

# Rola łączności sieci dolinnej, rzecznej i drogowej w transporcie materiału zawieszonoego w zlewni rolniczej i zalesionej (Pogórze Wiśnickie, Polska)

The role of valley, river and road networks connectivity in suspended sediment transport in agricultural and forested catchments (Wiśnicz Foothills, Poland)

Jolanta Świąchowicz <sup>1</sup>, Adrianna Natanek<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, jolanta.swiechowicz@uj.edu.pl

<sup>2</sup> Nadleśnictwo Lutowiska, PGL Lasy Państwowe, Lutowiska

**Zarys treści:** Poznanie źródeł osadów, szlaków i dynamiki transportu oraz czynników, które leżą u podstaw przestrzennej i czasowej zmienności w transporcie zawieszony w rzekach jest nadal kluczowym zagadnieniem poznawczym w geomorfologii. W zlewni nakładają się na siebie trzy sieci umożliwiające transport wody i osadów. Są to naturalne sieci dolinna i rzeczna oraz związana z gospodarczą działalnością człowieka sieć drogowa. Sieć dolinna, rzeczna i drogowa są ze sobą połączone, a w miejscach tych połączeń może następować dostawa materiału do transportu rzecznoego. Celem pracy jest poznanie roli sieci dolinnej, rzecznej i drogowej w transporcie zawieszony w zlewni rolniczej i zalesionej. Podstawą opracowania są badania przeprowadzone w zlewniach Dworskiego Potoku i Leśnego Potoku położonych na Pogórzu Wiśnickim. W rolniczej zlewni Dworskiego Potoku wyróżniono 10 węzłów: ciek–ciek, ciek–dolina, dolina–dolina i droga–droga. Najwięcej skrzyżowań występuje pomiędzy dolinami (połączenie dolina–dolina) oraz pomiędzy dolinami i ciekami (połączenie ciek–dolina). W zalesionej zlewni Leśnego Potoku wyróżniono 497 węzłów: ciek–ciek, ciek–dolina, ciek–droga, dolina–dolina i droga–droga. Najwięcej węzłów występuje pomiędzy dolinami (połączenie dolina–dolina), następnie między drogami (połączenie droga–droga) oraz między dolinami i ciekami wodnymi (połączenie ciek–dolina). Mniej powszechne są połączenia dróg i dolin oraz dróg i cieków wodnych. Najmniej połączeń występuje pomiędzy ciekami wodnymi.

**Słowa kluczowe:** łączność, sieć dolinna, sieć rzeczna, sieć drogowa, węzeł, transport zawieszony, Pogórze Wiśnickie, Polska

**Abstract:** Understanding sediment sources, routes and transport dynamics, and the factors that underlie spatial and temporal variability in suspended sediment transport in rivers is still a key cognitive issue in geomorphology. In the catchment area, three networks allow the transport of water and sediment. These are valley and river natural networks as well as a road network related to anthropogenic activity. The valley, river and road networks are interconnected, and sediment influx to fluvial transport pathways may be entered in sites of these connectivity. The aim of this work is to describe role of valley network, river network and road network in the transport of the suspended sediment in agricultural and forested catchments. The study is based on research performed in the Dworski Potok and Leśny Potok catchments located in Wiśnicz Foothills, Poland. In agricultural Dworski Potok catchment following 10 nodes has been distinguished: watercourse–watercourse, watercourse–valley, valley–valley, and road–road. The most of junction appear between valleys (valley–valley node) and between valleys and watercourses (watercourse–valley node). In Leśny Potok catchment 497 nodes has been distinguished: watercourse–watercourse, watercourse–valley, watercourse–road, valley–valley, and road–road. The most of nodes appear between valleys (valley–valley node), next between roads (road–road node), and between valleys and watercourses (watercourse–valley node). Less common are the connections between roads and valleys and between roads and watercourses. The least of connections appear between watercourses.

**Keywords:** connectivity, valley network, river network, road network, node, suspended sediment transport, Wiśnicz Foothills, Poland

## Wstęp

Transport materiału w zawieszynie w systemach rzecznych odgrywa dużą rolę w rozwoju rzeźby terenu. Po-

znanie źródeł osadów, szlaków i dynamiki transportu oraz czynników, które leżą u podstaw przestrzennej i czasowej zmienności w transporcie zawieszony w rzekach jest nadal kluczowym zagadnieniem poznawczym

w geomorfologii (Vercruyse i in. 2017). Drobny materiał (mineralny i organiczny) erodowany na stokach spływa wraz z wodą opadową lub roztopową po stokach. Jego część jest deponowana w obrębie stoków na różnej wielkości spłaszczeniach i w zagłębieniach, a pozostały najczęściej systemem różnego rzędu rozcięć zarówno naturalnych jak i antropogenicznych dostaje się do rzeki, gdzie jest transportowany z jej biegiem wraz z materiałem erodowanym w obrębie koryt (Świąchowicz 2012). W zlewni nakładają się na siebie trzy sieci umożliwiające transport wody i osadów. Są to naturalne sieci dolinna i rzeczna oraz związana z gospodarczą działalnością człowieka sieć drogowa. Sieć dolinna, rzeczna i drogowa są ze sobą połączone, a w miejscach tych połączeń może następować dostawa materiału do transportu rzecznoego.

Stosowany w geomorfologii od ponad dwóch dekad termin łączności (ang. *connectivity*), zarówno do opisu dostawy osadów ze stoków do koryt potoków (ang. *lateral connectivity*) jak i wzdłuż sieci rzecznej (ang. *longitudinal connectivity*), rozumiany jest jako struktura połączeń umożliwiających przepływ osadów między ich źródłami a obszarami niżej położonymi (Brierley i in. 2006, Bracken, Croke 2007, Wainwright i in., 2011, Heckmann i in. 2018, Wohl i in. 2019, Najafi i in. 2021). Charakterystyka przestrzenna połączeń (ang. *connectivity*) w zlewni umożliwia określenie udziału danej zlewni lub jej części w dostawie osadu transportowanego w zawieszynie oraz rozpoznanie dróg jego przemieszczania (Jain, Tandon 2010).

W literaturze podkreślano niewielki udział powierzchni stoków w bezpośredniej dostawie sedymentów do transportu fluwialnego (Fryirs, Brierley 1999, Świąchowicz 2002, 2012). Wyniki badań transportu zawiesiny prowadzone w różnych regionach Polski wskazują, że najwięcej materiału transportowanego w zawieszynie w korytach rzek pochodzi z bocznej erozji brzegów i pogłębienia koryta, do których dochodzi podczas wezbrań (Froehlich 1975, Kostrzewski i in. 1994, Smolska 1996, Świąchowicz 2002, Kijowska-Strugała 2015). Zawiesina dostarczana jest też do koryta cieków przez dopływy (Łajczak 1989, Smolska 1996, Świąchowicz 2002, Kijowska-Strugała 2015). Na rolę dróg w dostawie sedymentów do transportu fluwialnego zwracał uwagę Klimaszewski (1935). Późniejsze badania potwierdziły, iż drogi polne dostarczają znaczną ilość materiału transportowanego w zawieszynie do koryt cieków zarówno na obszarach rolniczych (Froehlich, Słupik 1980, 1986, Krocak 2010), zurbanizowanych (Ciupa 2012) jak i zalesionych (Gołąb i in. 2006, Gołąb 2011a, b, 2012, Wałdykowski, Krzemień 2013). Wpływ sieci drogowej na odprowadzanie wody i transport zawiesiny zmienia się w czasie i jest uzależniony od uwarunkowanego historycznie rozwoju gospodarczego danego obszaru (Szpikowski 2011). Badania nad erozją na drogach leśnych i produkcją sedymentu prowadzone są na całym świecie (Reid, Dunne 1984,

Luce, Black 1999, Wemple i in. 2001). Drogi leśne przyczyniają się do szkodliwego oddziaływania na obszary leśne, gdyż odprowadzana jest nimi woda, a w czasie prac leśnych na drogach zostaje uruchamiany materiał, który następnie odprowadzany jest do koryt cieków (Reid, Dunne 1984).

Artykuł poświęcono jak dotąd nierozpoznanemu aspektowi łączności występującemu w trzech funkcjonujących sieciach w zlewni (dolinnej, rzecznej i drogowej), ze szczególnym uwzględnieniem miejsc, w których dochodzi do połączeń tych sieci. W dotychczasowej literaturze zwracano uwagę osobno na rolę powiązań rzeki ze stokami w dostawie materiału do transportu fluwialnego, następnie różnego rzędu naturalnych rozcięć liniowych (suche doliny, wąwozy) i w końcu dróg polnych zarówno na obszarach rolniczych i zalesionych (Froehlich 1982, Kostrzewski i in. 1994, Smolska 1996, Świąchowicz 2002).

Celem pracy jest poznanie potencjalnej łączności między siecią drogową, dolinną i rzecznoą w transportowaniu zawiesiny w użytkowanej rolniczo zlewni Dworskiego Potoku i zalesionej zlewni Leśnego Potoku. Łączność sieci dolinnej, rzecznej i drogowej w transportowaniu zawiesiny z jednej sieci do drugiej została zdefiniowana jako powiązania występujące między wymienionymi sieciami, które umożliwiają lub potęgują transportowanie zawiesiny w zlewni i odprowadzanie jej poza jej granicę.

## Obszar badań

Podstawą opracowania są badania przeprowadzone w zlewniach Dworskiego Potoku i Leśnego Potoku położonych na Pogórzu Wiśnickim. Zgodnie z podziałem geomorfologicznym Polski południowej zlewnia Dworskiego Potoku położona jest w obrębie Przedgórze Brzeskiego, a Leśnego Potoku w obrębie Garbu Okocimskiego (ryc. 1, Starkel 1988, Świąchowicz 1992). Zlewnie mają różną powierzchnię, różnią się użytkowaniem i są cząstkowymi zlewniami wyróżnionymi w zlewni Starej Rzeki, w których od 1987 r. prowadzi się monitoring odpływu wody i sedymentów (Świąchowicz 2002).

Zlewnia Dworskiego Potoku zajmuje powierzchnię 0,3 km<sup>2</sup>, na wysokości 227–278 m n.p.m. Dominującym typem rzeźby są pogórza niskie. Dworski Potok jest ciekim 2. rzędu wg Strahlera (1964), a rząd doliny wynosi 3. Zlewnia Potoku Dworskiego jest prawie w całości terenem rolniczym. Większość zlewni to grunty orne (80%), na których uprawiane są głównie buraki cukrowe, pszenica i rzepak, a dna dolin Potoku Dworskiego i jego dopływów pokryte są użytkami zielonymi.

Zlewnia Leśnego Potoku zajmuje powierzchnię 4,82 km<sup>2</sup> (223–360 m n.p.m.). Dominującym typem



Ryc. 1. Położenie zlewni Dworskiego i Leśnego Potoku na tle jednostek geomorfologicznych

Fig. 1. Location of the Dworski and Leśny Potok catchment areas against the background of geomorphologic units

rzeźby są pogórze średnie. W północnej części zlewni dominują grunty orne (24%). Strome fliszowe stoki średnich pogórzy południowej części zlewni są głów-

Tabela 1. Podstawowe parametry fizjograficzne zlewni Dworskiego i Leśnego Potoku

Table 1. Basic physiographic parameters of the Dworski and Leśny Potok catchment areas

Parametr	Jednostka	Zlewnia Dworskiego Potoku	Zlewnia Leśnego Potoku
Powierzchnia topograficzna	km <sup>2</sup>	0,3	4,9
Długość maksymalna	km	0,86	2,87
Szerokość średnia	km	0,46	1,71
Wskaźnik wydłużenia	–	0,75	0,87
Wskaźnik zwartości	–	1,1	1,31
Wysokość maksymalna	m n.p.m.	272	223
Wysokość minimalna	m n.p.m.	225,3	360
Długość sieci rzecznej	km	0,96	12,29
Długość cieków głównego	km	0,74	4,2

Źródło: na podstawie Świąchowicz 2002, Natanek 2016  
Source: on the basis Świąchowicz 2002, Natanek 2016

nie zalesione (65%). Leśny Potok jest ciekim 3. rzędu według Strahlera, a rząd doliny wynosi 5.

Wskaźnik zwartości dla zlewni Dworskiego Potoku wynosi 1,1, a wskaźnik wydłużenia 0,75, co wskazuje na kształt zbliżony do koła. Te same wskaźniki dla zlewni Leśnego Potoku wynoszą odpowiednio 1,3 i 0,87, co wskazuje, że zlewnia ma bardziej wydłużony kształt (tab. 1).

## Materiały i metody

Badania nad łącznością sieci dolinnej, rzecznej i drogowej wykonano w pierwszej kolejności w rolniczej zlewni Dworskiego Potoku (Świąchowicz 2002, 2012). Okazały się na tyle interesujące, że warto zweryfikowania w zlewni zalesionej (Natanek 2016), a wyniki dotychczas zostały przedstawione w poniższym artykule.

Kartowanie sieci dolinnej, rzecznej i drogowej w zlewni Dworskiego Potoku wykonano w terenie nаноsząc wyniki na mapę topograficzną w skali 1:10 000 (arkusz 173.223 Poręba Spytkowska, 1993). W zlewni Leśnego Potoku natomiast analizę sieci dolinnej, rzecznej oraz drogowej dokonano na pod-

stawie mapy topograficznej w skali 1:25 000 (arkusz M 173.22\_C.PL.1977 Brzesko, 1977). Analiza ta obejmowała wyznaczenie dla omawianego obszaru dolin od 1. do 5. rzędu oraz cieków od 1. do 3. rzędu według klasyfikacji Strahlera (1964). Podstawowe analizy GIS zostały wykonane w programie ArcGIS 10.1.

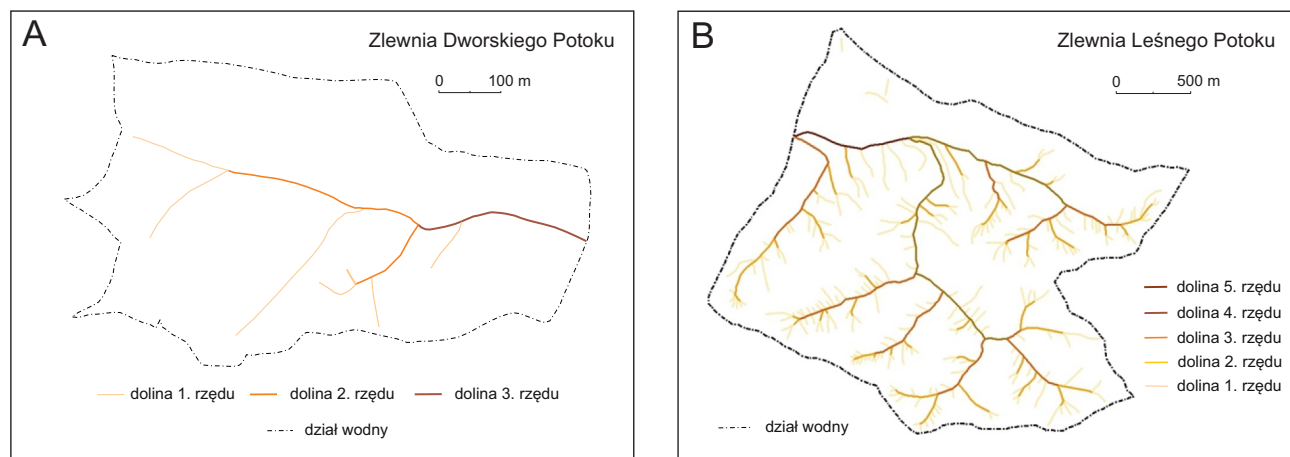
W trakcie badań terenowych skartowano wszystkie drogi występujące w rolniczej zlewni Dworskiego Potoku i w zalesionej części zlewni Leśnego Potoku zgodnie z opracowanym w tym celu raptularzem (Natanek 2016). Na podstawie map topograficznych i badań terenowych wykonano mapy przedstawiające: układ sieci drogowej, dolinnej i rzecznej, cechy skartowanych dróg oraz miejsca potencjalnej łączności (węzły) pomiędzy dolinami, ciekami i drogami umożliwiającej dostawę materiału do transportu w ciekach w postaci zawiesiny podczas trwania opadów deszczu i roztopów.

## Wyniki

### Charakterystyka sieci dolinnej, rzecznej i drogowej

#### Charakterystyka sieci dolinnej

Układ sieci dolinnej w zlewni Dworskiego Potoku jest asymetryczny z przewagą dolin w prawobrzeżnej części zlewni. Dolina główna 3. rzędu ma przebieg zbliżony do równoleżnikowego. Długość sieci dolinnej w zlewni wynosi 1,8 km. Wyróżniono 10 odcinków dolin od rzędu 1. do 3., o różnej długości (ryc. 2A). Najwięcej odcinków dolin (7) zalicza się do 1. rzędu (tab. 2). Doliny 1. rzędu, to głównie płytko wcięte doliny nieckowate bez wyraźnie widocznego koryta. Gęstość sieci dolinnej informująca o rozczłonkowaniu zlewni wynosi  $5,6 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ .



Ryc. 2. Rzędy dolin metodą Strahlera (1964). A. Zlewnia Dworskiego Potoku; B. Zlewnia Leśnego Potoku (na podstawie mapy topograficznej w skali 1:10 000, 1993 i 1:25 000, 1977)

Fig. 2. Orders of valleys using the Strahler method (1964). A. Dworski Potok catchment area; B. Leśny Potok catchment area (on the basis of a topographic map in the scale of 1:10,000, 1993 and 1:25,000, 1977)

Tabela 2. Liczba i długość dolin (średnia, minimalna, maksymalna) różnego rzędu w zlewni Dworskiego i Leśnego Potoku  
Table 2. Number and length (average, minimal, maximal) of valleys of different order in the Dworski and Leśny Potok catchment areas

Zlewnia	Rząd	Liczba dolin [liczba]	Długość średnia	Długość minimalna	Długość maksymalna	Suma długości dolin
	[numer]					
Dworskiego Potoku <sup>1</sup>	1	7	129	31	292	900
	2	2	300	138	323	461
	3	1	285	285	285	285
Leśnego Potoku <sup>2</sup>	1	225	93	22	569	21006
	2	42	152	19	524	6386
	3	9	518	108	928	4660
	4	2	1545	1200	1890	3090
	5	1				805

Źródło: <sup>1</sup> – na podstawie mapy topograficznej w skali 1:10 000, 1993; <sup>2</sup> – na podstawie mapy topograficznej w skali 1:25 000, 1977

Source: <sup>1</sup> – on the basis of a topographic map in the scale of 1: 10,000, 1993; <sup>2</sup> – on the basis of a topographic map in the scale of 1:25,000, 1977

Układ sieci dolinnej w zlewni Leśnego Potoku jest zbliżony do dendrytycznego. Długość sieci dolinnej w zlewni wynosi 36,0 km. Wyróżniono 279 odcinków dolin od rzędu 1. do 5. (ryc. 2B). Najwięcej odcinków dolin, bo aż 225, zalicza się do 1. rzędu. Wraz ze wzrostem rzędu dolin wzrasta długość poszczególnych odcinków dolin, z wyjątkiem odcinków 2. rzędu (tab. 2).

Gęstość sieci dolinnej w zlewni Leśnego Potoku wyniosła  $7,3 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ . Odcinki dolin zaliczone do 1. i 2. rzędu są to najczęściej wąskie doliny o V-kształtnym profilu poprzecznym (głównie debrza). Zbocza debrz cechują się dość dużymi spadkami, a ich głębokość może sięgać nawet do kilkunastu metrów. Następnym typem dolin są parowy (stanowią je niektóre odcinki dolin 2. rzędu), które charakteryzują się szerokim dnem i stromymi zboczami. Duża część odcinków dolin 1., 2. i 3. rzędu występuje w obszarze zalesionym, stąd ich dna wypełnione są często pniami powalonych drzew, gałęziami i liśćmi. Dodatkowo są one porośnięte darnią. Odcinki zaliczone do 3. rzędu są nieco szersze, dłuższe i mają bardziej

kręty przebieg. Odcinki dolin 4. i 5. rzędu cechują się szerokimi dnami, porośniętymi trawą. Ich koryta mają przebieg kręty i meandrowy. W ich obrębie występuje erozja boczna oraz akumulacja materiału. W większości doliny 4. rzędu występują w obszarze zalesionym, natomiast odcinek doliny 5. rzędu porastają użytki zielone.

#### Charakterystyka sieci rzecznej

Dworski Potok jest ciekim 2. rzędu, ma długość 0,74 km i jest lewobrzeżnym dopływem Starej Rzeki. Posiada tylko jeden dopływ o długości 0,22 km. W zlewni Dworskiego Potoku wyróżniono tylko dwa odcinki cieków 1. rzędu i jeden 2. rzędu (ryc. 3A, tab. 3). Gęstość sieci rzecznej wynosi  $3,26 \text{ km km}^{-2}$ .

Leśny Potok o długości 4,2 km jest ciekim 3. rzędu i prawobrzeżnym dopływem Starej Rzeki (ryc. 3B). W zlewni Leśnego Potoku wyróżniono 22 odcinki cieków o różnej długości oraz przebiegu (ryc. 4B). Najliczniejsze są odcinki cieków 1. rzędu. Długość sieci rzecznej w zlewni Leśnego Potoku wynosi 12,3 km, a jej gęstość  $2,5 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ .

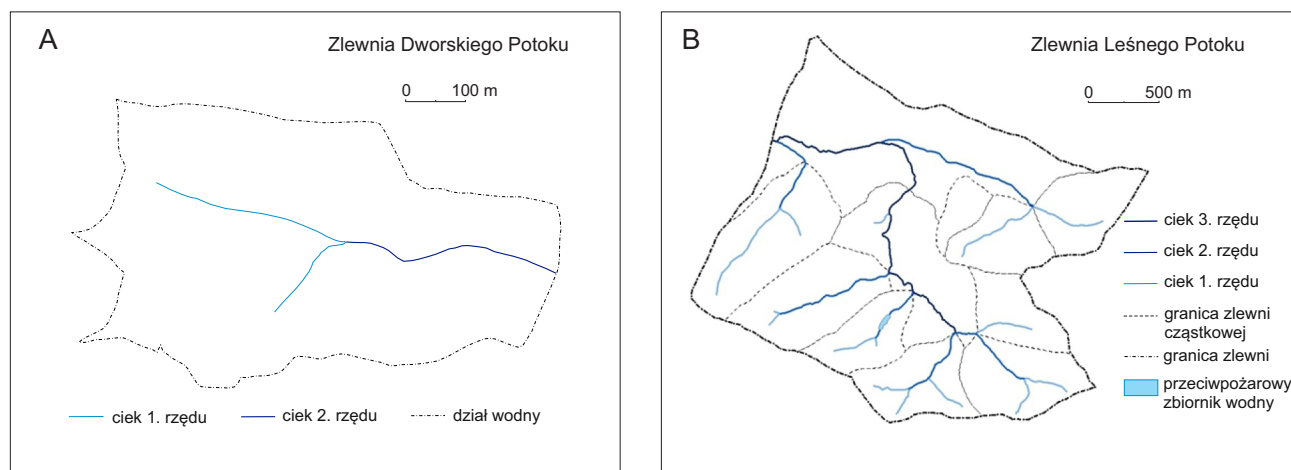
Tabela 3. Parametry sieci rzecznej zlewni Dworskiego i Leśnego Potoku

Table 3. Parameters of the river network in the Dworski and Leśny Potok catchments

Zlewnia	Rząd	Liczba cieków [liczba]	Długość średnia	Długość minimalna	Długość maksymalna	Suma długości cieków
	[numer]					
Dworskiego Potoku <sup>1</sup>	1	2	257	169	346	515
	2	1	445	445	445	445
Leśnego Potoku <sup>2</sup>	1	15	345,5	48	894	5183
	2	6	721,3	433	1230	4331
	3	1	–	–	–	2779

Źródło: <sup>1</sup> – na podstawie mapy topograficznej w skali 1:10 000, 1993; <sup>2</sup> – na podstawie mapy topograficznej w skali 1:25 000, 1977

Source: <sup>1</sup> – on the basis of a topographic map in the scale of 1: 10,000, 1993; <sup>2</sup> – on the basis of a topographic map in the scale of 1:25,000, 1977



Ryc. 3. Rzędy cieków metodą Strahlera (1964). A. Zlewnia Dworskiego Potoku; B. Zlewnia Leśnego Potoku (na podstawie mapy topograficznej w skali 1:10 000, 1993 i 1:25 000, 1977)

Fig. 3. Orders of watercourses by the Strahler method (1964). A. Dworski Potok catchment area; B. Leśny Potok catchment area (on the basis of a topographic map in the scale of 1:10,000, 1993 and 1:25,000, 1977)

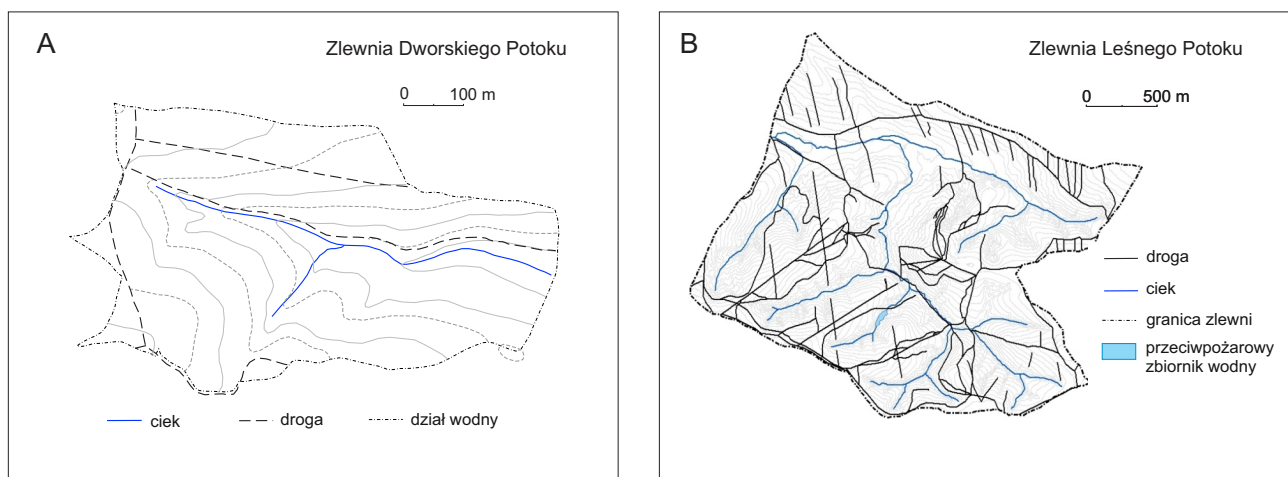
**Charakterystyka sieci drogowej**

W zlewni Dworskiego Potoku łączna długość sieci dróg wynosi 1,8 km. Najwięcej dróg o łącznej długości 1,4 km znajduje się w dnach dolin (40,3%) i na wierzchołkach (38,1%), a następnie na stokach (21,6%). Drogi biegną najczęściej wzdłuż doliny równoległe do biegu potoku, a na wierzchołku skośnie. Stosunkowo krótkie odcinki dróg na stokach biegną zwykle skośnie (ryc. 4A, tab. 4). Drogi w większości o szerokości do 3,5 m są nieutwardzone, płytko wcięte, zadarnione (74%) i pełnią funkcję dojazdową do pól. Gęstość sieci drogowej w użytkowanej rolniczo zlewni Dworskiego Potoku wynosi 6,1 km·km<sup>-2</sup>.

Większość skartowanych dróg (89%) to drogi niewcięte lub wcięte poniżej 0,5 m, głównie zadarnione i z widocznymi koleinami pozostawionymi przez maszyny rolnicze (ryc. 5A, B). Drogi przebiegające w obszarach wododziałowych są szersze, z wyraźny-

mi koleinami i częściowo utwardzone (ryc. 5C, D). Drogi wcięte powyżej 0,5 m, czyli holwegi, stanowią natomiast 11% wszystkich dróg i występują głównie w obszarach wododziałowych. Mają niewielki spadek i są częściowo utwardzone (ryc. 5E, F), a transportowany w ich obrębie materiał glebowy ma niewielkie możliwości dotarcia do koryta Dworskiego Potoku.

W zlewni Leśnego Potoku łączna długość dróg wynosi 29,6 km. W czasie kartowania terenowego wydzielono 165 odcinków dróg. Kryterium podziału stanowiło położenie odcinka drogi względem głównych form rzeźby oraz zmiana typu profilu poprzecznego drogi. Analizowano drogi położone w obszarze zalesionym omawianej zlewni, które nie były pokryte nawierzchnią asfaltową. Najwięcej odcinków dróg znajduje się na stokach (61%) oraz na grzbietach (28%). Najmniej odcinków położonych jest w dolinach (7%) i na wierzchołku (3%) (tab. 4). Naj-



Ryc. 4. Układ sieci drogowej. A. Zlewnia Dworskiego Potoku; B. Zlewnia Leśnego Potoku (na podstawie mapy topograficznej w skali 1:10 000, 1993 i 1:25 000, 1977 oraz kartowania terenowego)

Fig. 4. Layout of the road network. A. Catchment of Dworski Potok; B. Leśny Potok catchment area (on the basis of a topographic map in the scale of 1:10,000, 1993 and 1:25,000, 1977 and field mapping)

Tabela 4. Położenie drogi względem form rzeźby w zlewni Dworskiego i Leśnego Potoku

Table 4. Location of the road in relation to relief forms in the Dworski and Leśny Potok catchments

Zlewnia	Forma rzeźby	Położenie drogi względem form rzeźby					Suma
		zgodnie ze spadkiem	prostopadle do spadku	skośnie do spadku	wzdłuż	w poprzek	
[%]							
Dworskiego Potoku <sup>1</sup>	Stok	7,9	3,1	10,7	-	-	21,6
	Grzbiet	-	-	-	-	-	-
	Dolina	-	-	-	40,3	-	40,3
	Wierzchowina	-	-	-	1,5	3,1	33,5
Leśnego Potoku <sup>2</sup>	Stok	15	11	35	-	-	61
	Grzbiet	-	-	-	13	4	28
	Dolina	-	-	-	2	2	7
	Wierzchowina	-	-	-	3	-	4

Źródło: <sup>1</sup> – na podstawie mapy topograficznej w skali 1:10 000, 1993; <sup>2</sup> – na podstawie mapy topograficznej w skali 1:25 000, 1977 i kartowania terenowego

Source: <sup>1</sup> – on the basis of a topographic map in the scale of 1: 10,000, 1993; <sup>2</sup> – on the basis of a topographic map in the scale of 1:25,000, 1977 and field mapping



Ryc. 5. Typy dróg w zlewni Dworskiego Potoku (fot. J. Świąchowicz)

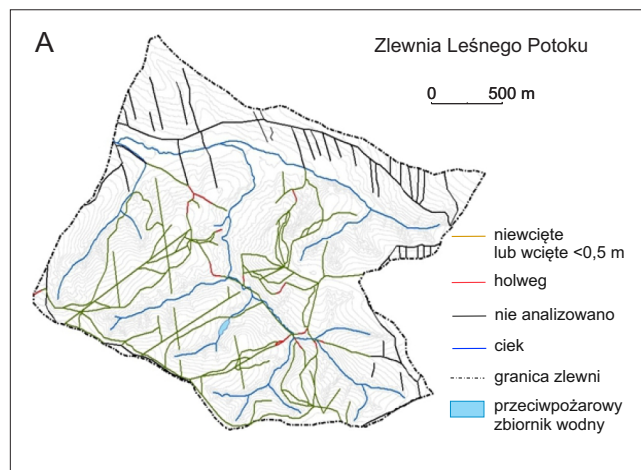
Fig. 5. Types of roads in Dworski Potok catchment area (photo by J. Świąchowicz)

więcej dróg położonych na stoku ma skośny przebieg – 35%. Odcinki biegnące równoległe do stoku stanowią 15% długości dolin.

Gęstość sieci drogowej w obszarze zalesionym zlewni Leśnego Potoku wyniosła  $8,7 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ , zaś gęstość dróg użytkowanych wyłącznie gospodarczo wyniosła  $6,9 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$  ( $68,71 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Na podstawie kryterium ekonomicznego optymalna gęstość sieci dróg na powierzchni leśnej w obszarach podgórskich i górskich w karpackiej krainie przyrodniczo leśnej powinna wynosić od  $18,4$  do  $27,8 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Antończyk, Dzikowski 1984). Obliczona wartość gęstości sieci drogowej użytkowanej gospodarczo ponad dwukrot-

nie przekroczyła wskaźnik optymalnej gęstości sieci drogowej, jaka powinna wynosić w analizowanym obszarze. Większość skartowanych dróg (88%) to drogi niewcięte lub wcięte poniżej  $0,5 \text{ m}$ , natomiast 12% stanowią drogi wcięte powyżej  $0,5 \text{ m}$ , czyli holwegi (ryc. 6). Drogi typu holweg występują głównie na stokach, a ich przebieg w stosunku do stoków jest skośny.

Nawierzchnia dróg jest w większości naturalna i nieutwardzona (90%). Dominują odcinki dróg, które częściowo pokryte są darnią (80%). Zdecydowanie mniej jest dróg pozbawionych darni, te stanowią 16%, natomiast dróg, które są całkowicie porośnięte



Ryc. 6. Zlewnia Leśnego Potoku A. Położenie różnych typów wcięć drogowych względem form rzeźby; B. Droga wcięta w podłoże do głębokości mniejszej niż  $0,5 \text{ m}$

Fig. 6. Leśny Potok catchment A. Location of various types of road cuts in relation to relief forms; B. The road cut into the ground to a depth of less than  $0.5 \text{ m}$

trawą jest jedynie 4%. Zdecydowana większość dróg (79%) stanowią drogi użytkowane gospodarczo, 12% odcinków drogowych zaklasyfikowano jako drogi piesze-gospodarcze, 8% dróg użytkowana jest wyłącznie przez pieszych. Najmniej, bo tylko 1% stanowią drogi dojazdowe do gospodarstw domowych.

Niemal na każdej skartowanej drodze występują mikroformy wskazujące na zachodzenie w ich obrębie procesów erozji, akumulacji oraz transportu materiału związanych ze spływem wody (zagłębienia

bezodpływowe tymczasowe, żłobiny, koleiny, podcięcia drogowo, kociołki eworsyjne oraz stożki napływowe). Dużą rolę odgrywają mikroformy, powstałe w wyniku gospodarczego użytkowania dróg leśnych – koleiny (ryc. 7A, B). Powszechne w ich obrębie są żłobiny erozyjne z progami i kociołkami eworsyjnymi (ryc. 7C). Dosty często za progiem zachodzi depozycja materiału organicznego (liście, ściółka) i mineralnego (ryc. 7D). Zaobserwowano istnienie licznych tymczasowych zagłębień bezodpływowych



Ryc. 7. Mikroformy w obrębie dróg (fot. A. Natanek). A. Żłobiny w obrębie drogi powstałe na skutek erozji liniowej; B. Koleiny powstałe po przejeździe maszyn leśnych; C. Kociołek eworsyjny na drodze częściowo zadarnionej; D. Rozcięcie liniowe na drodze, w obrębie którego zachodzi akumulacja materiału; E. Zagłębienie bezodpływowe powstałe po przejeździe maszyn leśnych i wypełnione wodą pochodzącą z opadów deszczu; F. Podcięcie drogowo w obrębie holwegu będące źródłem materiału do transportu podczas opadów lub roztopów

Fig. 7. Microforms within roads (photo by A. Natanek). A. Rows along the road, caused by linear erosion; B. Ruts resulting from the passage of forest machines; C. Evolution cauldron on a partially sodded road; D. A linear cut on the road with material accumulation; E. A septic basin created after the passage of forest machines and filled with rainwater; F. Road undercut within the tow, which is the source of material for transport during rainfall or snowmelt



wypełnionych wodą opadową (ryc. 7E). Mikroformy te powstają w wyniku przejazdu maszyn leśnych wykorzystywanych do zrywki drewna. Podcięcia drogowe występują głównie w obrębie holwegów (ryc. 7F) i stanowią źródło materiału, który może być transportowany w obrębie dróg.

### Potencjalna łączność sieci dolinnej, rzecznej i drogowej w transporcie zawiesiny

Transport zawiesiny może odbywać się zarówno w obrębie sieci rzecznej, dolinnej oraz drogowej. Sieci te łączą się ze sobą, a miejsca tych połączeń tworzą tzw. węzły między ciekami, dolinami i drogami. Potencjalnie w tych miejscach może zachodzić (podczas roztopów i deszczów) dostawa zawiesiny z jednej sieci do drugiej, a więc do naturalnej sieci drenażu mogą zostać dołączone antropogeniczne rozcięcia powstałe w obrębie dróg.

#### Rodzaje węzłów i ich rola w transporcie zawiesiny w zlewni Dworskiego Potoku

W zlewni Dworskiego Potoku występuje 10 węzłów łączących poszczególne sieci ze sobą (ryc. 8). Jest tylko jeden węzeł łączący ciek z ciekami. Węzłów łączących ciek i dolinę zaledwie 4, a węzłów łączących ciek z drogą nie ma wcale. Równie niewielka jest liczba węzłów łączących doliny różnego rzędu (3) oraz drogi (2). Węzłów łączących doliny i drogi nie ma wcale (ryc. 9, 10).



Ryc. 9. Liczba węzłów występująca między siecią drogową, dolinną i rzeczną w zlewni Dworskiego Potoku

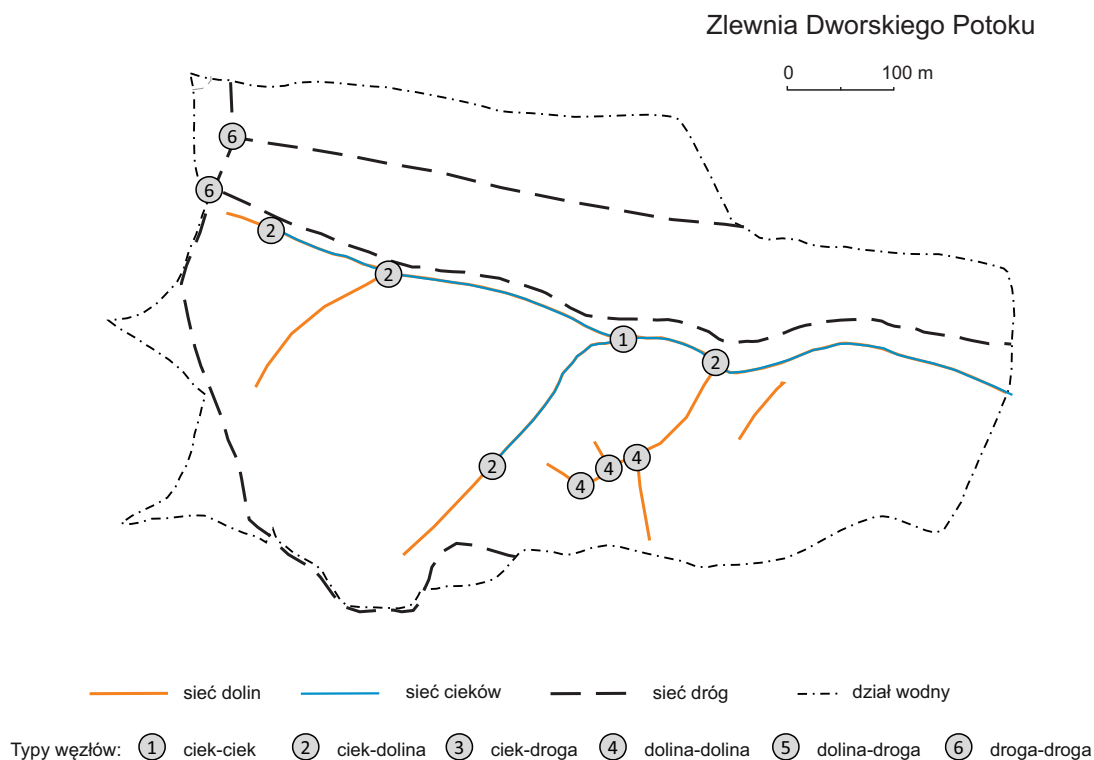
Fig. 9. Number of nodes between the road, valley and river networks in Dworski catchment area

#### Węzeł ciek-ciek

W zlewni Dworskiego Potoku jest tylko 1 węzeł łączący ciek z ciekami i jest to węzeł pomiędzy ciekami 1. rzędu (ryc. 8). Transport zawiesiny w korytach cieków zachodzi podczas wezbrań opadowych w okresie letnim oraz podczas wezbrań roztopowych w okresie wiosennym (Świąchłowicz 2002).

#### Węzeł ciek-dolina

Węzłów łączących ciek z doliną jest 4. Są to połączenia głównego cieku z suchymi dolinami niecko-



Ryc. 8. Zlewnia Dworskiego Potoku – miejsca połączenia (węzły) sieci dolinnej, rzecznej i drogowej

Fig. 8. Dworski Potok catchment – places of connection (nodes) of the valley, river and road networks



Ryc. 10. Przykładowe rodzaje węzłów występujące w zlewni Dworskiego Potoku. A. Węzeł ciek–dolina, B. Węzeł ciek–ciek, C. Węzeł ciek–dolina (fot. J. Świąchowicz)

Fig. 10. Examples of types of nodes in the Dworski Potok catchment. A. Stream–valley node, B. Stream–stream node, C. Stream–valley node (photo by J. Świąchowicz)

watymi rozcinającymi stoki. Głównym procesem rzeźbotwórczym działającym w dolinach odwadnianych okresowo jest erozja liniowa (ryc. 8, Świąchowicz 2012).

### Węzeł dolina–dolina

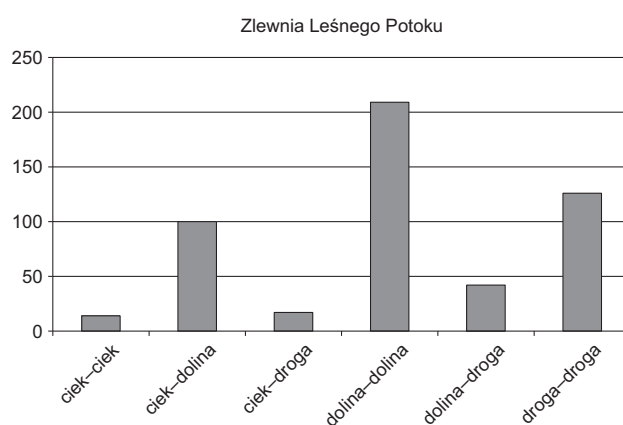
Węzłów dolina–dolina jest 3 (ryc. 8). Wśród nich znajdują tylko połączenia pomiędzy dolinami okresowo odwadnianymi. W przypadku węzła dolina–dolina, materiał transportowany w osi jednej doliny zwykle deponowany jest u jej ujścia do drugiej doliny w postaci stożków deluwialnych. Większość przemieszczanego materiału w dolinach okresowo odwadnianych deponowana jest u wylotu dolin w formie stożków deluwialnych, które zwykle są rozmywane i rozcinane podczas kolejnych spływów wody występujących po silnych opadach.

### Węzeł droga–droga

W zlewni Dworskiego Potoku występują zaledwie 2 węzły łączące drogę z drogą (ryc. 8). Wynika to z faktu, że w zlewni występuje niewielka gęstość dróg i większości przypadków drogi mają przebieg równoległy do głównych form terenu. Transport zawiesiny w obrębie dróg związany jest przede wszystkim z erozją liniową, o czym świadczą liczne mikroformy w postaci żłobin lub rozcięć drogowych.

### Rodzaje węzłów i ich rola w transporcie zawiesiny w zlewni Leśnego Potoku

W zlewni Leśnego Potoku najwięcej połączeń występuje między dolinami (209 węzłów dolina–dolina) oraz między drogami (126 węzłów droga–droga), co jest związane z dużą gęstością sieci dolinnej i drogowej. Połączeń między ciekami i dolinami jest 100. Najmniej zaś węzłów jest pomiędzy ciekami (14 węzłów ciek–ciek). Stosunkowo niewiele występuje połączeń między ciekami a drogami (17 węzłów ciek–droga) oraz dolinami a drogami (42 węzłów dolina–droga) (ryc. 11).



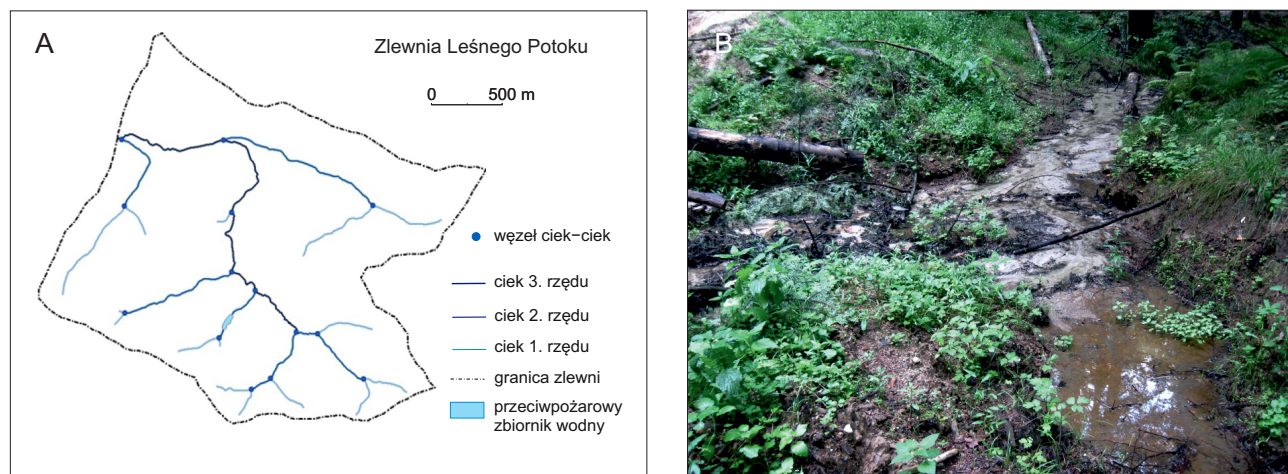
Ryc. 11. Liczba węzłów występująca między siecią drogową, dolinną i rzecznią w zlewni Leśnego Potoku

Fig. 11. Number of nodes between the road, valley and river networks in Leśny catchment area

### Węzeł ciek–ciek

W zlewni Leśnego Potoku węzłów łączących ciek z ciekami jest 14. Najwięcej pomiędzy ciekami 1. rzędu (6 połączeń) oraz 2. i 3. rzędu (5 połączeń), a w pozostałych przypadkach tylko po jednym połączeniu (ryc. 12A).

Transport zawiesiny w korytach cieków zachodzi podczas wezbrań opadowych w okresie letnim oraz podczas wezbrań roztopowych w okresie wiosennym. Takich zdarzeń może być od kilku do kilkunastu w ciągu roku (Świąchowicz 2005, Świąchowicz, Żelazny 2005). Mimo, iż liczba połączeń między ciekami jest niewielka, to potencjalnie mniejsze dopływy mogą dostarczać znaczną ilość materiału zawiesinowego do koryt większych cieków. Często zdarza się tak, że w czasie podwyższonych przepływów materiał pochodzący z dopływu niższego rzędu akumulowany jest na granicy połączenia z ciekami wyższego rzędu w postaci małych stożków napływowych. Materiał ten w czasie większych wezbrań może zostać uruchomiony przez strumień wody. Zdarzają się jednak



Ryc. 12. Zlewnia Leśnego Potoku. A. miejsca połączenia cieków różnego rzędu (węzły ciek-ciek); B. Akumulacja piasku i pyłu pochodzącego z ciek 2. rzędu w obrębie koryta ciek 1. rzędu. Materiał ten został zakumulowany w czasie opadania fali wezbraniowej (fot. A. Natanek)

Fig. 12. Leśny Potok catchment. A. places where watercourses of different order connect (watercourse nodes); B. Accumulation of sand and silt from the 2nd order watercourse within the 1st order watercourse bed. This material was accumulated during the fall of the flood wave (photo by A. Natanek)

przypadki, kiedy to w czasie wezbrania zawieszona transportowana w korycie ciek 1. rzędu jest akumulowana podczas opadania fali wezbraniowej w korycie u wylotu dopływu niższego rzędu (ryc. 13).

#### Węzeł ciek-dolina

Węzłów łączących ciek z doliną jest 100. Głównym procesem rzeźbotwórczym działającym w dolinach

odwadnianych okresowo jest erozja liniowa (Święchowicz 2005). Świadczą o tym suche koryta występujące w dnach tych dolin (ryc. 13A).

Okresowo skoncentrowany spływ powoduje, że dnem dolin może być transportowany materiał różnofrakcyjny. Materiał ten deponowany jest zwykle u wylotu tych dolin i w obrębie koryta rzeki głównej (ryc. 13B). Przemieszczanie się tego materiału



Ryc. 13. A. Koryto występujące w dnie doliny odwadnianej okresowo, które może przyczynić się do zwiększenia odpływu wody w zlewni oraz do transportu zawiesziny. B. Zakumulowany materiał w korycie Leśnego Potoku pochodzący z debrzy, który może zostać uruchomiony do transportu w czasie dużych wezbrań (fot. A. Natanek)

Fig. 13. A. A riverbed occurring at the bottom of a periodically drained valley, which may contribute to an increase in water runoff in the catchment area and to the transport of suspended solids. B. Accumulated material in the Leśny Potok bed from the debra, which can be put into transport during high floods (photo by A. Natanek)

odbywa się na niewielkie odległości. Świadczą o tym mikroformy w dnach debrz lub parowów, które tworzą system żłobin erozyjnych z akumulowanym w ich obrębie materiałem, często w formie stożków proluwialnych. Do akumulacji tego materiału przyczyniają się gałęzie oraz liście drzew, które porastają zbocza dolin. Jedynie podczas dużych wezbrań grubszy materiał tworzący stożki proluwialne u wylotu dolin okresowych jest wyprzątnięty na dalsze odległości.

### Węzeł ciek–droga

W zlewni Leśnego Potoku węzłów łączących ciek z drogą jest 17 (ryc. 14A). Węzły te mogą funkcjonować w transportowaniu zawiesiny głównie w czasie wiosennych roztopów, letnich opadów oraz w trakcie trwania prac zrywkowych. Dostawa zawiesiny odbywa się zazwyczaj z obrębu drogi do koryta ciek, natomiast dostawa zawiesiny z koryta ciek do drogi rzadko jest możliwa, gdyż koryta cieków są często dosyć głęboko wcięte w podłoże i odznaczają się wyraźną krawędzią od dna doliny. Jedynie podczas powodzi, kiedy woda występuje poza koryto i wypełnia dno doliny możliwa jest akumulacja pozakorytowa drobnego materiału (w tym również na odcinkach dróg przecinających koryto).

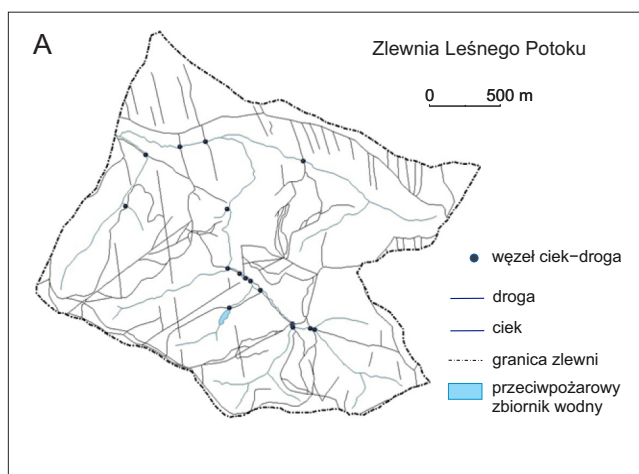
Odcinki dróg, które bezpośrednio łączą się korytem ciek nie są utwardzone, natomiast różnią się pod względem pokrycia darnią. Tylko odcinki dróg pozbawione roślinności są w stanie dostarczać zawieszinę do koryta cieków w przeciwieństwie do dróg, które całkowicie są pokryte darnią. Dużą rolę w transportowaniu zawiesiny na drodze odgrywają powstałe w jej obrębie mikroformy w postaci rynien erozyjnych i kolein, gdyż głównie w ich obrębie następuje przemieszczanie się materiału zawieszinowego.

Dodatkowo w obrębie omawianych dróg często występują tymczasowe zagłębienia bezodpływowe oraz system rynien z progami i kociołkami eworsyjnymi, w obrębie których dochodzi do akumulacji materiału. Może to potwierdzać, iż transportowana w korycie ciek zawieszina nie pochodzi z całego odcinka drogowego, ale z jego poszczególnych fragmentów.

W zlewni Leśnego Potoku prowadzone są prace leśne, w związku z tym drogi w tym obszarze muszą być odpowiednio przygotowane do zrywki drewna. W węzłach ciek–droga odcinek drogi przecina koryto rzeczne (ryc. 14B). W takim przypadku osady (głównie pyłowe) w korycie i na drodze mogą być uruchamiane (wzruszane) i transportowane przez ciek każdorazowo po przejechaniu przez tą drogę pojazdu. Szczególnie intensywnie proces ten może zachodzić podczas wyższych stanów wody w potoku.

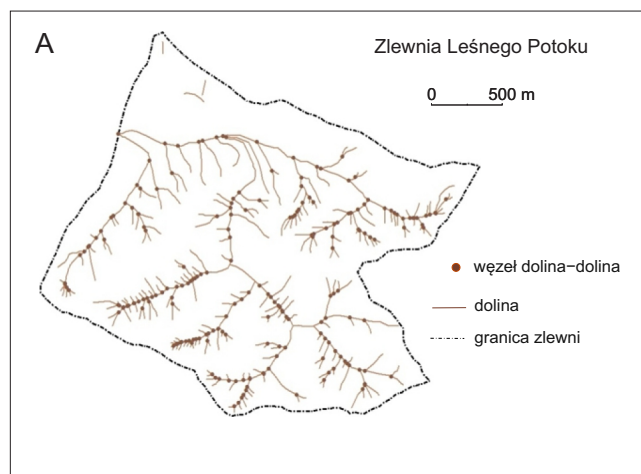
### Węzeł dolina–dolina

Węzłów dolina–dolina jest 209 (ryc. 15A). Wśród nich znajdują się zarówno połączenia pomiędzy dolinami okresowo odwadnianymi oraz pomiędzy dolinami okresowo odwadnianymi a dolinami rzecznyymi. W przypadku węzła dolina–dolina, materiał transportowany w osi jednej doliny zwykle depozytowany jest u jej ujścia do drugiej doliny w postaci stożków napływowych (dolina stale odwadniana) lub proluwialnych (dolina okresowo odwadniana), a w przypadku węzła ciek–dolina materiał dostarczany jest zwykle bezpośrednio do koryta ciek. Transport materiału w dnach dolin okresowo odwadnianych odbywa się na niewielkie odległości ze względu na obecność w ich dnach gęstej roślinności oraz licznych gałęzi i pni drzew w obrębie, których materiał zawieszinowy może być zatrzymywany.



Ryc. 14. Zlewnia Leśnego Potoku. A. Miejsca połączeń drogi z ciekami (węzeł ciek–droga); B. Droga przecinająca koryto ciek, która jest intensywnie użytkowana podczas prac leśnych transportuje duże ilości materiału pyłowego, a ten z kolei zatrzymywany jest w korycie ciek (fot. A. Natanek)

Fig. 14. Leśny Potok River catchment area. A. The places where the road connects to the watercourse (watercourse–road node); B. The road crossing the watercourse, which is intensively used during forestry works, transports large amounts of dust material, which in turn is retained in the watercourse bed (photo by A. Natanek)



Ryc. 15. Zlewnia Leśnego Potoku. A. Miejsce połączenia doliny z doliną (węzeł dolina-dolina); B. Porośnięta gęstą roślinnością pokrywa osadów proluwialnych, która została zakumulowana u wylotu doliny okresowo odwadniającej (fot. A Natanek)

Fig. 15. Leśny Potok catchment area. A. Place where the valley joins the valley (valley-valley node); B. Overgrown with dense vegetation, it covers pro-liberal sediments, which have been accumulated at the mouth of the periodically d rained valley (photo by A Natanek)

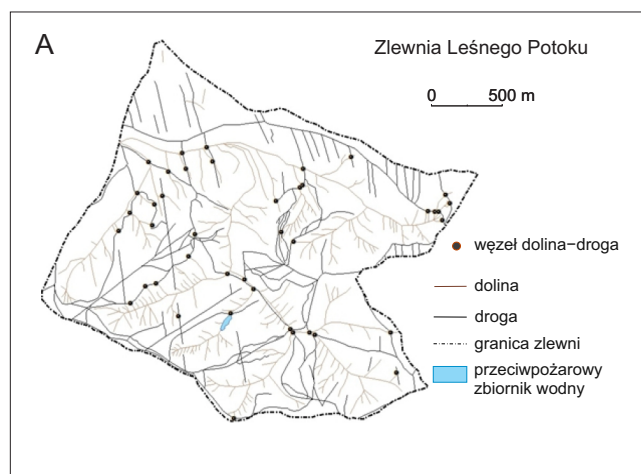
Większość przemieszczanego materiału w dolinach okresowo odwadnianych deponowana jest u wylotu dolin w formie stożków proluwialnych, które zwykle są rozmywane i rozcinane podczas kolejnych spływów wody występujących po silnych opadach (ryc. 15B). Gęsta pokrywa roślinna, zadrzewienia oraz podmokłe dno dolin rzecznych sprzyjają akumulacji materiału pochodzącego z debrzy oraz parowów.

### Węzeł dolina-droga

Węzłów łączących dolinę z drogą w zlewni Leśnego Potoku jest 42 (ryc. 16A). Odcinki drogowe, które przechodzą ze stoku do dna dolin rzecznych w więk-

szości przypadków są dość gęsto pokryte darnią, a dodatkowo w ich obrębie prawie nie występują mikroformy, dzięki którym potencjalnie zawiesina mogłaby dostawać się z drogi do doliny podczas opadów lub roztopów (ryc. 16B).

Zdarzają się jednak wyjątki, ponieważ w zlewni Leśnego Potoku trwają prace zrywkowe, a pojazdy przeznaczone do tego celu przekształcają powierzchnię dróg powodując powstanie licznych kolein, którymi potencjalnie może być transportowany materiał zawieszony do dolin. Gdy droga biegnie dnem doliny rzecznej możliwa jest dostawa zawiesiny z dolin bocznych okresowo odwadnianych, które łączą się z tą doliną.



Ryc. 16. Zlewnia Leśnego Potoku. A. Miejsce połączenia drogi z doliną (węzeł dolina-droga); B. Transport zawiesiny na drodze całkowicie porośniętej darnią jest ograniczony, co skutkuje brakiem jej dostawy do dna doliny (fot. A. Natanek)

Fig. 16. Leśny Potok catchment. A. The place where the road joins the valley (valley-valley node); B. Transport of the suspended material on a fully covered turf road is limited, which results in the lack of its delivery to the bottom of the valley (photo by A. Natanek)

## Węzeł droga–droga

W zlewni Leśnego Potoku połączeń drogi z drogą jest 126 (ryc. 17A). Transport zawiesiny w obrębie dróg związany jest przede wszystkim z erozją liniową, o czym świadczą liczne mikroformy w postaci żłobin lub rozcięć drogowych. W dostawie zawiesiny z jednej drogi do drugiej największe znaczenie mają drogi bez asfaltowej nawierzchni oraz takie, które nie są porośnięte gęstą darnią. Potencjalna dostawa zawiesiny z drogi pokrytej gęstą trawą jest utrudniona, gdyż drobny materiał zostaje zatrzymany przez roślinność (ryc. 17B).

W zlewni Leśnego Potoku transport zawiesiny w obrębie dróg zachodzi na niewielkie odległości, co uwarunkowane jest m.in. pokryciem roślinnością, lokalnymi zmianami nachyleń drogi (na jednej drodze mogą występować zarówno odcinki płaskie jak i odcinki o różnym nachyleniu), nawierzchnią oraz użytkowaniem. Materiał często akumulowany jest w obrębie żłobin lub w zagłębieniach bezodpływowych, stąd jego transport z jednej drogi do drugiej odbywa się stosunkowo rzadko.

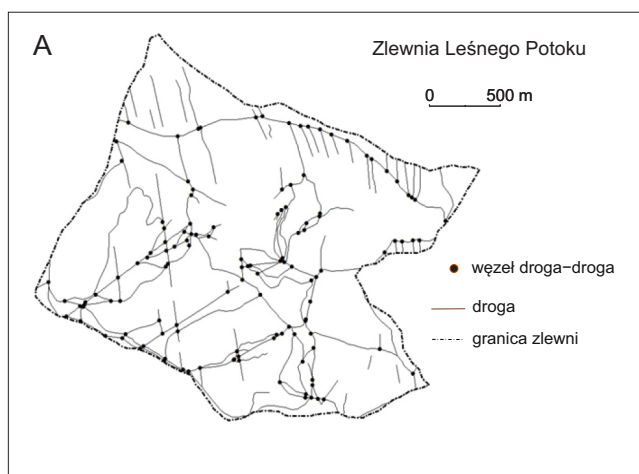
Potencjalna łączność między siecią drogową, dolinną i rzeczną polegająca na współdziałaniu w transporcie zawiesiny odbywać się może w czasie opadów deszczów lub podczas śródzimowych odwilży i roztopów. Funkcjonowanie tych węzłów uwarunkowane jest również takimi czynnikami jak okrywa roślinna, czy też sposób ich użytkowania (miejsce transportu drewna). Węzły typu ciek–ciek, ciek–droga oraz ciek–dolina mają bardzo duży wpływ na transportowanie zawiesiny w zlewni Leśnego Potoku, gdyż materiał dostarczany z sieci dolinnej lub sieci drogowej do koryta cieków może być dalej transportowany siecią

rzeczną. Poza tym w ciągu roku liczba zdarzeń erozyjnych, która występuje w korytach cieków (nawet podczas podwyższonych stanów wody) może być większa niż na stokach (Świąchowicz 2012), a materiał transportowany ciekami pochodzi w dużej mierze z samego otoczenia koryt (m.in. z erozji bocznej i dennej). Transport zawiesiny w korytach cieków zachodzi ciągle, tylko z różną intensywnością. W miejscach występowania węzłów dolina–dolina, dolina–droga oraz droga–droga, może występować transport materiału między siecią dolinną i drogową, jednak często jest on akumulowany w obrębie den dolin lub dróg, a dalszy transport możliwy jest tylko podczas ekstremalnych opadów lub powodzi.

## Dyskusja

Występuje duża dysproporcja pomiędzy występowaniem węzłów różnego typu w zlewniach Dworskiego i Leśnego Potoku. Spowodowana jest ona zarówno różnicami w powierzchni zlewni, rzeźbą jak również użytkowaniem ziemi. Duże rozcięcie dolinami zlewni Leśnego Potoku jest przyczyną występowania gęstej sieci dróg, ułatwiającej komunikację wewnątrz zlewni jak i prace zrywkowe.

Zlewnia Dworskiego Potoku o rzeźbie pogórzy niskich charakteryzuje się małym rozdolinieniem. Większość łagodnie nachylonych stoków jest przeznaczonych pod uprawę. Zlewnia Dworskiego Potoku jest typową zlewnią rolniczą, której 80% powierzchni zajmują grunty orne należące do wielkoobszarowego gospodarstwa rolnego Rolniczego Zakładu Doświadczalnego UJ. Stąd niewielka liczba dróg dojazdowych



Ryc. 17. Zlewnia Leśnego Potoku. A. Miejsca połączenia drogi z drogą (węzeł droga–droga); B. W przypadku takiego węzła drogowego potencjalna dostawa zawiesiny może nastąpić z odcinka nie porośniętego darnią do odcinka zadarnionego, jednak dalszy jego transport jest utrudniony (fot. A. Natanek)

Fig. 17. Leśny Potok catchment. A. Places where road meets road (road–road node); B. In the case of such a road node, the potential delivery of suspension may take place from the section not covered with turf to the section covered with turf, but its further transport is difficult (photo by A. Natanek)

do pól. W zlewni Dworskiego Potoku wyznaczono tylko 1 punkt, gdzie występuje połączenie Dworskiego Potoku z jego dopływem. Węzłów łączących ciek i dolinę jest zaledwie 4, a węzłów łączących ciek z drogą nie ma wcale. Równie niewielka jest liczba węzłów łączących doliny różnego rzędu (3) oraz drogi (2). Węzłów łączących doliny i drogi nie ma wcale (ryc. 11).

Na podstawie przeprowadzonych w zlewni Dworskiego Potoku badań poznano prawidłowości występowania, przebiegu i roli współczesnych procesów stokowych na tym obszarze (Świąchowicz 2012), co pozwala również na sformułowanie prawidłowości występowania łączności w obrębie poszczególnych sieci umożliwiającej transport materiału glebowego w zlewni. Procesy erozyjne wywołane przez opady na stokach zdarzają się epizodycznie (decyduje o tym erozyjność opadów) i niejednocześnie na całej powierzchni zlewni (decyduje o tym głównie stan okrywy roślinnej). Okresy działania procesów erozyjnych (transformacji) w wieloleciu (1987–2009) zajmują w zależności od przyjętego kryterium zaledwie od 0,3% do 4% czasu (Świąchowicz 2012).

Deszcze, które wystąpiły w krótkich okresach potencjalnej transformacji stoków, charakteryzują się bardzo zróżnicowaną skutecznością erozyjną. Deszcze potencjalnie erozyjne (zgodnie z kryterium USLE) trwały łącznie zaledwie 2% czasu półroczy letnich w wieloleciu, co w praktyce przekłada się na 84 dni w wieloleciu, czyli średnio na ok. 4 w roku. Największą skutecznością odznaczają się deszcze o ekstremalnej erozyjności lub jej bliskiej (powyżej  $200 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ), które zdarzały się wyłącznie w miesiącach letnich, głównie w lipcu i czerwcu.

Funkcjonowanie transportu materiału w obrębie badanych sieci możliwe było podczas występowania procesu erozji liniowej. W wieloleciu 1987–2009 potencjalna łączna liczba zdarzeń erozji liniowej mogła wynieść co najmniej 45. Największa liczba zdarzeń erozji liniowej wystąpiła w lipcu, czerwcu i sierpniu (Świąchowicz 2012). Podczas wielu zdarzeń część materiału glebowego ulega przemieszczeniu i lokalnej depozycji na stokach, nie wpływając na widoczną zmianę ich morfologii (I próg dostawy). W trakcie niektórych zdarzeń zostaje on jednorazowo przemieszczony od działu wodnego do podnóży stoków i tam zdeponowany (II próg dostawy). Jedynie podczas nielicznych zdarzeń materiał glebowy jest dostarczany bezpośrednio do koryta potoku. Podczas przekroczenia II i III progu dostawy w węzłach łączących poszczególne sieci (rzeczna, dolinna i drogowa) dochodzi przemieszczania materiału pomiędzy sieciami i w konsekwencji dostawy materiału glebowego do koryta potoku i jej odprowadzania poza zlewnię. W latach 1987–2009 potencjalna łączna liczba zdarzeń, w trakcie których doszło do przekroczenia I progu dostawy, wynosiła co najmniej 145. Przekro-

czenie II progu dostawy nastąpiło co najmniej 25 razy, a przekroczenie III progu dostawy już tylko 20 razy (Świąchowicz 2012).

Analizując sieć rzeczną Leśnego Potoku wyznaczono 14 punktów, gdzie występuje połączenie Leśnego Potoku z jego dopływami oraz dopływami dopływów Leśnego Potoku. W tych miejscach dochodzi do łączności, polegającej na dostawie wody i zawiesiny przez dopływy do koryta cieku głównego – Leśnego Potoku. Połączeń między dolinami różnego rzędu jest znacznie więcej, bo aż 209, a ponad 100 między doliną a ciekami. Odcinki dróg łączą się ze sobą w 126 miejscach. Między odcinkami dróg a dolinami istnieją 42 połączenia, a między odcinkami dróg a ciekami tych połączeń jest 17. Warto nadmienić, że analizę dla zlewni Leśnego Potoku wykonano na mapach w skali 1:25000, stąd rzeczywista liczba potencjalnych połączeń pomiędzy sieciami (węzłów) może być jeszcze większa w porównaniu do zlewni Dworskiego Potoku.

Potencjalne połączenia między siecią drogową, dolinną i rzecznią mogą wystąpić podczas występowania opadów atmosferycznych lub roztopów. Na Pogórzu największe miesięczne sumy opadów notowane były w lecie, gdy maksymalnie wynosiły około 100,0 mm w czerwcu (Świąchowicz 2012). Zatem przypuszczalnie najczęściej funkcjonalnych połączeń między omawianymi sieciami, polegających na transporcie zawiesiny, może wystąpić latem. Stosunkowo dużo połączeń omawianych sieci w transportowaniu zawiesiny może mieć miejsce w okresie wiosennym, który cechuje się dosyć wysokimi sumami opadów, a także występowaniem roztopów wiosennych. Również w zlewni Leśnego Potoku, w węzłach w obrębie krzyżowania się poszczególnych sieci, mogło dochodzić do połączeń podczas wystąpienia erozji liniowej, która w większości przypadków zachodziła w czasie deszczów powyżej 12,7 mm, charakteryzujących się dużą erozyjnością wynoszącą powyżej  $106 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  lub o maksymalnym 30-minutowym natężeniu wynoszącym  $30 \text{ mm}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Ze względu na pokrycie terenu lasem i inny mechanizm koncentracji fali wezbraniowej (głównie dzięki spływowi śródpokrywowemu) wartości te należy traktować orientacyjnie. Przykładowo w roku 2003 wezbrań w Potoku Leśnym Górnym wystąpiło tylko 6, w tym 3 spowodowane były opadami i 3 roztopami (Świąchowicz 2005). W tym samym roku w zlewniach użytkowanych rolniczo wezbrania wystąpiły dwukrotnie częściej. Świadczy to o dużej ochronnej roli koron drzew oraz większej roli spływu śródpokrywowego niż spływu powierzchniowego w koncentracji fali wezbraniowej w zlewniach zalesionych (Świąchowicz 2005, Świąchowicz, Żelazny 2005). Stąd też duża potencjalna rola dróg, w obrębie których koncentracja spływu liniowego jest większa niż na powierzchniach stoków porośniętych lasem. Dlatego drogi odgrywa-

ją dużą rolę w dostawie materiału zawieszono do transportu fluwialnego.

Według licznych autorów (m.in. Froehlich 1975, 1982, Krzemień, Świąchowicz 1992, Świąchowicz, Żelazny 2005) ilość transportowanego materiału zawieszono w czasie różnych przepływów wody w korytach cieków podlega dużemu zróżnicowaniu w ciągu roku i nie wykazuje prostych zależności. Maksymalne ilości materiału zawieszono występują zarówno przed, w czasie, czy też po kulminacji przepływu (Froehlich 1982). W zlewni Starej Rzeki, której zlewnia Leśnego Potoku jest zlewnią cząstkową wykazano, że duża ilość transportowanej zawiesiny związana była z wezbraniami deszczowymi oraz roztopowymi, a maksymalne wartości koncentracji zawiesiny wystąpiły w lecie (Świąchowicz 2002). Największa koncentracja materiału zawieszono w korycie Leśnego Górnego Potoku zazwyczaj występowała przed oraz w czasie kulminacyjnej fali przepływu, a gdy fala wezbraniowa opadała udział transportowanej zawiesiny bardzo szybko malał

(Świąchowicz, Żelazny 2005). Miało a to związek z szybką dostawą wody do koryt cieków oraz dostawą materiału z bliskiego otoczenia koryta cieków. Główne ciek zlewni Leśnego Potoku cechują się dosyć dobrze rozwiniętymi korytami rzecznoymi, stąd materiał, który transportowany jest tymi ciekami pochodzi w dużej mierze z podcinania i pogłębiania koryt tych cieków (ryc. 18A, B, C). Dodatkowo w obrębie koryt występują liczne miejsca, gdzie akumulowany jest materiał (ryc. 18D).

Zlewnie Leśnego Potoku charakteryzuje się występowaniem licznych dolin odwadnianych okresowo (Świąchowicz 2005) oraz gęstą siecią drogową. Uruchamianie materiału znajdującego się w dnach bocznych dolin i na drogach odbywa się rzadziej niż w korytach cieków. Transport zawiesiny z sieci drogowej do sieci dolinnej, a następnie do sieci rzecznej lub z sieci bocznych dolin do dolin głównych cieków, a następnie do koryt cieków jest utrudniony. W zlewni Leśnego Potoku dna dolin głównych cieków są szerokie, płaskie, a do tego porośnięte gęstą roślin-



Ryc. 18. Źródła pochodzenia zawiesiny transportowanej w zlewni Leśnego Potoku (fot. A Natanek). A. Kocioł eworsyjny powstały na skutek erozji wstecznej; B. Podcięcie brzegu koryta Leśnego Potoku będące źródłem materiału zawieszono podczas wezbrań; C. Koryto głównego ciek głęboko wcięte w dno doliny; D. Materiał zakumulowany w korycie cieków po wezbraniu

Fig. 18. Sources of origin of the suspended sediment transported in the Leśny Potok catchment (photo: A Natanek). A. Evolution boiler formed as a result of back erosion, B. Undercutting of the edge of the Leśny Potok bed being a source of suspension material during floods, C. Main watercourse bed deeply cut into the valley bottom, D. Material accumulated in the watercourse bed after flooding



ności i drzewami. W obrębie tych dolin dodatkowo występują liczne podmokłości. To wszystko sprawia, że materiał dochodzący z dróg lub bocznych dolin zatrzymywany jest w dnach głównych dolin rzecznych i potencjalnie materiał zawieszony mógłby dostać się do koryta cieką dopiero w czasie ekstremalnych opadów lub powodzi (Świąchowicz 2012).

Również podczas powodzi może się zdarzyć dostawa materiału z koryta cieką do drogi lub dna doliny. W innych przypadkach sytuacja taka raczej nie zachodzi, gdyż koryta cieków głównych są dość głęboko wcięte w dolinę, a koryta mniejszych cieków porośnięte są gęstą roślinnością, to wszystko stanowi barierę uniemożliwiającą na przemieszczenie się zawiesiny. Lokalnie zdarza się dostawa zawiesiny transportowanej cieką do dróg. Ma to zazwyczaj miejsce wtedy, kiedy odcinek drogi przechodzi przez ciek, którego koryto nie jest wcięte w dolinę.

## Wnioski

Transport zawiesiny w zlewni odbywa się zarówno siecią rzeczną, dolinną jak i drogową. Jest to proces zależny od obiegu wody w zlewni, ale wpływają na niego również rzeźba, użytkowanie terenu i pokrywa roślinna. Sieć dolinna, drogowa i rzeczna wzajemnie się przecinają (łączą), a miejsca tych połączeń (węzły) umożliwiają lub potęgują transportowanie zawiesiny w zlewni. Istnieje duża dysproporcja pomiędzy ilością połączeń (węzłów) pomiędzy różnymi sieciami w zlewni Dworskiego i Leśnego Potoku. Jest ona konsekwencją różnej powierzchni zlewni, rzeźby (głównie energii) i sposobu użytkowania ziemi. Zlewnia Dworskiego Potoku o małej powierzchni, niewielkiej energii rzeźby, małym rozdolinieniu płytkimi dolinami nieckowatymi stanowi prawie w całości wielkoobszarowe gospodarstwo rolne z niewielką liczbą dróg dojazdowych i jest użytkowana rolniczo. Zlewnia Leśnego Potoku ma większą powierzchnię, dużą energię rzeźby (strefa wyższego stopnia progów Pogórza Karpackiego), duże rozdolinienie powierzchni (debrze, parowy, doliny płaskodenne). Gęsta pokrywa koron drzew utrudnia szybką koncentrację spływu powierzchniowego, a większy udział w koncentracji fali wezbraniowej ma spływ śródpokrywo- wy. W tym kontekście dużą rolę w obiegu zawiesiny w zlewni odgrywa sieć drogowa.

Liczba węzłów w zlewni jest stała. Jednak ich funkcjonowanie polegające na wspomaganie transportu zawiesiny w korytach potoków uzależnione jest od wystąpienia opadów deszczów o określonej wydajności i dużym natężeniu lub od roztopów śniegów. W rolniczej zlewni Dworskiego Potoku płytkie doliny pozbawione ochronnej okrywy roślinnej reagują bardzo szybko na opad, a transport materiału przebiega

skutecznie. W zlewni Leśnego Potoku transport materiału w obrębie dolin jest utrudniony przez roślinność oraz gałęzie i pnie drzew, na co wskazują zakumulowane pokrywy proluwalne u ich wylotu.

Większość dróg w zlewni Dworskiego Potoku pełni funkcję dojazdową do pól. Drogi są nieliczne, bo duży areał pól uprawnych tego nie wymaga. W zlewni Leśnego Potoku sieć drogowa powstała w wyniku gospodarczego użytkowania lasu. W obrębie dróg w czasie prowadzenia prac zrywkowych dominują formy powstałe wskutek erozji liniowej – żłobiny oraz formy powstałe po przejazdach maszyn leśnych – koleiny. Formy te oraz brak pokrywy roślinnej sprawiają, że transport zawiesiny w czasie opadów deszczów lub roztopów śniegu w obrębie dróg jest duży i bardziej dynamiczny niż w dolinach.

W zlewni Leśnego Potoku dużej dynamice naturalnych procesów sprzyja gęsta sieć dolinna i rzeczna. W porównaniu do gęstości sieci dolinnej i rzecznej dla zlewni w obszarze progów Pogórza są to wartości stosunkowo duże. Ze względu na leśne użytkowanie zlewni i prowadzoną tam gospodarkę polegającą na ścinie i zrywce drewna istnieje gęsta sieć dróg.

Znaczna ilość materiału transportowanego przez cieką pochodzi z samego koryta (podcinanie brzegów, rozmywanie łąch) i najbliższego otoczenia koryt. Stąd najbardziej aktywne funkcjonowanie węzłów w transporcie zawiesiny występuje między węzłami ciek–ciek.

W sytuacji sieci rzecznej i drogowej (węzeł ciek–droga) oraz sieci rzecznej i dolinnej (węzeł ciek–dolina) funkcjonowanie węzłów, polegające na dostawie materiału do transportu fluwialnego, jest okresowe lub epizodyczne. Z kolei sieć drogowa i sieć dolinna (węzeł droga–dolina) charakteryzują się epizodyczną łącznością w transportowaniu zawiesiny.

W zależności od siły zdarzeń erozyjnych widoczne jest zróżnicowanie zasięgu przemieszczania materiału glebowego w obrębie poszczególnych sieci. Najczęściej materiał transportowany jest lokalnie na krótki dystans. Jedynie podczas nielicznych zdarzeń materiał glebowy jest dostarczany bezpośrednio do koryta potoku oraz dochodzi do krzyżowania się dróg transportu w obrębie poszczególnych sieci. Zdarzenia te charakteryzują się największą skutecznością w dostawie zawiesiny do koryt potoków, gdyż w czasie ich trwania jest uruchamiana największa masa materiału glebowego i dochodzi do połączeń funkcjonalnych poszczególnych sieci ze sobą.

Łączność sieci dolinnej, rzecznej i drogowej w transporcie materiału zawieszzonego w zlewni rolniczej i zalesionej zmienia się w roku i jest zróżnicowana w zlewni. Proces jest najbardziej dynamiczny i skuteczny podczas zdarzeń o dużej energii. W warunkach pogórskich są to opady o erozyjności bliskiej  $200 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  lub ją zdecydowanie przekraczające.

## Podziękowania

Autorki dziękują anonimowym recenzentom za wartościowe uwagi, które wzbogaciły pracę i nadały jej ostateczny kształt.

## Wkład autorów

Jolanta Świąchowicz: koncepcja, metodyka, badania terenowe, dokumentacja fotograficzna, opracowanie i interpretacja danych, ryciny, edycja tekstu, recenzowanie, promotorstwo. Adrianna Natanek: metodyka, opracowanie raptularza do kartowania dróg, badania terenowe, dokumentacja fotograficzna, opracowanie i interpretacja danych, ryciny, edycja tekstu.

## Literatura

- Antończyk S., Dzikowski J., 1984. Tabele optymalnych wskaźników gęstości dróg na powierzchni leśnej. *Sylvan* 1: 23–34.
- Bracken L.J., Croke J., 2007. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes* 21(13): 1749–1763. DOI: [10.1002/hyp.6313](https://doi.org/10.1002/hyp.6313).
- Brierley G., Fryirs K., Jain V., 2006. Landscape connectivity: The geographic basis of geomorphic applications. *Area* 38(2): 165–174. DOI: [10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x).
- Ciupa T., 2012. Znaczenie dróg na obszarze zurbanizowanym w kształtowaniu odpływu i transportu fluwialnego (Kielce). *Landform Analysis* 19: 17–28.
- Froehlich W., 1975. Dynamika transportu fluwialnego Kamienicy Nawojowskiej. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 114: 1–122.
- Froehlich W., 1982. Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryta w górskiej zlewni fliszowej. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 143: 1–144.
- Froehlich W., Słupik J., 1980. Drogi polne jako źródło dostawy wody i zwietrzeliny do koryta ciek. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 235: 257–268.
- Froehlich W., Słupik J., 1986. Rola dróg w kształtowaniu spływu i erozji w karpaccich zlewniach fliszowych. *Przegląd Geograficzny* 58: 129–160.
- Fryirs K., Brierley G.J., 1999. Slope-channel decoupling in Wolumala catchment, New South Wales, Australia: the changing nature of sediments sources following European settlement. *Catena* 35: 41–63. DOI: [10.1016/S0341-8162\(98\)00119-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00119-2).
- Gołąb J., 2011a. Natężenie powierzchniowego spływu wody z leśnej drogi stokowej. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 7: 199–208.
- Gołąb J., 2011b. Przechwytywanie wewnątrzgruntowego spływu wody przez wykop leśnej drogi stokowej. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 7: 117–198.
- Gołąb J., 2012. Symulacja objętości powierzchniowego spływu wody z sieci dróg leśnych w terenie górskim. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 2: 129–139.
- Gołąb J., Wańczyk R., Matusiak B., 2006. Surface runoff from slanting forest roads. *Acta Scientiarum Polonorum-Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 5(1): 13–25.
- Heckmann, T., Cavalli, M., Cerdan, O., Foerster, S., , M., Javaux M., Lode, E., Smetanová, A., Vericat, D., Brardinoni, F. (2018). Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. *Eartch-Science Reviews* 187: 77–108. DOI: [10.1016/j.earscirev.2018.08.004](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.004).
- Jain, V., Tandon S.K. (2010). Conceptual assessment of (dis) connectivity and its application to the Ganga River dispersal system. *Geomorphology* 118: 349–358. DOI: [10.1016/j.geomorph.2010.02.002](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.002).
- Kijowska-Strugała M., 2015. Transport zawiesiny w warunkach zmieniającej się antropopresji w zlewni Bystrzanki (Karpaty Fliszowe). *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 247: 1–140.
- Klimaszewski M., 1935. Przyczynek do poznania morfologicznej działalności roztopów wiosennych. *Czasopismo Geograficzne* 13: 300–304.
- Kostrzewski A., Mazurek M., Zwoliński Z., 1994. Dynamika transportu fluwialnego górnej Parsęty jako odbicie funkcjonowania systemu zlewni. *Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich, Poznań*.
- Kroczał R., 2010. Geomorfologiczne i hydrologiczne skutki funkcjonowania dróg polnych na Pogórzu Ciężkowickim. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 225: 1–138.
- Krzemień K., Świąchowicz J. 1992. Zróżnicowanie i zmienność koncentracji zawiesiny w zlewni Starej Rzeki. *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne* 88: 71–86.
- Luce Ch., Black T., 1999. Sediment production from forest roads in western Oregon. *Water Resources Research* 35(8): 2561–2570. DOI: [10.1029/1999WR900135](https://doi.org/10.1029/1999WR900135).
- Łajczak A., 1989. Zróżnicowanie transportu zawiesiny w karpacciej części dorzecza Wisły. *Dokumentacja Geograficzna* 5: 1–85. Mapa topograficzna, arkusz Brzesko, 1:25 000, 1977. Główny Geodeta Kraju, Warszawa.
- Mapa topograficzna, arkusz Poręba Spytkowska, 1:10 000, 1993. Główny Geodeta Kraju, Warszawa.
- Najafi S., Dragovich D., Heckmann T., Sadeghi S.H., 2021. Sediment connectivity concepts and approaches. *Catena* 196: 104880. DOI: [10.1016/j.catena.2020.104880](https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104880).
- Natanek A., 2016. Łączność sieci drogowej, dolinnej i rzecznej w transportowaniu zawiesiny w zlewni Leśnego Potoku (Pogórze Wiśnickie). *Archiwum Prac Dyplomowych UJ, Kraków*.
- Reid L.M., Dunne T., 1984. Sediment production from forests road surfaces, *Water Resources Research* 20(11): 1753–1761. DOI: [10.1029/WR020i011p01753](https://doi.org/10.1029/WR020i011p01753).
- Smolska E., 1996. Funkcjonowanie systemu korytowego w obszarze młodoglacjalnym na przykładzie górnej Szeszczy (Pojezierze Suwalskie). *Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Warszawa*.
- Starkel L., 1988. Rzeźba. W: J. Warszńska (red.), *Województwo tarnowskie – monografia*. PAN, Kraków: 19–28.
- Strahler A., 1964. Quantitative geomorphology of drainage Bains and channel networks. *Handbook of Applied Hydrology*: 4–39.
- Szpikowski J., 2011. Geomorfologiczne uwarunkowania rozwoju sieci komunikacyjnej na obszarze młodoglacjalnym (zlewnia Perznicy, Pojezierze Drawskie). *Badania Fizjograficzne Seria A – Geografia Fizyczna* (A62): 69–85.
- Świąchowicz J., 1992. Naturalne i antropogeniczne uwarunkowania przebiegu denudacji w zlewni Starej Rzeki. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne* 88: 49–69.
- Świąchowicz J., 2002. Współdziałanie procesów stokowych i fluwialnych w odprowadzaniu materiału rozpuszczonego i zawiesiny ze zlewni pogórskiej, *Seria Przemiany środowiska na Pogórzu Karpackim, t. 3, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków*: 1–150.
- Świąchowicz J., 2005. Źródła dostawy zwietrzelin do koryta potoków. W: M. Żelazny (red.), *Dynamika związków biogenych w wodach opadowych, powierzchniowych i podziemnych w zlewniach o różnym użytkowaniu na Pogórzu Wiśnickim*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków: 160–165.
- Świąchowicz J., 2012. Wartości progowe parametrów opadów deszczu inicjujących procesy erozyjne w zlewniach użytkowanych rolniczo, *Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków*: 1–282.
- Świąchowicz J., Żelazny M., 2005. Zmiany koncentracji zawiesiny podczas wezbrań w różnie użytkowanych zlewniach pogórskich. W: A. Kotarba, K. Krzemień, J. Świąchowicz (red.), *Współczesna ewolucja rzeźby Polski*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków: 461–467.

- Vercruyse K., Grabowski R.C., Rickson R.J., 2017. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Science Reviews* 166: 38–52. DOI: [10.1016/j.earscirev.2016.12.016](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.016).
- Wainwright J., Turnbull L., Ibrahim T.G., Lexartza-Artza I., Thornton S.F., Brazier R.E., 2011. Linking environmental régimes, space and time: Interpretations of structural and functional connectivity. *Geomorphology* 126: 387–404. DOI: [10.1016/j.geomorph.2010.07.027](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.027).
- Wałdykowski P., Krzemień K., 2013. The role of road and footpath networks in shaping the relief of middle mountains on the example of the Gorce Mountains (Poland). *Zetschrift fur Geomorfologie* 57(4): 429–470. DOI: [10.1127/0372-8854/2013/0108](https://doi.org/10.1127/0372-8854/2013/0108).
- Wemple B.C., Swanson F.J., Jones J.A., 2001. Forest roads and geomorphic process interactions, Cascade Range, Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms* 26(2): 191–204. DOI: [10.1002/1096-9837\(200102\)26:2<191::AID-ESP175>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200102)26:2<191::AID-ESP175>3.0.CO;2-U).
- Wohl E., Brierley G., Cadol D., Coulthard T. J., Covino T., Fryirs K.A., Grant G., Hilton R.G., Lane S.N., Magilligan F.J., Meitzen K.M., Passalacqua P., Poepl R.E., Rathburn S. L., Sklar L.S., (2019). Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. *Earth Surface Processes and Landforms* 44(1): 4–26. DOI: [10.1002/esp.4434](https://doi.org/10.1002/esp.4434).