stożków napływowych) stanowią podłoże drogi do Doliny Wyżniej Chochołowskiej. Rozcięcie drogowe oraz rynny erozyjne w dnie drogi, wynikające z transportu drewna, są bardzo płytkie. Gliniaste podłoże jest szczególnie podatne na powstawanie kolein, których rozmieszczenie zmienia się po kolejnych przejazdach sprzętu zrywkowego, czego efektem są liczne zagłębienia bezodpływowe. Najgłębsze rozcięcia drogowe zidentyfikowano w 114 odcinku drogi o wzrastającym nachyleniu do 16° , gdzie droga przechwytywała spływ powierzchniowy ze stoku.

Zlepieńce stanowiły podłoże dróg w górnej części Jarońca i w Dolinie Lejowej. W dolnej części Jarońca podłoże budują piaskowce dolomityczne. Analizowane drogi, zwłaszcza te biegnące zgodnie z nachyleniem stoku, są szczególnie narażone na skutki erozji liniowej, zwłaszcza wskutek przechwytywania spływu śródpokrywowego. Akumulacja materiału następuje w odcinkach o mniejszym nachyleniu oraz w dnie doliny, w postaci stożka napływowego, który szczególnie dobrze wykształcony jest u wylotu drogi w Dolinie Lejowej. Na podcięciach drogowych bez trwałej pokrywy roślinnej zaobserwowano liczne zerwy oraz przemieszczanie materiału.

W rejonie Molkówki przeważają utwory czwartorzędowe. Najgłębszym rozcięciem drogowym odznaczają się odcinki stokowe na podłożu łupkowym. W obrębie rynien erozyjnych w drodze widoczne były skutki erozji liniowej, lokalnie występowały strefy z odsłoniętym litym podłożem. Natomiast w obrębie podcięć drogowych zidentyfikowano liczne zerwy i strefy transportu materiału. W północnej części polany Molkówka drogi przebiegają po torfach, co sprawia, że podłoże jest podatne na przekształcenia przez pojazdy, zwłaszcza quady, które przyczyniają się tworzenia dróg alternatywnych. W obszarze tym występują również liczne zagłębienia bezodpływowe. Powstanie tych przekształceń wynika z niskiej odporności podłoża, a nie z nachylenia terenu, które w tych odcinkach dróg sięga jedynie 1° . Podobne przekształcenia występują na drodze prowadzącej w kierunku polany Hawryłówka, gdzie występuje małe nachylenie.

Najintensywniejsze procesy morfogenetyczne na badanych drogach leśnych występowały w odcinkach stromych. Główne przekształcenia związane były pogłębianiem rynien

erozyjnych oraz transportem luźnego materiału zwietrzelinowego. W większości odcinków dominowała erozja linijna wzdłuż rozcięć drogowych.

Dyskusja

Porównanie dróg leśnych i szlaków zrywkowych w Tatrach z innymi obszarami górkimi jest trudne ze względu na różnice klimatyczne i geologiczne. Ważnym czynnikiem jest stopień kontynentalizmu, z którym wiąże się ilość opadów i intensywność spłukiwania. Budowa geologiczna, szczególnie odporność podłoża i frakcja zwietrzeliny, ma kluczowy wpływ na rozwój rozcięć drogowych (holwegu) i rynien erozyjnych, zwłaszcza na stromych stokach (Megahan et al., 2001; Yu et al., 2024 a, b). Podobne wnioski dotyczyły dróg leśnych w Appalachach i Górach Skalistych (Packer, 1967; Swift, 1984). W przypadku podłoża skalnego o dużej odporności wcinanie maleje po wyerodowaniu grubofrakcyjnego materiału zwietrzelinowego lub litego podłoża, natomiast gdy droga przebiega po stosunkowo mało odpornych skałach, jak tępki, postępuje dalsze przekształcanie, szczególnie wskutek erozji liniowej. Zależność tą obserwowano w obrębie dróg turystycznych w Tatrach i masywie Monts Dore (Gorczyca i Krzemień, 2009), gdzie na skałach piroklastycznych o niskiej odporności intensywność spłukiwania jest większa niż w obrębie skał tatrzańskich.

W analizowanym obszarze zidentyfikowano odcinki wyłączane z użytkowania, które wciąż intensywnie ulegają przekształceniom. Badania Kleinschroth et al. (2015) wykazały, iż po wyłączeniu drogi z użytkowania po upływie średnio 4 lat następuje proces stabilizacji podłoża przez pokrywą roślinną, a po upływie kolejnych 20 lat droga całkowicie zarasta i trudno ją zidentyfikować w terenie. Jednak prawidłowość ta nie dotyczy odcinków dróg niepoprawnie wytyczonych co wykazane zostało w badaniach w Dolinie Lejowej. Za odcinki dróg wytyczone niepoprawnie uznano te, które przyczyniły się nieodwracalnych przekształceń rzeźby w krótkim czasie po powstaniu i znacząco wpłynęły na zmianę obiegu wody i materii na stoku (Fidelus-Orzechowska et al., 2018, 2023). Droga w Dolinie Lejowej wytyczona została w 2014 r., jednak wskutek intensywnych przekształceń rzeźby, związanych z rozwojem głębokich rozcięć erozyjnych, w 2016 r. została wyłączona z użytkowania. Pomimo, iż jest ona nieużytkowana, tempo erozji w okresie 2019-2020 było porównywalne do wartości z dróg, które są ciągle modelowane wskutek prowadzonych prac leśnych (Fidelus-Orzechowska et al., 2023). Jednak warto podkreślić, iż większość badanych dróg istnieje w terenie bardzo długi okres i są jedynie użytkowane w pewnych odstępach czasu, co pokazuje, że zostały one wytyczone w poprawny sposób, a przekształcenia w ich obrębie są głównie efektem sporadycznie prowadzonych prac leśnych.

Niepoprawne wytyczenie drogi oraz intensywne ich użytkowanie mogą przyczyniać się do nieodwracalnych przekształceń w środowisku naturalnym, nawet w czasie jednego sezonu prowadzonych prac leśnych (Kasprzak, 2005). Ponadto przekształcenia te mogą wpływać na całkowite wyłączenie z użytkowania dróg w krótkim czasie po ich wytyczeniu (Sidle et al., 2011). Dlatego też budowa dróg leśnych i gospodarowanie nimi w obszarach górskich może stanowić trudne wyzwanie dla zarządzających. Nie możemy dokładnie przewidzieć wszystkich negatywnych skutków związanych z gospodarką leśną. Jednak możemy te skutki znacząco ograniczyć już na etapie planowania prac leśnych. Szczególnie poprzez analizę naturalnych uwarunkowań danego obszaru i doświadczeń z innych masywów górskich. Bardzo dobrym przykładem są rozwiązania prowadzone w USA, gdzie różne

doświadczenia i wyniki badań gromadzone są w zbiorach najlepszych praktyk (*Best Management Practices*, BMP) (Cristian et al., 2016; Edwards et al., 2016). Ponadto kluczowym czynnikiem warunkującym postępujące przekształcenia jest presja antropogeniczna, która w analizowanym terenie w okresie badań nie została ściśle określona, gdyż autorzy nie pozyskali takich danych. Prace leśne w tym transport pni drzew, użycie ciężkiego sprzętu istotnie zmieniają podłoże i przyspieszają przebieg procesów morfogenetycznych (Reid i Dunne, 1984; Zemke, 2016).

Największy wpływ na przekształcenia rzeźby mają nachylenie terenu oraz położenie drogi zgodnie ze spadkiem podłużnym stoku (Megahan et al., 2001). Istotne przekształcenia występują na drogach wzdłuż stoku, z nachyleniem powyżej 10°, gdzie rozcięcia drogowe osiągają 1-1,5 m głębokości. Prawidłowość ta była widoczna również w terenie badań. Bajrić et al. (2013), badając drogi leśne Bośni i Hercegowiny, podali, że erozja jest największa na stromych drogach, których spadek wynosi 10-20%. Bucala-Hrabia (2018) wskazuje, że budowa drogi zgodnie ze spadkiem stoku zwiększa tempo erozji, a tym samym ilość dostarczanego materiału do potoków. Wpływa to na zaburzenie systemu hydrologicznego zlewni i zwiększenie częstości wezbrań (Affek, 2019).

Wiele badań podkreśla rolę pokrywy roślinnej w ograniczaniu procesów morfogenetycznych w obszarach górskich (Akbarimehr i Naghti, 2012; Zemke, 2016). Największe przemiany rzeźby w terenach pozbawionych roślinności zachodzą podczas wiosennych roztopów oraz letnich opadów nawałnych (Kłapa, 1980; Wałykowski, 2006; Gorczyca i Krzemień, 2010). Przepojenie pokryw wodami opadowymi i roztopowymi ma istotne znaczenie w aspekcie aktywności procesów masowych i lodu włóknistego. Ponadto w odcinkach głęboko wciętych kluczowy może być przepływ śródpokrywowy przechwytywany przez drogę (Wemple i Jones, 2003; Kastradis, 2020). W analizowanym terenie zidentyfikowano strefy wycieków i wysięków na rozcięciach drogowych w obrębie dróg w Dolinie Lejowej, Wyżniej Chochołowskiej, górnej części Doliny Huciańskiej oraz w odcinkach stokowych dróg w rejonie Molkówki. Odcinki tych dróg były szczególnie głęboko wcięte, co może świadczyć o potęgowaniu erozji liniowej podczas intensywnych opadów i przechwytywania spływu śródpokrywowego. Głębokość rozcięcia drogowego w tych strefach wyniosła od 0,8 m do 2 m.

Podczas badań terenowych zauważono, że w odcinkach dróg zarastających, gdzie zakończono prace zrywkowe, formy erozyjne były mniej widoczne. Natomiast większość badanych dróg pozbawiona była roślinności, co prowadziło do dalszego rozwoju rynien erozyjnych i ograniczało stabilizację powierzchni drogi. W opracowaniu Gorczyca i Krzemienia (2010) podkreślono, że zniszczenie roślinności przez gospodarkę leśną i turystykę jest kluczowym procesem antropogenicznym wpływającym na rzeźbę górską. Pozbawienie darni zwiększa intensywność procesów naturalnych w okresie niweopluralnym, prowadząc do większego zawilgocenia gleby i wzrostu podatności podłoża na kompaktację (Affek, 2019). Znaczenie roślinności na stromych stokach zaznaczają także Akbarimehr i Naghti (2012).

Kryterium wydzielenia odcinków była liczba rynien erozyjnych oraz znaczne zmiany nachylenia. Liczebność odcinków bez rynien erozyjnych oraz z jedną lub dwiema tymi formami była podobna. Analizowane rynny różniły się genezą. Występowanie dwóch rozcięć w dnie drogi było związane z przejazdami sprzętu zrywkowego. Pojedyncze rynny występowały szczególnie na nieużytkowanych drogach, gdzie przepływ wody prowadził do wykształcenia V-kształtnego profilu. Tylko 10 odcinków drogi stanowiących 3% długo-

ści wszystkich badanych dróg miało trzy lub więcej rynien erozyjnych lub kolein, głównie w miejscach intensywnego użytkowania, jak składnice czy tereny rozjeżdżane przez quady. [Wałdykowski \(2006\)](#) zaobserwował podobne prawidłowości na drogach leśnych w Gorczańskim Parku Narodowym i otoczeniu.

Szerokości badanych dróg były najmniejsze w trudnym terenie, osiągając 1,6-2,5 m. To wartości zbliżone do dróg zlewni Krempnej w Beskidzie Niskim ([Gorczyca i Krzemień, 2010](#)), ale mniejsze niż na drogach w masywie Monts Dore we Francji ([Gorczyca i Krzemień, 2010](#)), gdzie drogi osiągają szerokość 4,5-6 m, a ich głębokość wynosi 2-4 m, podczas gdy w badanej części Tatr Zachodnich sięgają one najgłębiej do 3,1 m, a średnia głębokość wynosi 0,6 m.

W pracach dotyczących budowy dróg podkreśla się znaczenie uwzględnienia naturalnych uwarunkowań terenu, takich jak nachylenie, położenie na stoku, rodzaj podłoża, odporność na erozję oraz obecność wycieków i wysięków ([Byblyuk et al., 2010](#); [Akbarimehr i Naghti, 2012](#); [Łukasik et al., 2016](#); [Fidelus-Orzechowska et al., 2018, 2020](#)). Brak przeprowadzenia analiz środowiskowych przed rozpoczęciem budowy drogi może skutkować nasileniem erozji, powstawaniem licznych rynien i zwiększeniem ilości wynoszonego materiału ze zlewni. Wspomniane następstwa braku badań terenu poprzedzających budowę drogi w Etiopii opisuje [Nyssen et al. \(2002\)](#). Kluczowe jest także prawidłowe zabezpieczenie dróg po zaprzestaniu prac leśnych ([Bajrić et al., 2013](#); [Łukasik et al., 2016](#)). Badania w Dolinie Lejowej wykazały, że na drogach wyłączonych z prac leśnych intensywność erozji przez pierwsze lata po zakończeniu użytkowania może być wyższa niż na drogach ciągle wykorzystywanych ([Fidelus-Orzechowska et al., 2020](#)). Odpowiednio przeprowadzone zabiegi odwadniające oraz rekultywacyjne są niezbędne do ograniczenia działania procesów morfogenetycznych. Pokrycie nieużytkowanych dróg ściółką lub zrębkami ogranicza przemieszczanie materiału i spowalnia powstawanie rynien erozyjnych ([Bajrić et al., 2013](#)). [Ka-stridis \(2020\)](#) sugeruje budowę systemu drenażowego, utwardzanie dróg i wprowadzenie roślinności jako metody ochrony przed erozją liniową.

Wnioski

W następstwie przeprowadzonych badań dróg leśnych w Tatrzańskim Parku Narodowym i w jego otoczeniu można wskazać następujące wnioski. W obrębie dróg wyłączonych z użytkowania mogą występować intensywne przekształcenia rzeźby m.in. rynny erozyjne o głębokości 2,1 m, co stwierdzono na przykładzie drogi w Dolinie Lejowej. Głębokość rozcięć drogowych i rynien erozyjnych zależy od odporności skał podłoża i rodzaju pokrywy zwietrzelinowej, w szczególności w odniesieniu do skutków erozji liniowej i spłukiwania. Na odcinkach w obrębie łupków formy te są głębsze niż na dolomitach.

Nachylenie stoku jest kluczowym czynnikiem wpływającym na rozwój rynien erozyjnych. Przeważnie największe przekształcenia rzeźby zachodzą w odcinkach o nachyleniu przekraczającym 10°. Jednak w strefach o mało odpornym podłożu, gdzie pojawia się dodatkowa presja antropogeniczna związana z przejazdami quadów i motocykli, znaczne przekształcenia rzeźby mogą występować na obszarze o niewielkim nachyleniu. W obszarze takim mogą występować rynny erozyjne o głębokości sięgającej maksymalnie do 0,9 m. Zależność taką stwierdzono poza granicami TPN, w obrębie dróg zlokalizowanych na polanie Molkówka.

Piśmiennictwo

- Affek, A. (2019). Wpływ gospodarki leśnej na terenach górskich na wybrane elementy środowiska – aktualny stan wiedzy. Impact of mountain forest management on selected elements of the environment – the current state of knowledge. *Przegląd Geograficzny*, 91(1), 63-81. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2019.1.3>
- Akbarimehr, M., & Naghdi, R. (2012). Reducing erosion from forest roads and skid trails by management practices. *Journal of Forest Science*, 58, 165-169. <https://doi.org/10.17221/136/2010-JFS>
- Byblyuk, N., Styranivsky, O., Korzhov, V., & Kudra, V. (2010). Timber harvesting in the Ukrainian Carpathians: ecological problems and methods to solve them. *Journal of Forest Science*, 56, 333-340. <https://doi.org/10.17221/111/2009-JFS>
- Bajrić, M., Sokolović, D., Musić, J., & Halilović, V. (2013). Assessment of intensity of erosion and natural coverage of tractor roads in post-exploitation period. *Radovi šumarskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu*, 43(1), 27-38. <https://doi.org/10.54652/rsf.2013.v43.i1.115>
- Barančok, P., & Varsavova, M. (1996). The influence of tourism on the natural environment of the Belianske Tatry Mountains investigated on an educational hiking path situated in the locality of Monkova Dolina – Kopske Sedlo and its near surroundings, *Ekologia*, 15(4), 469-473.
- Bryndal, T., & Krocak, R. (2019). Reconstruction and characterization of the surface drainage system functioning during extreme rainfall: the analysis with use of the ALS-LIDAR data—the case study in two small flysch catchments (Outer Carpathian, Poland). *Environmental Earth Sciences*, 78(6), 215. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8211-6>
- Bucała-Hrabia, A. (2018). Land use changes and their catchment-scale environmental impact in the Polish Western Carpathians during transition from centrally-planned to free-market economics. *Geographia Polonica*, 91(2), 171-196. <https://doi.org/10.7163/GPol.0116>
- Cristan, R., Aust, W.M., Bolding, M.C., Barrett, S.M., Munsell, J.F., & Schilling, E. (2016). Effectiveness of forestry best management practices in the United States: Literature review. *Forest Ecology and Management*, 360, 133-151. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.10.025>
- Czocharński, J.T., & Szydarowski, W. (2000). Diagnostyka stanu i zróżnicowanie przestrzenno-czasowe użytkowania szlaków turystycznych w TPN.W: D. Borowiak, J.T. Czocharński (red.), *Z badań geograficznych w Tatrach Polskich* (s. 207-228). Gdańsk: Wydawnictwo UG.
- Dąbek, P., Żmuda, R., Ćmielewski, B., & Szczepański, J. (2014). Analysis of water erosion processes using terrestrial laser scanning. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 11(1), 173. <https://doi.org/10.13168/AGG.2013.0054>
- Edwards, P.J., Wood, F., & Quinlivan, R.L. (2016). Effectiveness of best management practices that have application to forest roads: a literature synthesis. Gen. Tech. Rep. NRS-163. Newtown Square, PA: US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station.
- Elliot, W.J., Lewis, SA, & Cannard, C.L. (2023) Measuring and modeling impacts of gravel road design on sediment generation in the southeastern U.S. American Society of Agricultural and Biological Engineers. *Journal of the ASABE*, 66(5), 1229-1254. <https://doi.org/10.13031/ja.15539>
- Fidelus-Orzechowska, J., Gorczyca, E., Bukowski, M., & Krzemień, K. (2021). Degradation of a protected mountain area by tourist traffic: case study of the Tatra National Park, Poland. *Journal of Mountain Science*, 18(10), 2503-2519. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6611-4>
- Fidelus-Orzechowska, J., Gorczyca, E., & Krzemień, K. (2017). *Geomorfologiczne skutki gospodarki turystycznej w Tatrach*. Kraków: Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

- Fidelus-Orzechowska, J., Puniach, E., Ćwiakła, P., Strzyżowski, D., & Nędzka, M. (2023). Changes within the roadbed and the cutslope of an abandoned forest road. A case-study from the Tatra Mts. (Poland). *Land Degradation & Development*, 34(2), 558-569. <https://doi.org/10.1002/ldr.4479>
- Fidelus-Orzechowska, J., Strzyżowski, D., Cebulski, J., & Wrońska-Wałach, D. (2020). A quantitative analysis of surface changes on an abandoned forest road in the Lejowa Valley (Tatra Mountains, Poland). *Remote Sensing*, 20(12), 3467. <https://doi.org/10.3390/rs12203467>
- Fidelus-Orzechowska, J., Strzyżowski, D., & Żelazny, M. (2018). The geomorphic activity of forest roads and its dependencies in the Tatra Mountains. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 100(1), 59-74. <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1376585>
- Gorczyca, E. (2000). Wpływ ruchu turystycznego na przekształcanie rzeźby wysokogórskiej na przykładzie masywu Czerwonych Wierchów i Regli Zakopiańskich. W: B. Obrębska-Starkel (red.), *Studia z zakresu geografii fizycznej*. Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 105, 369-389.
- Gorczyca, E. (2008). The geomorphological effectiveness of extreme meteorological phenomena on flysch slopes. *Landform Analysis*, 6, 15-27.
- Gorczyca, E., & Krzemień, K. (2002). Wpływ ruchu turystycznego na rzeźbę Tatrzańskiego Parku Narodowego. W: W. Borowiec, A. Kotarba, A. Kownacki, Z. Krzan, Z. Mirek (red.), *Przemiany środowiska przyrodniczego Tatr* (s. 389-394). Kraków-Zakopane: Wydawnictwo TPN.
- Gorczyca, E., & Krzemień, K. (2005). Wpływ turystyki pieszej na przekształcanie rzeźby Tatr. W: B. Domański, S. Skiba (red.), *Geografia i Sacrum* (s. 77-85). Kraków: Wydawnictwo IGI GP UJ.
- Gorczyca, E., & Krzemień, K. (2006a). Wpływ ruchu turystycznego na przekształcania rzeźby. W: J. Trepiańska, Z. Olecki (red.), *Klimatyczne aspekty środowiska geograficznego* (s. 311-323). Kraków: Wydawnictwo IGI GP.
- Gorczyca, E., & Krzemień, K. (2006b). Rola ruchu turystycznego w przeobrażaniu rzeźby Tatr na tle wybranych obszarów górskich. W: Z. Krzan (red.), *Tatrzański Park Narodowy na tle innych górskich terenów chronionych* (s. 81-86), t. III. Zakopane: Wydawnictwo TPN.
- Gorczyca, E., & Krzemień, K. (2008). Morfologiczne skutki ekstremalnego zdarzenia opadowego w Tatrach reglaowych w czerwcu 2007 r. *Landform Analysis*, 8, 21-24.
- Gorczyca, E., & Krzemień, K. (2009). Rola antropopresji w przekształcaniu obszarów wysokogórskich na przykładzie Tatr i Monts Dore. *Prace i Studia Geograficzne*, 41, 89-106.
- Gorczyca, E., & Krzemień, K. (2010). Rola dróg i ścieżek turystycznych w modelowaniu rzeźby gór strefy umiarkowanej. *Roczniki Bieszczadzkie*, 18, 228-242.
- Gucinski, H., Furniss, M.J., Ziemer, R.R., & Brookes, M.H. (2001). Forest roads: a synthesis of scientific information. General Technical Report, 509. Portland: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Hreško, J., Bugár, G., & Petrovič, F. (2009). Changes of vegetation and soil cover in alpine zone due to anthropogenic and geomorphological processes. *Landform Analysis*, 10, 39-43.
- Kasprzak, M. (2005). Tempo degradacji powierzchni dróg i ścieżek turystycznych w Karkonoszach Wschodnich. *Opera Corcontica*, 42(17).
- Kastridis, A. (2020). Impact of forest roads on hydrological processes. *Forests*, 11, 1201. <https://doi.org/10.3390/f11111201>
- Kleinschroth, F., Gourlet-Fleury, S., Sist, P., Mortier, F., & Healey, J.R. (2015). Legacy of logging roads in the Congo Basin: how persistent are the scars in forest cover? *Ecosphere*, 6(4), 1-17. <https://doi.org/10.1890/ES14-00488.1>
- Klimaszewski, M., (1988). *Rzeźba Tatr Polskich*. PWN: Warszawa.
- Kłapa, M. (1980). *Procesy morfogenetyczne oraz ich związek z sezonowymi zmianami pogody w otoczeniu Hali Gąsienicowej w Tatrach*. Dokumentacja Geograficzna, 4. Warszawa: IGI PAN.

- Krocak, R. (2010). *Geomorfologiczne i hydrologiczne skutki funkcjonowania dróg polnych na Pogórzu Ciężkowickim*. Prace Geograficzne, 225. Warszawa: IGI PAN.
- Krocak, R., & Bryndal, T. (2017). Wykorzystanie numerycznych modeli terenu do generowania systemu drenażu powierzchniowego, funkcjonującego podczas opadów nawaalnych. Podstawy metodyczne na podstawie studium przypadku zlewni Zalasówki (Pogórze Ciężkowickie). *Przegląd Geograficzny*, 89(1), 67-85. <https://doi.org/10.7163/Prz.G.2017.1.4>
- Krocak, R., & Soja, R. (2011). Przestrzenne zróżnicowanie gęstości dróg polnych na Pogórzu Ciężkowickim na tle regionów południowej Polski. *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich*, 58, 41-52.
- Krusiec, M. (1996). Wpływ ruchu turystycznego na przekształcanie rzeźby Tatr Zachodnich na przykładzie Doliny Chochołowskiej. *Czasopismo Geograficzne*, 67, 303-320.
- Łukasik, W., Kubiesa, P., & Staszewski, T. (2016). Erosion processes initialized by use of heavy equipment in mountain forests of the Wilczy Potok catchment, Silesian Beskids. *Archives of Environmental Protection*, 42(1), 80-86. <https://doi.org/10.1515/aep-2016-0010>
- Megahan, W.F., Wilson, M., & Monsen, S.B. (2001). Sediment production from granitic cutslopes on forest roads in Idaho, USA. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26(2), 153-163. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200102\)26:2<153::AID-ESP172>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200102)26:2<153::AID-ESP172>3.0.CO;2-0)
- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., Haile, M., & Govers, G. (2002). Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 27(12), 1267-1283. <https://doi.org/10.1002/esp.404>
- Ortofotomapa obszaru Doliny Huciańskiej z lat 2012, 2015, 2018, 2020. Pobrane z: <https://tpn-obliview.com/> (08.08.2024).
- Packer, P.E. (1967). Criteria for designing and locating logging roads to control sediment. *Forest Science*, 13(1), 2-18. <https://doi.org/10.1093/forests/13.1.2>
- Parzóch, K. (2002). Procesy erozyjne na stokach wylesionych w Karkonoszach. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 487, 239-247.
- Passendorfer, E. (1996). Geologia. W: Z. Mirek, Z. Głowaciński, K. Klimek, H. Piękoś-Mirkowa (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego, Tatry i Podtatrze*, 3 (s. 69-96). Kraków-Zakopane: Tatrzański Park Narodowy.
- Piotrowska, K., Kotański, Z., Gawęda, A., Piotrowski, J., Rączkowski, W. (2017). Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50000. Arkusze: Tatry Zachodnie. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny – PIB.
- Plewniak, J., & Gołąb, J. (2017). Gospodarczo-techniczne uwarunkowania procesu projektowania szlaków zrywkowych w lasach górskich. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 1(1), 85-99. <http://doi.org/10.14597/infraeco.2017.1.1.007>
- Ramos-Scharrón, C.E., & MacDonald, L.H. (2007). Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St. John, US Virgin Islands. *Catena*, 71(2), 250-266. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.03.009>
- Rączkowska, Z., & Kozłowska, A. (2002). Odzwierciedlenie wpływów antropogenicznych w wybranych elementach środowiska przyrodniczego otoczenia Kasprowego Wierchu. W: W. Borowiec, A. Kotarba, A. Kownacki, Z. Krzan, Z. Mirek (red.), *Przemiany środowiska przyrodniczego Tatr* (s. 403-406). Kraków-Zakopane: Wydawnictwo TPN.

- Rączkowska, Z., & Kozłowska, A. (2010). Wpływ turystyki na rzeźbę i roślinność przy ścieżkach w otoczeniu Kasprowego Wierchu. W: Z. Krzan (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek* (s. 21-28). Zakopane: Tatrzański Park Narodowy.
- Reid, L.M., & Dunne, T. (1984). Sediment production from forest road surfaces. *Water Resources Research*, 20(11), 1753-1761.
- Rojan, E. (2015). Changes in unpaved forest roads of the windthrow area in the Slovak High Tatra Mts in years 2004-14. *Štúdie o Tatranskom Národnom Parku*, 44(11), 97-106.
- Šakar, D., Aydin, A., & Akay, A.E. (2022). Essential issues related to construction phases of road networks in protected areas: A review. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 43(1), 219-237. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1179>
- Sidle, R.C., Furuichi, T., & Kono, Y. (2011). Unprecedented rates of landslide and surface erosion along a newly constructed road in Yunnan, China. *Natural Hazards*, 57, 313-326. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9614-6>
- Sidle, R.C., Ghestem, M., & Stokes, A. (2014). Epic landslide erosion from mountain roads in Yunnan, China-challenges for sustainable development. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(11), 3093-3104. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3093-2014>
- Skawiński, P. (1993). Oddziaływanie człowieka na przyrodę kopuły Kasprowego Wierchu oraz Doliny Goryczkowej w Tatrach. W: W. Cichocki (red.), *Ochrona Tatr w obliczu zagrożeń* (s. 197-226). Zakopane: Wyd. Muzeum Tatrzańskiego.
- Skawiński, P. (1996). Gospodarka leśna przed i po utworzeniu Tatrzańskiego Parku Narodowego. Osiągnięcia, porażki, kontrowersje. W: Z. Krzan (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek*, 3 (s. 83-85). Zakopane: Tatrzański Park Narodowy.
- Sosnowski, J. (1996). *Ćwiczenia z transportu drewna*. Kraków: Akademia Rolnicza.
- Sosnowski, J. (2002). Szlaki zrywkowe w proekologicznym gospodarstwie leśnym. Część II – Projektowanie, wykonawstwo i użytkowanie szlaków zrywkowych. *Sylwan*, 146(8), 73-80.
- Soulis, K.X., Dercas, N., & Papadaki, C.H. (2015). Effects of forest roads on the hydrological response of a small-scale mountain watershed in Greece. *Hydrological processes*, 29(7), 1772-1782. <https://doi.org/10.1002/hyp.10301>
- Swift Jr, L.W. (1984). Soil losses from roadbeds and cut and fill slopes in the southern Appalachian Mountains. *Southern Journal of Applied Forestry*, 8(4), 209-216. <https://doi.org/10.1093/sjaf/8.4.209>
- Ustawa o lasach. (1991). Ustawa z dnia 28 września 1991 o lasach (Dz.U. 1991 nr 101 poz. 444)
- Wałydowski, P. (2006). Wpływ dróg górskich na dynamikę procesów morfologicznych w rejonie Turbaczka, *Ochrona Beskidów Zachodnich*, 1 (s. 67-79). Poręba Wielka: Gorceński Park Narodowy.
- Wałydowski, 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 für Geomorphologie*, 57(4), 429-470. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/0108>
- Wang, C., Liu, B., Yang, Q., Pang, G., Long, Y., Wang, L., Cruse, R., Dang, W., Liu, X., & Wang, E. (2022). Unpaved road erosion after heavy storms in mountain areas of northern China. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(1), 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.04.012>
- Wemple, B.C., Jones, J.A. (2003). Runoff production on forest roads in a steep, mountain catchment. *Water Resources Research*, 39(8). <https://doi.org/10.1029/2002WR001744>.
- Wemple, B.C., Browning, T., Ziegler, A.D., Celi, J., Chun, K.P., Jaramillo, F., Leite, K.N., Ramchunder, S.J., Negishi, N.J., Palomeque, X., & Sawyer, D. (2018). Ecohydrological disturbances associated with roads: Current knowledge, research needs, and management concerns with reference to the tropics. *Ecohydrology*, 11(3), e1881. <https://doi.org/10.1002/eco.1881>

- Yu, J., Zhao, Q., Yu, Z., Liu, Y., & Ding, S. (2024b). A Review of the Sediment Production and Transport Processes of Forest Road Erosion. *Forests*, 15(3), 454. <https://doi.org/10.3390/f15030454>
- Yu, Z., Zhao, Q., Liu, Y., Yu, J., Wang, A., & Ding, S. (2024a). Soil erosion associated with roads. A global review and statistical analysis. *Land Degradation & Development*, 35(11), 3509-3522. <https://doi.org/10.1002/ldr.5159>
- Zemke, J.J. (2016). Runoff and soil erosion assessment on forest roads using a small scale rainfall simulator. *Hydrology*, 25(3). <https://doi.org/10.3390/hydrology3030025>

Summary

Contemporary anthropogenic transformations in Poland's Tatra National Park are mainly a reflection of steadily-increasing tourist traffic. Observed transformations of relief away from tourist trails mainly coincide with the Forest Community of 8 Entitled Villages headquartered in Witów, and more precisely the timber skidding work that it engages in.

Our research sought to determine if there were any regularities to emerging transformations of the terrain as a reflection of forest management in mountain areas. Relevant analysis proceeded on the assumption that the formation of a forest road is dependent on the geological substrate across which it is routed, as well as on location in relation to such main elements of relief as slope, ridge and valley.

Our main method of study was geomorphological mapping based on a field form (ryc. 1), as well as GPS (Garmin 64s). Fieldwork encompassed the western part of the Tatra National Park, meaning the Chochołowska and Lejowa Valleys, as well as Jaroniec, with the focus being on both roads in use and those in areas where forestry work had ceased. For comparison, roads beyond the TNP boundaries were also made subject to analysis – specifically in the Polana Molkówka area. All of the forest roads studied were located within the aforesaid Forest Community of 8 Entitled Villages headquartered in Witów. The field work involved each described roads being divided into sections. The criteria for their separation involved numbers of cuts occurring in the road bed, as well as significant changes of slope.

In the sections studied, flushing was found to be the most important of the natural morphogenetic processes. However, it is difficult to determine the separate roles of flushing and ongoing forestry works in achieving transformations of landforms, as road-dredging processes bring together natural processes on the one hand and anthropopressure on the other. A significant influence in slope modelling through water erosion is exerted by heavy rainfall events occurring mainly during the pluvial season. Erosion cuts very often develop in the course of intense precipitation events, at least where permanent vegetation cover is lacking, as along forest roads and hiking trails.

Of all the factors responding to the development of erosion forms within a road, it is slope of the terrain and position in regard to slopes that play the most important role. The coexistence of these two elements within roads with unpaved ground, especially when the slope exceeds 10°, leads to water erosion of increased intensity, and hence to a deepening of road cuts and indentations.

As regards the scale of the transformation within roads being dependent on geological structure, the type of rock present in the subsoil is shown to be important to the process by which a road cut is deepened – when the weathered layer is completely elevated or

cut. Within a substratum of low resistance (like shale or peat), further deepening of the road is to be observed in relation to both water run-off and timber transport. In turn, where roads are on resistant dolomites, it is diffuse water run-off and lifting of the weathered layer from the adjacent area and widening of the degraded zone that prove to be dominant. On the other hand, along most sections it is typical for type and fraction of weathering to be the factor most determining the development of cuts and road cuts.

If the intensity with which landform disturbances arise along forest roads is to be limited, it is vital for such roads to be designed correctly, with treatments applied to preserve the surface both during the period of road use and after. Slope, position in relation to a slope, geological type of substratum, weathering, and the presence of natural springs and hence a possibility of groundwater flow being intercepted should all be taken account of at the design stage of any new road. The analysed forest roads of the Chochołowska, Lejowa and Jarońca Valleys – located within the Tatra National Park or just adjacent to it near Molkówka – are very much characterised by insufficient protection against erosion, with this being true of both sections in use, and places in which skidding and timber transport have been completed.