

INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA
im. Stanisława Leszczyckiego
POLSKA AKADEMIA NAUK

MAŁGORZATA KIJOWSKA-STRUGAŁA

TRANSPORT ZAWIESINY
W WARUNKACH ZMIENIAJĄCEJ SIĘ ANTROPOPRESJI
W ZLEWNI BYSTRZANKI (KARPATY FLISZOWE)



Warszawa 2015

INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA
IM. STANISŁAWA LESZCZYCKIEGO
POLSKA AKADEMIA NAUK

PRACE GEOGRAFICZNE NR 247

GEOGRAPHICAL STUDIES

No. 247

TRANSPORT OF SUSPENDED SEDIMENT
IN THE BYSTRZANKA STREAM (POLISH FLYSCH CARPATHIANS)
UNDER CHANGING ANTROPOPRESSURE

INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA
IM. STANISŁAWA LESZCZYCKIEGO
POLSKA AKADEMIA NAUK

PRACE GEOGRAFICZNE NR 247

MAŁGORZATA KIJOWSKA-STRUGAŁA

**TRANSPORT ZAWIESINY
W WARUNKACH ZMIENIAJĄCEJ SIĘ ANTROPOPRESJI
W ZLEWNI BYSTRZANKI (KARPATY FLISZOWE)**



WARSZAWA 2015

<http://rcin.org.pl>

KOMITET REDAKCYJNY

REDAKTOR: Grzegorz Węclawowicz
CZŁONKOWIE: Jerzy Grzeszczak, Barbara Krawczyk,
Jan Matuszkiewicz, Jerzy J. Parysek

RADA REDAKCYJNA

Bolesław Domański, Adam Kotarba, Jan Łoboda,
Andrzej Richling, Jan S. Kowalski, Andrzej Lisowski,
Eamonn Judge, Lydia Coudroy

RECENZENCI TOMU

Adam Łajczak, Roman Soja

ADRES REDAKCJI PRAC GEOGRAFICZNYCH

IGiPZ PAN
ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa

Zgłoszenie pracy do druku jest jednoznaczne z wyrażeniem zgody
na opublikowanie w wersji papierowej i elektronicznej

Opracowanie redakcyjne i techniczne: Ewa Jankowska

Zdjęcie na okładce: Małgorzata Kijowska-Strugała

© Copyright by Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN
im. Stanisława Leszczyckiego, Warszawa 2015

PL ISSN 0373-6547
ISBN 978-83-61590-39-2

Łamanie wykonano w IGiPZ PAN,
ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa

Druk i oprawa: Drukarnia Klimiuk
ul. Zwierzyniecka 8A, 00-719 Warszawa

SPIS TREŚCI

1. Wstęp.....	9
1.1. Transport materiału zawieszonoego w świetle dotychczasowych badań.....	9
1.2. Cel pracy.....	11
1.3. Obszar badań.....	12
1.4. Materiały i metody badań.....	14
1.4.1. Literatura źródłowa.....	14
1.4.2. Badania terenowe.....	15
1.4.3. Metody kameralne.....	17
1.4.4. Obserwacje meteorologiczne i hydrologiczne.....	18
1.4.5. Materiały kartograficzne i historyczne.....	19
1.4.6. Zastosowane techniki GIS.....	19
2. Środowisko przyrodnicze zlewni Bystrzanki.....	21
2.1. Budowa geologiczna.....	21
2.2. Rzeźba terenu.....	22
2.3. Gleby.....	26
2.4. Szata roślinna.....	26
3. Hydrometeorologiczna charakterystyka okresu badań.....	29
3.1. Warunki termiczne.....	29
3.2. Opady atmosferyczne w latach hydrologicznych 1970-2011.....	30
3.2.1. Charakterystyka opadów atmosferycznych w półroczu hydrologicznym letnim w latach 1970-2011.....	31
3.3. Przestrzenne zróżnicowanie opadów w zlewni Bystrzanki w latach 2010-2011.....	37
3.4. Pokrywa śnieżna.....	44
3.5. Przepływy w Bystrzance w latach hydrologicznych 1970-2011.....	45
3.5.1. Wezbrania w latach 1970-2011.....	46
3.5.2. Wezbrania w półroczu letnim w latach 1970-2011.....	49
4. Antropopresja w zlewni Bystrzanki na tle innych obszarów Karpat.....	51
5. Źródła dostawy zawiesiny do koryta Bystrzanki w warunkach zmieniającej się antropopresji.....	55
5.1. Zmiany w strukturze użytkowania ziemi.....	55
5.2. Prace inżynierskie w zlewni.....	62
5.3. Rola koryt w dostawie materiału do transportu rzecznoego.....	64
5.4. Zmiany sieci dróg w ostatnich 40 latach.....	69

6. Zmienność czasowa koncentracji zawiesiny w potoku Bystrzanka podczas wybranych wezbrań opadowych	75
7. Zróznicowanie przestrzenne koncentracji zawiesiny	91
8. Zmienność ładunku materiału zawieszzonego w latach 1970-2011	101
9. Implikacje zmian antropopresji dla dostawy zawiesiny do koryta	113
10. Podsumowanie i wnioski	117
Literatura	120
Transport of suspended sediment in the Bystrzanka stream (Polish Flysch Carpathians) under changing antropopressure – Summary	130

Składam serdeczne podziękowania mojemu Promotorowi, Pani dr hab. Zofii Rączkowskiej, prof. IGiPZ, za opiekę naukową, poświęcony czas, okazaną pomoc podczas realizacji pracy i liczne dyskusje.

Pragnę podziękować byłym i obecnym pracownikom Stacji Naukowej IGiPZ PAN w Szymbarku, bez których nie byłoby możliwe zgromadzenie tak bogatej bazy danych. Szczególnie dziękuję kierownikowi dr. Witoldowi Bochenkowi za cenne uwagi i pomoc w badaniach terenowych oraz dr. Eugeniuszowi Gilowi za okazaną pomoc i wielogodzinne dyskusje.

Dziękuję również pracownikom Zakładu Badań Geośrodowiska w Krakowie za dyskusje i konstruktywne uwagi.

Ciepłe słowa podziękowania kieruję do Wszystkich moich Bliskich za otuchę, wsparcie i wyrozumiałość.

1. WSTĘP

1.1. TRANSPORT MATERIAŁU ZAWIESZONEGO W ŚWIETLE DOTYCHCZASOWYCH BADAŃ

Transport fluwialny odzwierciedla procesy zachodzące w środowisku przyrodniczym zlewni. Dominującą formą transportu fluwialnego w obszarach górskich jest transport zawiesiny, definiowanej jako materiał mineralny, składający się w przewadze z frakcji pylasto-ilastych z domieszką drobnoziarnistych piasków (Froehlich 1975). Na materiał transportowany jako zawiesina składają się osady dostarczane przez dopływy, materiał budujący dno i brzegi koryta, osady wypełniające dna dolin oraz materiał dostarczany ze stoków (m.in. Figuła 1966; Łajczak 1989; Krzemień 1995; Święchowicz 2002; Ciupa 2012).

Ilość i koncentracja materiału transportowanego w formie zawieszony w cieku podlega bardzo częstym i trudnym do uchwycenia zmianom, szczególnie podczas wezbrań (m.in. Walling 1974; Froehlich 1975; Ciupa 2008). Duża trudność w prowadzeniu badań zmienności transportu zawiesiny, wynika ze złożoności tego procesu, na który wpływają m.in. warunki klimatyczne, budowa geologiczna, rzeźba terenu, nachylenie, kształt i powierzchnia zlewni, stopień i sposób pokrycia obszaru przez roślinność, wilgotność podłoża, gęstość i układ sieci dolin oraz dróg (m.in. Froehlich, Słupik 1980; Łajczak 1992; Soja 2002).

Badania nad transportem fluwialnym prowadzone są od wielu lat na całym świecie w zlewniach o różnej wielkości. Autorzy koncentrują się m.in. na rozpoznaniu źródeł dostawy luźnego, drobnoziarnistego materiału do koryt rzecznych (m.in. Gregory, Walling 1973; Froehlich 1982; Święchowicz 2002). W zlewniach, w których dominują użytki rolne szczególnej analizie podlega rozpoznanie tempa erozji gleb, w odniesieniu do różnych praktyk rolniczych, jako ważnego źródła materiału transportowanego w cieku (m.in. Walling 1990; Russell i in. 2001; Święchowicz 2002). Wielu autorów zwraca uwagę, że tylko niewielka część materiału uruchamiana na stoku dociera do koryta rzecznego a w cyklu rocznym wydzielone strefy zasilania zmieniają się w zależności od warunków hydrometeorologicznych (m.in. Starkel 1972; Kostrzewski i in. 1994; Siakeu i in. 2004; Ciupa 2009). Dotychczasowe badania wykazały także, że najwięcej drobnoziarnistego, luźnego materiału jest dostarczane w wyniku procesów zachodzących w korycie rzeki, takich jak erozja brzegów i pogłębianie koryta (m.in. Froehlich 1975; Lowler i in. 1999; Lach, Wyżga 2002; Krzemień 2003; Tekielak in. 2007). Podczas wezbrań

z wysoką energią, aktywnych geomorfologicznie, dochodzi do wzmożonej erozji i uruchomienia materiału do transportu. W beskidzkiej części Karpat polskich tempo pogłębiania koryta rzecznego może dochodzić nawet do 0,8–1,0 m (Krzemień 2003; Lach, Wyźga 2002), natomiast roczne tempo erozji brzegowej wynosi średnio 0,4–0,6 m*rok⁻¹ (Tekielak in. 2007).

Wielu badaczy wskazuje także drogi jako źródło dostawy materiału do transportu w zawieszynie. K. Figuła (1966) zauważył, że nagły wzrost kulminacji katastrofalnych wezbrań i przyspieszenie erozji należy powiązać bezpośrednio z szybkim spływem wody polnymi drogami o małej przepuszczalności. W. Froehlich (1986) oszacował, że udział osadu pochodzącego z nieutwardzonych dróg w średnim rocznym ładunku materiału zawieszzonego wynoszonego ze zlewni Homerki wynosi 70–80%, przy średnim tempie pogłębiania dróg około 6,6 mm rocznie. Pozostała część materiału zawieszzonego pochodzi z koryta oraz aktywnych bocznych dolin (Froehlich, Walling 1997). R. Soja (2002) dowiódł, że drogi, bez względu na stopień użytkowania powierzchni, mają najwyższy współczynnik odpływu w odniesieniu do innych form użytkowania.

Przedmiotem badań był również wpływ na naturalne warunki dostawy materiału zawieszzonego do koryta rzecznego (Klimek 1987; Russell i in. 2001; Gao i in. 2007; Ciupa 2009). Zachodzące w ostatnich latach zmiany w pokryciu terenu i użytkowaniu ziemi, związane głównie z wycofywaniem się rolnictwa i zmniejszeniem powierzchni gruntów ornych, jak i sposobem zagospodarowania koryt rzecznych, mają swoje odzwierciedlenie w procesach zachodzących w zlewni (Costa i in. 1995; Messerli i in. 2000; Soja 2002; Ciupa 2003). Skutkami zmian w użytkowaniu ziemi, głównie zaniku pól uprawnych, jest często niedociążenie koryt materiałem dostarczanym ze stoków podczas intensywnych opadów deszczu oraz pogłębianie koryt skutkujące obniżaniem się zwierciadła wód podziemnych w dnach dolin i zwiększeniem amplitudy przepływów (Cebulak i in. 2008; Bucala, Starkel 2013).

Powszechnie uważa się, że zmiany w ładunku zawiesziny transportowanej w korytach rzek wynikają głównie ze zmian klimatycznych, na które nakłada się działalność człowieka (Ludwig, Probst, 1998; Zhang, Lu 2009; Kundzewicz 2011). Do zmniejszenia ilości wynoszonej ze zlewni zawiesziny przyczynia się wzrost powierzchni zajętych przez zbiorowiska łąkowe oraz leśne. Stopień w jakim działania człowieka wpłynęły na dostawę materiału do transportu rzecznego pozostaje jednak często niejasny (Verstraeten i in. 2009). Liczne badania pokazują, że zmiany w użytkowaniu ziemi na obszarach wyżynnych i górskich w ostatnich stuleciach nie mają bezpośredniego wpływu na przemieszczanie osadów w cieku, głównie ze względu na rolę, jaką odgrywają równiny zalewowe w oddzieleniu systemu stokowego od korytowego (Trimble 1999; Świąchowicz 2002; Philips 2003). Według K.S. Richards (2002) transport materiału w rzece jest nie tylko wynikiem współczesnej struktury użytkowania gruntów, ale często odzwierciedla jej stan w przeszłości, ze względu na zdolności buforowe zlewni.

W latach 70. XX w. w zlewni Bystrzanki podjęto próbę oceny wielkości dostawy zwierzelin do koryt potoków, poprzez porównanie jej z wielkością splukiwania na stokowych poletkach doświadczalnych lub w całym systemie stokowym (Gil, Słupik 1972; Welc 1972; Gil 1976). Stwierdzono, że odprowadzanie wyerodowanego na stokach materiału do Bystrzanki jest zwykle możliwe tylko z działek położonych nad korytem. Zwrócono uwagę, że do koryta dociera znaczna ilość materiału wymyta z bruzd ograniczających działki oraz z dróg polnych. A. Welc (1972) oszacował, że ilość materiału dostarczanego ze stoku do potoku nie przekracza 10% ilości materiału zawieszonego wynoszonego ze zlewni Bystrzanki.

Nie ulega wątpliwości, że w ostatnich kilkudziesięciu latach zmiany kierunków ingerencji człowieka w środowisko przyrodnicze gór polegają na wycofywaniu się gospodarki rolnej, zwiększeniu obszarów zalesionych oraz regulacji cieków, które mogą sprzyjać m.in. procesom pogłębiania koryt (Latocha 2006; Bucala, Budek 2011). W ostatnich latach dodatkowo obserwuje się w Karpatach wzrost częstości zdarzeń hydrometeorologicznych o charakterze ponadprzeciętnym (Starkel i in. 2007), które w dużym stopniu wpływają na ilość niesionego w cieku materiału zawieszonego pochodzącego głównie z erozji koryta rzecznego i terenów zalewowych. Ze względu jednak na duże zróżnicowanie źródeł dostawy materiału do transportu, zmiany w użytkowaniu ziemi, związane ze zmniejszaniem powierzchni użytkowanej jako grunty orne, nie muszą być proporcjonalne do ilości transportowanej w ciekach zawiesiny (Oygarden i in. 2003).

1.2. CEL PRACY

Przegląd dotychczasowych badań wskazuje, że na przebieg procesów fluwialnych, w tym transportu zawiesiny, mają wpływ zarówno czynniki naturalne jak i antropogeniczne. W poniższej pracy testowana jest hipoteza robocza zakładająca, że zachodzące w ostatnich latach zmiany w środowisku przyrodniczym Karpat, w tym zmniejszenie powierzchni użytkowanych rolniczo, powinny wpłynąć na transport materiału zawieszonego w ciekach.

Zlewnia Bystrzanki, dzięki zainicjowanym w roku 1968 r. kompleksowym badaniom środowiska oraz stacjonarnym badaniom procesów fizycznogeograficznych (m.in. spływ powierzchniowy, erozja gleb, spływ śródpokrywowy, dynamika poziomu wód podziemnych, odpływ wody, zawiesiny i materiału rozpuszczonego) jest jednym z najlepiej rozpoznanych obszarów w Karpatach polskich. Równocześnie widoczne zmiany w środowisku przyrodniczym tej zlewni związane z działalnością człowieka, są podobne do obserwowanych w innych częściach Karpat.

Głównym celem pracy jest wskazanie prawidłowości określających czasową zmienność i przestrzenne zróżnicowanie odprowadzania zawiesiny w małej, fliszowej zlewni Bystrzanki w warunkach zmieniającej się antropopresji. Badaniami objęto lata 1970–2011, okres znacznych przemian społeczno-gospodarczych. Starano się odpowiedzieć na pytanie, czy i w jaki sposób zmiany w środowisku przyrodniczym, związane ze zmieniającą się antropopresją, wpłynęły na transport zawiesiny w badanym potoku.

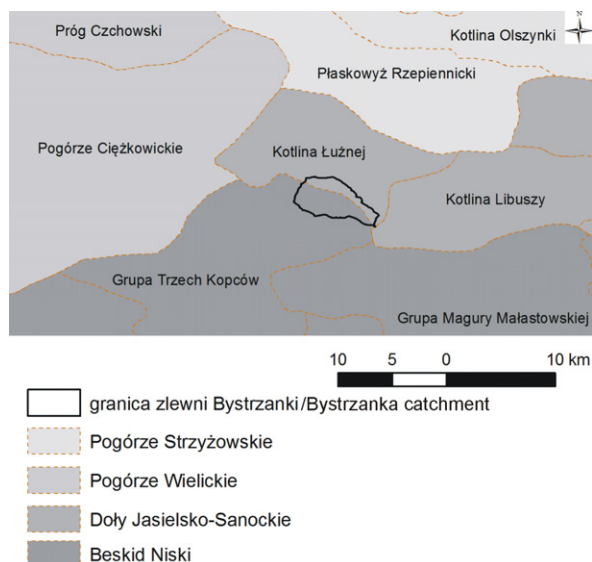
Cel główny realizowany jest poprzez cele cząstkowe takie jak:

- charakterystyka opadów atmosferycznych w latach 1970–2011 oraz ich przestrzennego rozkładu (2010–2011) jako najważniejszego czynnika powodującego wezbrania,
- opracowanie map użytkowania ziemi w kilku przekrojach czasowych w ostatnich 40 latach, w celu określenia kierunku i wielkości zmian z uwzględnieniem wpływu czynników fizycznogeograficznych (nachylenie stoków, ekspozycja, wysokość n.p.m.) i gospodarczych oraz oceny oddziaływania tych zmian na transport zawiesiny,
- ocena wpływu zmian sieci dróg na koncentrację zawiesiny transportowanej w Bystrzance i wskazanie zmian w źródłach dostawy materiału do koryta w ciągu 40 lat obserwacji,
- oszacowanie erozji na stokach z uwzględnieniem zmian w użytkowaniu ziemi,
- określenie dynamiki odprowadzania zawiesiny w Bystrzance (1970–2011) i jej wybranych dopływach (2010–2011),
- zmiany składu granulometrycznego zawiesiny w czasie wybranych wezbrań opadowych w cieku głównym i dopływach,
- obliczenie ładunku materiału zawieszonoego wynoszonego ze zlewni i wskazanie okresów szczególnej aktywności w transporcie zawiesiny.

1.3. OBSZAR BADAŃ

Zlewnia Bystrzanki, o powierzchni 13 km², leży na granicy dwóch głównych jednostek geomorfologicznych Karpat fliszowych: Beskidów (Beskid Niski) i Pogórza Karpackiego (Obniżenie Gorlickie – Kotlina Łuźnej), (Starkel 1972), (ryc. 1). Od wschodu i północy dział wodny zlewni biegnie wzdłuż garbu Taborówka (440,9 m n.p.m.) – Bucze (550,0 m n.p.m.) – Bieśnik (585,3 m n.p.m.), natomiast od zachodu grzbietem Trzech Kopców, najbardziej na północ wysuniętą częścią Beskidu Niskiego, oddzieloną od niego doliną Ropy, obejmującym Jelenią Górę (686,0 m n.p.m.), Maślaną Górę (752,9 m n.p.m.), oraz grzbiet na wschód od Zielonej Góry (704,4 m n.p.m.), (ryc. 2). Obszar beskidzki, obejmujący północno-zachodnią część zlewni (Dauksza i in. 1970), zbudowany jest z piaskowcowych serii warstw

magurskich (Kozikowski 1956; Świdziński 1973). Obszar ten charakteryzuje się występowaniem dolin o stromych stokach. Pozostała część zlewni obejmuje pogórskie garby z szerokimi, spłaszczonymi wierzchowinami.

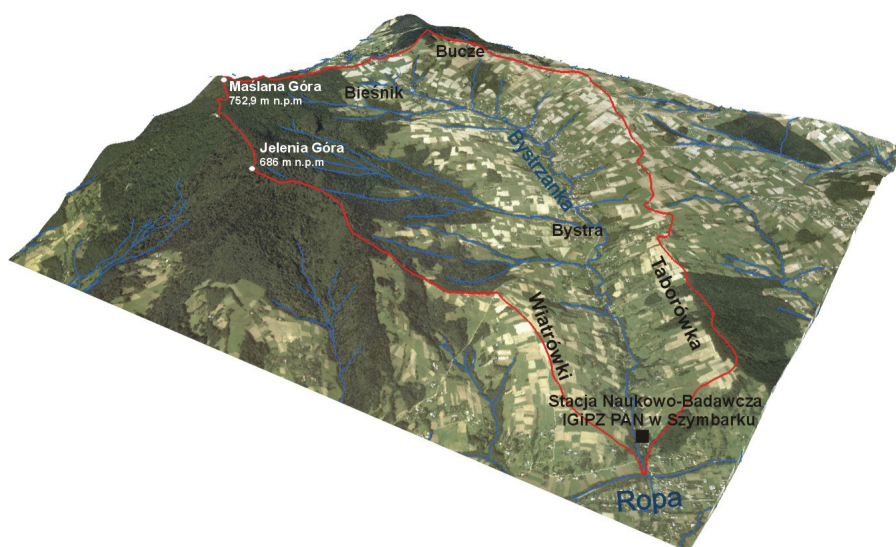


Ryc. 1. Położenie zlewni Bystrzanki na tle jednostek geomorfologicznych Karpat (wg L. Starkla 1972)

Fig. 1. Location of the Bystrzanka catchment against the Carpathians geomorphological units (after L. Starkel 1972)

Potok Bystrzanka o długości 7,2 km jest lewobrzeżnym dopływem Ropy. W górnym odcinku dolina jest typowym wciosem o wąskim dnie i stromych zboczach dochodzących do wysokości 15 m, natomiast w środkowym biegu jego dno rozszerza się do kilkudziesięciu metrów. Szerokość koryta systematycznie rośnie od 3–4 m w odcinku środkowym, do około 10 m w odcinku ujściowym. Zlewnia posiada asymetryczny kształt w stosunku do przebiegu koryta głównego potoku, ze zdecydowaną przewagą (70%) części zachodniej (beskidzkiej).

Większość zlewni Bystrzanki położona jest w piętrze klimatu umiarkowanie ciepłego, a jedynie wierzchowiny grzbietów górskich w piętrze umiarkowanie chłodnym (Hess 1965; Obrębska–Starkel 1973; Hess i in. 1977). Granicę pomiędzy piętrami wyznacza izoterma średniej rocznej temperatury 6°C, która przebiega na wysokości około 600 m n.p.m.



Ryc. 2. Cyfrowy model wysokościowy zlewni Bystrzanki z nałożoną ortofotomapą (ArcScene 9.3)

Fig. 2. Digital elevation model of the Bystrzanka catchment with the orthophotomap (ArcScene 9.3)

1.4. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

1.4.1. LITERATURA ŹRÓDŁOWA

Obszar badań posiada bogatą literaturę źródłową, opartą o stacjonarne badania procesów morfogenetycznych, poprzedzone kartowaniem elementów środowiska przyrodniczego na przełomie lat 60. i 70. XX w. Pierwsze badania prowadzone w ramach działalności Stacji Naukowej w Szymbarku koncentrowały się głównie na rozpoznaniu rzeźby obszaru (Kotarba 1970) oraz stosunków wodnych (Niemirowska 1970). W kolejnych latach badaniami objęto niemal wszystkie elementy środowiska geograficznego, jednak szczególną uwagę zwrócono na dynamikę procesów fizycznogeograficznych w warunkach gospodarczej działalności człowieka. Badania dotyczyły: pokrywy glebowej (Adamczyk i in. 1973), zbiorowisk leśnych (Staszkievicz 1973), roślinności łąk i pól uprawnych (Wójcik 1977), stosunków mezo- i mikroklimatycznych (Obrębska-Starkłowa 1973; Soja 1977), użytkowania ziemi (Gil 1979), przebiegu spłukiwania i obiegu wody na stokach o różnym użytkowaniu (Słupik 1973; Gil, Słupik 1972; Gil 1976; Bochenek, Gil 2010), rozmiarów deflacji (Welc 1977) oraz typologii środowiska (Gil 1979). Rezultatem tych badań jest seria monografii tematycznych i towarzyszących im dokumentacji kartograficznych w postaci tematycznych map komponentów środowiska przyrodniczego, m.in.: mapa geomorfologiczna (Kotarba

1970), geologiczna (Świdziński 1973; Wójcik i in. 2003), hydrograficzna (Niemirska 1970), mezo- i mikroklimatów (Obrębska-Starkel 1973), gleb (Adamczyk i in. 1973), użytkowania ziemi (Gil 1979), zbiorowisk leśnych (Staszkiwicz 1973), elementów ograniczających gospodarkę rolną (Gil 1979).

Ponadto szczegółową analizę bilansu wodnego w zlewni Bystrzanki wykonał R. Soja (1981). Autor porównując odpływy Bystrzanki i Ropy, reprezentujących zlewnie o wyjątkowo złożonym typie obiegu wody (Dynowska 1971; Ziemońska 1973), wykazał podobieństwa i różnice wynikające z wpływu środowiska zlewni na transformację opadu w odpływ. A. Welc (1972, 1973, 1985, 1988) w zlewni Bystrzanki prowadził szczegółowe badania nad transportem materiału zawieszonego i rozpuszczonego w celu poznania bilansu denudacyjnego zlewni i jego związków z systemem stokowym, zwracając uwagę m.in. na wpływ opadów na wielkość i czas trwania transportu zawiesiny.

Bogate wyniki badań Stacji Naukowej w Szymbarku umożliwiają kompleksową charakterystykę poszczególnych komponentów środowiska przyrodniczego, niezbędną w badaniach transportu zawiesiny w zlewni rzecznej oraz wskazanie zmian w środowisku w ciągu ostatnich 40 lat, związanych głównie z użytkowaniem ziemi.

1.4.2. BADANIA TERENOWE

W pracy wykorzystano dane uzyskane w wyniku badań nad transportem materiału zawieszonego w potoku Bystrzanka, które rozpoczęto na Stacji w Szymbarku pod koniec lat 60. XX w. Skoncentrowano się głównie na analizie materiału zawieszonego podczas wezbrań opadowych w półroczu hydrologicznym letnim. Próby wody z materiałem zawieszonym pobierano zawsze w tym samym punkcie przy Stacji Naukowej, powyżej ujścia potoku do Ropy.

W latach 2009–2011 autorka pracy uczestniczyła w badaniach prowadzonych w Stacji i dodatkowo mierzyła koncentrację zawiesiny w profilu podłużnym cieku głównego oraz w jego dopływach z części pogórskiej oraz beskidzkiej. Pomiary transportu materiału zawieszonego prowadzone były zawsze tą samą metodą. Próbkę wody o pojemności 1 dm³ pobierane były batometrem butelkowym w profilu hydrometrycznym potoku w strefie nurtu potoku na głębokości kilkudziesięciu centymetrów, z częstotliwością co około 15–20 min. Częstotliwość poboru prób była zmniejszana w miarę obniżania się stanów wody w potoku. W czasie opadów o niewielkim natężeniu, które powodowały powolny przyrost stanu wody w potoku, próby pobierano co 1–2 godziny. W ciągu czterdziestu lat obserwacji próby pobierane były w czasie wezbrań z podobną częstotliwością.

Ładunek transportowanej zawiesiny w czasie całego wezbrania obliczony został jako iloczyn koncentracji zawiesiny i wielkości przepływu wody:

$$L_s = \sum_{i=1}^n C_s \cdot Q \cdot \Delta t$$

L_s – ładunek wyniesionego materiału zawieszonego (t);

n – liczba prób,

C_s – koncentracja zawiesiny ($\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$);

Q – przepływ w czasie pobierania prób wody ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Δt – przedział czasu przypadający na dany pomiar.

Analizowane ładunki zawiesiny wynoszone ze zlewni w czasie wybranych wezbrań odnoszono do wielkości spłukiwania na stokach. Od 1969 r. na Stacji w Szymbarku funkcjonowały poletka eksperymentalne o długości 60 m i szerokości 10 m z rynnami chwytającymi i zbiornikami z limnigrafami w ich dolnej części. Powierzchnia poletek była zbliżona do typowych działek uprawowych występujących w regionie karpackim (Gil 1976) z typowymi uprawami, zmianowaniem i zabiegami agrotechnicznymi. Podstawowe użytki rolne z 2–3 letnim okresem zmianowania reprezentowane były m.in. przez: zboża, ziemniaki i łąkę o charakterze kośno-pastwiskowym. Wraz ze zmianą użytkowania ziemi w zlewni, zwłaszcza w ostatnich 20 latach i zmniejszaniem powierzchni użytkowanej rolniczo, zrezygnowano z badań na poletkach eksperymentalnych w celu określenia wpływu wody i erozji gleby na ziemniakach (poletka eksperymentalne do 1995 r.) i zbożu (poletka eksperymentalne do 2000 r.). W okresie szczegółowych badań autorki (2009–2011) funkcjonowały jedynie poletka z łąką.

Skład granulometryczny materiału zawieszonego pobieranego podczas wezbrań w Bystrzance i dopływach w 2010 i 2011 r. określano w Zakładzie Badań Geośrodowiska w Krakowie metodą dyfrakcji laserowej na dyfraktometrze Analysette 22 firmy Fritsch, według metodyki opisanej przez I. Kaszę (1992).

W 2010 r., przeprowadzono dwukrotnie kartowanie geomorfologiczne koryta Bystrzanki na podkładzie map katastralnych w skali 1:2 000 w celu określenia potencjalnych źródeł dostawy zawiesiny. Pierwsze kartowanie, w kwietniu 2010 r., miało na celu rozpoznanie głównych form korytowych w potoku Bystrzanka, naturalnych takich jak łąchy żwirowe, podcięcia erozyjne, progi skalne i kotły eworsyjne oraz antropogenicznych, powstałych w wyniku prac regulacyjnych koryt, w tym siatkowo-kamiennych umocnień brzegów oraz nasypów brzegowych. Dodatkowo w wybranych miejscach wykonano przekroje poprzeczne koryta. W czerwcu 2010 r. kilka dni po ulewnych opadach deszczu przeprowadzono drugie kartowanie geomorfologiczne w celu wykazania zmian morfologii koryta i dna doliny Bystrzanki. Polegało ono na rejestracji skutków wezbrania szczególnie zasięgu form erozyjnych i akumulacyjnych w korycie. Badaniami objęto odcinek koryta Bystrzanki o długości około 5,5 km, w dolnym i środkowym biegu potoku.

Oprócz rejestracji zmian w obrębie koryta, mierzono wysokość oraz głębokość podcięć erozyjnych (wielkość cofnięcia brzegu), wysokość progów rumowiskowych, wielkość kotłów eworsyjnych, rozmiary łąch bocznych i śródkorytowych, wielkość frakcji rumowiska na powierzchni łąch oraz na stożkach torrencjalnych u wylotu bocznych dolin. Dane uzyskane z kartowania w czerwcu 2010 r. zostały porównane z wynikami badań z kwietnia 2010 r. Umożliwiło to określenie geomorfologicznych skutków wezbrania o znanych parametrach. Wykonano ponownie profile poprzeczne koryta, w celu określenia wielkości erozji w wybranych miejscach koryta.

1.4.3. METODY KAMERALNE

Prawdopodobieństwo przepływów rocznych maksymalnych obliczono, przyjmując za Z. Kaczmarkiem (1970), że 40-letni ciąg obserwacyjny pozwala na określenie wiarygodnych wartości Q_{max} dla $p < 1\%$. Przepływ maksymalny o prawdopodobieństwie p (Q_{maxp}) obliczono w oparciu o metodę decyli opisaną przez K. Dębskiego (1954) opierając się na rozkładzie Pearsona typu III i metodzie decyli.

W celu określenia wpływu człowieka na środowisko przyrodnicze obliczono wskaźnik antropopresji (Kostrowicki 1992; Soja 2002):

$$P = (\text{powierzchnia gruntów ornych} + \text{obszarów zmeliorowanych} + \text{pozo-} \\ \text{stałych}) / (\text{powierzchnie zalesione} + \text{użytki zielone} + \text{sady}) + K$$

P – wskaźnik antropopresji;

K – element uwzględniający gęstość zaludnienia

Dla wybranych parametrów określono także odchylenie standardowe (SD) oraz współczynnik zmienności (Cv), jako klasyczne miary zróżnicowania rozkładu cechy.

W celu określenia wielkości erozji i akumulacji materiału w całej zlewni, w różnych przedziałach czasowych, wykorzystano modele: RUSLE – *Revised Universal Soil Loss Equation* (Wischmeier, Smith 1978; Renard i in. 1991) oraz USPED – *Unit Stream Power-based Erosion/Deposition* (Mitasova i in. 1998). Wyniki uzyskane z wykorzystaniem modelu RUSLE ukazują jedynie zjawisko erozji gleb, które należy traktować jako maksymalną możliwą erozję, która może wystąpić na danym terenie w określonych warunkach, nie uwzględniając przy tym możliwości deponowania gleby. W modelu USPED zakłada się, że istnieje ograniczona ilość materiału glebowego, który może być transportowany przez spływającą wodę. Najlepszym rozwiązaniem do określania procesów erozji, a także depozycji, przy różnym użytkowaniu, wydaje się zastosowanie modeli RUSLE i USPED. Natężenie erozji w modelu RUSLE szacowane jest na podstawie równania:

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

E – masa wyerodowanej gleby z jednostki powierzchni w ciągu roku ($t \cdot ha^{-1}$);

R – współczynnik erozyjności deszczu i spływu ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$);

K – współczynnik podatności gleby na erozję wodną ($t^*ha^{-1})/(MJ^*ha^{-1})(mm^*h^{-1})$;
 LS – współczynnik topograficzny (długości i nachylenia stoku, bezwymiarowy);
 C – współczynnik pokrywy roślinnej (bezwymiarowy);
 P – współczynnik zabiegów przeciwerozyjnych (bezwymiarowy).

W modelu USPED możliwość transportowa gleby obliczana jest przy pomocy funkcji energii nachylonego zbocza, spływu wody, rodzaju gleb oraz użytkowania ziemi. Model USPED bazuje na podobnych wskaźnikach jak model RUSLE (RKCP), jednak w modelu tym wskaźnik LS jest zastąpiony wskaźnikiem T, liczonym jako:

$$LS=T= A^m (\sin \beta)^n,$$

A – jednostka powierzchni zasilania (m^*m^{-2});

n, m – współczynniki;

β – nachylenie ($^{\circ}$)

Dla całego okresu badawczego skonstruowano podwójną krzywą kumulacyjną, która jest prostą praktyczną metodą, mającą szerokie zastosowanie w badaniach regularności długoterminowych zależności danych hydro-meteorologicznych (Dynowska i in. 1985). Metodę tą zastosowano w celu wykazania zmian w ładunku wynoszonej zawiesiny ze zlewni.

Ponadto w pracy wykorzystano program Statistica (v. 10.0), który daje szeroki wybór procedur analizy i zarządzania danymi, zapewnia także wizualizację wyników analizy. W pracy wykorzystano m.in. analizę grupowania metodą Warda, przy zastosowaniu odległości miejskiej Manhattan. Do zaprezentowania wyników badań wykorzystano także program CorelDRAW, (v. 9.0) oraz Adobe Photoshop (v. 6.0.1).

1.4.4. OBSERWACJE METEOROLOGICZNE I HYDROLOGICZNE

Charakterystykę warunków klimatycznych w badanym okresie (1970–2011) opracowano na podstawie codziennych wyników obserwacji prowadzonych na Stacji Naukowej IGiPZ PAN w Szymbarku. Szczegółową analizę opadów atmosferycznych przeprowadzono w oparciu o materiały pluwiograficzne Stacji. W 2010 roku zainstalowano na terenie zlewni dwa dodatkowe deszczomierze (w górnej i środkowej części, rozdz. 3.3) w celu wykazania przestrzennego zróżnicowania opadów, które są bezpośrednim czynnikiem wpływającym na wzrost stanów wody w cieku i transport zwietrzeliney. Analiza warunków hydrologicznych została przeprowadzona w oparciu o analizę limnigraficznych zapisów stanów wody w ujściowym odcinku Bystrzanki, przy użyciu limnigrafu KB2.

W pracy porównano dwa skrajnie różne okresy pod względem użytkowania ziemi: 1970–1979 oraz 2000–2011 (uwzględniający ponadprzeciętny rok 2010). Podział ten umożliwił także ocenę wpływu ekstremalnych opadów na ilość wynoszonego ładunku zawiesiny z wielolecia.

1.4.5. MATERIAŁY KARTOGRAFICZNE I HISTORCZNE

Analizę zmian w użytkowaniu ziemi dokonano w oparciu o dostępne materiały kartograficzne. Wykorzystano mapę użytkowania ziemi E. Gila (1979) przedstawiającą stan w roku 1969 oraz mapę sporządzoną dla roku 2003 przez zespół prof. R. Olędzkiego z Katedry Geoinformatyki i Teledetekcji UW. Ponadto użyto mapę użytkowania ziemi w latach 90. XX w., które została sporządzona w oparciu o ortofotomapę z roku 1997 w skali 1:10 000, a także mapę użytkowania ziemi opracowaną dla zlewni Bystrzanki z 2010 r. sporządzoną przez Z. Zwolińskiego i J. Gudowicz (2011). W celu sporządzenia mapy użytkowania ziemi w latach 80. ubiegłego wieku wykorzystano obraz satelity Landsat 5TM z sierpnia 1986 r. o rozdzielczości 30 m x 30 m.

Analiza sieci dróg utwardzonych i nieutwardzonych, jako jednego z istotnych źródeł dostarczania materiału do koryta, została przeprowadzona na podstawie map topograficznych – 1:10 000 z 2003 r. i 1:25 000 z 1965 r. (arkusz Gorlice). W oparciu o mapę topograficzną w skali 1:10 000 (2003 r.) sporządzono także Numeryczny Modelu Terenu (NMT).

1.4.6. ZASTOSOWANE TECHNIKI GIS

Do analizy danych wykorzystano program ArcGis w wersji 9.3. Analizie GIS poddane zostały dane statystyczne, mapy i zdjęcia lotnicze w wersji cyfrowej oraz inne materiały kartograficzne. W oparciu o NMT sporządzono mapę nachylenia stoków, ekspozycji i pięter wysokościowych, na podstawie których dokonano niezbędnych obliczeń.

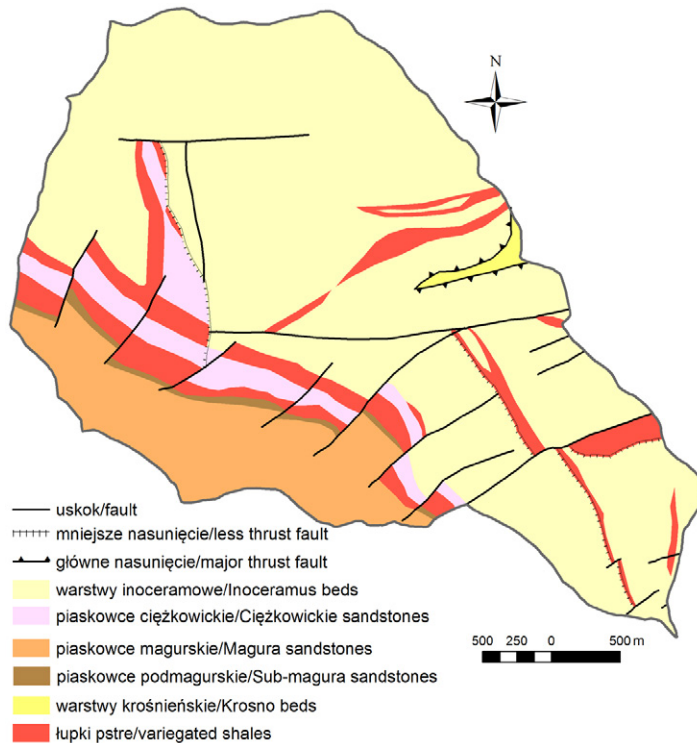
Do opracowania mapy użytkowania ziemi w 1986 r., obrazy z satelity LANDSAT zostały przetworzone w programie Beam-Visat, który bazuje na danych rastrowych. W programie policzono m.in. wskaźniki wegetacji NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*) oraz indeks NDI (*Normalised Difference Index*), które pomogły w interpretacji i klasyfikacji form użytkowania ziemi.

2. ŚRODOWISKO PRZYRODNICZE ZLEWNI BYSTRZANKI

Rozpoznanie warunków fizycznogeograficznych w zlewni ma duże znaczenie dla właściwej oceny procesów fluwialnych i denudacyjnych. Poszczególne elementy środowiska przyrodniczego warunkują występowanie, przebieg, efektywność procesów stokowych, korytowych i tym samym wpływają na ilość odprowadzanej ze zlewni zawiesiny.

2.1. BUDOWA GEOLOGICZNA

Badany obszar leży w brzeżnej części płaszczowiny magurskiej, u nasady tzw. półwyspu tektonicznego Łużnej, który nasunięty jest na jednostkę centralnej depresji karpackiej. Równoległe, złuskowacone fałdy fliszu, na północ od doliny Ropy, pocięte są uskokami na wiele bloków i wtórnie sfałdowane (Kozikowski 1956; Świdziński 1973), (ryc. 3).



Ryc. 3. Mapa geologiczna odkryta zlewni Bystrzanki (Wójcik i in. 2003)

Fig. 3. Geological map of the Bystrzanka catchment (Wójcik et al. 2003)

Skąły płaszczowiny magurskiej zajmują większą część powierzchni badanego obszaru. Poszczególne kompleksy litologiczne mają różną odporność na działanie czynników degradacyjnych. W budowie geologicznej garbów pogórskich przeważają średnioodporne łupkowo–piaskowcowe warstwy inoceramowe i mało odporne łupki pstre eocenu (ryc. 3). Bardziej odporne piaskowce magurskie budują główne grzbiety Beskidu Niskiego i zajmują około 30% powierzchni zlewni (Soja 1981). Duży udział łupków w budowie geologicznej jest istotny z punktu widzenia źródeł transportowanego materiału w korycie Bystrzanki. Stoki okryte są różnej miąższości pokrywami zwietrzelinowymi i zwietrzelinowo-skalnymi koluwiami, z różnym udziałem frakcji szkieletowej. Dno doliny wyścielają zwirowo–gliniaste pokrywy aluwialne (Kozikowski 1956; Świdziński 1973).

2.2. RZEŻBA TERENU

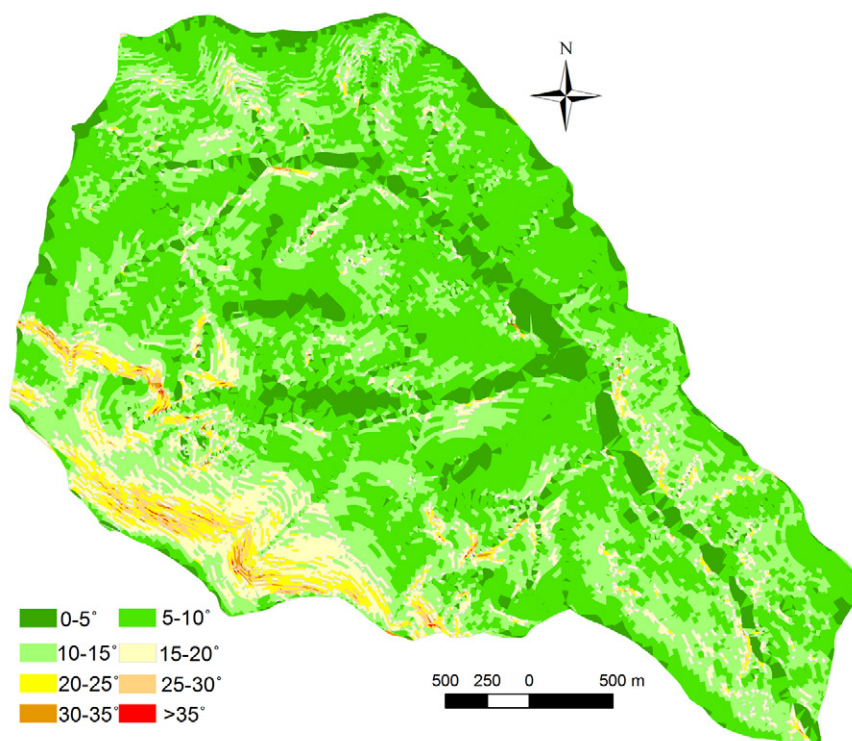
Zlewnia potoku Bystrzanka (13 km²) leży na granicy dwóch głównych jednostek geomorfologicznych Karpat fliszowych, Beskidów i Pogórza Karpackiego (Starkel 1972). Część beskidzka zlewni potoku Bystrzanka wznosząca się do wysokości 600–753 m n.p.m. zajmuje około 8% jej powierzchni (tab. 1). Zbudowana jest z odpornych piaskowców magurskich. Reprezentuje ją zwarty, długi grzbiet beskidzki Trzech Kopców będący najbardziej na północ wysuniętą częścią Beskidu Niskiego. Deniwelacje w części beskidzkiej zlewni wynoszą od 300 do 450 m. Stoki Trzech Kopców są proste o nachyleniach od 15° do 25° (NE stok Zielonej Góry) lub niewyrównane, silnie przemodelowane osuwiskami (Kotarba 1970). Szerokość grzbietów jest bardzo zróżnicowana (od kilkudziesięciu do ponad 200 m), co jest związane z rozmiarami rozcięć przez leje źródłowe potoków lub przez nisze osuwiskowe. Grzbiet beskidzki Trzech Kopców schodzi w kierunku południowym wąskim i stromym grzbietem Kamionki oraz długimi stokami, o profilu wypukłym. W kierunku wschodnim jego stoki opadają do poziomu wyrównanych garbów pogórskich, bądź przechodzą w leje źródłowe potoków prostymi lub schodkowymi stokami o profilu wypukłym.

Tabela 1. Procentowy udział stref wysokościowych w ogólnej powierzchni zlewni Bystrzanki

Wysokości bezwzględne [m n.p.m.]	<350	350–400	400–450	450–500	500–550	550–600	600–650	650–700	700–750	>750
Procent powierzchni zlewni	4,63	18,24	26,72	23,48	13,54	5,83	3,65	2,60	1,27	0,04

Źródło: Opracowanie własne

Nachylenie stoków, wpływające na szybkość spływu wody, jest zróżnicowane. W części wierzchwinowej wynosi od 3° do 7° i wzrasta w kierunku załomu wypukłego stoków do 13°, a w stromych częściach przekracza 30° (ryc. 4). W zlewni Bystrzanki dominują stoki o nachyleniu 5°–10°, stanowiące 46,8% powierzchni zlewni. Stoki o nachyleniu powyżej 25° zajmują 0,9% powierzchni terenu (tab. 2). Szybkość spływu wody z topnienia pokrywy śnieżnej zależy od ekspozycji stoku. Analiza wykazała, że w zlewni Bystrzanki stoki o ekspozycji wschodniej stanowią 36% obszaru, północnej 28%, południowej 25% i zachodniej 11% (ryc. 5, tab. 3).

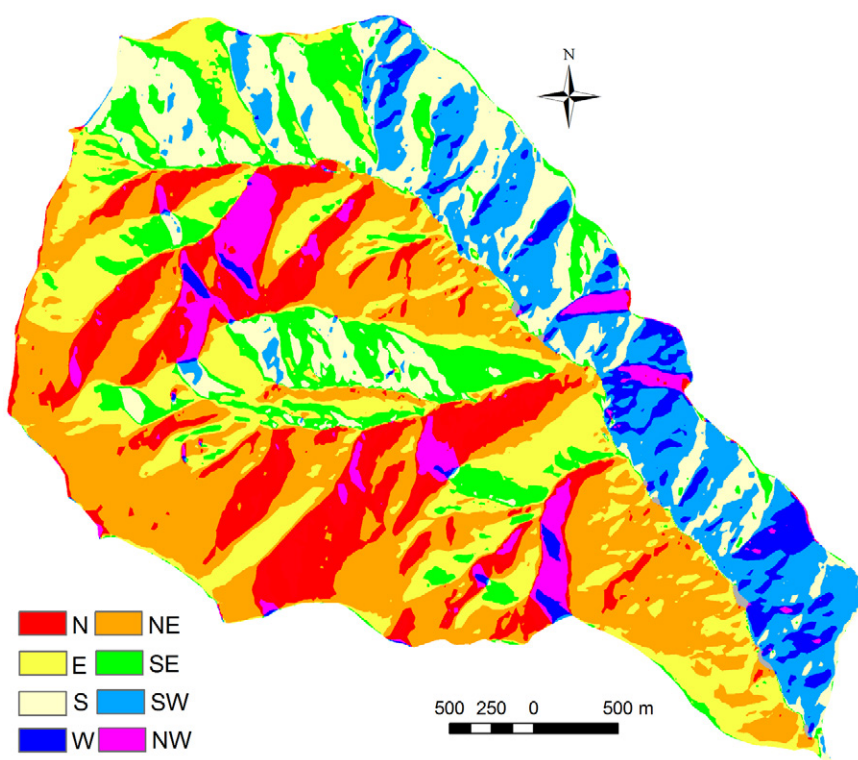


Ryc. 4. Mapa nachyleń stoków w zlewni Bystrzanki
Fig. 4. Map of slope gradient in the Bystrzanka catchment

Tabela 2. Nachylenie terenu w procentach ogólnej powierzchni zlewni Bystrzanki

Nachylenia	<5°	5–10°	10–15°	15–20°	20–25°	25–30°	>30°
Procent powierzchni zlewni	8,83	46,76	31,48	8,79	3,33	0,80	0,01

Źródło: Opracowanie własne



Ryc. 5. Mapa ekspozycji stoków w zlewni Bystrzanki
 Fig. 5. Map of slope aspect in the Bystrzanka catchment

Tabela 3. Procentowy udział głównych ekspozycji terenu w powierzchni zlewni Bystrzanki

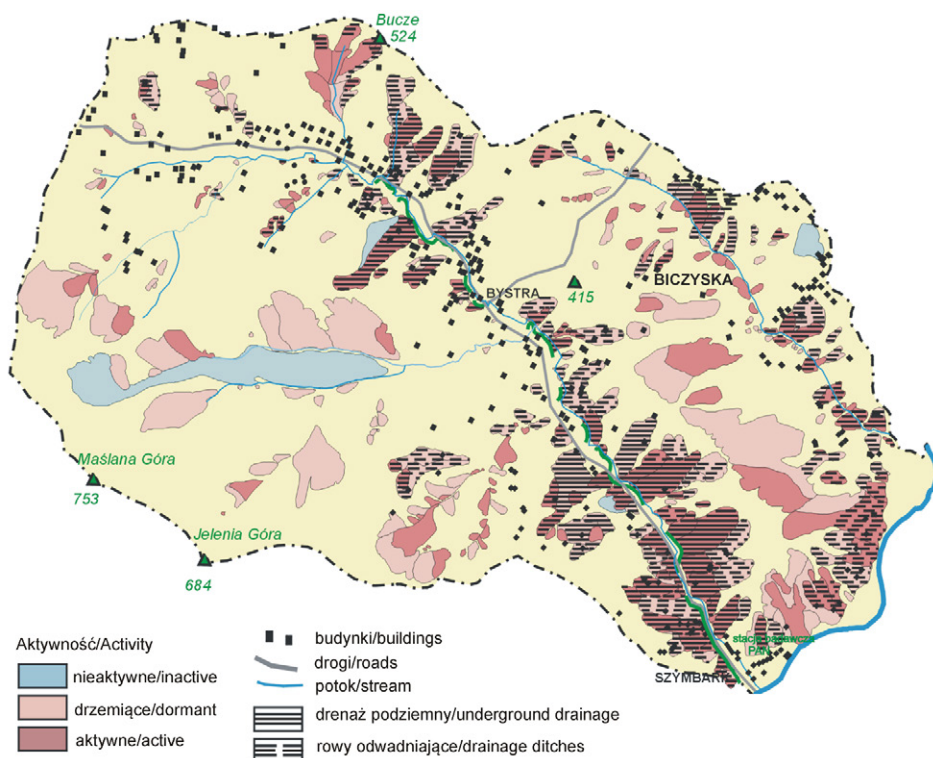
Ekspozycja	północna	wschodnia	południowa	zachodnia
Procent powierzchni zlewni	28,5	35,9	24,6	11,0

Źródło: Opracowanie własne

Granica pomiędzy rzeźbą pogórską a beskidzką jest dość wyraźna wskutek różnic litologicznych budujących je kompleksów skalnych i podkreślona dodatkowo przez osuwiska rozwijające się na eoceńskiej serii łupkowej odgraniczającej bardziej odporne warstwy magurskie od inoceramowych (Kotarba 1970). Doliny rozcinające garby pogórskie mają charakter głębokich niecek lub rozległych wciosów o niewyrównanych profilach podłużnych, z dnem na ogół sięgającym litej skały, ale posiadającym materiał gruzowo-zwirowy. Dostarczają one do Bystrzanki znaczne ilości materiału pochodzącego z licznych osuwisk występujących w ich górnych biegach.

Dno doliny Bystrzanki rozcięte jest korytami potoków do głębokości od 2,5 do 6,0 m. Równina zalewowa nie występuje w sposób ciągły wzdłuż koryta, a w rozszerzeniach doliny jej szerokość wynosi 60 m (Gil 1979).

Uwarunkowania tektoniczne i litologiczne, energia rzeźby, erozyjna działalność potoków oraz opady atmosferyczne i roztopy sprawiają, że zlewnia Bystrzanki to obszar podatny na osuwiska (ryc. 6). Zajmują one 30% obszaru zlewni i występują głównie w dolnych częściach stoków dochodząc do koryt Bystrzanki i jej dopływów (Kotarba 1986). Na 1 km² obszaru przypada 17,4 osuwisk. Są one stosunkowo niewielkie, większość z nich ma powierzchnię poniżej 10 ha (Wójcik i in. 2003; Mrozek i in. 2008; Zabuski i in. 2009). Licznie występujące małe osuwiska dolinne (ryc. 6) uruchamiane są nawet po niewielkich opadach deszczu.



Ryc. 6. Osuwiska w zlewniach Bystrzanki i Biczysk (Wójcik i in. 2003)

Fig. 6. Landslides in the Bystrzanka and Biczyska catchment (Wójcik et al. 2003)

Erozja boczna Bystrzanki i jej dopływów odgrywa istotną rolę w inicjacji ruchów masowych, powodując gwałtowne uruchomienie materiału do transportu fluwialnego. Część osuwisk jest rozwiniętych w strefie przykorytowej Bystrzanki, a ich czoła schodzą bezpośrednio do potoku. Jest to istotne źródło materiału transportowanego podczas wezbrań. Materiał koluwalny

przemieszczany grawitacyjnie do koryt jest najczęściej szybko usuwany przez wody wezbraniowe, ale niejednokrotnie może spowodować przegrodzenie potoku w trakcie wezbrań i spiętrzenie wody, powodując intensyfikację erozji bocznej.

W maju i czerwcu 2010 r., po długotrwałych opadach atmosferycznych, stwierdzono uaktywnienie się osuwisk oraz dostarczanie przez nie, znacznych ilości materiału do koryta Bystrzanki i dopływów (fot. 1).

2.3. GLEBY

Właściwości gleb odgrywają ważną rolę w procesie erozji. Gleby w zlewni Bystrzanki wykształciły się na pokrywach zwietrzelinowych utworów płaszczowiny magurskiej. Nie tworzą one skrajnie różnych glebotwórczo kompleksów litologicznych (Adamczyk i in. 1973). Występują tu szkieletowe utwory gliniaste i gliniasto-ilaste. Na magurskich piaskowcach glaukonitowych i w miejscach z przewagą piaskowców wśród warstw inoceramowych, występuje zwietrzelina z przewagą frakcji kamienistej (50–80%), natomiast na warstwach łupków pstrych, na serii łupkowej warstw inoceramowych i krośnieńskich, zaznacza się znacznie niższy udział części szkieletowych (20–40%).

Ogólna miąższość pokrywy glebowej z reguły rośnie w kierunku podnóży stoków i waha się od 80–100 cm na wierzchołkach do 200 cm na stokach górskich. Stoki garbów pogórskich, które zbudowane są z mniej odpornych warstw łupkowych, cechuje większe zróżnicowanie miąższości zwietrzelin (Kotarba 1970). Na wypukłych częściach stoków miąższość pokrywy wynosi około 100 cm, zwiększając się do 300–400 cm u podnóża stoku.

Dno doliny Bystrzanki zbudowane jest z pokryw aluwialnych lub aluwialno-deluwialnych, żwirowo-głazowych, z domieszką piasków i glin, o miąższości do 140 cm, które nie stanowią ciągłej warstwy.

Gleby okolic Szymbarku na garbach pogórskich wykazują skład mechaniczny glin ciężkich, a na grzbietach beskidzkich glin średnich. Gleby wykształcone na łagodniejszych stokach pogórskich, w przeciwieństwie do gleb stoków beskidzkich, są często w głębszych poziomach oglejone, na co wpływają warunki wodno-tlenowe, drenaż śródpokrywowy, przewarstwienia gruzu skalnego i zróżnicowanie miąższości pokryw. Ze względu na dużą zwięźłość wykazują słabszą retencję wodną i większą skłonność do podmiania (Adamczyk i in. 1973).

2.4. SZATA ROŚLINNA

Obszar badań według kryteriów biogeograficznych zaliczony został do Regionu (prowincji) Alpejsko-Karpackiego, Podregionu Karpackiego (Szafer, Zarzycki 1972). Leży w obrębie dwóch pięter roślinnych: piętra pogórze i piętra regla dolnego. Granica pomiędzy nimi przebiega na wysokości 450–500 m n.p.m. (Staszkiwicz 1973) i jest ściśle związana z warunkami mezo- i mikroklimatycznymi (Obrębska-Starkel 1973). Wyznaczają ją zbiorowiska grądu wysokiego (*Tilio-Carpinetum*) i zespołu buczyny karpackiej (*Fagetum Carpaticum*). Największą powierzchnię zajmują lasy zespołu buczyny karpackiej – *Dentario glandulosaeFagetum*, stanowiąc główne zbiorowisko lasów piętra regla dolnego. W jego skład wchodzi dwa podzespoły: typowy (*Fagetum typicum*) i podzespół z miesięcznicą trwałą (*Fagetum lunarietosum*). Pogórski zespół grądowy – *TilioCarpedinetum* występuje tylko w małych płatach na stromych fragmentach stoków lub na wyższych terasach rzecznych (Staszkiwicz 1973). Pomiędzy wymienionymi głównymi zespołami pośrednie położenie zajmują zbiorowiska lasu jodłowego z jeżyną i fragmentarycznie boru jodłowego (*Rubus hirtus – Abies alba*), leżące na granicy garbów pogórskich i grzbietów beskidzkich. W dnach dolin występują zespoły olszyny karpackiej składające się głównie z olszy szarej z domieszką jesiona, jawora, wierzby i grabu. Lasy w zlewni Bystrzanki położone są na obszarze leśnictwa Łużna. W 1957 r. zajmowały 35% zlewni (4,6 km²), natomiast w 2010 r. już 40% (5,1 km²).

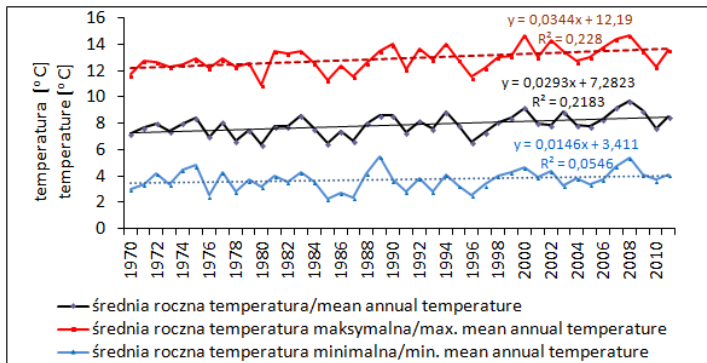
Wraz z rozwojem osadnictwa i gospodarki rolnej obserwowano zmiany zasięgu zbiorowisk roślinnych, głównie w piętrze pogórskim, gdzie zbiorowisko grądu wysokiego zostało zajęte przez obszary użytkowane rolniczo, podobnie jak zbiorowiska dolinne przez osadnictwo.

3. HYDROMETEOROLOGICZNA CHARAKTERYSTYKA OKRESU BADAŃ

3.1. WARUNKI TERMICZNE

Warunki termiczne odgrywają znaczącą rolę w kształtowaniu i przebiegu wezbrań oraz zjawisk erozyjnych na stokach. Temperatura powietrza wpływa na zmiany retencji gruntowej, kształtowanie się wielkości parowania, zamarzanie gleby, a w konsekwencji na spływ i splukiwanie powierzchniowe.

Średnia miesięczna, roczna i wieloletnia temperatura powietrza są jednymi z najczęściej obliczanych wskaźników opisujących stosunki termiczne danego obszaru. Średnia roczna temperatura powietrza, na Stacji w Szymbarku od 1970–2011 wynosiła 7,9°C . W latach 1970–1979 notowano niższą średnią roczną temperaturę, o prawie 1°C niż w latach 2000–2011. Najcieplejszy w tym okresie był rok 2008 ze średnią roczną temperaturą 9,7°C (ryc. 7). W przebiegu wieloletnim zaznacza się niewielki wzrost średniej temperatury powietrza, co wpisuje się w trend zmian klimatu potwierdzony w raporcie IPCC (Kundzewicz 2011). Seria obserwacji klimatycznych w Szymbarku jest jednak zbyt krótka by jednoznacznie potwierdzić zmiany klimatyczne w szerszej skali terytorialnej.



Ryc. 7. Przebieg średniej rocznej temperatury powietrza w latach 1970–2011 w Stacji Naukowej w Szymbarku

Fig. 7. The course of mean annual air temperature in the period 1970–2011 at the Szymbark Research Station

Zgodnie z klasyfikacją termiczną H. Lorenc (1994) w okresie 1970–2011, 20 lat (1971–1974, 1977, 1979, 1981, 1982, 1984, 1988, 1992, 1993, 1995, 1998, 2001, 2003–2006, 2010) mieściło się w zakresie normalnym, zbliżonym do średniej z wielolecia. Miesiące anomalnie ciepłe wystąpiły we wszystkich porach roku, oprócz zimy, jednak z największą częstością pojawiały się na wiosnę od roku 2000. Należy zaznaczyć, że od roku 1999 zanotowano wyraźny wzrost miesięcy ciepłych oraz bardzo ciepłych.

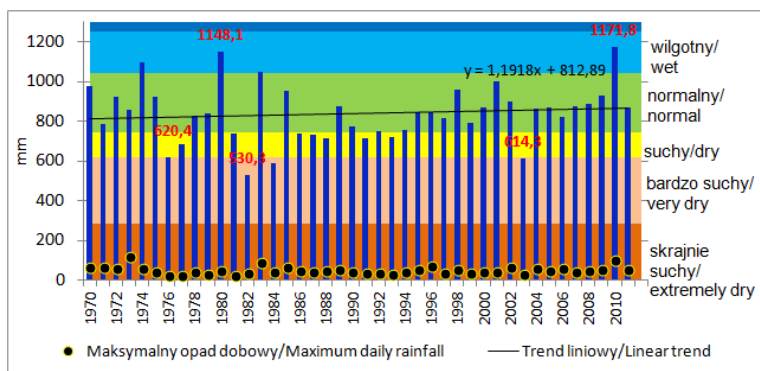
Dla właściwej oceny procesów spływu i spłukiwania na stoku ważna jest znajomość długości okresu wegetacyjnego, dat jego rozpoczęcia i zakończenia. Średnia długość okresu wegetacyjnego na Stacji w Szymbarku w latach 1970–2011 wyniosła 222 dni w roku, odznaczając się niewielkim trendem dodatnim wynoszącym 0,7 dnia na 10 lat. W latach 1970–1979 średnia liczba dni z okresem wegetacyjnym wyniosła 227 i była o 9 dni krótsza niż w okresie 2000–2011. Odchylenie standardowe czasu trwania wegetacji w Szymbarku wyniosło ± 16 dni. Zaobserwowano umiarkowaną ujemną korelację pomiędzy liczbą dni w okresie wegetacyjnym a średnią temperatura powietrza, z współczynnikiem korelacji liniowej $r = -0,46$ (Kijowska 2010).

3.2. OPADY ATMOSFERYCZNE W LATACH HYDROLOGICZNYCH 1970–2011

Podstawowym ogniwem obiegu wody w zlewni jest opad atmosferyczny, którego wysokość, częstość występowania, czas trwania oraz natężenie ma decydujące znaczenie w transformacji rzeźby. Procesy ekstremalne wywołane deszczami nawalnymi czy też rozlewnymi mają największe znaczenie w przekształcaniu koryt (m.in. Kaszowski, Kotarba 1970; Starkel 1976; Krzemień, Górczyca 2010; Frandorfer, Lehotsky 2011; Kijowska–Strugała 2011) i dostarczają znacznych ilości materiału do transportu rzeczno-

Średnia roczna suma opadów atmosferycznych na Stacji w Szymbarku w latach 1970–2011 wyniosła 838,5 mm. Najniższą roczną sumę opadu, równą 530 mm, zarejestrowano w 1982 r., a najwyższą ponad 1171 mm w roku 2010 (ryc. 8). Zgodnie z klasyfikacją opadową Z. Kaczorowskiej (1962) w całym okresie badawczym jedynie trzy lata (1974, 1980, 2010) zaliczane były do lat wilgotnych, a rok 1982 i 2003 do bardzo suchych (ryc. 8). Lata normalne stanowiły 52% ich liczby w okresie 1970–2011.

Średnio w latach 1970–2011 notowano 174 z opadem w roku, przy czym dominowały opady słabe (1–5 mm) stanowiące 37% wszystkich dni z opadem. W półroczu zimowym i letnim notowano średnio 87 dni z opadem. Dni z opadem >20 mm stanowiły zaledwie 4% wszystkich dni z opadem i notowano je głównie w półroczu letnim. Najniższą liczbę dni z opadem notowano w roku bardzo suchym – 1982 (135 dni), a najwyższą w 2004 r. (216).



Ryc. 8. Roczna suma opadów atmosferycznych w latach 1970–2011 na Stacji w Szymbarku na tle klasyfikacji opadowej wg Kaczorowskiej (1962)

Fig. 8. Annual precipitation totals in the period 1970–2011 at the Szymbark Research Station against Kaczorowska classification of precipitation

Porównując dwa skrajne okresy 1970–1979 oraz 2000–2011, można wskazać, że w ostatnich latach zanotowano średnio 14 dni więcej z opadem w roku (186 dni). Procentowy udział dni o określonej sumie opadu był podobny. W latach 2000–2011 zanotowano więcej dni z opadem o dobowej sumie do 1 mm. Średnia liczba dni z opadem >20 mm w obydwu przedziałach czasowych była podobna i wyniosła 7 (1970–1979) oraz 8 dni (2000–2011).

3.2.1. CHARAKTERYSTYKA OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH W PÓŁROCZU HYDROLOGICZNYM LETNIM W LATACH 1970–2011

Ze względu na dominującą rolę wezbrań w półroczu hydrologicznym letnim w ilości odprowadzanego ze zlewni materiału zawieszzonego, okres ten poddano szczegółowej analizie. Ładunek zawiesziny wynoszonej ze zlewni w czasie wezbrań letnich może stanowić nawet 99% rocznego ładunku zawiesziny (Welc 1972; Froehlich 1982; Łajczak 1989; Kijowska, Bochenek 2011).

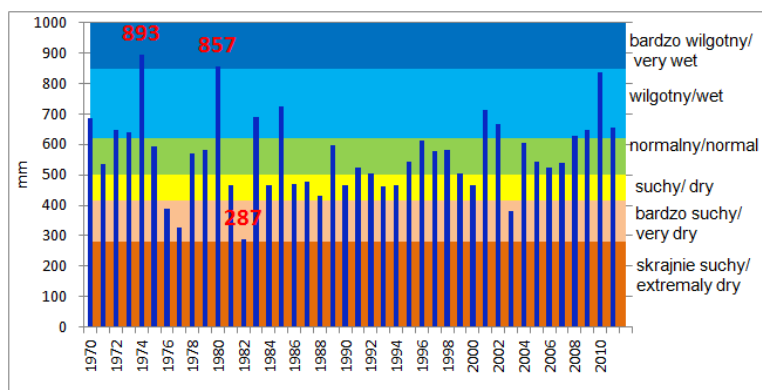
Średnia suma opadów atmosferycznych w półroczu hydrologicznym letnim (V–X) w latach 1970–2011 na Stacji w Szymbarku wynosiła 566 mm (tab. 4). Bardzo wilgotne półrocze zanotowano dwukrotnie (w 1974 r. oraz w 1980 r.), (ryc. 9). Opady w półroczu letnim stanowiły od 47% (1977 r.) do 82% (1974 r.) rocznej sumy opadu. Istnieje wysoka dodatnia zależność między sumą opadów w półroczu hydrologicznym letnim a roczną sumą opadu w badanym wieloleciu ($r^2 = 0,8583$; $r = 0,93$). Miesiące letnie decydują zatem w największym stopniu o wysokości rocznej sumy opadu. Najwyższe wartości odchylenia standardowego zanotowano w lipcu (średnio 72 mm). W latach 2000–2011 wartość ta była jednak wyższa o 41 mm w odniesieniu do okresu 1970–1979 (tab. 4). Najwyższa średnia miesięczna suma opadów w analizowanym wieloleciu zanotowana została w czerwcu (125,6 mm) i lipcu (120,8 mm), natomiast najniższa w październiku (54,9 mm). Największa zmienność

miesięcznych sum opadów deszczu wystąpiła w październiku (72%) i lipcu (60%), a najmniejsza w maju (40%). Dodatkowo w ostatniej dekadzie notuje się wzrost miesięcy skrajnie wilgotnych.

Tabela 4. Charakterystyka średnich miesięcznych sum opadu w półroczu hydrologicznym letnim na Stacji w Szymbarku

1970–2011	V	VI	VII	VIII	IX	X	V–X
Średnia suma opadu [mm]	95,3	125,6	120,8	94,2	75,3	54,9	566,1
Maksymalna dobową sumą opadu (rok) [mm]	76,3 (1996)	125,4 (1973)	94,0 (1983)	68,3 (2002)	60,8 (1983)	45,6 (1980)	125,4
Procentowy udział w opadzie w półroczu letnim [%]	16,8	22,2	21,3	16,7	13,3	9,7	100,0
SD [mm]	37,7	62,9	72,4	42,6	39,6	39,5	49,1
CV [%]	39,5	50,1	59,9	45,2	52,6	72,1	53,2
Średnia liczba dni z opadem	15,3	16,0	15,4	13,1	13,5	13,3	14,4
Maksymalna liczba dni z opadem	26,0	23,0	25,0	19,0	24,0	24,0	26,0
1970–1979	V	VI	VII	VIII	IX	X	V–X
Średnia suma opadu [mm]	96,0	140,9	109,4	109,9	70,8	59,0	586,0
Maksymalna dobową sumą opadu [mm]	67,3	125,4	55,5	67,5	24,2	34,4	125,4
Procentowy udział w opadzie w półroczu letnim [%]	16,4	24,0	18,7	18,8	12,1	10,1	100,0
SD [mm]	36,9	81,4	54,3	53,2	29,0	51,7	51,1
CV [%]	38,5	57,8	49,6	48,4	41,0	87,6	53,8
Średnia liczba dni z opadem	16,2	15,2	16,9	13,2	14,4	13,6	14,9
Maksymalna liczba dni z opadem	23,0	22,0	25,0	19,0	22,0	23,0	25,0
2000–2011	V	VI	VII	VIII	IX	X	V–X
Średnia suma opadu [mm]	95,4	131,9	157,1	92,0	73,8	50,9	601,1
Maksymalna dobową sumą opadu [mm]	47,0	107,0	62,3	68,3	47,7	31,3	107,0
Procentowy udział w opadzie w półroczu letnim [%]	15,9	21,9	26,1	15,3	12,3	8,5	100,0
SD [mm]	45,2	68,5	101,3	37,9	51,7	33,6	56,4
CV [%]	47,4	52,0	64,5	41,1	70,1	65,9	56,8
Średnia liczba dni z opadem	16,3	16,5	16,9	12,8	13,0	13,5	14,4
Maksymalna liczba dni z opadem	26,0	22,0	23,0	19,0	22,0	24,0	26,0

Źródło: Opracowanie własne



Ryc. 9. Suma opadów atmosferycznych w półroczu hydrologicznym letnim (V–X) w latach 1970–2011 w Stacji w Szymbarku na tle klasyfikacji opadowej wg Kaczorowskiej (1962)

Fig. 9. Annual precipitation in the summer hydrological year in the period 1970–2011 at the Szymbark Research Station against Kaczorowska classification of precipitation

R. Soja (1981) wydzielił dwie główne kategorie opadów odnoszące się do stanu wody w rzece. Pierwsza związana jest z opadami, które są całkowicie przechwytywane przez glebę i roślinność i nie mają wpływu na zmianę przepływu w cieku. Natomiast druga obejmuje opady, które powodują wzrost przepływu wody w wyniku powstania opadu efektywnego. Według R. Soji (1981) opady o wysokości do 3 mm w ciągu doby nawet przy dużym uwilgotnieniu zlewni, nie zaznaczają się w zmianie natężenia przepływu (z wyjątkiem okresu zalegania pokrywy śnieżnej). Opady wyższe, w granicach 3–5 mm, mogą sporadycznie powodować minimalny wzrost przepływu, który jest rozłożony w przeciągu kilku godzin. Z kolei opady o wysokości od 5 do 10 mm zwiększają przepływ, który trwa kilkadziesiąt godzin. W takiej sytuacji w kształcie fali wezbraniowej nie zaznacza się wyraźnie zarysowana kulminacja. Wezbrania wywołane opadami do 10 mm formują się najczęściej bez udziału spływu wody po naturalnej powierzchni terenu, a kształtowane są przez wody drenujące pochodzące m.in. drogi polne i o nawierzchni asfaltowej, wody spływające z dachów zabudowań itp. W Karpatach dostawa nawet niewielkich ilości wody do koryta następuje bardzo szybko, co związane jest często spotykanym przebiegiem dróg wzdłuż cieków (Krocak 2010).

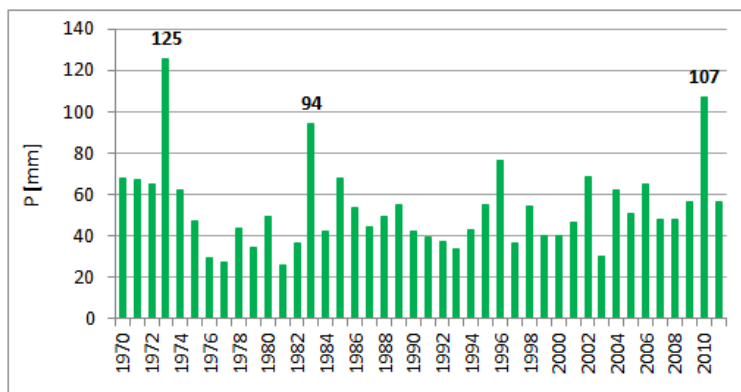
W Stacji w Szymbarku w latach 1970–2011 sumy opadów dobowych do 3 mm stanowiły 56,7% sumy opadów od maja do października, natomiast opady w granicach 3–5 mm 11,2%. W całym okresie badawczym dominowały dni z opadem bardzo słabym (do 1 mm) i słabym (1–5 mm), które łącznie stanowiły 68% liczby dni z opadem w tym półroczu. Wraz ze wzrostem sumy opadów zmniejszała się ich częstość. Dni z opadem >20 mm stanowiły zaledwie 6% liczby dni z opadem w półroczu letnim. W latach 1970–1979 opady najczęściej występowały w czerwcu (7,4%), w latach 2000–2011 w lipcu

i sierpniu (8,4 i 8,0%). Ponadto w latach 2000–2011 opady o sumie przekraczającej 30 mm występowały częściej niż w latach 1970–1979 (tab. 5). Najwyższe dobowe sumy opadów najczęściej notowano w lipcu. W ciągu całego okresu badawczego dobowe sumy opadu dwukrotnie przekroczyły granicę 100 mm: 30.06.1973 – 125 mm, 03.06.2010 – 107 mm (ryc. 10), a największą intensywność deszczu $6,3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ odnotowano w sierpniu 2002 r.

Tabela 5. Liczba dni z dobowym opadem o różnej wysokości w półroczu hydrologicznym letnim w różnych przedziałach czasowych

Opad mm	1970–1979	1980–1989	1990–1999	2000–2009	2000–2011	1970–2011
	Liczba dni					
<1	26,1	23,9	26,0	27,0	27,3	25,6
1.1–5.0	31,3	27,2	28,4	28,3	28,2	28,9
5.1–10.1	14,6	13,8	15,6	14,2	14,3	14,9
10.1–15.0	8,0	6,6	6,7	7,4	7,6	7,4
15.1–20.0	4,0	3,8	4,5	3,9	4,1	4,2
20.1–30.0	3,8	2,5	2,8	3,4	3,7	3,1
30.1–50.0	1,7	3,0	1,9	2,6	2,8	2,5
>50	0,9	0,6	0,3	0,6	0,6	0,6
Suma	90,4	81,4	86,2	87,4	88,4	87,2

Źródło: Opracowanie własne



Ryc. 10. Maksymalne dobowe sumy opadu atmosferycznego (P) w półroczu hydrologicznym letnim, zanotowane na Stacji w Szymbarku w latach 1970–2011

Fig. 10. Maximum daily precipitation (P) in the summer hydrological year (May–October) in the period 1970–2011 (the Szymbark Research Station)

W latach 1970–1979 zaznaczał się niewielki trend spadkowy w wysokości opadów atmosferycznych, wyrażony równaniem regresji liniowej $y = -20,151P + 696,8$. Po roku 1990 obserwowano odwrotną tendencję. W latach 1990–1999 średnio co roku w półroczu hydrologicznym letnim suma opadu zwiększała się o około 10 mm ($y = 10,124x + 467,97$), a po 2000 r. już o 14 mm ($y = 14,35x + 507,84$).

W celu oceny roli erozji wodnej w zlewni Bystrzanki obliczono erozyjność deszczy (EI_{30}) w półroczu hydrologicznym letnim w latach 1969–2005. Wybór przedziału czasowego związany był z dostępnością danych do analizy. Średnia ilość zdarzeń opadowych wywołujących erozję gleb wyniosła około 7 zdarzeń na rok (tab. 6). Najczęściej zdarzenia erozyjne notowano w czerwcu oraz lipcu (odpowiednio 61 i 64 zdarzenia) w całym okresie badawczym, średnio 2–3 zdarzenia na miesiąc. W lipcu występowały deszcze o największej erozyjności, ze średnią wartością $338 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Wartość wskaźnika EI_{30} w półroczu letnim w poszczególnych latach hydrologicznych zmieniała się w szerokim zakresie, od 17,7 (1999) do 1984,1 $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (1980). O tak wysokiej wartości rocznej wskaźnika zdecydowała duża liczba zdarzeń (20), suma opadu przekraczająca 1148 mm oraz wysokie natężenie opadu. Najwyższymi wartościami wskaźnika EI_{30} cechowały się lata wilgotne i bardzo wilgotne. Średnia wartość współczynnika erozyjności deszczy i spływów powierzchniowych w letnim półroczu hydrologicznym w okresie 35 lat (1969–2005) wyniosła $751,2 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Średni wskaźnik EI_{30} w latach 1969–1979 był wyższy o $200 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ niż w latach 1990–2005, a suma zdarzeń o 11. Uzyskane wartości wskaźnika są wyższe od zanotowanych na Pogórzu Wiśnickim (Święchowicz 2012).

Tabela 6. Sumy miesięczne i roczne indeksów erozyjności deszczu EI30 (M)*mm*ha⁻¹*h⁻¹) wraz z ilością zdarzeń erozyjnych

Rok	Maj		Czerwiec		Lipiec		Sierpień		Wrzesień		Październik		Suma	
	EI30	Liczba zdarzeń	EI30	Liczba zdarzeń	EI30	Liczba zdarzeń	EI30	Liczba zdarzeń	EI30	Liczba zdarzeń	EI30	Liczba zdarzeń	EI30	Liczba zdarzeń
1969			1352,0	3			245,4	1					1597,4	4
1972	62,4	2	286,6	3	930,6	1	203,5	3	28,7	1			1511,9	10
1973			46,0	2	1037,8	4							1083,8	6
1974	107,7	3	460,1	2	57,5	2	55,4	1			53,4	3	734,1	11
1975			118,7	3	57,0	1	285,7	1					461,4	5
1976	327,4	1	4,1	1			29,4	1	41,3	3			402,3	6
1977					336,8	3	76,7	1	34,9	2			448,4	6
1978	82,3	3	44,6	1			316,7	3	83,9	2			527,5	9
1979			380,4	4			404,9	3					785,3	7
1980			1024,6	9	668,0	7	58,7	1	3,3	1	229,4	2	1984,1	20
1981			100,8	3	12,5	1			11,0	1			124,3	5
1982					373,3	2							373,3	2
1983	17,3	1	208,8	2	557,6	4	95,9	5	70,4	1			950,1	13
1984	15,7	1			3,3	1			42,7	2	6,3	1	67,9	5
1985	342,9	1	774,3	3	289,3	2	253,6	3					1660,0	9
1986			393,0	2	363,2	1	310,7	1					1067,0	4
1987	71,6	1					62,7	1					134,2	2
1988	3,6	1			962,8	3	49,0	1					1015,4	5
1989					626,6	1	637,2	2					1263,8	3
1990	49,6	1	334,9	1	14,4	1			20,6	2			419,5	5
1991	117,6	2	174,3	3	195,5	1	80,2	2	12,2	1			579,9	9
1992	18,5	1	152,6	3	68,8	2	60,0	1	95,3	1	43,4	1	438,4	9
1993	116,4	4	77,2	2	177,9	6	327,6	4	9,4	1			708,5	17
1994			17,9	2			6,8	1					24,8	3
1995	239,7	1	459,3	4	27,1	2	311,0	2	280,1	2			1317,1	11
1996	285,5	3			20,9	1	647,2	2	10,8	1			964,5	7
1997	103,9	1	83,8	2	652,0	4	13,2	1			66,6	1	919,5	9
1998			295,3	2	196,7	2					23,1	2	515,1	6
1999					16,1	1			1,7	1			17,7	2
2000	90,1	1			23,3	1							113,4	2
2001					694,8	3	338,2	2	56,4	1			1089,5	6
2002			51,9	2			1584,8	1					1636,8	3
2003	104,2	5	21,2	1	135,6	1			1,2	1			262,1	8
2004	9,9	1			630,2	6	19,0	2			6,9	2	666,0	11
2005	6,1	1	40,4	1			84,0	2	347,1	2			477,7	6
Suma 1969–2011	2172,4	35	6903,0	61	9129,7	64	6557,8	48	1101,5	26	429,0	12	26293,4	246

Średnia 1969– 2011	108,6	2	287,6	3	338,1	2	252,2	2,0	61,2	1	61,3	2	751,2	7
Średnia 1969– 1979	145,0	2	336,6	2	484,0	2	202,2	2,0	34,9	2	53,4	3	833,6	7
Średnia 1990– 2005	103,8	1,9	155,4	2,1	219,5	2,4	315,7	1,8	83,5	1,3	35,0	1,5	634,4	7,1

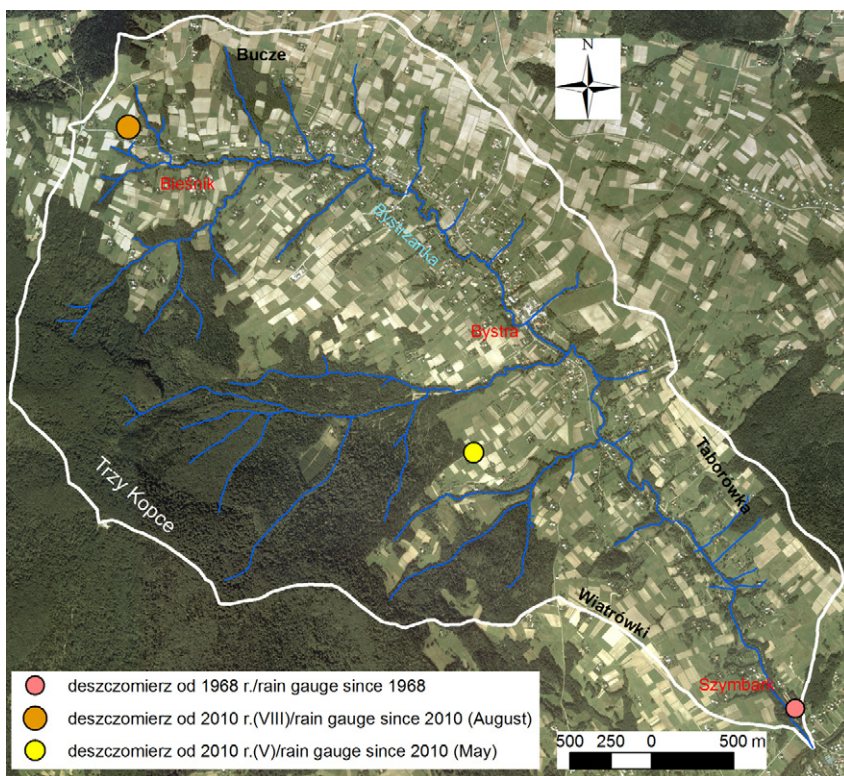
Źródło: Kijowska–Strugała, Demczuk 2013

Analiza warunków opadowych w półroczu hydrologicznym letnim wyraźnie wskazuje, że warunki potencjalnie sprzyjające pojawieniu się erozji wodnej na stokach zdarzają się rzadko. Mimo stosunkowo dużej liczby dni z opadem deszczu, ich morfogenetyczna skuteczność jest bardzo zróżnicowana, ponieważ zależy ona nie tylko od sumy opadu ale także od jego natężenia.

3.3. PRZESTRZENNE ZRÓŻNICOWANIE OPADÓW W ZLEWNI BYSTRZANKI W LATACH 2010–2011

W latach 2010–2011 w zlewni Bystrzanki badano przestrzenne zróżnicowanie opadu atmosferycznego przy użyciu deszczomierzy zlokalizowanych w różnych częściach asymetrycznej zlewni. Od 2010 r. funkcjonowały trzy deszczomierze (ryc. 11) zainstalowane w górnej (Bieśnik – deszczomierz automatyczny firmy ASTER), środkowej (Bystra – deszczomierz Hellmana) i dolnej części zlewni (Szymbark – deszczomierz Hellmana, deszczomierz automatyczny, telepluviograf), przy czym deszczomierz w Bystrej został uruchomiony w kwietniu, a deszczomierz w Bieśniku dopiero w sierpniu 2010 r. Najwyżej zlokalizowany był deszczomierz w Bieśniku, na wysokości 485 m n.p.m, a najniżej w Szymbarku (325 m n.p.m.).

Zróżnicowanie przestrzenne opadów ma kluczowe znaczenie dla wielkości wezbrań i przebiegu transportu zawiesiny w asymetrycznej, zróżnicowanej pod względem typów rzeźby, zlewni Bystrzanki. Zebrane dane wykazują zróżnicowanie rozkładu przestrzennego opadów, pomimo niewielkiej powierzchni zlewni, czego przyczyną jest wzajemny układ dolin i grzbietów. Zlewnia od zachodu osłonięta jest wzniesieniem Maślanej Góry, które powoduje powstanie cienia opadowego. Jak wykazały badania prowadzone w tym obszarze w latach 1954–1963 (Soja 1977) oraz 1971–1979 (Welc 1988), stoki w zlewni eksponowane na zachód otrzymują najwięcej opadów, ponieważ w Karpatach najbardziej obfite deszcze przynoszone są przez wiatry z kierunku zachodniego. Zlewnia Bystrzanki znajdująca się w cieniu opadowym otrzymuje zatem mniej opadu niż wynikałoby to z jej wysokości n.p.m. R. Soja (1977) w latach 1969–1970 stwierdził w czasie deszczy rozlewnych niższe sumy opadu w środkowej części zlewni, co wskazuje na nierównomierny obraz przestrzenny opadów w badanym obszarze.



Ryc. 11. Lokalizacja deszczomierzy w zlewni Bystrzanki w latach 2010–2011
 Fig. 11. Distribution of the rain gauges in Bystrzanka catchment in 2010–2011

Badania prowadzone w latach 2010–2011 wykazały, że w czasie tego samego opadu jego wysokość rejestrowana w kilku punktach zlewni znacznie się różni. Przykładowo na Stacji w Szymbarku suma opadów w maju i czerwcu 2010 r. osiągnęła odpowiednio 210,2 i 222,5 mm, a w Bystrej 237,3 mm i 201,0 mm (tab.7). Odnotowana suma opadu w maju była najwyższą dotąd zanotowaną wysokością opadu na Stacji w Szymbarku w tym miesiącu, od początku jej funkcjonowania i stanowiła 224% średniej miesięcznej sumy opadów dla maja z wielolecia 1970–2011 i 25% średniej rocznej sumy opadów (838,5 mm). W miesiącu tym opad trwał przez 27 dni (nieprzerwanie przez 13 dni). W czerwcu suma opadów atmosferycznych w Szymbarku prawie dwukrotnie przewyższyła średnią miesięczną normę (124,7 mm) i stanowiła 27% średniej sumy opadów dla wielolecia.

Najwyższą dobową sumę opadu w Bystrej – 92,5 mm i Szymbarku – 107,0 mm odnotowano 3 czerwca 2010 r. (ryc. 12), o maksymalnym natężeniu $0,85 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (Stacja w Szymbarku). Prawdopodobieństwo opadu o takiej sumie dobowej wynosi 3,9% (rzadziej niż 1 raz na 25 lat).

Tabela 7. Miesięczne sumy opadów zanotowane w różnych częściach zlewni Bystrzanki w latach 2010–2011

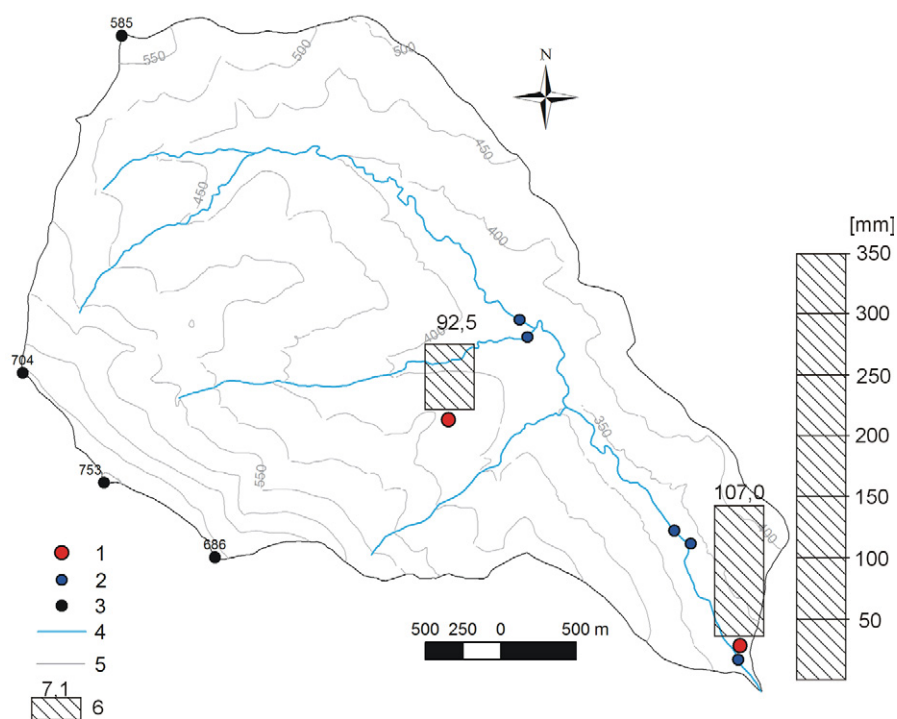
Miesiące półrocza hydrologicznego letniego [mm]	Szymbark 325 m n.p.m.	Bystra 442 m n.p.m.	Bieśnik 485 m n.p.m	ŚREDNIA	SD	Cv	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]		
2010	V	210,2	237,3		223,7	19,1	8,5
	VI	222,5	201,0		211,7	15,2	7,2
	VII	146,7	151,2		148,9	3,1	2,1
	VIII	98,2	91,8	92,0	94,0	4,5	4,8
	IX	137,9	182,9	191,5	170,8	31,8	18,6
	X	22,0	27,8	25,6	25,1	4,1	16,2
Suma	V–X	837,5	891,8	309,1*	864,6**	38,4	4,4
2011	V	57,9	60,0	63,3	60,4	1,5	2,5
	VI	136,8	140,0	142,2	139,7	2,3	1,6
	VII	325,0	326,1	347,1	332,7	0,8	0,2
	VIII	65,9	55,5	52,8	58,1	7,4	12,7
	IX	13,4	14,3	22,7	16,8	0,6	3,8
	X	57,6	61,4	67,3	62,1	2,7	4,3
Suma	V–X	656,6	657,3	695,4	669,8	0,5	0,1

*suma od sierpnia do października

**średnia suma opadu z deszczomierza zlokalizowanego w Szymbarku i Bystrej

Źródło: Opracowanie własne

W Szymbarku najwyższą godzinową sumę opadu, 34,6 mm, odnotowano 4 czerwca 2010 r. między godziną 4:08 i 5:08. Stosując klasyfikację wydajności deszczu K. Chomicza (1951), opartą o sumę opadu i czas trwania, obliczony współczynnik wydajności deszczu α dla sumy godzinowej wyniósł 4,5, co pozwoliło zaklasyfikować opad do klasy „deszcz ulewny IV stopnia”. Decydującym czynnikiem wpływającym na wysokość i natężenie opadów była bardzo duża wilgotność masy powietrza zalegającej nad Polską i związana z nią znaczna grubość chmur warstwowych oraz silny wiatr z kierunku północnego występujący w dolnej troposferze. Na Stacji w Szymbarku 3 czerwca odnotowano 8 burz, które przemieszczały się z południa na północ i północny-zachód. Suma opadu w Szymbarku za okres 20 dni, od 15 maja do 3 czerwca, osiągnęła wartość 320,4 mm i była najwyższą 2-dekadową sumą w ostatnim 40-leciu. Prawdopodobieństwo takiej sumy wynosi 4,7% (rzadziej niż 1 raz na 20 lat). Tak wysokie opady atmosferyczne spowodowały wezbranie o ponadprzeciętnym przepływie ($57 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), podczas którego zaszło znaczne przemodelowanie koryta (rozd. 5.3) i odprowadzenie ze zlewni dużej ilości zawiesiny (rozd. 6 i 8).



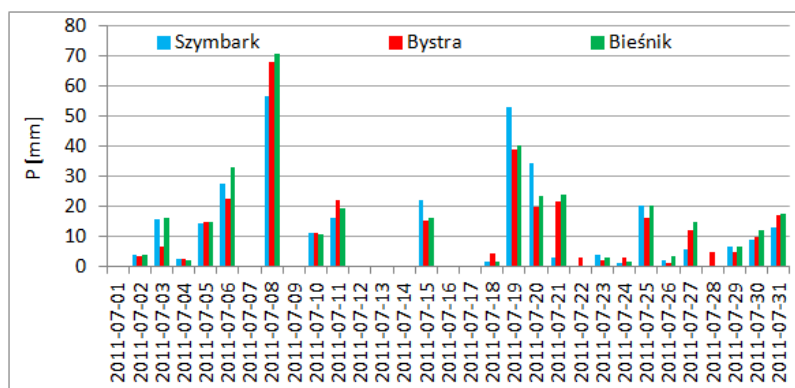
Ryc. 12. Przestrzenne zróżnicowanie wysokości opadu w dniu 3.06.2010 r. w zlewni Bystrzanki

Fig. 12. Spatial differentiation of daily precipitation on 3 June,2010 in the Bystrzanka catchment

1 – deszczomierz / rain-gauge; 2 – miejsce poboru próbek wody / collection of water samples; 3 – punkt wysokościowy (m n.p.m.) / altitude point (m a.s.l.); 4 – potok / stream; 5 – poziomicę / contour line; 6 – wysokość opadu (mm) / precipitation (mm)

Odnotowana suma opadów w półroczu hydrologicznym letnim w 2010 r. w Szymbarku była niższa o 54,3 mm od sumy zanotowanej w Bystrej, jednak stanowiła aż 71% rocznej sumy opadów. W 2010 r. współczynnik zmienności opadów był najwyższy we wrześniu i wyniósł 18,6%, co związane było z wystąpieniem intensywnych opadów deszczu, które swym zasięgiem objęły głównie północną i środkową część zlewni. W Bieśniku suma dobowa opadów wyniosła w dniu 1 września 65 mm, a na Stacji w Szymbarku o 24 mm mniej.

W lipcu 2011 r. w wyniku deszczu rozlewnego zanotowano w zlewni Bystrzanki ponadprzeciętne sumy opadu (ryc. 13). W Bieśniku ich wysokość wyniosła 347,1 mm i była wyższa od sumy opadu zanotowanej w Bystrej i Szymbarku, odpowiednio o 21,0 mm i 22,1 mm (tab. 7). W lipcu dominowały kierunki wiatru z sektora południowego, a burze zostały zanotowane w ciągu 9 dni (tj. 8, 10, 11, 15, 18, 19, 20, 21 i 25 lipca).



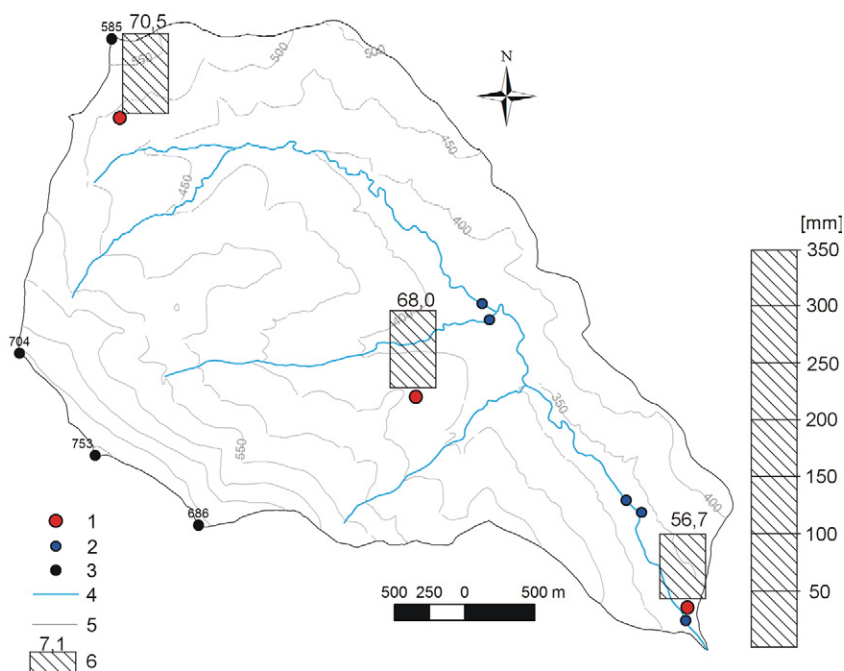
Ryc. 13. Dobowe sumy opadu deszczu w różnych częściach zlewni Bystrzanki w lipcu 2011 r.

Fig. 13. Daily precipitation in different parts of the Bystrzanka catchment in July 2011

Na Stacji w Szymbarku od początku jej funkcjonowania nie zanotowano tak wysokiej miesięcznej wartości opadu jak w lipcu 2011 r. Zgodnie z klasyfikacją opadową H. Lorenc (1994) był to miesiąc skrajnie wilgotny. Średnia suma opadu w lipcu stanowiła 37% rocznej sumy opadu i 50% opadów notowanych w półroczu letnim. Najwyższa dobowa suma opadu została odnotowana na wszystkich posterunkach opadowych 8 lipca (ryc. 14). Ciekawą sytuację opadową zaobserwowano 19 lipca 2011 r. (ryc. 15) Najwyższe opady – 55 mm - o intensywności osiągającej wartość ponad $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, zanotowano na Stacji w Szymbarku. W środkowej części zlewni opady były wówczas najniższe (44 mm). Koncentracja zawiesiny w ujściowym odcinku osiągała wartość $23 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ (rozd. 6).

Współczynnik zmienności opadu w roku 2011 kształtował się od 0,2% (VII) do 12,7% (VIII). W półroczu hydrologicznym letnim najwyższą sumę opadu odnotowano w Bieśniku (695,4 mm), a najniższą w Szymbarku (656,6 mm). Ta ostatnia stanowiła 75% rocznej sumy opadu.

Z analizy opadów rozlewnych i nawałnych wynika, że w zróżnicowaniu sumy rocznej opadów w zlewni Bystrzanki największy udział mają opady o wysokości $>10 \text{ mm}$. Opady niższe są rozłożone bardziej równomiernie.



Ryc. 14. Przestrzenne zróżnicowanie wysokości opadu atmosferycznego w zlewni Bystrzanki w dniu 8 lipca 2011 r. Objasnienia jak do ryc. 12.

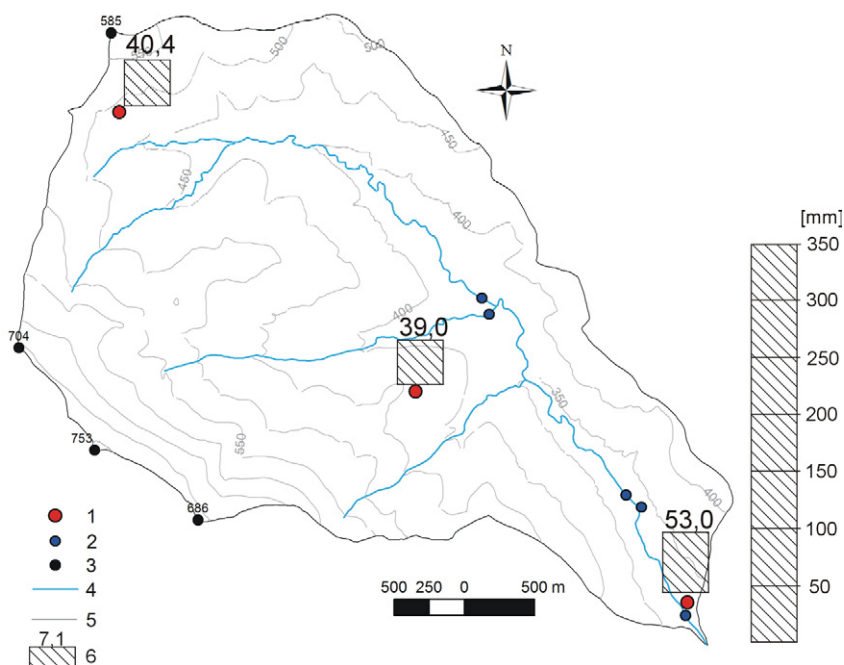
Fig. 14.patial differentiation of daily precipitation on 8 July, 2011 in the Bystrzanka catchment. Explanations see fig.12.

Badania wykazały, że rozkład przestrzenny opadów w zlewni Bystrzanki ma dużo cech wspólnych, zarówno z regionem beskidzkim jak i pogórskim. Potwierdzona więc została prawidłowość stwierdzona przez R. Soję (1977) mówiąca, że przestrzenne zróżnicowanie opadów w badanej zlewni jest uwarunkowane przez jej beskidzką część, a sumy roczne opadów są zbliżone do tych notowanych w obszarze garbów Pogórza.

Od wielkości obszaru zlewni objętego opadem, miejsca wystąpienia największych opadów i kierunku ich zmniejszania się zależy wielkość koncentracji zawiesiny w badanym potoku. Badania przeprowadzone w latach 2009–2011 potwierdziły prawidłowości stwierdzone przez A. Welca (1988), że deszcze o wysokości 5–10 mm i niewielkim natężeniu (do $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) nie mają większego znaczenia w transporcie zawiesiny, m.in. ze względu na powolny przyrost przepływu w potoku i niskie przepływy maksymalne. Wzrost natężenia opadu (do $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) przy podobnej sumie opadu powoduje szybki wzrost przepływu w potoku i większą koncentrację zawiesiny.

W przypadku ulew obejmujących swym zasięgiem całą zlewnię, ale z maksimum opadu w jej najniższej położonej części zmiany przebiegu wezbrania i koncentracji zawiesiny są gwałtowne. Kiedy obserwowana jest odwrotna

sytuacja, tj. zmniejsza się wysokość opadu w kierunku ujściowym potoku, odnotowuje się proporcjonalny przyrost objętości wody i zawiesiny wzdłuż potoku do przyrostu zlewni. Zazwyczaj wyższe koncentracje zawiesiny przy tych samych przepływach w fazie opadania wezbrania są charakterystyczne dla wezbrań wywołanych ulewami o wyższych sumach w źródłowej części zlewni, co potwierdzają sytuacje zaobserwowane w 2011 r. Materiał transportowany w zawieszynie pochodzi z utwardzonych i nieutwardzonych dróg w dnach dolin i na stokach oraz z bruzd polnych w obszarach źródłowych cieków. Materiał z tych źródeł dociera do koryta w jego ujściowym odcinku, gdzie prowadzone są pomiary koncentracji, później niż materiał z podcinania brzegów Bystrzanki i dopływów, gdzie obserwuje się rozmywanie oderwanych pakietów gleby przy obniżających się przepływach.



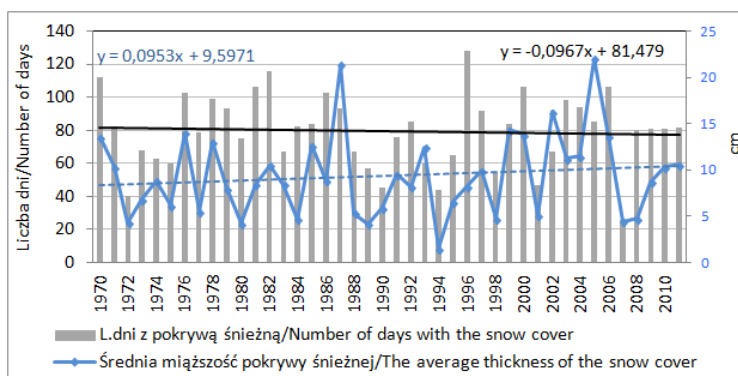
Ryc. 15. Przestrzenne zróżnicowanie wysokości opadu atmosferycznego w zlewni Bystrzanki 19 lipca 2011 r. Objasnienia jak do ryc. 12.

Fig. 15. Spatial differentiation of daily precipitation on 19 July, 2011 in the Bystrzanka catchment. Explanations see fig.12.

W przypadku opadów skoncentrowanych na zalesionych stokach grzbietu Trzech Kopców znaczna część wód infiltruje w przepuszczalne pokrywy zwietrzelinowe, w efekcie spływ powierzchniowy na stokach jest niewielki. Materiał transportowany wówczas w potoku pochodzi głównie z erozji koryt, dróg, młodych rozcięć erozyjnych na stokach.

3.4. POKRYWA ŚNIEŻNA

Obecność pokrywy śnieżnej wpływa na działalność procesów denudacyjnych w zlewni (Obreńska–Starkłowa 1968). Utrudnia zamrażanie gruntu, co sprzyja infiltracji podczas i po wytopieniu śniegu. Z tego powodu spływ powierzchniowy i spłukiwanie mogą być niewielkie w czasie powolnych odwilży lub roztopów. W Beskidzie Niskim ciepłe wiatry z sektora południowego, powodują stosunkowo późne pojawienie się pokrywy śnieżnej, a także jej częste tajanie, czego skutkiem jest wzmożony odpływ wody w miesiącach zimowych (Ziemońska 1973).



Ryc. 16. Liczba dni z pokrywą śnieżną oraz jej średnia miąższość w Szymbarku w latach hydrologicznych 1970–2011

Fig. 16. Number of days with snow cover and the average thickness in Szymbark in the hydrological years 1970–2011

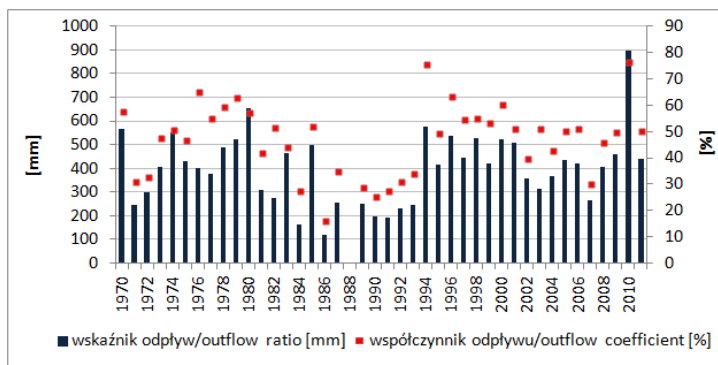
W zlewni Bystrzanki w latach 1970–2011 pokrywa śnieżna formowała się najczęściej w trzeciej dekadzie listopada. W latach hydrologicznych 1970–2011 pokrywa śnieżna zalegała średnio przez 79 dni w roku, wykazując zróżnicowanie od 26 dni w 2007 r. do 128 dni w 1996 r. (ryc. 16). Zanikała ona w sezonie zimowym kilkakrotnie na skutek odwilży śródziemnych, które są typowe dla nisko położonych obszarów w Karpatach. Nieprzerwanie pokrywa śnieżna zalegała przez 107 dni w 1970 r. (1 grudnia 1969 r. do 16 marca 1970 r.) a w 2006 r. 11 dni krócej (od 17 grudnia 2005 r. do 22 marca 2006 r.). Najdłużej zwarta pokrywa śnieżna utrzymuje się na stokach Trzech Kopców, a najkrócej na bezleśnych wierzchołkach garbów pogórskich i na stokach o ekspozycji południowej i południowo-zachodniej, a także na stokach o niewielkim nachyleniu (do 5°), (Dauksza i in. 1970). Różnica wynosi średnio od kilku do kilkunastu dni.

Pokrywa śnieżna o grubości do 5 cm stanowiła w zlewni Bystrzanki 42,7% wszystkich przypadków jej zalegania, natomiast powyżej 20 cm: 13,1%. Maksymalną miąższość pokrywy śnieżnej – 53 cm odnotowano w 1983 r.

3.5. PRZEPIŁY W BYSTRZANCIE W LATACH HYDROLOGICZNYCH 1970–2011

O tempie procesów dostawy materii oraz jej transportu w zlewni i korycie ciekę decyduje w głównej mierze ilość i czas krążenia wody. Znajomość parametrów odpływu rzeczny pozwala na lepsze rozpoznanie procesów erozyjno–depozycyjnych zachodzących w zlewni rzecznej.

Średni przepływ w potoku Bystrzanka w latach 1970–2011 wyniósł $0,17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Najwyższy średni roczny przepływ $0,37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ odnotowano w 2010 r., a najniższy $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ w 1986 r. Współczynnik zmienności odpływu dla tego okresu wynosił 37%, przy czym najwyższe wartości notowano w październiku 143%, a najniższe w marcu 67%. Najwyższe wartości wskaźnika odpływu i współczynnika odpływu odnotowano w 2010 r. (898 mm, 77%), (ryc. 17), co należy wiązać z najwyższym chwilowym przepływem Bystrzanki oraz najwyższą roczną sumą opadu atmosferycznego 1172 mm.

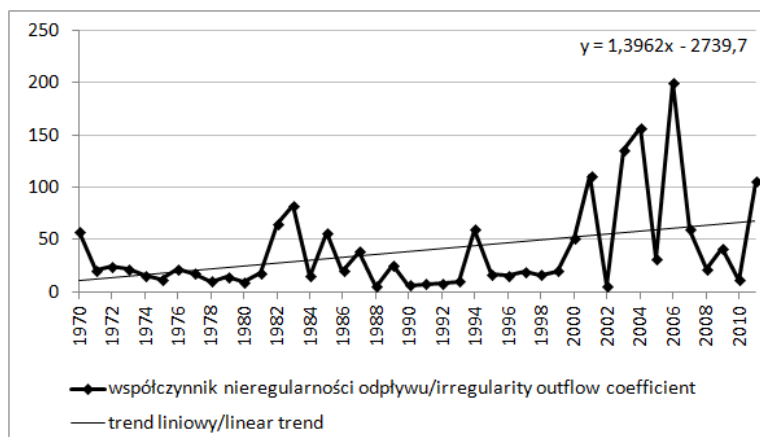


Ryc. 17. Wskaźnik odpływu [mm] i współczynnik odpływu w zlewni Bystrzanki w latach 1970–2011

Fig. 17. Outflow ratio [mm] and outflow coefficient in the Bystrzanka catchment in the period 1970–2011

Do charakterystyki reżimu rzeczny w Bystrzance wykorzystano średnie wartości przepływów miesięcznych z wielolecia, jako podstawę do obliczenia współczynników przepływu ($k = SQ_m / SQ_r$, gdzie SQ_m – średni przepływ miesięczny, SQ_r – średni przepływ roczny), (Pardé 1957). W Bystrzance stwierdzono występowanie ustroju rzeczny złożony, pierwotny, śnieżno–deszczowy (Kijowska 2011). Zwiększony odpływ wód ze zlewni Bystrzanki odnotowuje się głównie w drugiej połowie półrocza zimowego oraz w półroczu letnim. Odpływ w półroczu zimowym i letnim stanowił w badanym okresie odpowiednio 55 i 45% odpływu roczny. Współczynnik nieregularności odpływu zmieniał się od 5,9 w 2002 r. do 200,1 w 2006 r. i wykazywał tendencję wzrostową (ryc. 18). Tak wysoka wartość współczynnika w 2006 r. związana była między innymi z dużym zróżnicowaniem sum opadów atmosferycznych w poszczególnych miesiącach roku, a co za tym

idzie znacznymi zmianami w odpływie, który w listopadzie wynosił 2,8 mm, a w czerwcu 134,3 mm. W porównaniu do innych rzek karpackich współczynnik nieregularności odpływu Bystrzanki nie jest wysoki, o czym decyduje w miarę stałe zasilanie w okresach letnich i jesiennych niżówek. W pogórskiej części Karpat notuje się wartości tego współczynnika często wyższe niż w Beskidach, szczególnie w małych wylesionych zlewniach, co związane jest z zanikiem przepływów w okresie niżówek. W zlewni Bystrzanki stwierdza się zatem cechy reżimu odpływu charakterystyczne dla Makroregionu Wschodniego polskich Karpat, obejmującego region beskidzki i pogórski (Ziemońska 1973).



Ryc. 18. Współczynnik nieregularności odpływu Bystrzanki w latach 1970–2011

Fig. 18. Irregularity outflow coefficient of the Bystrzanka stream in the period 1970–2011

W latach 1970–2011 średnio przez około 138 dni w roku występował przepływ w granicach $0,01\text{--}0,05\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ natomiast przepływy $0,1\text{--}0,3\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ przez 78 dni. W latach 1970–1979 zanotowano większą liczbę dni z przepływem $0,01\text{--}0,05\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ niż w latach 2000–2011. Przepływ $>1\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ obserwowany był w obydwu okresach średnio przez 11 dni.

3.5.1. WEZBRANIA W LATACH 1970–2011

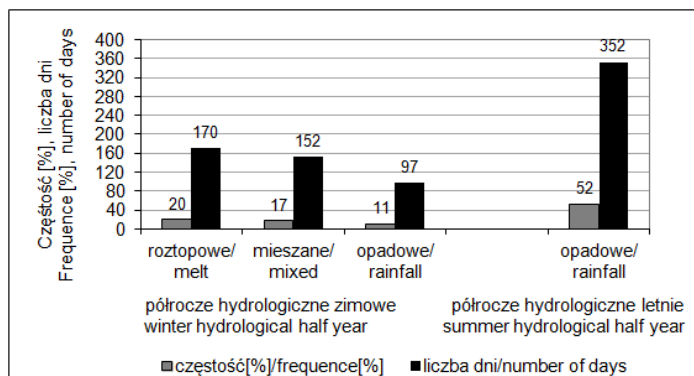
W zlewni Bystrzanki, szczegółowej analizie poddano typy genetyczne wezbrań: opadowe (ulewne i rozlewne), związane głównie z okresem letnim oraz roztopowe, spowodowane wiosennym topnieniem śniegu i odwilżami śródziemnymi. Podziału wezbrań dokonano według klasyfikacji A. Byczkowskiego (1999). W przypadku wezbrań spowodowanych równoczesnym nakładaniem się opadu deszczu i topnienia pokrywy śnieżnej analizowane sytuacje zaliczono do typu mieszanego wezbrań.

Zgodnie z definicją przyjętą za M. Ozgą–Zielińską i J. Brzezińskim (1994), wezbranie to okres, w którym przepływy są równe i większe od przepływu granicznego wezbrania $Q \geq Q_{gr}$, obliczanego według formuły $\frac{1}{2} (NWQ + WSQ)$, gdzie NWQ to przepływ minimalny z maksymalnych z wielolecia, WSQ to przepływ najwyższy ze średnich z wielolecia. Jest to również wartość progowa wezbrania małego. Przepływ wezbrania zwykłego stanowił: NWQ (najniższy przepływ z maksymalnych wartości z wielolecia) i wielkiego: SWQ (średni przepływ z maksymalnych wartości z wielolecia).

W latach 1970–2011 przepływ graniczny wezbrania wyniósł $0,698 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, natomiast wezbrania zwykłego $1,025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i wielkiego $4,054 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wezbrania były ściśle związane ze sposobem zasilania koryta rzecznego. Wysokość i przebieg wezbrań w okresie zimowym związany był z ilością wody powstałej z topnienia śniegu w jednostce czasu. Gwałtowne topnienie śniegu jest często przyczyną dużych wezbrań wiosennych. W rejonach górskich wezbrania wiosenne nie osiągają wprawdzie tak znacznych rozmiarów jak letnie wezbrania opadowe, lecz obserwuje się większą częstotliwość pojawiania się pojedynczych wezbrań roztopowych (styczeń–marzec) oraz wezbrań o zasilaniu mieszanym (kwiecień), (Soczyńska 1977). W zlewni Bystrzanki na formowanie się wezbrań roztopowych decydujący wpływ ma ekspozycja zlewni. Dominująca północna i północno–wschodnia ekspozycja stoków zmniejsza szybkość wytapiania śniegu. W sumie w badanym wieloleciu zarejestrowano 259 przepływów wezbraniowych. Najwięcej przepływów wezbraniowych odnotowano w 1980 r. (13). Średnio na każdy rok hydrologiczny przypada po 7 wezbrań, które trwały średnio przez 19,6 dnia w roku, co stanowiło jedynie 5,4% roku hydrologicznego.

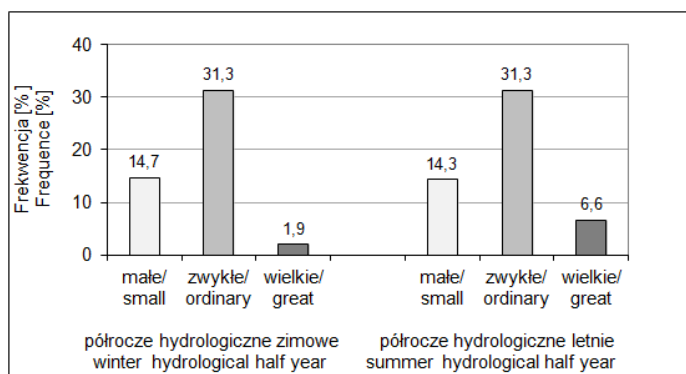
W okresie badań, w półroczu hydrologicznym zimowym (XI–IV) wystąpiły 124 wezbrania, które trwały w sumie 431 dni, o 107 dni dłużej niż w półroczu letnim, co należy wiązać z zasilaniem koryta przez wody opadowo–roztopowe pochodzące z różnych części asymetrycznej zlewni. Należy jednak zaznaczyć, że w analizowanym wieloleciu w półroczu zimowym wezbrania opadowe stanowiły aż 23% wszystkich wezbrań. Najdłużej trwające wezbranie w tym półroczu zanotowano w grudniu 1979 r. i lutym 2010 r. (po 12 dni). Wzrost stanu wody w rzece w grudniu 1979 r. związany był z powolnym topnieniem pokrywy śnieżnej, natomiast w lutym 2010 r. początkowo z powolnym topnieniem pokrywy śnieżnej (o miąższości 37 cm), a następnie z opadami deszczu, których dobową sumę dochodziła do 10 mm. Marzec w całym wieloleciu charakteryzował się największą liczbę z przepływami wezbraniowymi (126 dni). W marcu dominowały wezbrania zwykłe, stanowiące 70% przepływów wezbraniowych zanotowanych w tym miesiącu. Wezbrania mieszane trwały średnio 3 dni i 16 h, czyli o 9 godzin dłużej niż wezbrania roztopowe.

Jak wynika z badań prowadzonych przez R. Soję (1981), w zlewni Bystrzanki czas koncentracji stanowi 36–37% czasu trwania całego wezbrania, bez względu na wielkość przepływu maksymalnego. Podobne wyniki uzyskał J. Żychowski (2000) dla rzek Bełczy i Mszanki (Beskid Niski).



Ryc. 19. Częstość oraz czas trwania różnych typów wezbrań w Bystrzance w półroczu hydrologicznym zimowym (XI–IV) i letnim (V–X) w latach 1970–2011

Fig. 19. Frequency and the duration of flood types in the Bystrzanka channel in the winter (XI–IV) and summer hydrological half year (V–X) in the period 1970–2009



Ryc. 20. Częstość różnych typów wezbrań w Bystrzance w półroczu hydrologicznym zimowym (XI–IV) i letnim (V–X) w latach 1970–2011

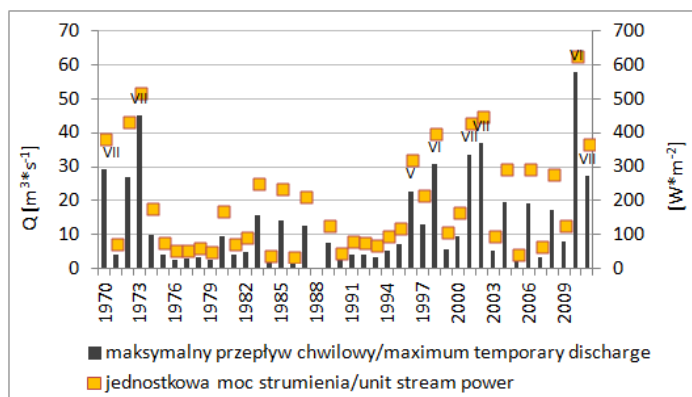
Fig. 20. Frequency of flood types in the Bystrzanka channel in the winter (XI–IV) and summer hydrological half year (V–X) in the period 1970–2009

W Bystrzance w latach 1970–2011 dominowały wezbrania opadowe, które wystąpiły 164 razy (29 razy w półroczu hydrologicznym zimowym), natomiast wezbrania roztopowe 51 razy, a mieszane 42, co stanowi odpowiednio 63, 20 i 17% liczby wszystkich wezbrań (ryc. 19). Wezbrania zwykłe występowały najczęściej i stanowiły około 63% wszystkich wezbrań, natomiast wezbrania

wielkie w całym wieloleciu stanowiły jedynie 9% (ryc. 20). Częstość wezbrań w półroczu letnim jest większa. Dodatkowo w półroczu letnim notuje się prawie 4-krotnie więcej wezbrań wielkich, niż w półroczu zimowym. Podczas tego typu zdarzeń transportowane są największe ilości zawiesiny w rzekach w Karpatach fliszowych (Froehlich 1975). Mają one także decydujące znaczenie w przekształcaniu koryta rzecznego (rozdz. 5.3).

3.5.2. WEZBRANIA W PÓŁROCZU LETNIM W LATACH 1970–2011

Położenie zlewni Bystrzanki w brzeżnej części Beskidu Niskiego, gdzie opady ulewne występują bardzo często powoduje, że ten rodzaj opadów decyduje o wielkości odpływu ze zlewni w okresie letnim. Wezbrania letnie są groźniejsze w skutkach od wezbrań zimowych i charakteryzują się większą dynamiką i zdecydowanie wyższymi wartościami koncentracji zawiesiny. W czasie wezbrań letnich wynoszony jest prawie cały roczny ładunek materiału zawieszonoego. W analizowanym wieloleciu w półroczu hydrologicznym letnim zanotowano łącznie 135 wezbrań, które spowodowane były opadami rozlewnymi oraz ulewnymi. W latach 1970–1979 oraz 2000–2011 zanotowano średnio 4 wezbrania rocznie. Wysokość wezbrań opadowych zależy, oprócz sumy i natężenia opadu również od powierzchni objętej opadem w stosunku do całej zlewni, cech fizycznogeograficznych zlewni, stanu retencyjnego podłoża oraz rozmieszczenia ważniejszych dopływów wzdłuż cieku głównego.



Ryc. 21. Maksymalne chwilowe wartości przepływu ($m^3 \cdot s^{-1}$) w Bystrzance w latach hydrologicznych 1970–2011 wraz z jednostkową mocą strumienia ($W \cdot m^{-2}$)

Fig. 21. Maximum temporary discharge ($m^3 \cdot s^{-1}$) and unit stream power ($W \cdot m^{-2}$) in the Bystrzanka stream in the hydrological year 1970–2011

Wezbrania w półroczu letnim występowały w korycie Bystrzanki nieregularnie i trwały krócej od wezbrań w miesiącach zimowych (średnio 2 dni 14 h). Najczęściej zdarzały się w lipcu (33 wezbrania) i maju (29 wezbrań).

Łączny czas trwania wezbrań w półroczu letnim w badanym wieloleciu wyniósł 324 dni. Średnia wartość maksymalnego przepływu dobowego podczas wszystkich wezbrań wyniosła $18,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a absolutny maksymalny przepływ $57,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ zanotowano 4 czerwca 2010 r. (Kijowska–Strugała 2012), (ryc. 21). Prawdopodobieństwo wystąpienia takiego przepływu wynosi 2%, czyli przeciętny okres powtarzalności (T) wynosi 50 lat. Jednostkowa moc strumienia wyniosła wówczas ponad $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Tak wysoki przepływ spowodowany był przez opad o dobowej sumie 107 mm i maksymalnym natężeniu $0,85 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Przepływ był ponad 340 razy większy od średniego przepływu z wielolecia ($0,17 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

4. ANTROPOPRESJA W ZLEWNI BYSTRZANKI NA TLE INNYCH OBSZARÓW KARPAT

Antropopresja obejmuje wpływ działalności człowieka na środowisko naturalne, prowadząc do zaburzeń w funkcjonowaniu geosystemów (Rączkowska, Kozłowska 2002; Goudie 2006; Gregory 2006). Następstwem tego oddziaływania jest przekształcanie abiotycznych i biotycznych komponentów środowiska przyrodniczego oraz powstawanie nowych elementów wytworzonych przez człowieka (obszary wylesione zamieniane na grunty orne, użytki zielone, zabudowa, drogi, sztuczne zbiorniki wodne itp.).

W Beskidzie Niskim ingerencja człowieka w środowisko przyrodnicze rozpoczęła się najprawdopodobniej dopiero w XIV w. Wcześniej obszar ten stanowił anekumę położoną na pograniczu trzech państw: Polski, Węgier i Rusi. Zasielany był etapami przez ludność wołosko-ruską (napływającą ze wschodu) oraz polską (z zachodu), (Soja 2001). Dzieje Szymbarku należą do najbardziej zagadkowych w zachodniej części ziemi bieckiej (Żarnecka 1986). Pierwsze dokumenty z dziejów tej miejscowości pochodzą z 1359 r., gdzie Szymbark określany był jako miasto („oppidum Szeinberg”). W XIV w. Szymbark stanowił ośrodek akcji osadniczej przeprowadzanej przez Gładyszów w zlewni Ropy (Morawski 1883). Szymbark uzyskał najprawdopodobniej prawa miejskie w XIV (księgi sądowe bieckie), a w drugiej połowie XIV w. istniała tu już parafia. O miejscowości Szymbark można przeczytać w rejestrze poborowym z 1536 r., który podaje, że istniał tu folwark, 2 łany ziemi uprawnej (33 ha) i 9,5 pręta gruntu (dawna jednostka miary; 41 m), karczma, młyn i opustoszały tartak.

Zlewnia Bystrzanki wykazuje pewne cechy odrębne od Beskidu Niskiego, gdzie do końca XIX w. obserwowano proces wylesiania, zahamowany dopiero w latach 30. XX w. Do II wojny światowej w Beskidzie Niskim utrzymywała się proporcja 1:3 powierzchni zalesionych i gruntów ornych, która była głównie funkcją presji demograficznej i rolniczej na środowisko naturalne. Przeludnienie agrarne i brak możliwości zagospodarowania nowych terenów dla rolnictwa wywołało falę emigracji wśród mieszkańców Beskidu Niskiego. Ponadto w wyniku II wojny światowej a przede wszystkim prowadzonych etapami akcji przesiedleńczych (m.in. Akcji „Wisła” w 1947 r.) Beskid Niski poniósł straty materialne i ludnościowe. Liczba ludności zmniejszyła się tu z 120,7 tysięcy w 1931 r. do 55,7 tysięcy w 1950 r. (Soja 2001). Zmniejszająca się presja człowieka na środowisko w Beskidzie Niskim, w tym w zlewni Bystrzanki, przejawiała się poprzez zmniejszenie udziału powierzchni użytków rolnych. Związana była z rozwojem pozarolniczych form działalności człowieka (Lach 1984; Soja 2001).

Równocześnie w ciągu ostatnich stu lat w zlewni Bystrzanki, odmiennie niż w Beskidzie Niskim, obserwowany był stopniowy wzrost liczby ludności (tab. 8). W 1900 r. w Szymbarku liczba ludności wynosiła 2549, 85 lat później 2790, a w 2010 r. 3113. Wraz ze wzrostem liczby ludności odnotowano wzrost liczby budynków, głównie mieszkalnych. W 2012 r. było ich 750 w Szymbarku oraz 389 w Bystrej, odpowiednio o 59 oraz 28 więcej niż w roku 2008. Średnio ich ilość wzrosła o około 10% w ciągu 5 lat. Od roku 1990 do 2012 w Szymbarku przybyło łącznie 155 budynków, a w Bystrej 74. Ze zmianą liczby ludności wiąże się także ze wzrost długości dróg na obszarze zlewni (rozdz. 5.4).

Tabela 8. Zmiany liczby ludności w Szymbarku i Bystrej

Rok	Miejscowość	Liczba ludności	Razem	Wzrost liczby osób
1900*	Szymbark	2549		
1985	Szymbark	2790	4217	
	Bystra	1427		
1990	Szymbark	2842	4260	43
	Bystra	1418		
1996	Szymbark	2967	4446	186
	Bystra	1479		
2000	Szymbark	3014	4499	53
	Bystra	1485		
2005	Szymbark	3067	4605	106
	Bystra	1538		
2010	Szymbark	3113	4642	37
	Bystra	1529		

Źródło: Urząd Gminy Gorlice; *M. Soja (2008)

Renaturalizacja środowiska naturalnego w zlewni Bystrzanki, powodująca zahamowanie procesów denudacji stoków oraz regenerację gleb i roślinności naturalnej, wynikała w głównej mierze z przemian społeczno-gospodarczych na przełomie lat 80. i 90. XX w. i związana była ze spadkiem opłacalności uprawy ziemi oraz hodowli zwierząt.

W celu określenia wpływu człowieka na środowisko przyrodnicze obliczono wskaźnik antropopresji (Kostrowicki 1992; Soja 2002). Do jego obliczenia wykorzystano powierzchnię gruntów ornych, użytków zielonych, sadów, powierzchni zalesionych, obszarów zmeliorowanych a także gęstość ludności. Obszary zmeliorowane w zlewni Bystrzanki występują jedynie w środkowej części zlewni, we wsi Bystra i zajmują 18 ha, a także 407 m rowów melioracyjnych (w okolicy technikum w Bystrej) oraz 10 wylotów i 3 przepusty wodne (dane: Małopolski Zarząd Melioracji, stan na 31 grudnia 2011 r.). Wskaźnik antropopresji dla zlewni Bystrzanki wynosi 0,24.

Stopień antropopresji w obszarze polskich Karpat zmniejsza się z północy na południe (Soja 2002) osiągając najwyższy wskaźnik na obszarach o rzeźbie pogórskiej, gdzie obserwuje się niemal całkowite wylesienie m.in. w gminie Roźwienica w powiecie jarosławskim (40,98). Najniższe jego wartości ustalono dla gmin bieszczadzkich (m.in. Cisna 0,16) i niektórych zachodnio-beskidzkich (Piwniczna 0,20). Średni wskaźnik antropopresji w Beskidzie Niskim wynosi 0,47 a w Dołach Jasielsko-Sanockich jest ponad pięciokrotnie wyższy (2,50), (Soja 2002). Wskaźnik antropopresji w zlewni Bystrzanki wskazuje zatem bliższe powiązanie z obszarem górskim niż pogórskim.

5. ŹRÓDŁA DOSTAWY ZAWIESINY DO KORYTA BYSTRZANKI W WARUNKACH ZMIENIAJĄCEJ SIĘ ANTROPOPRESJI

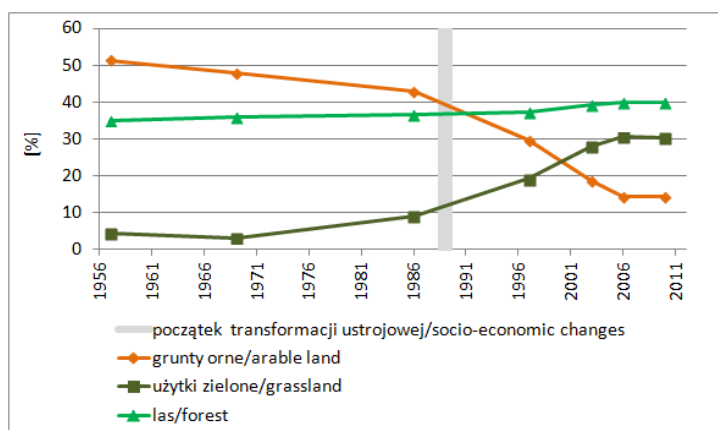
Obszary dostawy materiału do koryt rzecznych charakteryzują się zmienną wydajnością, uwarunkowaną m.in. dynamiką procesów hydrologicznych i geomorfologicznych. W ich obrębie funkcjonują źródła dostawy, m.in. litosferyczne, pedosferyczne i antroposferyczne (Kostrzewski i in. 1994). W zlewni Bystrzanki za główne źródła dostawy materiału do koryta można uznać koryto potoku, osuwiska przykorytowe, obszary objęte pracami inżynieryjnymi oraz drogi. Zmiany w użytkowaniu ziemi, obserwowane w zlewni Bystrzanki znacznie zmniejszają erozję na stokach, ograniczając tym samym możliwość transferu materiału do koryta. J. Lach i B. Wyżga (2002) wśród działań antropogenicznych przyczyniających się do zmniejszenia dostawy materiału ze stoków do koryt wymieniają zaniechanie orki zgodnej z nachyleniem stoku, terasowanie stoków, zaniechanie wypasu, wznoszenie zapór przeciwrumowiskowych, ochronę brzegów cieków poprzez różnego rodzaju umocnienia w postaci gabionów oraz wzrost powierzchni leśnych.

5.1. ZMIANY W STRUKTURZE UŻYTKOWANIA ZIEMI

W ostatnich kilkudziesięciu latach w Karpatach obserwuje się zmiany w użytkowaniu ziemi, które w znaczący sposób wpływają na środowisko przyrodnicze. Sposób użytkowania ziemi ma decydujące znaczenie w procesie denudacji stoków (Gerlach 1976), a także wpływa na kształtowanie fali wezbraniowej i ilość transportowanego materiału w potoku. Proces zmian w użytkowaniu ziemi w Karpatach nasilił się w okresie transformacji ustrojowej kraju pod wpływem przemian społeczno-gospodarczych, prowadzących do odpływu ludności z obszarów wiejskich (Brański 2003; Bucała 2012). Do początku XX w. polskie Karpaty były obszarem wyłącznie rolniczym, z małymi centrami miejskimi, ale w porównaniu z ukraińskimi, słowackimi czy rumuńskimi Karpatami, należały do najsilniej przekształconych obszarów przez człowieka (Soja 2002). Na terenie Beskidu Niskiego do roku 1931, w strukturze użytkowania ziemi dominowały użytki rolne, stanowiące 67,1% powierzchni, których udział do 1988 r. zmalał do 37%. Równocześnie zachodził wzrost lesistości, z 30% w latach 30. XX w. do 60% pod koniec XX w. (Soja 2001). Zmiany użytkowania ziemi w Karpatach, choć są podobne do wielu innych obszarów górskich Europy (MacDonald i in. 2000; Lipský 2001; Falcucci i in. 2007), są przesunięte w czasie.

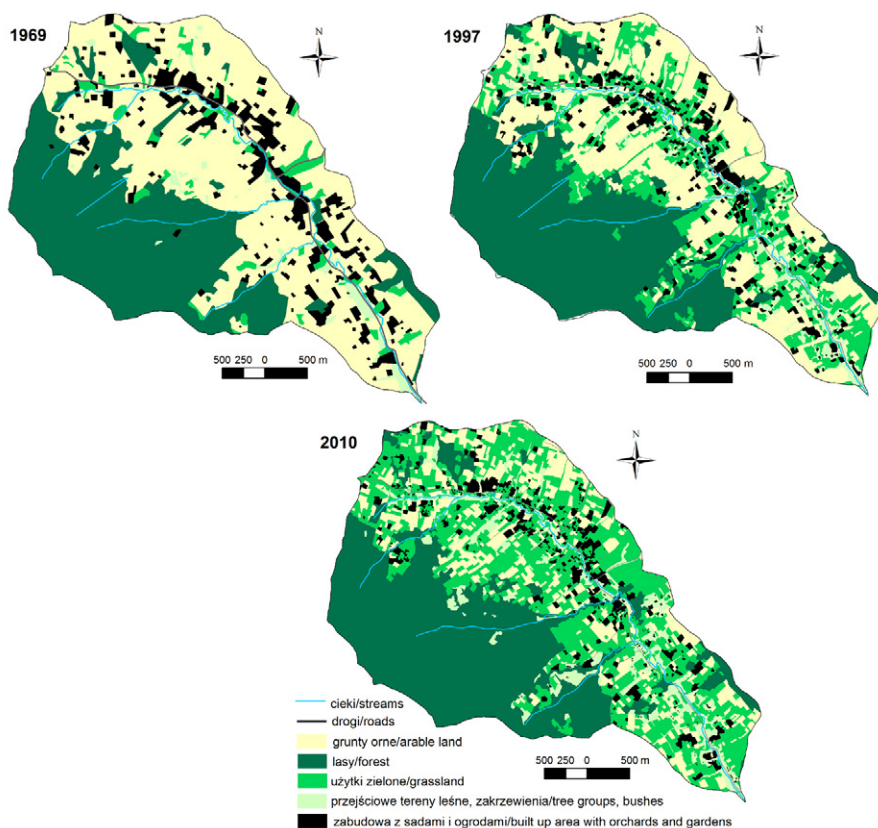
Pierwsza mapa użytkowania ziemi dla zlewni Bystrzanki została sporządzona w 1969 r. przez E. Gila (1979), który oprócz kartowania terenowego wykorzystał plany katastralne, zdjęcia lotnicze i spisy rolne. W celu określenia zmian w latach 1970–2011 mapę tą porównano z późniejszymi mapami sporządzonymi dla lat 1986, 1997, 2003 i 2010.

W zlewni Bystrzanki poszczególne typy użytkowania ziemi wykazywały duże zróżnicowanie przestrzenne, co było związane z warunkami środowiska oraz zmianami w strukturze osadnictwa. Najwcześniejsze dane dotyczące użytkowania ziemi pochodzą z 1957 r. (Olędzki 2011, materiały archiwalne). Dominowały wówczas grunty orne, które stanowiły 51,4% ogólnego użytkowania ziemi (ryc. 22), natomiast powierzchnie leśne zajmowały 35% zlewni.



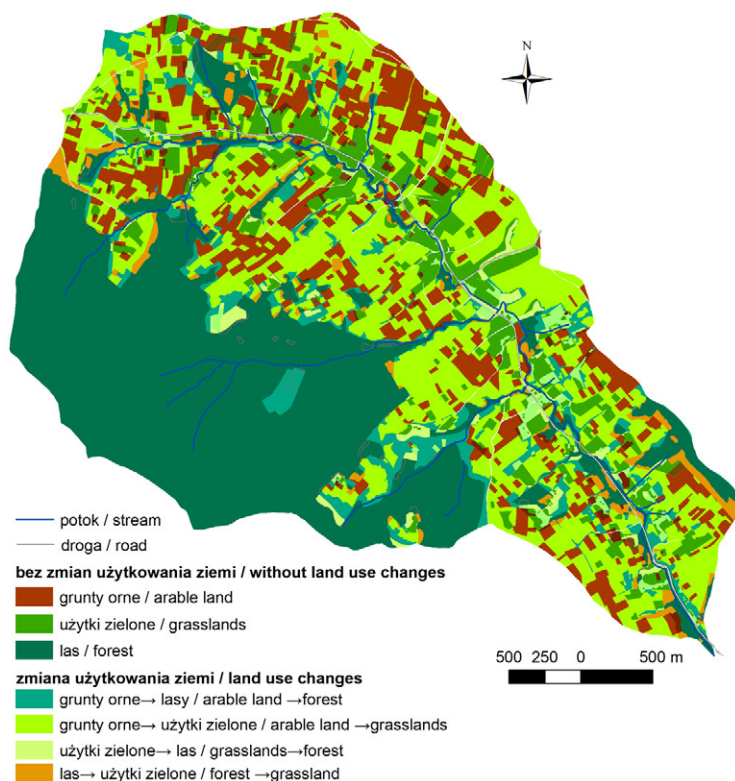
Ryc. 22. Zmiany w użytkowaniu ziemi w zlewni Bystrzanki w ostatnim 50-leciu
Fig. 22. Land use changes in the Bystrzanka catchment in the last 50 years

Wraz z upływem lat zaznaczył się wyraźny spadek powierzchni gruntów ornych, o 34% między 1969 i 2010 r. (ryc. 22, 23). Na gruntach ornych nie zmieniała się jednak struktura upraw. Oznacza to, że udział poszczególnych upraw rolnych był podobny, w ciągu całego badanego okresu, w ogólnej powierzchni gruntów ornych. Do 2003 r. udział procentowy upraw ziemniaków zmniejszył się z 10% w 1969 r. do 5%, a zbóż z 28% do 12%. W przypadku łąk i pastwisk (trwałych i nietrwałych użytków zielonych) stwierdzono wzrost powierzchni o 16% w 1997 r. i 27% w 2010 r. w porównaniu z 1969 r. Niewielkie zmiany obserwowano natomiast na obszarach zajmowanych przez lasy, od 1957 r. do 2010 r. ich powierzchnia zwiększyła się o 4,8% (ryc. 23).



Ryc. 23. Użytkowanie ziemi w zlewni Bystrzanki w latach 1969, 1997, 2010
 Fig. 23. Land use in the Bystrzanka catchment in years 1969, 1997, 2010

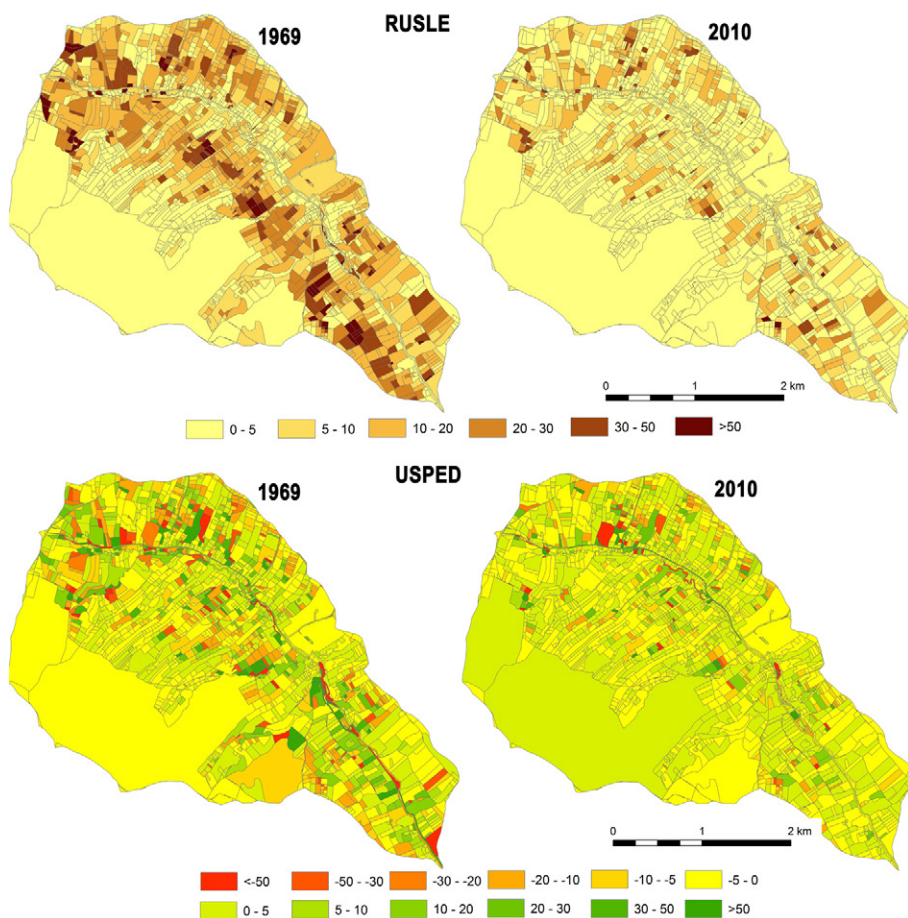
Analiza kierunków zmian w użytkowaniu ziemi od 1969 r. do 2010 r. wskazuje, że na 46% obszaru zlewni nastąpiły zmiany (ryc. 24). W niewielkim stopniu przekształceniu uległy lasy, których powierzchnia od 1969 r. do 2010 r. zwiększyła się tylko o 4%. Pola użytkowane jako grunty orne w 1969 r. są obecnie użytkowane w ten sam sposób jedynie na powierzchni 27%, a pozostałe tereny rolnicze zostały zajęte głównie przez użytki zielone (53%) oraz zakrzaczenia (7%), (ryc. 24). Ponadto zanotowano niewielki wzrost zadrzewień wzdłuż dróg i powierzchni zajętych pod zabudowę. Należy się spodziewać, że dotychczasowy kierunek zmian, a więc spadek powierzchni użytkowanej rolniczo i wzrost lesistości, będzie kontynuowany, co również jest obserwowane w innych częściach Karpat (Kozak 2005; Wolski 2007; Bucala 2012).



Ryc. 24. Zmiany w użytkowaniu ziemi w zlewni Bystrzanki w latach 1969–2010
 Fig. 24. Land use changes in Bystrzanka catchment in the period 1969–2010

Zmniejszenie powierzchni użytkowanych jako grunty orne wynikało w głównej mierze z przeobrażeń społeczno-ekonomicznych, które nastąpiły po 1989 r. podczas transformacji ustrojowej w Polsce. Ograniczenie produkcji rolniczej prowadziło do zmniejszania powierzchni użytkowanych rolniczo, przy jednoczesnym wzroście liczby ludności. Było to związane z trudną sytuacją ekonomiczną rolników oraz problemami wynikającymi ze zmian w opłacalności produkcji i z brakiem popytu na płody rolne. Programy strukturalne Unii Europejskiej dla rolnictwa są nastawione na wspieranie niskonakładowych form produkcji, co prowadzi do dalszego zaniechania użytkowania rolniczego i do zalesiania gruntów ornyczych (Kopacz i in. 2011).

W celu wskazania obszarów erozji i akumulacji na stokach, w różnych przedziałach czasowych (lata 70., 80., 90. XX w. i początek XXI w.), w zależności od użytkowania ziemi, wykorzystano dwa modele *RUSLE* (Renard i in. 1991) oraz *USPED* (Mitasova i in. 1998). Wyniki symulacji erozji i depozycji dla 4 różnych współczynników erozyjności deszczu w zależności od użytkowania ziemi w różnym okresie przedstawia ryc. 25. Rezultaty uzyskane z obydwu modeli różnią się głównie w odniesieniu do obszarów depozycji, których model *RUSLE* nie uwzględnia.



Ryc. 25. Natężenie erozji (RUSLE, USPED) i akumulacji (USPED), ($t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$) w zlewni Bystrzanki w 1969 i 2010 r.

Fig. 25. The intensity of erosion (RUSLE, USPED) and accumulation (USPED), ($t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$) in the Bystrzanka catchment in 1969 and 2010

W zlewni Bystrzanki, średnio w latach 1969–2003, 57% powierzchni podlegało erozji a 43% akumulacji (USPED). Największy procent powierzchni zlewni we wszystkich analizowanych okresach zajmowały obszary z erozją do $5 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$, stanowiące od 65 do 87% (RUSLE) oraz 39–49% (USPED). W latach 70. XX w. obszary z bardzo wysokimi wartościami erozji ($>50 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$) zajmowały $0,64 km^2$ (RUSLE) oraz $0,58 km^2$ (USPED), co stanowiło odpowiednio 4,9 i 4,5% zlewni. W kolejnych latach obserwowano spadek zagrożenia erozyjnego w całej zlewni i wzrost powierzchni niezagrażonych erozją. W 2003 r. powierzchnia obszarów z bardzo wysokim zagrożeniem erozyjnym wynosiła jedynie $0,17 km^2$ (RUSLE) lub $0,26 km^2$ (USPED). Akumulacja materiału w zlewni Bystrzanki oszacowana na podstawie modelu

USPED wskazuje w kolejnych okresach na stopniowy wzrost powierzchni obszarów z akumulacją do 5 t*ha^{-1} . Obszary te stanowiły od 28% powierzchni zlewni w 1969 r. do 36% w 2003 r. Najmniejszą powierzchnię w zlewni zajmowały obszary z akumulacją od $20\text{--}30 \text{ t*ha}^{-1}\text{rok}^{-1}$.

Na podstawie modelu USLE oszacowano, że średnia wielkość erozji w zlewni Bystrzanki w poszczególnych okresach badawczych, przy różnym użytkowaniu ziemi, wyraźnie się zmniejszyła, z $8,3 \text{ t*ha}^{-1}\text{rok}^{-1}$ (lata 70. XX w.) do $2,9 \text{ t*ha}^{-1}\text{rok}^{-1}$ (na początku XXI w.), (RUSLE). Uzyskane wartości erozji w wyniku modelowania w zlewni Bystrzanki porównano z wartościami zmierzonymi na poletkach doświadczalnych użytkowanych rolniczo w Szymbarku w latach 1969–2000. Wartości te nie różnią się znacząco od wyników uzyskanych w wyniku modelowania. W latach 1969–1979 średnia erozja w zlewni w półroczu letnim wyniosła $8,2 \text{ t*ha}^{-1}$, natomiast w latach 1990–2000 $4,6 \text{ t*ha}^{-1}$ (Gil 2009).

Tabela 9. Procentowy udział poszczególnych form użytkowania ziemi w różnych klasach nachylenia terenu w zlewni Bystrzanki

Nachylenie [°]	Forma użytkowania ziemi	1969	1985	1997	2003	2010
<5	Grunty orne	3,96	1,93	2,96	1,77	1,56
	Użytki zielone	1,74	3,63	2,11	3,29	3,43
	Lasy	3,13	3,24	3,76	3,78	3,72
5–10	Grunty orne	27,18	15,10	18,24	10,94	9,67
	Użytki zielone	7,07	17,74	12,19	19,58	21,62
	Lasy	12,51	13,93	16,32	16,24	15,40
10–15	Grunty orne	14,48	7,75	7,95	4,19	3,56
	Użytki zielone	4,30	9,71	8,25	11,72	12,34
	Lasy	12,70	14,04	15,28	15,57	15,69
15–20	Grunty orne	1,44	0,64	0,40	0,15	0,13
	Użytki zielone	0,55	0,92	0,99	1,17	1,18
	Lasy	6,79	7,23	7,39	7,46	7,53
20–25	Grunty orne	0,09	0,02	0,01	0,00	0,00
	Użytki zielone	0,04	0,09	0,05	0,05	0,05
	Lasy	3,21	3,22	3,27	3,28	3,31
25–30	Grunty orne	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Użytki zielone	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
	Lasy	0,80	0,76	0,80	0,80	0,80
>30	Grunty orne	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Użytki zielone	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	Lasy	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

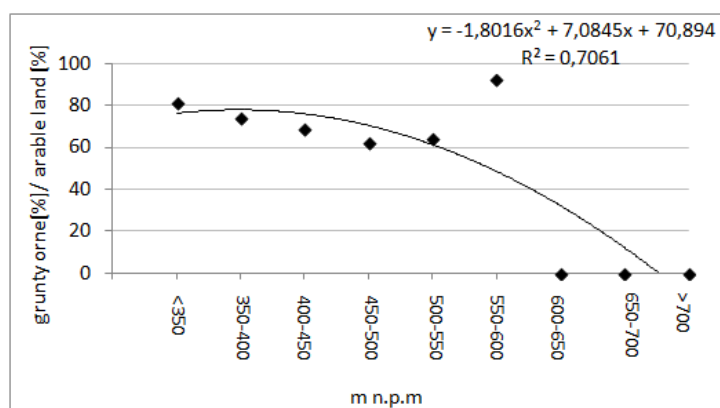
Źródło: Opracowanie własne

Na procesy erozji i akumulacji ma duży wpływ nachylenie terenu. We wszystkich przedziałach nachyleń obserwowano spadek powierzchni użytkowanych jak grunty orne (tab. 9). Największy udział gruntów ornych we wszystkich latach notowano w klasie nachyleń $5\text{--}10^\circ$. Porównując

użytkowanie ziemi z 1969 i 2010 r. największy procentowy ubytek gruntów ornych, o ponad 90%, stwierdzono na stokach o nachyleniu $>15^\circ$. Zmniejszenie powierzchni użytkowanych jako grunty orne jest wprost proporcjonalne do wzrostu nachylenia stoków. Nisze licznych osuwisk zajmujących strome stoki stanowią dodatkową przeszkodę dla rolnictwa.

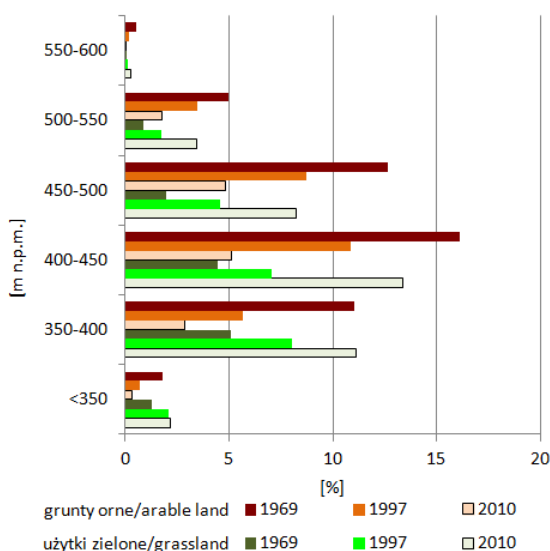
Odwrotną zależność zaobserwowano w przypadku powierzchni leśnej, gdzie do nachylenia 25° stwierdzono wzrost takich powierzchni (tab. 9). Stoki o nachyleniu $>25^\circ$ mają stabilne zalesienie. W latach 1997, 2003, 2010 największy udział lasów notowano w przedziale $5-10^\circ$. W 2010 r. w porównaniu z użytkowaniem ziemi w 1969 r. największy przyrost powierzchni leśnej odnotowano w przedziale $10-15^\circ$, około 23%. W przypadku użytków zielonych największy przyrost, aż 200%, czyli o około 2 km^2 nastąpił w przedziale nachyleń $5-10^\circ$.

Analiza zmian użytkowania w poszczególnych przedziałach wysokościowych w zlewni wykazała procentowy wzrost lesistości do wysokości 500 m n.p.m. W roku 2010 powierzchnie leśne zajmowały około 11% tego przedziału wysokościowego. Największy przyrost powierzchni leśnej w odniesieniu do 1969 r. stwierdzono w przedziale wysokościowym 400–450 m n.p.m. ($0,3 \text{ km}^2$). Największe zmiany w powierzchni zajmowanej przez grunty orne zanotowano w przedziale 550–600 m n.p.m. oraz <350 m n.p.m. (ryc. 26). Grunty orne zajmowały między 1969 r. i 2010 r. największą powierzchnię w przedziale wysokościowym 400–450 m n.p.m. (ryc. 27). W 1969 r. powierzchnie użytkowane rolniczo stanowiły tu około 16% obszaru zlewni, a w 2010 r. 5%. Z kolei najwięcej użytków zielonych w roku 1969 i 1997 występowało w przedziale 350–400 m n.p.m. (kolejno 5 i 8%), natomiast w 1986, 2003 i 2010 r. w przedziale 400–450 m n.p.m. (odpowiednio 10, 12 i 13%), (ryc. 27).



Ryc. 26. Udział powierzchni gruntów ornych (%) wg ich arealu z 1969 r. zmienionych na inne formy użytkowania w 2010 r. w zlewni Bystrzanki w przedziałach wysokości (m n.p.m.)

Fig. 26. The area of arable land (%) in 1969 changed to other forms of land use in 2010 in the Bystrzanka catchment in the elevation belts



Ryc. 27. Użytkowanie ziemi w zlewni Bystrzanki w przedziałach wysokości
 Fig. 27. Land use in the Bystrzanka catchment in the elevation belts

Zmiany użytkowania ziemi zlewni Bystrzanki w ostatnich 40 latach, poprzez zmniejszenie powierzchni gruntów orných, przyczyniły się do ograniczenia procesów erozji na stoku. Zmiany natężenia procesów na stoku mogą mieć swoje odzwierciedlenie w przebiegu procesów korytowych. Wkroczenie roślinności łąkowej na grunty orne, spowodowało ograniczenie procesów spływu i spłukiwania, a tym samym ograniczyło ilość drobnoziarnistego materiału docierającego ze stoków użytkowanych rolniczo do koryt. Nie oznacza to jednak, że ilość zawiesiny transportowanej w potoku musi być mniejsza. Zmniejszenie obciążenia potoku materiałem dostarczanym ze stoku może wpływać na wzrost procesów erozji w korycie, a z drugiej strony relacja ta może być zakłócona przez czynnik antropogeniczny (np. prace inżynierskie na obszarze zlewni i w korycie potoku).

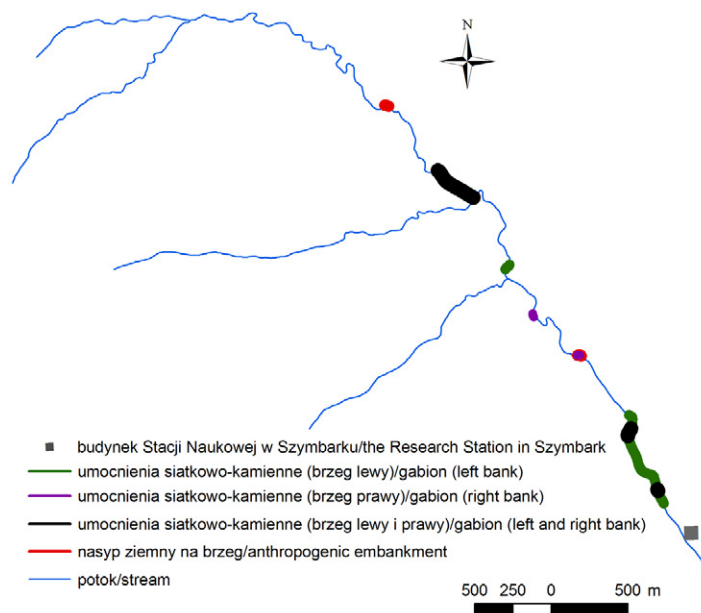
5.2. PRACE INŻYNIERYJNE W ZLEWNI

Ingerencja człowieka w środowisko przyrodnicze spowodowała zmiany w użytkowaniu ziemi (rozdz. 5.1.), a także przekształcenia na stoku i w korycie Bystrzanki, które doprowadziły do powstania form antropogenicznych, głównie w odcinku ujściowym cieku. Na obszarze zlewni, prace inżynierskie prowadzono już na początku lat 90. XX w. (*Urząd Gminy Gorlice*, 2012). W potoku Bystrzanka wykonano m.in. kładkę pieszo-jezdną z przyczółkami na płytach drogowych po obu stronach potoku i nawierzchnię asfaltową drogi, w pobliżu Bystrzycy wraz z rowami odwadniającymi. Ponadto ułożono

w potoku betonowe płyty, umożliwiające przejazd w bród oraz zabezpieczono przyczółki jednego z mostów i kładki, poprzez umocnienie ich kamieniami i betonem. Dodatkowo na odcinku 400 m uregulowano koryto Bystrzanki i umocniono jego brzegi (we wsi Bystra).

Intensyfikacja prac nastąpiła po 2000 r. (*Urząd Gminy Gorlice*). Polegały one głównie na wykonaniu nawierzchni asfaltowych wybranych odcinków dróg gminnych oraz budowie mostu żelbetowego na potoku Bystrzanka, w miejscowości Bystra. Najważniejsze inwestycje, które doprowadziły do znacznych zmian w zlewni, rozpoczęto w drugiej połowie 2009 r. Przyczyniły się one do zwiększenia ilości materiału w korycie. Najważniejszą inwestycją była: *Stabilizacja osuwiska wraz z odbudową drogi powiatowej Nr 25 113 Szymbark – Bystra – Szalowa*, w ramach projektu Osłona Przeciwosuwiskowa (Starostwo Powiatowe w Gorlicach). W ramach tej inwestycji wyburzono stary most na Bystrzance i rozpoczęto budowę nowego (fot. 2). Ponadto wykonano stabilizację 6 osuwisk w pobliżu koryta (fot. 3) oraz przebudowę drogi powiatowej Szymbark – Szalowa.

Przebudowano także przepusty pod drogą, wywiercono drenaże odwadniające oraz uszczelniono rowy przydrożne. Przeprowadzone prace spowodowały nagromadzenie znacznych ilości luźnego materiału, który był usuwany w czasie wezbrań, głównie w 2010 r. W wyniku prac regulacyjnych prowadzonych w korycie w 2009 r. umocniono 652,6 m lewego brzegu i około 50 m prawego brzegu, głównie w pobliżu mostów (ryc. 28).



Ryc. 28. Umocnienia brzegów w korycie Bystrzanki

Fig. 28. Embankments of the Bystrzanka stream channel

W 2009 r. zbudowano także gabiony siatkowo–kamienne w poprzek ciek, mające na celu zmniejszenie prędkości przepływu. Część tych gabionów została uszkodzona podczas wezbrania w 2010 r. Dodatkowo na brzegi intensywnie erodowane w czasie wezbrań został nawieszony materiał w celu ograniczenia dalszego podcinania. W potoku zaobserwowano dwa takie miejsca (ryc. 28, fot. 4). Ingerencja ta doprowadziła do zwiększenia dostawy do koryta luźnego materiału, który z łatwością był erodowany i wynoszony podczas kolejnych zdarzeń wezbraniowych. Prace inżynierskie w ostatniej dekadzie są jednym z ważniejszych źródeł transportowanego materiału.

Jak wykazały badania prowadzone przez T. Ciupę (2009), obszary z dużym wpływem antropopresji, w tym obszary zurbanizowane, w porównaniu do innych rodzajów użytkowania gruntów wytwarzają znacznie więcej drobnoziarnistego materiału, co w istotny sposób wpływa na dynamikę i wielkość transportu fluwialnego.

5.3. ROLA KORYT W DOSTAWIE MATERIAŁU DO TRANSPORTU RZECZNEGO

Koryto rzeczne to zarówno źródło jak i droga transportu materiału oraz miejsce czasowej jego depozycji. Morfologię koryta ciek kształtują procesy erozyjno-depozycyjne zachodzące podczas określonych zdarzeń hydrologicznych (Kaszowski, Kotarba 1970; Mokwa 2002; Radecki–Pawlik 2006; Bryndal i in. 2010). Między erozją dna i brzegów koryta istnieje związek pośredni, a czynnikiem łączącym oba procesy jest transport rumowiska (Kaszowski, Kotarba 1970). Zwiększenie obciążenia ciek materiałem pochodzącym z erozyjnego rozmycia dna przyczynia się do wzrostu transportu i nasilenia procesów erozji bocznej oraz sedymentacji. Natomiast gdy obciążenie rzeki jest mniejsze od jej zdolności transportowej płynąca woda, przy udziale niesionego rumowiska, żłobi podłoże (Schumm 1969).

Morfologiczna rola wezbrań w polskich Karpatach była i jest przedmiotem licznych publikacji (m.in. Ziętara 1968; Niemirowski 1974; Froehlich 1975; Starkel 1996; Gorczyca 2004; Cebulak i in. 2008; Bucala, Budek 2011; Kijowska–Strugała 2012). Natężenie procesów rzeźbotwórczych podczas ekstremalnych zdarzeń hydrometeorologicznych jest o kilka rzędów wielkości większe niż podczas przeciętnych warunków (Krzemień, Gorczyca 2010). Badania prowadzone przez K. Krzemienia (1992) wykazały, że największe wezbrania o dużej sile morfodynamicznej mają decydujące znaczenie dla transformacji koryt, przy czym odprowadzanie ładunku ze zlewni zachodzi już w okresach wezbraniowych o mniejszej sile. Pogląd ten jest sprzeczny z przekonaniem W. G. Wolmana i J. P. Millera (1960).

Ingerencja człowieka w środowisko przyrodnicze spowodowała przekształcenia w obrębie koryta potoku Bystrzanka, gdzie obok naturalnych form korytowych (erozyjnych i akumulacyjnych) występują formy antropogeniczne, głównie w odcinku ujściowym cieku (rozdz. 5.2). Formy te łatwo ulegają erozji i stanowią źródło materiału transportowanego zwłaszcza w zawieszinie. Mogą one też skutecznie chronić koryto przed erozją.

Badania nad rolą koryt w dostawie osadu do transportu fluwialnego prowadzono w latach 2009–2010. W czerwcu 2010 r. kilka dni po ulewnych opadach deszczu zostało przeprowadzone kartowanie geomorfologiczne dna doliny Bystrzanki. Polegało ono na rejestracji skutków wezbrania pod kątem zmian erozyjnych i akumulacyjnych w korycie na odcinku około 5,5 km (od ujścia w górę potoku). Wyniki kartowania w czerwcu 2010 r. zostały porównane z wynikami kartowania przeprowadzonego w kwietniu 2010 r.

Wysokie przepływy, które wystąpiły podczas wezbrań wiosennych w 2010 r. spowodowały duże przemodelowanie koryta Bystrzanki. Bezpośrednie działanie erozyjne wody obserwowano w strefie wahań stanów wody. W strefie tej działanie wody prowadzi do podcinania brzegów poprzez uderzanie niesionym materiałem, wrywanie i wymywanie zróżnicowanego pod względem uziarnienia materiału. Dalszy przebieg procesu powoduje odpadanie, obrywanie i zsuwanie materiału z górnej strefy brzegowej, będącej poza zasięgiem wód wezbraniowych. W korycie Bystrzanki, na skutek erodowania cząstek gruntu z powierzchni brzegów, powstały liczne podcięcia erozyjne, rozmieszczone nieregularnie wzdłuż całego potoku. Wysokie podcięcia brzegowe, przekraczające 7 m, związane były z rozwojem zerw brzegowych, które powstawały wskutek całkowitego nasycenia podłoża wodą. Materiał wyerodowany z brzegu trafia bezpośrednio do koryta cieku i zostaje częściowo lub całkowicie odprowadzony w czasie wezbrań. Tylko duże pakiety gruntu oderwane od brzegu koryta, których dalszy transport jest niemożliwy ze względu na niewystarczającą kompetencję transportową cieku, deponowane są w dnie koryta u podnóży podcięć.

Na całej długości koryta Bystrzanki około 50% świeżych podcięć erozyjnych osiągało w badanym okresie wysokość do 2 m (tab. 10). Suma długości podcięć erozyjnych obu brzegów wyniosła 1305 m. Dłuższe podcięcia zajmowały prawy brzeg (716 m), przy podobnej liczbie podcięć na obu brzegach (prawy 41, lewy 39), (tab. 10). Podcięcia brzegów koryta stanowią ważne źródło dostawy materiału do koryta potoku i powodują zmiany w jego szerokości. Zaobserwowano wyraźną zależność pomiędzy erozją boczną, a wewnętrzną stroną zakoli koryta, gdzie proces ten zachodził najintensywniej.

Tabela 10. Charakterystyka podcięć erozyjnych w korycie potoku Bystrzanka po wezbraniach w 2010 r.

Liczba podcięć (wysokość)				Liczba podcięć erozyjnych na brzegu lewym i prawym	Rozmiary podcięć [m]		Łączna długość podcięć brzegów [m]		Łączna długość podcięć [m]	Procentowy udział długości podcięć w długości skartowanego odcinka koryta	
<2 m	2-4 m	4-6 m	>6 m		długość	wysokość	brzeg prawy	brzeg lewy		brzeg prawy	brzeg lewy
42	26	9	3	80 (b.l. 39, b.p. 41)	2-50	1-15	716	589	1305	14,3	11,8

b.l. – brzeg lewy

b.p. – brzeg prawy

Źródło: Opracowanie własne

Wezbrania w 2010 r. spowodowały znaczną erozję niestabilnych, świeżo uformowanych brzegów po przeciwnej stronie umocnień siatkowo-kamiennych (gabionów), zbudowanych w 2009 r. w odległości ok. 700 i 1200 m od ujścia Bystrzanki do Ropy. Spowodowało to usunięcie luźnego materiału nawiezonego w trakcie prac stabilizacyjnych (fot. 5). Szerokość koryta po wezbraniu w czerwcu zmniejszyła się w tym odcinku Bystrzanki z 7 m (stan z kwietnia 2010 r.) do około 2 m. Jednocześnie w procesie erozji bocznej intensywnie erodowane były brzegi zbudowane głównie z mało odpornych łupków.

Po wezbraniach wiosennych w 2010 r. wzdłuż całego koryta obserwowano świeżo utworzone odsypy boczne i łachy śródkorytowe o zróżnicowanych rozmiarach. Formy te są zbudowane z bardzo zróżnicowanego pod względem uziarnienia materiału (piaski, gliny, żwiry o różnym stopniu obtoczenia, bloki skalne). Łachy środkowe i boczne osiągały powierzchnię do 250 m² (tab. 11). Oszacowano, że długość wszystkich łach wyniosła około 2450 m, co stanowiło ponad 45% długości skartowanego odcinka koryta Bystrzanki. W korycie odnotowano 124 łachy o łącznej powierzchni 4922 m². Największe strefy depozycji rumowiska znajdowały się poniżej dużych podcięć erozyjnych (fot. 6)

Odcinki koryta ciek, gdzie w dnie odsłaniała się lita skała, w czasie przepływów wezbraniowych pełnią funkcję tranzytową dla rumowiska rzeczne. Poniżej progów skalnych oraz przy ujściu dopływów odnotowano pogłębianie koryta i powstawanie kotłów eworsyjnych o maksymalnej głębokości 1,5 m.

Tabela 11. Charakterystyka łąch występujących w korycie potoku Bystrzanka w 2010 r.

Liczba	Łączna długość [m]	Rozmiary łąch [m]		Powierzchnia [m ²]	
		długość	szerokość	największej łąchy	całkowita wszystkich łąch
124	2450	3,0–50,0	0,8–25,0	250	4922

Źródło: Opracowanie własne

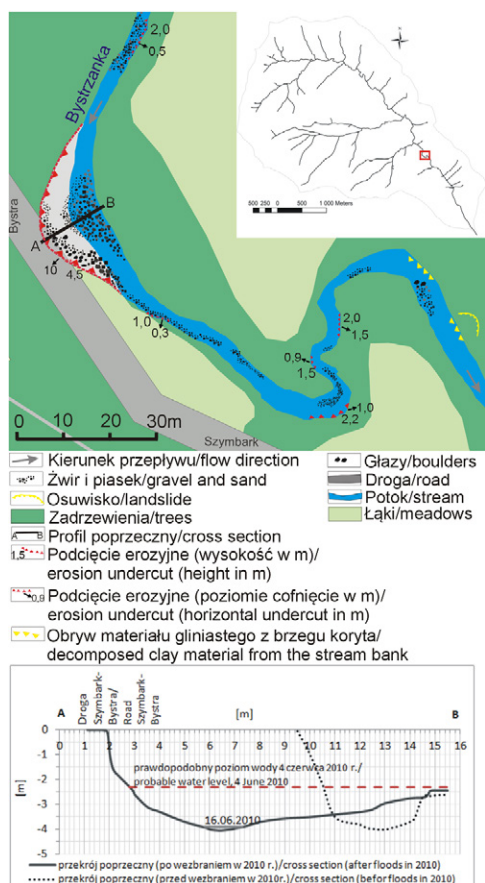
Podczas wezbrań wiosennych stoki przyległe do koryta były rozcinane przez rynny erozyjne. U ich wylotu formowane były stożki napływowe osiągające szerokość 25 m, długość 5 m i miąższość około 0,6 m (fot. 7). Powodowały one zwężenie koryta nawet do 1 m. Powstawanie stożków wskazuje na istotną rolę dopływów bocznych oraz epizodycznie funkcjonujących rynien w kształtowaniu koryta i dostawie materiału do transportu fluwialnego. Badania wykazały, że koncentracja zawiesiny w najdłuższym dopływie beskidzkim Bystrzanki (Gerusze) podczas wezbrania 4 czerwca 2010 r. była 4,5 razy większa niż w Bystrzance przed ujściem tego dopływu. Rolę koryt dopływów bocznych w dostawie materiału fluwialnego w Bystrzance omówiono szczegółowo w rozdziale 7.

W miejscach, gdzie brzegi koryta są niższe od 1 m dochodzi do depozycji osadu i nadbudowywania terasy zalewowej (fot. 8). Miąższość odsypów zbudowanych z piasków, żwirów oraz otoczków dochodziła w takich miejscach do 0,5 m. Obserwowano także uaktywnienie osuwisk przykorytowych (typu zerw), których czoła zasypały niemal całe dno koryta, powodując spiętrzenie wody. Dostarczały one materiał głównie gliniasty, z licznymi drzewami i krzewami. Część tego materiału została wyniesiona dopiero podczas wezbrań w 2011 r. Miejsca z nagromadzonym „rumoszem drzewnym”, m.in. przed mostami drogowymi i na łąchach śródkorytowych (fot. 9), stanowiły barierę dla transportowanego w korycie materiału dennego, podobnie jak zniszczone siatkowo–kamienne progi poprzeczne.

O wysokiej energii płynącej wody podczas analizowanych wezbrań świadczą rozmiary głazów piaskowcowych zdeponowanych na całej długości koryta cieku. Ich średnica często przekracza 1 m. Głazy te tworzyły w kilku miejscach blokowiska skalne pokrywające całą szerokość koryta.

Wskutek zablokowania odpływu Bystrzanki spowodowanego przez wysoki stan wody w Ropie, w odcinku ujściowym koryta Bystrzanki nastąpiła częściowa akumulacja wynoszonego ze zlewni materiału na obszarze o powierzchni około 950 m². Utworzona w tych warunkach łączę budują głównie piaski, żwiry i głazy ostrokrawędziste i obtoczone.

Wezbrania w 2010 r. spowodowały uszkodzenia drogi powiatowej Szymbark – Szalowa w miejscowości Szymbark, powodując cofnięcie brzegu o około 7 m (ryc. 29). W wyniku wezbrania powierzchnia przekroju poprzecznego koryta zwiększyła się o 8 m². W kilku miejscach w korycie Bystrzanki zostały zniszczone betonowe płyty w korycie, uniemożliwiając tym samym mieszkańcom wsi przejazd przez potok.



Ryc. 29. Fragment mapy powstałej w wyniku kartowania koryta Bystrzanki po wezbraniach wiosną 2010 roku wraz z profilem poprzecznym koryta

Fig. 29. Fragment of the map resulting from the geomorphological mapping of the Bystrzanka channel after floods in 2010 and the cross section of the channel

Istotne zmiany w korycie potoku obserwowano w lipcu 2011 r. Opad rozlewny o sumie 325 mm nie spowodował znaczącego podniesienia stanów wody w Bystrzance i jej dopływach jednak długi czas trwania opadu (nieprzerwanie przez 16 dni) przyczynił się do znacznego nasiąknięcia gruntu wodą. W konsekwencji obniżanie stanu wody w korycie spowodowało odrywanie dużych pakietów z jego krawędzi i dostarczanie materiału do transportu

(fot. 10). W Bystrzance zanotowano wówczas wysokie wartości koncentracji zawiesiny. Źródłem dużego ładunku zawiesiny wyniesionego ze zlewni w 2011 r. (rozdz. 8) był również materiał zakumulowany w korycie w czasie wezbrań w 2010 r. oraz wprowadzany do koryta w czasie prac inżynierskich (fot. 11) mających na celu usunięcie skutków tych wezbrań.

Przedstawione przykłady transformacji koryta Bystrzanki w trakcie wezbrań wskazują, że jest ono jednym z ważniejszych źródeł materiału do transportu fluwialnego. Potwierdzają to wysokie ładunki zawiesiny wynieszonej ze zlewni w roku 2010 i 2011 (rozdz. 8). Są one efektem zarówno intensywnej erozji koryta jak i prac budowlanych w korycie. Niestety nie jest możliwe jednoznaczne określenie udziału poszczególnych źródeł w dostawie zwietrzliny do wód w korycie w ostatnich latach. Stwierdzone zmiany w morfologii koryta Bystrzanki potwierdzają również tezę, że opady o wysokiej sumie i dużym natężeniu odgrywają główną rolę w przekształcaniu koryt rzecznych.

5.4. ZMIANY SIECI DRÓG W OSTATNICH 40 LATACH

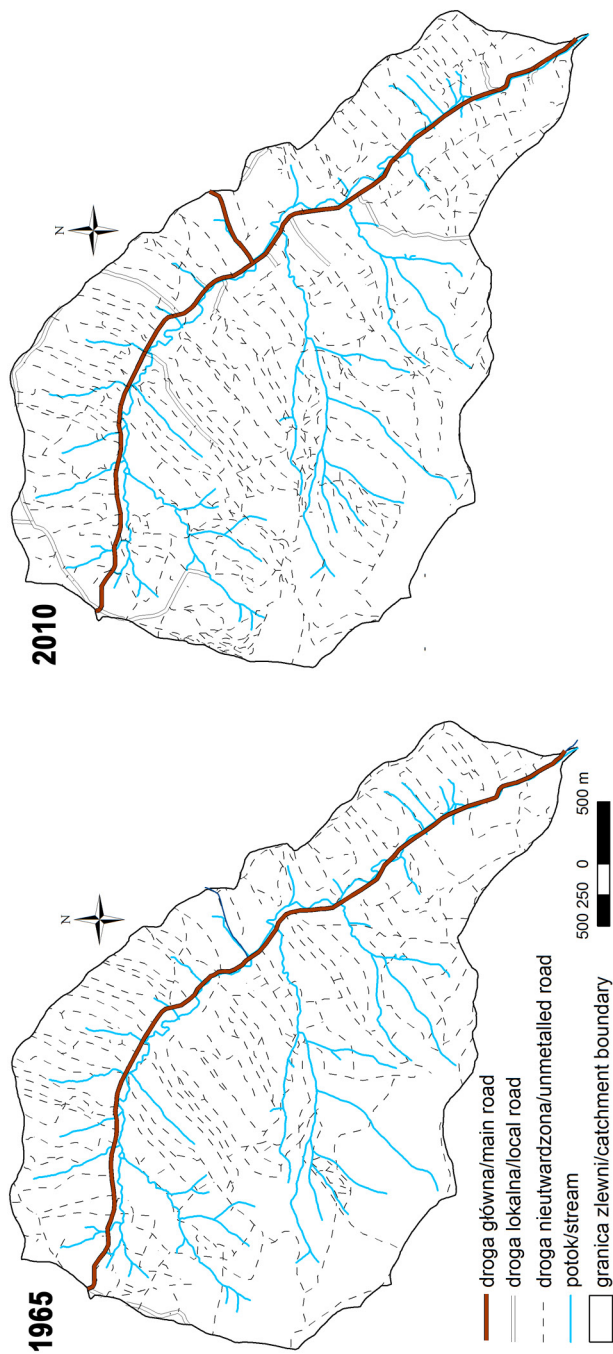
Drogi mają kluczowe znaczenie we współczesnym funkcjonowaniu środowiska geograficznego. W beskidzkiej części Karpat sieć dróg zaczęła się kształtować w XIV w., co związane było z akcjami osadniczymi. Jak wykazały badania P. Prokopa i R. Soji (1995) gęstość sieci drogowej jest związana głównie z gęstością zaludnienia i sposobem zagospodarowania obszaru. Drogi oprócz funkcji komunikacyjnej w istotny sposób wpływają na procesy hydrologiczne (Soja 2002; Wałydkowski 2006; Krocak 2010). Pełnią one niejednokrotnie rolę epizodycznych cieków wpływając na kulminację i częstotliwość wezbrań. J. Żychowski (2000) w Beskidzie Niskim wykazał, że gęsta sieć dróg przyspiesza falę kulminacyjną. Stoki pokryte drogami polnymi mają na ogół wyższy współczynnik odpływu niż pozostałe fragmenty stoków z innymi formami użytkowania ziemi (Słupik 1981; Prokop, Soja 1995). Współczynnik ten dla dróg nieutwardzonych szacowany jest na 0,90–0,75, a dla utwardzonych 0,95 (Radwan–Dębski 1995). Drogi stanowią także łącznik pomiędzy systemem stokowym i korytowym dostarczając znacznych ilości drobnego materiału do koryta rzecznego (Froehlich, Walling 1997). Dotyczy to również dróg utwardzonych żwirem, gdzie podczas ruchu ciężkich pojazdów produkowana jest znaczna ilość drobnociastego materiału łatwo ulegającego transportowi fluwialnemu (Reid, Dune 1984). K. Krzemień (1976) prowadząc badania nad dynamiką modelowania koryta potoku Konina w Gorcach wykazał, że zawiesina wyniesiona poza zlewnię w początkowej fazie wezbrania pochodzi głównie z systemu bruzd erozyjnych i dróg polnych. Podobne wyniki uzyskał B.C. Wemple i in. (2001) w Górach Kaskadowych w USA. Procesy spływu i erozji na drogach nieutwardzonych często powodują ich przekształcenie w debrze, wciosa lub wąwozy w zależności od podłoża na jakim one powstają (Nowocień i in. 2002; Krocak 2010).

Wyniki badań nad rolą dróg w dostawie materiału do koryta prowadzone w zlewni Homerki w Beskidzie Sądeckim (Froehlich, Słupik 1980; Froehlich 1982; Froehlich, Walling 1997) wykazały, że aż 80% materiału transportowanego w rzece w formie zawieszonej pochodzi z nieutwardzonych dróg polnych. Pozostała część materiału transportowanego w potoku pochodzi z erozji koryta oraz aktywnych rynien przykorytowych. Maksymalna koncentracja zawiesiny zmierzona w zlewni Homerki na jednej z dróg polnych osiągnęła $147,9 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ (Froehlich 1982). W. Froehlich i D.E. Walling (1997) uważają, że zmniejszenie kulminacji i częstotliwości wezbrań oraz ilości transportowanego materiału zawieszonoego może nastąpić, gdy znacząco zmniejszy się gęstość dróg na stokach. Zmiany w użytkowaniu ziemi doprowadziły w różnych obszarach polskich Karpat do zaprzestania użytkowania wielu dróg polnych, co ułatwiło ich zarastanie trawą lub krzewami, a tym samym ograniczyło erozję liniową na stokach.

Dużą rolę w dostawie materiału do transportu odgrywają również bruzdy powstające podczas zabiegów agrotechnicznych. Odprowadzają one tyle samo wody co całe pole i skracają czas jej spływu (Słupik 1976). Długość tych dodatkowych dróg spływu znacznie przewyższa stałą sieć odwadniającą. W zlewni Bystrzanki w latach 70. XX w., w obrębie pól uprawnych, ich gęstość wynosiła $35 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ (Słupik 1976). Tereny rolnicze zajmowały wówczas powierzchnię $8,5 \text{ km}^2$ (2/3 powierzchni zlewni), a całkowita długość bruzd i dróg polnych wynosiła co najmniej 300 km. Na drogach i w bruzdach spływ powstaje nawet podczas opadów o wysokości kilku milimetrów, a utwardzenie podłoża nie sprzyja wsiąkaniu wody. Częstotliwość splukiwania jest więc tu większa aniżeli na powierzchni stoków poza drogami. Ze względu na zmianę użytkowania ziemi i przekształcenia pól ornych w użytki zielone gęstość bruzd w zlewni jest obecnie znacznie mniejsza w porównaniu do lat 70.

Analizę zmian sieci dróg w zlewni Bystrzanki przeprowadzono w oparciu o mapę topograficzną z 2003 r. w skali 1:10 000 oraz badania terenowe przeprowadzone w 2010 r. a także mapę z 1965 r. w skali 1:25 000. Jak wykazały badania przeprowadzone przez P. Prokopa i R. Soję (1995) gęstość dróg w tej zlewni obliczona na mapach w skali 1:10 000 oraz 1:25 000 niewiele się różni. Możliwe jest więc porównywanie sieci dróg z różnych okresów na podstawie map w tych dwóch skalach.

Droga główna, asfaltowana, zlewni biegnie wzdłuż koryta Bystrzanki i jest połączona z gęstą siecią dróg lokalnych oraz polnych, które przebiegają zgodnie z nachyleniem stoku (ryc. 30). Łączą się one z ciekim, jeśli nie bezpośrednio to przy udziale rowów przydrożnych.



Ryc. 30. Sieć dróg w 1965 i 2010 r.

Fig. 30. Network of roads in 1968 and in 2010

Długość sieci dróg w badanej zlewni w 2010 r. wynosiła 138 km, a ich gęstość była równa $10,6 \text{ km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$. Gęstość sieci drogowej była wtedy o $1,8 \text{ km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$ większa niż w 1995 r. (mapa topograficzna 1:10 000, Prokop, Soja 1995) i o $2,8 \text{ km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$ niż w 1965 r. (tab. 12). W Beskidzie Niskim w XIV–XV w. gęstość sieci dróg szacowana była na $1,0 \text{ km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$, natomiast w latach 90. XX w. na $3,9 \text{ km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$ (Prokop, Soja 1995). W Beskidach i na Podhalu gęstość dróg jest mniejsza od notowanej na Pogórzu Karpackim czy wyżynach. W Dołach Jasielsko–Sanockich gęstość dróg wynosi $7,0 \text{ km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$ (Prokop, Soja 1995), na Pogórzu Ciężkowickim $8,8 \text{ km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$ (Krocak, Soja 2011), a na Wyżynie Krakowsko–Częstochowskiej $12\text{–}15 \text{ km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$ (Niedbała, Soja 1998).

Tabela 12. Sieć dróg w zlewni Bystrzanki w roku 1965, 1995 i 2010

1965			1995*	2010		
Drogi nieutwardzone	Drogi utwardzone	Suma	Wszystkie drogi	Drogi nieutwardzone	Drogi utwardzone	Suma
długość [km]						
95	6,5	101,5	119,7	123	15	138
gęstość [$\text{km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$]						
7,31	0,50	7,81	8,80	9,42	1,15	10,57

Źródło: Opracowanie własne. * (Prokop, Soja 1995)

W zlewni Bystrzanki, podobnie jak w innych częściach Karpat, powszechne są drogi nieutwardzone. Ich łączna długość obecnie wynosi 123 km, tj. o 28 km więcej niż w 1965 r. (ryc. 30). Gęstość dróg nieutwardzonych wynosi $9,4 \text{ km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$ i jest podobna do notowanej w Karpatach, gdzie sięga $9 \text{ km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$. Drogi nieutwardzone podczas zdarzeń opadowych dostarczają do koryta materiał erodowany w ich obrębie oraz na polach ornych. Część dróg w zlewni została utwardzona w latach 90. XX i na początku XXI w. W większości utwardzono tylko krótkie odcinki dróg, łączące się z drogą główną. Obecnie gęstość dróg utwardzonych wynosi $1,2 \text{ km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$ (tab. 12).

W oparciu o mapę sporządzoną przez E. Gila w 1969 r. obliczono także długość odcinków dróg, które podlegały intensywnemu procesowi pogłębiania. Wyniosła ona 38,2 km, czyli stanowiła około 1/4 długości sieci drogowej. W 2010 r. długość dróg utwardzonych wzrosła 2-krotnie, a nieutwardzonych o 1/3 w stosunku do roku 1965.

Badania prowadzone w Karpatach wskazują na różne tempo pogłębiania dróg nieutwardzonych. W zlewni Homerki dokumentacja wcięć erozyjnych na drogach nieutwardzonych wskazuje, że w okresie około 30 lat średnie tempo ich pogłębiania wyniosło 6–7 mm na rok (Froehlich 1991). Inne badania prowadzone w rejonie Turbacza w Gorcach wykazały tempo pogłębiania drogi nieużytkowanej na poziomie 8 cm w ciągu roku (Wałdykowski 2006). W zlewni Bystrzanki pomiary prowadzone podczas zdarzenia opadowego w 1969 r. (sierpień) wskazały, że drogi nieutwardzone obniżają się o 5–10 cm (Gil 1976). Także w czasie intensywnych opadów w latach 2010

i 2011 w zlewni Bystrzanki obserwowano intensywny spływ wody po drogach nieutwardzonych i utwardzonych. Transportowane były wtedy znaczne ilości materiału do rowów przydrożnych i następnie do koryta potoku (fot. 12).

Przeprowadzona analiza, potwierdza obserwacje z innych obszarów Karpat, że drogi dostarczają znacznych ilości drobnego materiału do koryta rzecznego. Pomimo utwardzenia nawierzchni części dróg w zlewni materiał transportowany drogami nieutwardzonymi w czasie opadów deszczu dostaje się do dróg utwardzonych, skąd jest spłukiwany i dostarczany do koryta. Wzrost powierzchni utwardzonych w zlewni, umożliwia szybkie odprowadzanie wody wraz z niesionym materiałem do potoku, gdzie na skutek prawie jednoczesnej dostawy wody i materiału z różnych obszarów w zlewni następuje gwałtowny wzrost przepływu i transportu fluwialnego. Wzrost sieci drogowej w ostatnim 20-leciu w znaczący sposób przyczynił się również do rozwoju sieci rowów przydrożnych, erodowanych w czasie intensywnych opadów deszczu, które obok dróg stanowią bardzo ważne źródło materiału transportu fluwialnego.

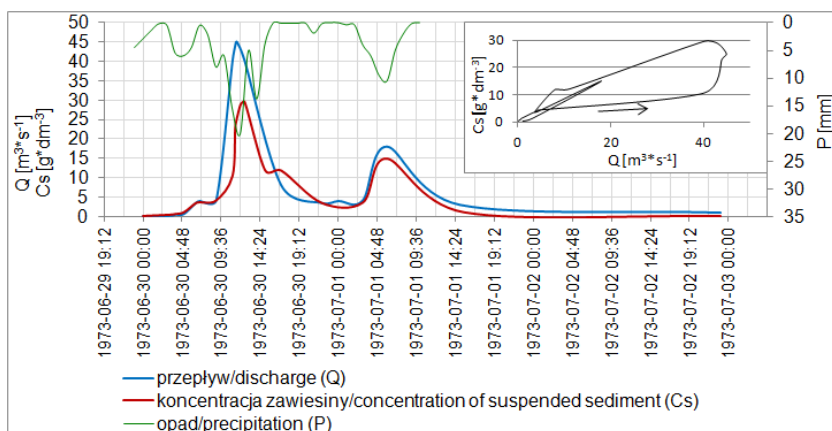
6. ZMIENNOŚĆ CZASOWA KONCENTRACJI ZAWIESINY W POTOKU BYSTRZANKA PODCZAS WYBRANYCH WEZBRAŃ OPADOWYCH

Badania nad koncentracją materiału zawieszonoego, transportowanego w czasie wezbrań są prowadzone w zlewni Bystrzanki już od końca lat 60. i 70. XX w. (Welc 1972, 1973, 1988). Transport zawiesiny w tym potoku odbywa się głównie w półroczu hydrologicznym letnim, podczas wezbrań opadowych. Jak pokazują badania w innych rzekach w Karpatach ładunek zawiesiny wyniesionej ze zlewni w tym półroczu stanowi średnio 75% rocznego ładunku (Łajczak 1989; Froehlich 1975), a niejednokrotnie wzrasta nawet do 99% (Welc 1972; Kijowska, Bochenek 2011).

Do szczegółowej analizy koncentracji zawiesiny w latach 1970–2011 wybrano zatem wezbrania opadowe z półroczu hydrologicznego letniego (tab. 13). W czasie różnych zdarzeń opadowych stwierdzono w potoku opóźnienie odpływu rumowiska, od momentu wystąpienia opadu atmosferycznego, aż do momentu kiedy jego odpływ bezpośrednio dotarł do przekroju zamykającego zlewnię, w którym prowadzono pomiary zawiesiny. Analizowane wezbrania miały odmienny przebieg. Poszczególne wezbrania różniły się cechami hydrometeorologicznymi okresu poprzedzającego zdarzenie, sumą opadu, czasem trwania, maksymalnym przepływem, koncentracją zawiesiny. Analizie poddano wezbrania reprezentatywne dla różnego typu zdarzeń hydrometeorologicznych, starając się podać przykłady najbardziej typowych i charakterystycznych dla danego roku. Szczegółowa analiza poszczególnych wezbrań w latach 1970–2011 pozwoliła na określenie roli czynnika antropogenicznego w dostawie materiału do transportu fluwialnego, który jest „zamaskowany” przez czynniki naturalne.

W 1970 r. występujące po sobie, w odstępie 34 dni, dwa wezbrania wywołane deszczem ulewnym i rozlewnym różniły się znacząco koncentracją zawiesiny i przepływami (tab. 13). Pierwsze wezbranie z 11 czerwca wywołane zostało deszczem ulewnym trwającym 8,5 godziny o sumie 80 mm w górnej części zlewni i 50 mm w dolnej części. Osiągnęło maksymalny przepływ $22 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a najwyższa koncentracja zawiesiny wyniosła $22,7 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$. Podczas kolejnego wezbrania (15–19 lipca) pomimo wyższego przepływu maksymalnego, o wartości $45 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Soja 1972; Welc 1972), maksymalna koncentracja zawiesiny wyniosła jedynie $3,6 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$. W obydwu przypadkach natężenie opadu było podobne i wyniosło $0,4\text{--}0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, przy czym wysokość opadu w lipcu była wyższa o 124,3 mm. Niższe wartości koncentracji zawiesiny podczas ekstremalnego przepływu w lipcu wynikały

z usunięcia luźnego materiału podczas wcześniejszego wezbrania. Erozja na stokach w zlewni, gdzie dominowały grunty orne, stanowiące wówczas 48% jej powierzchni, była w lipcu podczas opadu rozlewnego mniejsza niż w czerwcu. Warto jednak zaznaczyć, że w omawianych wezbraniach materiał erodowany na stokach nie przekraczał 10% ładunku zawiesiny odtransportowanej ze zlewni (Welc 1988). W czasie tych dwóch wezbrań zostało wyniesione ze zlewni 99,3% rocznego ładunku zawiesiny (tab. 13). W latach 70. XX w. najwyższe wartości koncentracji zawiesiny oraz przepływu zmierzono w dniach 26.06–1.07.1973 r. Opady rozlewnie o wysokości 160,7 mm i intensywności dochodzącej do $0,7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, wzrastające w kierunku ujścia Bystrzanki, wywołały przepływ o kulminacji $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i maksymalnej koncentracji zawiesiny $29,6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ (ryc. 31). Odpływ odnotowany w czasie tego wezbrania stanowił aż 26% rocznego odpływu wody. W czasie najwyższych koncentracji zawiesiny transportowane było $1,3 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$ tego materiału. Na stokach notowano wówczas intensywne spłukiwanie gleby, największe na polach z uprawą ziemniaka, $25,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Łącznie zostało wyniesione 3289 t gleby z wszystkich pól z uprawą ziemniaka w zlewni.



Ryc. 31. Transportu zawiesiny w czasie wezbrania w Bystrzance na przełomie czerwca i lipca 1973 r. wraz z pętlą histerezy

Fig. 31. Transport of suspended sediment in Bystrzanka stream during the floods in 1979 with the hysteresis loop

Tabela 13. Charakterystyka wybranych zdarzeń opadowych i ich skutków w Bystrzance i na stoku eksperymentalnym w Szymbarku w letnim półroczu hydrologicznym w latach 1970–2011

Data	Opad (P)	Maksymalne natężenie opadu (Pi)	Przepływ maksymalny (Q _{max})	Maksymalna koncentracja zawiesiny (C _s)	Odpływ wody ze zlewni (H)	Ładunek zawiesiny przetransportowany podczas wezbrania w przekroju wodowskazowym	Udział ładunku zawiesiny w rocznym transporcie zawiesiny	Spłukiwanie na polach doświadczalnych			Spływ na polach doświadczalnych		
	mm							ziemniaki	zboże	łąka	ziemniaki	zboże	łąka
	mm	mm ² min ⁻¹	m ³ s ⁻¹	g*dm ⁻³	mm (% rocznego odpływu)	t	%	kg*ha ⁻¹			mm		
11.06.1970	50,7	0,5	22,0	22,7	135 (10,0)	10500	79,8	1020	143,1	62,3	bd	bd	bd
15–19.07.1970	175	0,4	45,0	3,6	57 (23,9)	2560	19,5	930	71,5	46,5	bd	bd	bd
22–23.05.1971	100,8	1,7	3,3	9,5	27 (11,0)	566	52,8	bd	bd	bd	bd	bd	bd
21–24.08.1972	107,7	0,2	26,9	18,1	24 (8,1)	6996	90,1	nb	154	nb	nb	77,2	nb
29.06–1.07.1973	160,7	0,7	45,0	29,6	106 (26,1)	16511	95,8	25273	149,9	344,9	116,6	55,9	86,1
11–12.06.1974	63,7	0,2	10,0	13,9	31 (0,1)	2297	30,0	2480	57,8	60,3	93,6	67,6	24,7
30–31.05.1975	39	0,3	1,6	9,9	2 (0,4)	62	3,0	nb	0,0	0,0	nb	0	0,0
20.06.1975	33,4	0,1	2,0	10,1	10 (2,4)	136	6,6	nb	239,5	0,8	nb	2,5	5,0
7.08.1975	30,4	2,0	4,1	6,1	4 (5,6)	98	4,7	nb	5,0	2,4	nb	1,6	0,2
26–27.05.1976	29,7	1,4	0,7	3,7	6 (1,6)	34	50,0	7259	3,3	0,9	8,5	0,4	0,2
23.09.1978	24,2	1,2	3,5	3,3	6 (1,3)	219	24,6	12,9	nb	11,2	1,8	nb	3,7
27–28.06.1979	35,7	1,8	0,7	2,3	5 (0,9)	2	0,3	31183	0,4	0,0	15,2	0,1	0,0
11.06.1980	28,5	1,3	0,6	3,3	24 (0,2)	13	0,2	14866	34,5	34,0	18,6	2,1	3,4
18.10.1980	42,5	1,1	9,8	5,5	1 (3,3)	1348	23,6	358	63,5	20,6	43,1	40	48,2
13–14.07.1983	117,6	0,8	15,6	30,1	38 (8,2)	6635	76,7	59367	189,8	137,0	93,6	54,7	32,3
17–18.05.1985	81,2	0,8	14,1	23,7	27 (5,5)	3057	41,9	nb	4036,7	6,7	nb	45,2	31,0
22.05.1987	44,5	0,4	12,7	36,6	1 (0,3)	7159	97,2	30650	4,34,3	8,3	30,0	24,8	21,3
24.06.1992	27,1	1,2	0,5	2,9	1 (0,4)	229	32,9	13347	1,7	0,0	6,3	0,0	0,0
2–3.08.1997	33,4	0,2	9,2	9,0	22 (4,9)	528	8,7	nb	16,7	21,7	nb	3,9	10,9
21–25.06.1999	82,3	1,6	5,7	11,1	54 (11,6)	1110	56,0	nb	2,8	1,0	nb	1,4	2,2
29–30.07.2000	50,4	0,1	4,7	1,3	18 (3,5)	127	3,8	nb	8,3	6,0	nb	12,6	12,2
23–24.07.2001	36,2	1,1	33,7	21,0	39 (7,7)	9933	81,7	nb	nb	41,3	nb	nb	35,1
4.07.2002	27	1,0	37,0	33,4	18 (5,0)	3034	80,2	nb	nb	0,0	nb	nb	0,0
26–31.07.2004	164	1,1	19,6	7,8	45 (12,1)	12672	96,0	nb	nb	22,5	nb	nb	64,5
23–26.07.2008	72	0,2	17,4	8,3	64 (15,7)	3724	85,8	nb	nb	nb	nb	nb	44,9
22–24.06.2009	77,2	0,3	6,9	7,2	33 (7,2)	678	62,3	nb	nb	nb	nb	nb	0,0
14–20.05.2010	148,5	0,2	15,6	14,2	146 (16,2)	4269	19,7	nb	nb	nb	nb	nb	12,0
3–4.06.2010	115,3	0,9	57,7	44,2	122 (13,6)	16843	76,1	nb	nb	nb	nb	nb	100,5
17.06.2011	29,7	0,8	1,9	6,3	3 (0,7)	62	1,2	nb	nb	nb	nb	nb	0,2
6–8.07.2011	84,1	1,4	27,3	29,1	46 (10,6)	2557	49,5	nb	nb	nb	nb	nb	3,5
19–21.07.2011	90,6	2,5	13,3	14,9	57 (13,1)	1095	21,2	nb	nb	nb	nb	nb	93,8
25.07.2011	20,2	0,3	2,8	1,3	8 (1,7)	78	1,5	nb	nb	nb	nb	nb	110,6

nb – nie prowadzono pomiarów

bd – brak danych archiwalnych

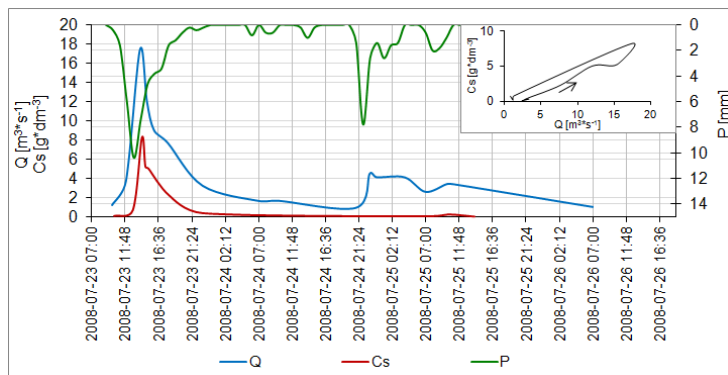
Źródło: Opracowanie własne

Graficznym obrazem związku między przepływem wody a koncentracją zawiesiny podczas wezbrań jest pętla histerezy. Określenie zależności między koncentracją i przepływem wody jest jednak bardzo trudne (Bogen 1980; Williams 1989; Park 1991; Lenzi, Marchi, 2000). Każde wezbranie charakteryzuje się odmiennym kształtem pętli (Kostrzewski i in. 1994; Gellis 2012). G. P. Williams (1989) wyróżnia pięć typów pętli w zależności od ilości materiału transportowanego w korycie rzeczonym w czasie wzrostu i opadania fali wezbraniowej. Pętle wezbrań wybranych do analizy przebiegały normalnie (zgodnie z ruchem wskazówek zegara), odwrotnie (przeciwnie do ruchu wskazówek zegara) lub miały kształt złożony. Według W. Froehlicha (1975) brak bezpośredniego związku między przepływem wody a koncentracją zawiesiny powoduje, że reżim wynoszenia ładunku zawiesiny odbiega od reżimu odpływu. W półroczu letnim ilość zawiesiny znacznie przewyższa wartości z okresu wiosennego, przeciwnie niż w przypadku odpływu.

W czasie wezbrania w 1973 r. pętla histerezy miała kształt złożony (ryc. 31). Wyższe wartości koncentracji podczas pierwszej kulminacji obserwowano w czasie opadania fali co wskazywało na dostawę materiału z brzegów koryta i dopływów. Podczas drugiej niższej kulminacji sytuacja była odwrotna. Stosunek wielkości splukiwania na stokach do transportu zawiesiny w korycie potoku w czasie tego opadu rozlewnego wyniósł 1:6 (Welc 1988). W czasie wezbrania zostało wyniesione 96% rocznego ładunku zawiesiny (tab. 13). Jak wykazały badania A. Welca (1972) i E. Gila (1976) podczas opadów rozlewnych około 20% materiału transportowanego w cieku pochodzi ze stoków, pod warunkiem, że 2/3 powierzchni zlewni stanowią uprawy rolne. Nieco inną sytuację obserwowano podczas wezbrania w 1983 r. (13–14 lipca). Wyższe wartości koncentracji zawiesiny, dochodzące do $30,1 \text{ g}^* \text{dm}^{-3}$, przy przepływie niższym o $29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ niż w czasie wymienionego wyżej wezbrania, można powiązać z przygotowaniem materiału do transportu podczas wezbrania, które wystąpiło 2 dni wcześniej. Dodatkowo, część materiału uruchomiona na stoku podczas opadów 11 lipca (o sumie 26 mm) dotarła do dna doliny i następnie podczas opadów 13 lipca została przetransportowana do potoku. W czasie tego wezbrania pętla histerezy była prawoskrętna (normalna). Stosunek pomiędzy ilością materiału przemieszczanego na stokach w zlewni a ilością wyniesionej zawiesiny wyniósł 1,2:1 (Welc 1988).

W czasie wezbrania z czerwca 1999 r. (tab. 13) dwie kolejne kulminacje ukazywały wyczerpywanie dostępnego do transportu materiału zawieszonoego. Został on w większości wyniesiony podczas pierwszej fali wezbraniowej. Pomimo, że przepływy podczas obydwu kulminacji były zbliżone, to koncentracja zawiesiny w pierwszej kulminacji była prawie 2-krotnie wyższa niż w czasie drugiej kulminacji. Dodatkowo zwiększenie wilgotności gleby spowodowało utrzymanie w stanie zwięzłości pakietów glebowych. W czasie tego wezbrania odpływ w potoku stanowił 11% rocznego odpływu wody.

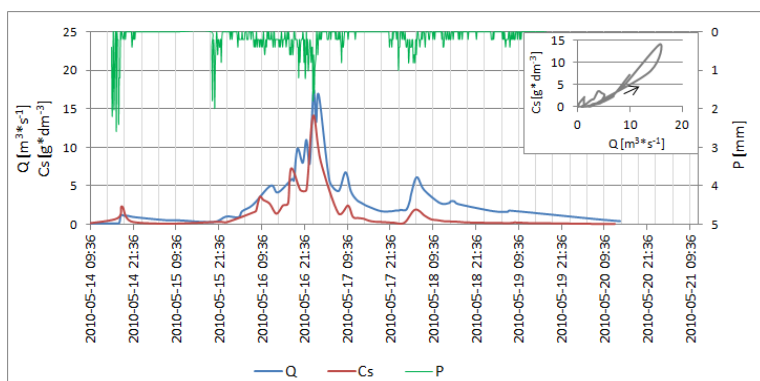
Podobną sytuację obserwowano w czasie opadów rozlewnych 23–26 lipca 2008 r. (ryc. 32). W obydwu przypadkach transportowany materiał w potoku przewyższał wartości spłukiwania na stoku doświadczalnym w Symbarku.



Ryc. 32. Przebieg transportu zawiesiny w czasie wezbrania w Bystrzance w lipcu 2008 r. Objaśnienia jak do ryc. 31.

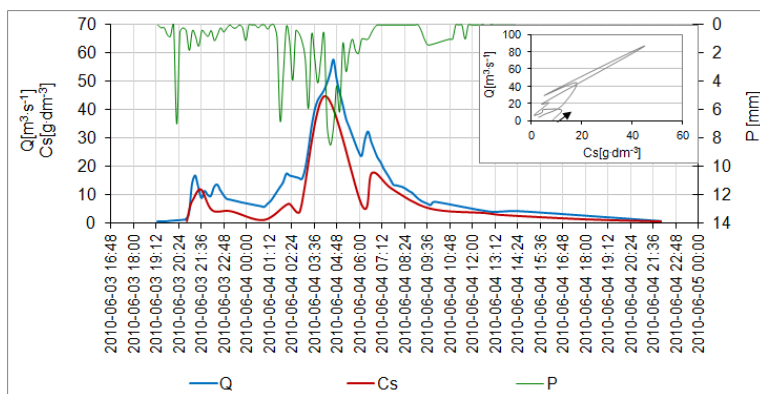
Fig. 32. Transport of suspended sediment in Bystrzanka stream during the floods in July 2008 with the hysteresis loop. Explanations see fig. 31.

Zupełnie wyjątkowe wezbrania zanotowano w ostatnim 10-leciu. W 2002 r. (4 lipca), trwający 2 godziny opad burzowy o sumie 27 mm ($24 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), spowodował nagły wzrost przepływu wody (do $37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) i wysoką zawartość zawiesiny ($33,4 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$), (tab. 13). O wysokiej koncentracji zawiesiny w tym okresie zdecydował głównie gwałtowny przepływ. Pięć dni przed wezbraniem odnotowano opad o wysokości 36 mm, który spowodował niewielkie wezbranie o maksymalnym przepływie $0,95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, podczas którego potok transportował nieznaczne ilości zawiesiny (koncentracja nie przekroczyła $2,8 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$). Efektywność geomorfologiczna ekstremalnych wezbrań jest ściśle związana z charakterem i następstwem poprzedzających je mniejszych wezbrań o większej częstotliwości występowania, i wzrasta wprost proporcjonalnie do długości czasu, który upłynął od ostatniego podobnej wielkości zdarzenia.



Ryc. 33. Przebieg transportu zawiesiny w czasie wezbrania w Bystrzance w maju 2010 r. Objasnienia jak do ryc. 31.

Fig. 33. Transport of suspended sediment in Bystrzanka stream during the floods in May 2010 with the hysteresis loop. Explanations see fig. 31.

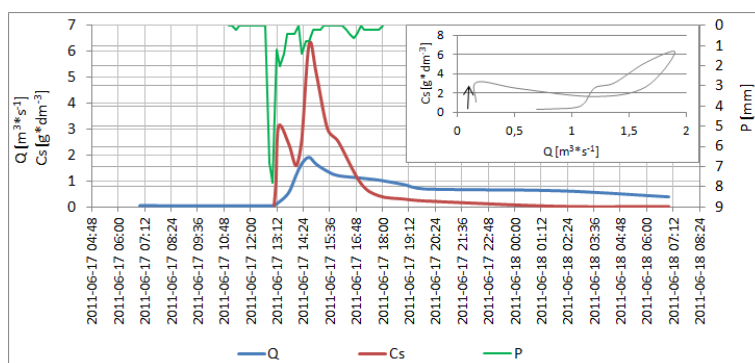


Ryc. 34. Przebieg transportu zawiesiny w czasie wezbrania w Bystrzance w czerwcu 2010 r. Objasnienia jak do ryc. 31.

Fig. 34. Transport of suspended sediment in Bystrzanka stream during the floods in June 2010 with the hysteresis loop. Explanations see fig. 31.

W roku 2010 odnotowano 2 duże wezbrania, spowodowane deszczem rozlewnym w dniach 14–20 maja (ryc. 33) oraz deszczem ulewnym w dniach 3–4 czerwca (rozdz. 3.3). Przepływ maksymalny w tych wezbraniach osiągał odpowiednio 15,6 i 57,7 m^3s^{-1} . Wyższą koncentrację zawiesiny odnotowano w czasie wezbrania w czerwcu, głównie ze względu na wyjątkowo wysoki przepływ. Podczas tego wezbrania, w trakcie pierwszej kulminacji, pomimo wysokich przepływów do 16,8 m^3s^{-1} , koncentracje zawiesiny nie były wysokie (ryc. 34) ze względu na wyniesienie luźnego materiału z koryta podczas wcześniejszego wezbrania w maju 2010. Natomiast maksymalny przepływ wynoszący 57,7 m^3s^{-1} doprowadził do znaczącej transformacji koryta

(rozd. 3) i wysokiej koncentracji zawiesiny, ponad $44 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Była to najwyższa dotąd zanotowana koncentracja materiału zawieszonego w Bystrzance w całym okresie pomiarowym. W czasie tego zdarzenia obserwowano także dużą dostawę materiału z dróg, rowów przydrożnych oraz osuwisk przykorytowych. W czasie wezbrania ze zlewni zostało wyniesione 16 843 ton materiału zawieszonego. W czasie dwóch wezbrań (w maju i czerwcu) zostało wyniesione 96% rocznego ładunku zawiesiny (tab. 13), (rozd. 8). Tak wysokie ładunki wyniesionej zawiesiny związane były również z pracami inżynierskimi rozpoczętymi w drugiej połowie 2009 r., kiedy nagromadzono ogromne ilości materiału w korycie. Podczas wezbrania czerwcowego sumy opadów zwiększały się od obszaru źródłowego w kierunku ujściowym potoku (rozd. 3.3). Pętla histerezy w czasie tego wezbrania, podobnie jak podczas wezbrania majowego, miała kształt złożony ze względu na kilka kulminacji przepływu. Pętle histerezy podczas obu wezbrań charakteryzowały się dodatkowo małą szerokością, na co wpływ miała niewielka różnica w dostawie materiału zawieszonego w czasie wzrostu i opadania fali wezbraniowej. Spływ powierzchniowy na stoku użytkowanym jako łąka, podczas opadu w maju wyniósł jedynie 12 mm, natomiast w czerwcu 101 mm, podczas gdy odpływ w potoku wyniósł odpowiednio 145 mm (14–20 maja), 122 mm (3–4 czerwca).



Ryc. 35. Przebieg transportu zawiesiny w czasie wezbrania w Bystrzance 17.06.2011 r. Objaśnienia jak do ryc. 31.

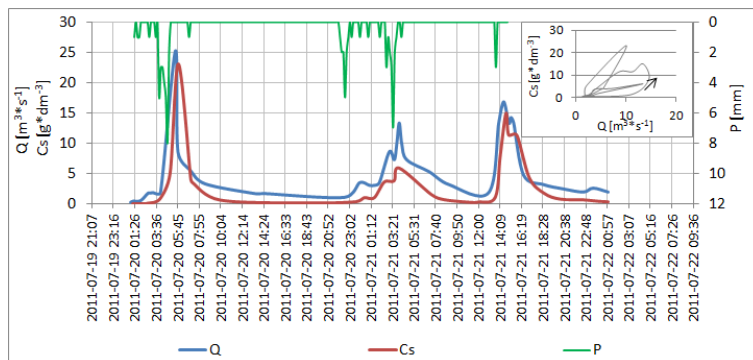
Fig. 35. Transport of suspended sediment in Bystrzanka stream during the floods in 17 June 2011 with the hysteresis loop. Explanations see fig. 31.

W czerwcu i lipcu 2011 r. odnotowano w Bystrzance kilka wezbrań różnej wielkości. Szczególny przebieg miało wezbranie 17 czerwca wywołane deszczem ulewnym o wysokości 30 mm i intensywności $8 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$, który spowodował powolny wzrost stanu wody w potoku (ryc. 35). Podczas niskich przepływów w fazie wzrostu fali wezbraniowej, koncentracja materiału zawieszonego osiągnęła wartość $3,1 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$, następnie zmniejszyła się do $1,6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$, by znów po przejściu kulminacji osiągnąć $6,3 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Na

taki przebieg hydrogramu oraz sedymentogramu miały wpływ głównie opady atmosferyczne, które przemieszczały się od ujścia do źródła potoku (rozdz. 3.3). Pętla histerezy ma kształt ósemki odwrotnej (lewoskrętnej). Wyższe koncentracje zawiesiny po przejściu kulminacji przepływu wynikały z opóźnionej dostawy materiału pochodzącego z górnej części zlewni, głównie jako produktu erozji koryta potoku i jego dopływów oraz materiału zgromadzonego w korycie w 2010 r., a także pochodzącego z erozji dróg i rowów przydrożnych.

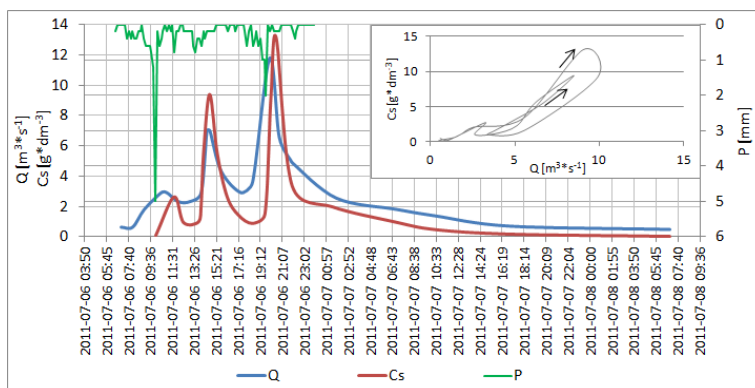
Wezbranie z 25.07.2011 r. wywołane opadem o nieco niższej sumie opadu (20 mm) i natężeniu ($0,3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) charakteryzowało się wyższymi przepływami lecz niższą koncentracją zawiesiny (do $1,3 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$) niż wezbranie z 17 czerwca. Było to związane głównie z występowaniem podwyższonych stanów wody, spowodowanych nieprzerwanymi opadami, poprzedzającymi wezbranie i trwającymi 7 dni, oraz wyczerpywaniem się materiału do transportu. Podobne sumy opadów (23 mm) zanotowane 20 oraz 21 lipca w źródłowej części zlewni spowodowały zupełnie odmienną reakcję w korycie. Podczas pierwszej kulminacji koncentracja zawiesiny była ponad 4-krotnie wyższa a przepływ 2,5-krotnie wyższy, niż podczas drugiej kulminacji (ryc. 36). Ponadto w czasie pierwszej kulminacji wezbrania notowano wysokie sumy opadu w ujściowej części zlewni (34,5 mm), odwrotnie niż kolejnego dnia. Wezbranie 6 lipca 2011 r. (ryc. 37) charakteryzowało się trzema kulminacjami przepływu wody i koncentracji zawiesiny. Pierwsza faza opadu, o natężeniu $5 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$, nie spowodowała znacznych zmian w przepływie, a koncentracja wzrosła do $2 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Jednak do wywołania kolejnych kulminacji potrzebna była już niewielka suma opadu. Duża wilgotność gruntu, a miejscami jego pełne nasycenie spowodowała wystąpienie nasyczonego spływu powierzchniowego, który wywołał szybką dostawę wody i zwierzdelin do koryta. Najwyższy przepływ wynoszący około $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i koncentracja zawiesiny równa $13 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ została wywołana opadem o godzinowej sumie 6,2 mm ($2 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$). Taki przebieg sedymentogramu wskazuje na destabilizację brzegów w korycie podczas pierwszych kulminacji przepływów i przygotowanie materiału do transportu. Dodatkowo zwierzdelina transportowana była przez drogi i rowy przydrożne, gdzie materiał ten został wcześniej osadzony i predysponowany do dalszego transportu. Podczas wszystkich kulminacji przepływu wyższe wartości koncentracji zawiesiny zanotowano w czasie opadania fali wezbraniowej. Dodatkowo w czasie tego wezbrania wyższe opady notowano w źródłowej części zlewni (o około 10 mm).

Wysokie koncentracje zawiesiny w czasie wezbrań w 2011 r. związane były również z materiałem nagromadzonym w pobliżu potoku w wyniku prac ziemnych przeprowadzonych w związku z kanalizacją sanitarną w Szymbarku (Urząd Gminy Gorlice).



Ryc. 36. Przebieg transportu zawiesiny w czasie wezbrania w Bystrzance w dniach 19–21.07.2011 r. Objasnienia jak do ryc. 31

Fig. 36. Transport of suspended sediment in Bystrzanka stream during the floods in 19–21 July 2011 with the hysteresis loop. Explanations see fig. 31

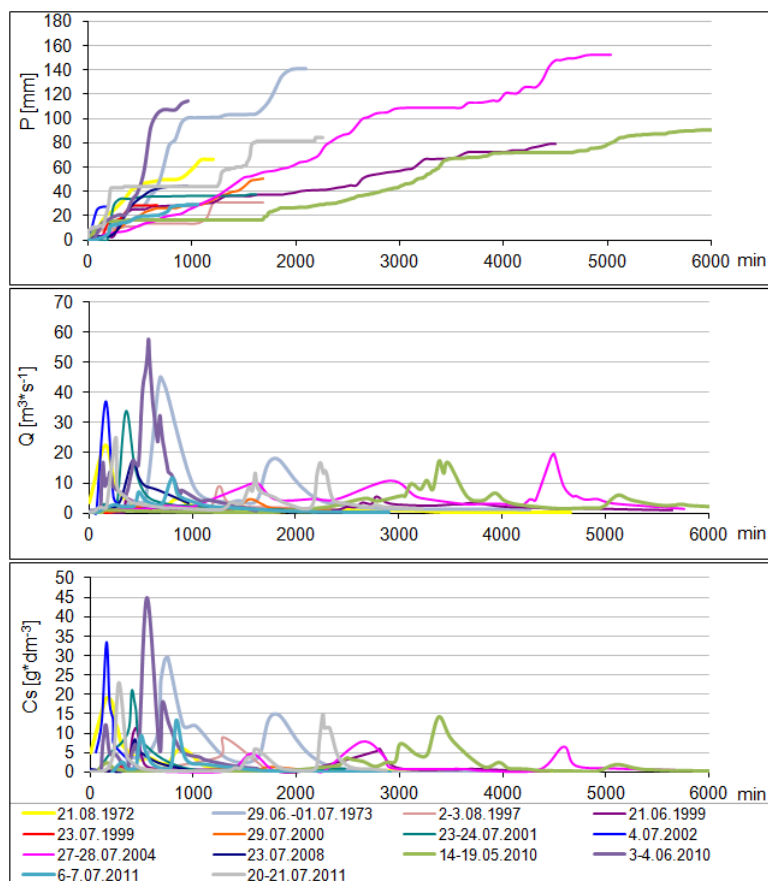


Ryc. 37. Przebieg transportu zawiesiny w czasie wezbrania w Bystrzance w dniach 6–8.07.2011 r. Objasnienia jak do ryc. 31

Fig. 37. Transport of suspended sediment in Bystrzanka stream during the floods in 6–8 July 2011 with the hysteresis loop. Explanations see fig. 31

Długoletnia seria pomiarów koncentracji zawiesiny umożliwiła określenie rozmiarów i dynamiki transportu materiału zawieszonoego w Bystrzance, w nawiązaniu do warunków meteorologicznych i hydrologicznych w zlewni. W celu porównania wybranych wezbrań z okresu 1970–2011 i wykazania podobieństw i różnic w reakcji koryta potoku, na określoną wysokość, natężenie i czas trwania opadu, wybrane zdarzenia zaprezentowano graficznie, na jednej osi czasu (ryc. 38). Analiza wyników wykazała, że najwyższe przepływy oraz koncentracje zawiesiny notowane są w czasie krótkotrwałych opadów, o dużym natężeniu (np. lipiec 2001, 2002). Opady w czerwcu 2010 r. znacznie różniły się od pozostałych zdarzeń w badanym 40-leciu, zarówno wysokością, natężeniem jak i czasem trwania. Ich krótki czas i wysoka intensywność

spowodowały ponadprzeciętne przepływ ($57,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) i koncentracje zawiesiny ($45 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$). Opady trwające dłużej, o niewielkim natężeniu i wysokiej sumie nie powodują tak znaczących reakcji potoku. Przykładem jest wezbranie z lipca 2004 r., kiedy opad trwający 3 doby o sumie 153 mm wywołał trzy kulminacje przepływu. Obserwowano jednak powolne zmiany stanów wody z maksymalnym przepływem do $20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i koncentracją zawiesiny do $8 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$. Najwyższa koncentracja odnotowana została jednak w czasie wzrostu drugiej fali kulminacji, która osiągnęła maksymalny przepływ $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Powyższe przykłady dowodzą bardzo dużej dynamiki w koncentracji zawiesiny, nie zawsze zależnej od stanu środowiska przyrodniczego.



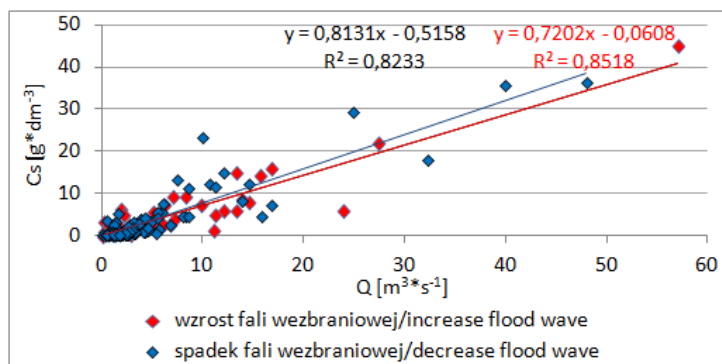
Ryc. 38. Porównanie wybranych wezbrań pod względem czasu trwania, sumy opadów (P), przepływu (Q) oraz koncentracji zawiesiny (Cs) w Bystrzance

Fig. 38. Comparison of selected floods in terms of duration, precipitation (P), discharge (Q) and concentrations of suspended sediment (Cs)

Koncentracje zawiesiny zanotowane w zlewni Bystrzanki są zdecydowanie wyższe od zmierzonych w zlewniach pogórskich w polskich Karpatach. Maksymalne wartości odnotowane w zlewni Starej Rzeki na Pogórzu Wiśnickim, o powierzchni 22,4 km², osiągały wartość 13,3 g*dm⁻³ (Krzemień, Sobiecki 1998). Stanowiło to zaledwie 30% maksymalnej wartości koncentracji zawiesiny w potoku Bystrzanka i około 50% w odniesieniu do średniej wartości maksymalnej w Beskidach. Wartości koncentracji zawiesiny w Bystrzance są podobne do notowanych w innych potokach beskidzkich (m.in. Froehlich 1975; Krzemień 1976). W potoku Świdnik (zlewnia o powierzchni 11 km²) w Beskidzie Wyspowym maksymalne koncentracje zawiesiny w 1963 r. osiągały wartość 35,3 g*dm⁻³, przy przepływie 29 m³*s⁻¹ (Cyberska, Cyberski 1964).

WPLYW ZMIAN ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO I WARUNKÓW HYDROMETEOROLOGICZNYCH NA TRANSPORT ZAWIESINY

Znaczne zmiany środowiska przyrodniczego zlewni Bystrzanki w okresie badań powinny wpłynąć na cechy transportu zawiesiny, dlatego poszukiwano ich zapisu w zróżnicowaniu koncentracji tego materiału. Analizowano jak zmieniła się koncentracja zawiesiny przy takich samych przepływach wody w cieku w latach 2009–2011 w porównaniu z okresem 1970–1979. Badania dotyczące lat 2009–2011 wykazały, że podczas takiego samego przepływu wody w fazie opadania fali wezbraniowej notowane były wyższe wartości koncentracji zawiesiny (ryc. 39), niż w fazie wzrostu kulminacji (pętla odwrotna). Równanie regresji liniowej w przypadku wzrostu fali wezbraniowej ma postać: $C_s = 0,7202Q - 0,0608$ natomiast w fazie opadania: $C_s = 0,8131Q - 0,5158$. Współczynnik korelacji wynosi $r = 0,91$, przy prawdopodobieństwie $p < 0,05$.

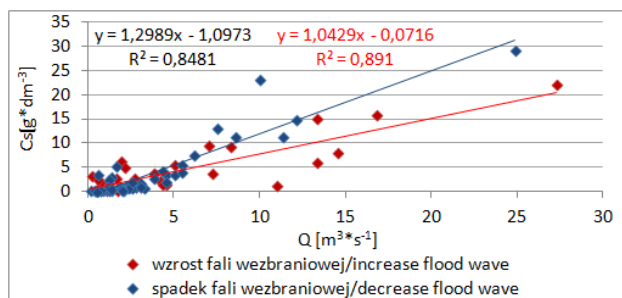


Ryc. 39. Koncentracja zawiesiny (C_s) przy danym przepływie wody (Q) w fazie wzrostu i opadania fali wezbraniowej w Bystrzance w latach 2009–2011 r. ($p < 0,05$)

Fig. 39. Concentration of suspended sediment (C_s) at a specified discharge (Q) in the increase and decrease phase of flood wave in the Bystrzanka stream in the period 2009–2011 ($p < 0,05$)

Przyczyną tego może być dostawa materiału z brzegów koryta podczas maksymalnych przepływów, w postaci odrywanych dużych pakietów gleby, rozmywanych jeszcze przy obniżających się przepływach. Na wysokie koncentracje zawiesiny po przejściu kulminacji wezbrania może także wpływać dostawa materiału przez drogi i bruzdy z pogórskiego obszaru zlewni Bystrzanki, który najpóźniej dociera do koryta. Duże znaczenie miały również przeprowadzone w 2009 r. prace w korycie. Umocnienia w postaci gabionów w ujściowym odcinku koryta oraz lokalnie odsłonięta skała w znaczący sposób ograniczyły ilość transportowanego materiału. Z drugiej jednak strony materiał nawieziony w obrębie brzegów dostarczał znacznych ilości transportowanej zawiesiny. Wyższe wartości koncentracji po przejściu kulminacji wezbrania są powiązane także z wysokością opadów w asymetrycznej zlewni, kierunkiem przemieszczania opadów oraz zróżnicowaną rzeźbą terenu. Zwiększająca się wysokość opadu w kierunku źródłowym zlewni powoduje, że materiał erodowany w korycie Bystrzanki dociera do ujściowego odcinka potoku z pewnym opóźnieniem i powoduje wzrost koncentracji po przejściu kulminacji wezbrania. Przyczyny takiej dynamiki koncentracji zawiesiny, jakie stwierdzono w Bystrzance, są także wskazywane przez innych badaczy. Wśród głównych przyczyn wyższych koncentracji zawiesiny po przejściu kulminacji wezbrania wymieniana jest erozja brzegów koryta (Simon i in. 2000; Rinaldi i in. 2004), odległe źródła sedymentu w górnej części zlewni (Loughran i in. 1986; Williams 1989; Baca 2008), dopływy cieków w górnej części zlewni (Asselman 1999) oraz większa prędkość przemieszczania fali powodziowej niż średnia prędkość płynięcia wody (Marcus 1989; Williams 1989; Brasington, Richards 2000).

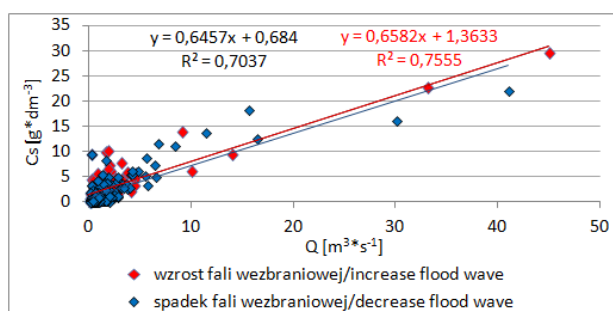
Szczegółowa analiza koncentracji zawiesiny w czasie wezbrań z 2011 r. (ryc. 40) dodatkowo wskazuje, że w fazie wzrostu fali wezbraniowej przy przepływie do $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ odnotowuje się wyższe koncentracje zawiesiny niż podczas opadania fali, o czym świadczą przecinające się linie trendu.



Ryc. 40 Koncentracja zawiesiny (C_s) przy danym przepływie wody (Q) w fazie wzrostu i opadania fali wezbraniowej w Bystrzance w 2011 r. ($p < 0,05$)

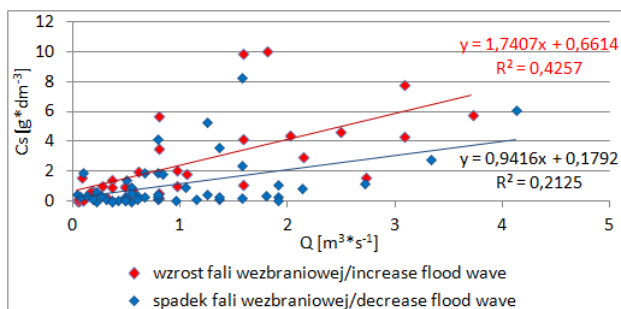
Fig. 40. Concentration of suspended sediment (C_s) at a specified discharge (Q) in the increase and decrease phase of flood wave in the Bystrzanka stream in 2011 ($p < 0,05$)

Odmierna sytuacja występowała w czasie wezbrań w latach 1970–1979 (ryc. 41). Wyższe wartości koncentracji zawiesiny notowano w czasie wzrostu fali wezbraniowej. Różnice dla całego okresu nie były jednak duże. Równanie regresji liniowej w przypadku wzrostu fali wezbraniowej ma postać: $C_s=0,6582Q+1,3633$, natomiast w fazie opadania: $C_s=0,6457Q+0,684$. Współczynnik korelacji wynosi odpowiednio $r=0,86$ i $0,84$, przy prawdopodobieństwie $p<0,05$. Jednak już analiza poszczególnych wezbrań z roku 1974 oraz 1975 ukazała większe różnice koncentracji przy określonych stanach wody (ryc. 42). Można to wiązać ze zwiększoną dostawą materiału do transportu rzeczno-ego z pól użytkowanych rolniczo w pobliżu koryta, które zajmowały wówczas większą powierzchnię (ryc. 23).



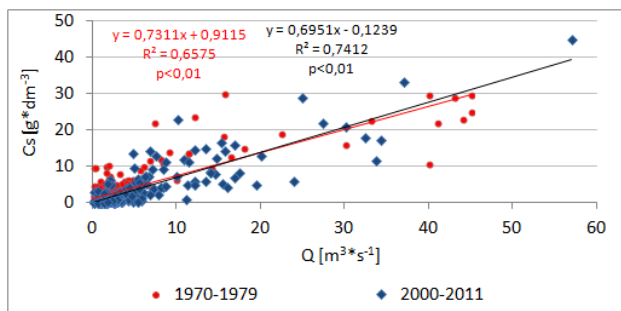
Ryc. 41. Koncentracja zawiesiny (C_s) przy danym przepływie wody (Q) w fazie wzrostu i opadania fali wezbraniowej w Bystrzance w latach 1970–1979 ($p<0,05$)

Fig. 41. Concentration of suspended sediment (C_s) at a specified discharge (Q) in the increase and decrease phase of flood wave in the Bystrzanka stream in the period 1970–1979 ($p<0,05$)



Ryc. 42. Koncentracja zawiesiny (C_s) przy danym przepływie wody (Q) w fazie wzrostu i opadania fali wezbraniowej w Bystrzance w 1975 r. ($p<0,05$)

Fig. 42. Concentration of suspended sediment (C_s) at a specified discharge (Q) in the increase and decrease phase of flood wave in the Bystrzanka stream in 1975 ($p<0,05$)



Ryc. 43. Związek między przepływem wody (Q) a koncentracją zawiesiny w Bystrzance w latach 1970–1979 oraz 2000–2011

Fig. 43. The relationship between discharge (Q) and concentration of suspended sediment in the Bystrzanka stream in the period 1970–1979 and 2000–2011

Wybrane wezbrania z okresu 1970–2011 poddano analizie statystycznej. Wykorzystano analizę skupień (wielowymiarowe techniki eksploracyjne), (Statistica v. 10.0), do grupowania wybranych wezbrań pod względem maksymalnej koncentracji zawiesiny, wysokości opadu, przepływów maksymalnych. Dane poddane zostały wcześniej standaryzacji. Dzięki analizie wydzielono 5 głównych grup, różniących się pod względem wprowadzanych zmiennych. Do pierwszej grupy zostały zaklasyfikowane wezbrania charakteryzujące się niskimi przepływami maksymalnymi ($<5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) oraz koncentracjami zawiesiny dochodzącymi do $3,7 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. W grupie tej znalazły się wezbrania z 26–27.05.1976 r., 23.09.1978 r., 27–28.06.1979 r., 11.06.1980 r., 24.06.1992 r., 29–30.07.2000 r., oraz z 25.07.2011 r. Zaobserwowano, że pomimo niższej sumy opadu i niższego przepływu, w czasie wezbrania w 1992 r. notowano wyższe koncentracje zawiesiny niż w 1979 r. Przyczyną był dłuższy okres międzywezbraniowy w 1992 r., który spowodował wzrost ilości luźnej zwietrzliny w zlewni. Efektywność geomorfologiczna wezbrań jest zatem wprost proporcjonalna do długości czasu, który upłynął od ostatniego podobnej wielkości zdarzenia, o czym wspominał W. Froehlich (1982).

Grupę drugą, w skład której wchodzi wezbrania z 02–03.08.1997 r., 18.10.1980 r., 17.06.2011 r., 7.08.1975 r., 24–25.06.1975 r., 23.09.1975 r., charakteryzują podobne sumy opadów co grupę pierwszą, jednak notowane wartości przepływu i koncentracji zawiesiny są wyższe i zawierają się w granicach odpowiednio $1,6\text{--}9,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz $5,5\text{--}10,1 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Podobna suma opadów z 1975 r. oraz 2011 r. (17 czerwca) spowodowała wezbranie o różnym przepływie maksymalnym, odpowiednio $4,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz $1,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pomimo tak zróżnicowanych przepływów maksymalnych, koncentracja w obu przypadkach osiągała podobne wartości około $6,1 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$, co wskazuje, że zmniejszenie powierzchni gruntów rolnych nie wpływa jednoznacznie na spadek koncentracji zawiesiny w potoku. Również porównanie wezbrań z 1980 r. (październik) i 1997 r. ukazuje, że pomimo niższego przepływu

podczas wezbrania w 1997 r. koncentracja zawiesiny była wyższa o około $3,5 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Wysoka koncentracja zawiesiny przy niskich stanach wody może świadczyć o dostawie znacznej części materiału z „terenów szybkiego spływu” (powierzchnie utwardzone), bądź o transporcie materiału nagromadzonego w pobliżu koryta lub w samym potoku w czasie prac inżynierskich.

W grupie trzeciej znalazły się wezbrania wywołane przez opad o sumie od 60 do 100 mm, o przepływach do $17,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz maksymalnych koncentracjach od $7,2$ do $4,9 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Grupa czwarta to wezbrania spowodowane opadami o najwyższych sumach, powyżej 148 mm, których przepływy osiągały $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (lipiec 1970 r., czerwiec 1973 r.) a maksymalne koncentracje zawiesiny $29,6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ (czerwiec/lipiec 1973 r.). Grupa piąta obejmuje wezbrania charakteryzujące się najwyższymi koncentracjami zawiesiny. Można ją podzielić na dwie podgrupy: wezbrania wywołane opadami o sumie 80–117 mm, charakteryzujące się wysoką koncentracją zawiesiny, do $30,1 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$, przy przepływie $14,1$ – $27,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz wezbrania wywołane niższymi opadami (do 44,5 mm), ale ze znacznie wyższymi wartościami przepływów maksymalnych i maksymalnej koncentracji zawiesiny $21,0$ – $36,6 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ (np. lipiec 2002, czerwiec 1970). Zupełnie wyjątkowe jest wezbranie z czerwca 2010 r., które ze względu na bardzo wysokie wartości koncentracji zawiesiny i przepływu można potraktować oddzielnie.

W latach 70. XX w. oraz w okresie 2000–2011 podobne przepływy charakteryzowały się zbliżonymi wartościami koncentracji zawiesiny (ryc. 43). Wielkość koncentracji nie wykazuje zasadniczych różnic pomimo zmian w użytkowaniu ziemi. Odmienna natomiast dynamika koncentracji w czasie wezbrań w latach 70. XX w. i na początku XXI w. wskazuje na odmienne źródła dostawy materiału do transportu rzecznoego. Zdecydowanie mniejsza erozja na stokach wpływa na zmniejszenie dostawy materiału do koryta, co z kolei skutkuje zwiększeniem zdolności transportowej rzeki i wzrostem erozji w korycie.

Stopień powiązania systemu stokowego i korytowego był przedmiotem badań m.in. E. Gila (1999), który wykazał, że w czasie opadów burzowych do koryta dociera tylko niewielka część materiału przemieszczanego na stokach. Krótki czas trwania opadów nie sprzyja transportowi materiału na większe odległości. W czasie takich opadów w latach 70. i 80. XX w. notowano na stokach wielokrotnie wyższe wartości spłukiwania niż wartości ładunków transportowanych w potoku. Materiał transportowany ze stoku był przemieszczany na niewielkie odległości, a jego akumulacja odbywała się na obszarach z roślinnością o większym zagęszczeniu lub w dnie doliny. Taką samą prawidłowość stwierdzono w czasie badań w latach 2009–2011, pomimo zmian w użytkowaniu ziemi. Podczas ulewy w 1988 r. stosunek wielkości materiału spłukiwanego na stokach do transportu zawiesiny ze zlewni wyniósł 145:1, a w 1992 r. 4:1. W odniesieniu do całej zlewni wartości te są średnio o 1/3 niższe (Gil 1999). Odmienna sytuacja obserwowana jest w czasie opadów

rozlewnych, kiedy spływ powierzchniowy nie powoduje dużego splukiwania na powierzchni stoków. Duża erozja zachodzi wówczas w miejscach koncentracji spływu na drogach nieutwardzonych czy w bruzdach. Takie procesy zachodziły m.in. w czasie wezbrania w 1972 r., 1973 r., 2002 r., czy w lipcu 2011 r. Ponadto z analizy wezbrań (tab. 13) wynika, że podobne natężenia i sumy opadów atmosferycznych w latach 70. XX w. i w okresie 2000–2011 powodowały różne przepływy wody i koncentracje zawiesiny. Wskazuje to na wpływ innych czynników na ilość zawiesiny wynoszonej ze zlewni. Należą do nich cechy okresów międzywezbraniowych oraz działalność człowieka, wpływająca na wzrost ilości luźnego materiału w zlewni Bystrzanki.

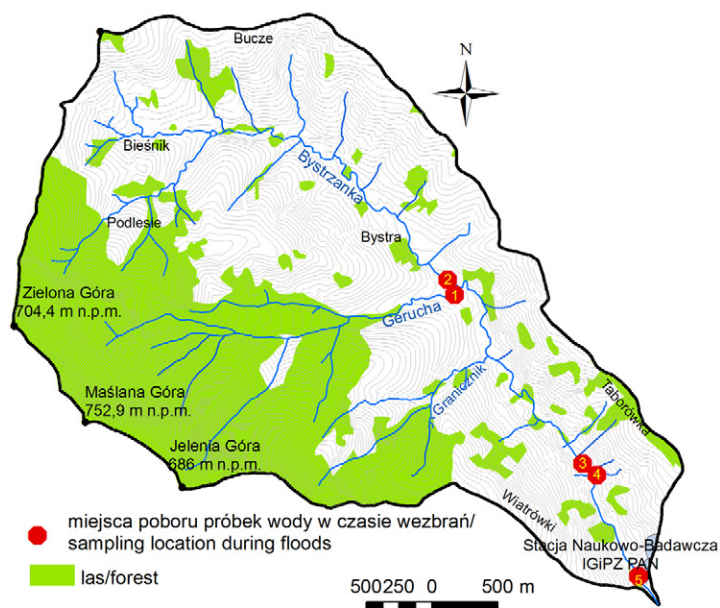
Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że w ostatniej dekadzie materiał transportowany w formie zawieszonyj pochodzi w głównej mierze z erozji brzegów koryta a także z obszarów objętych działalnością człowieka w korycie i w jego sąsiedztwie. Duże ilości materiału dostarczają drobne zerwy i osuwiska przykorytowe oraz powstające w miejscu podcięcia zboczy dolin przez potok. Również nie bez znaczenia jest wzrost powierzchni utwardzonej w zlewni, o niskiej retencyjności podłoża, który powoduje szybszy odpływ wody wraz z materiałem pochodzącym m.in. z erozji przydrożnych rowów niebrukowanych. Ważną rolę odgrywają drogi nieutwardzone, które w czasie intensywnych opadów pełnią rolę potoków transportujących znaczne ilości materiału. Drogi nieutwardzone łączą się z obecnie z drogami utwardzonymi, co powoduje, że materiał doprowadzany jest do dna doliny. Działalność człowieka w zlewni spowodowała także ograniczenie procesów erozji na stokach, poprzez zmniejszenie powierzchni gruntów ornych, co skutkuje ograniczeniem dostawy materiału do koryta rzecznoego. Powoduje to niedociążenie cieków prowadzące do wzrostu erozji w korycie.

7. ZRÓŻNICOWANIE PRZESTRZENNE KONCENTRACJI ZAWIESINY

Zmiany koncentracji materiału zawieszzonego wzdłuż cieku oraz głównych dopływów stanowią cenną informację dotyczącą źródeł dostawy materiału do koryta. Monitoring transportowanego materiału wzdłuż cieku informuje także jak zmienia się koncentracja zawiesiny w miarę przyrostu powierzchni zlewni. Badania w różnych obszarach wskazują, że wraz z biegiem rzeki dostawa materiału do koryta może się zmniejszać, zwiększa się natomiast możliwość sedymentacji pozakorytowej tego materiału (Walling 1983; Knighton 1987). Pogląd ten zakwestionowali m.in. M. Church i D. Slaymaker (1989) oraz L.J. Bull i D.M. Lawler (1995), którzy uznali, że ładunek materiału wzrasta wraz z odległością od źródeł cieku, co należy wiązać z erozją brzegów i migracją koryta.

Zróżnicowanie przestrzenne koncentracji zawiesiny w zlewni jest odzwierciedleniem cech zlewni i koryta rzeczno. W obszarach górskich i pogórskich wielkość koncentracji zawiesiny jest zróżnicowana wzdłuż cieku (Froehlich 1975; Łajczak 1989; Krzemień 1992). Natężenie transportu zawiesiny w rzekach karpaccich, czego miarą jest koncentracja tego materiału w jednostce objętości wody, zwiększa się od źródeł do ujścia rzek (Froehlich 1975), a w przypadku rzek wypływających na przedpole Karpat tylko do granicy gór (Łajczak 1989). Na przedpolu Karpat wraz z oddalaniem się od źródeł rzek do ich ujścia obserwuje się spadek koncentracji zawiesiny w rzekach (Łajczak 1989). Z. Zwoliński (1989) zwraca uwagę, że taki przebieg należy wiązać z energią rzeźby, która jest większa w górnej części zlewni oraz z transportem suspensyjnym, który jest epizodyczny, pulsacyjny. Odbiciem tego jest okresowa depozycja materiału w systemie korytowym, o zróżnicowanym natężeniu przestrzennym i czasowym.

W potoku Bystrzanka i jej głównym dopływie beskidzkim (Gerucha) oraz w znacznie krótszym cieku pogórskim, podczas wybranych wezbrań w latach 2010–2011 pobierano próbki wody wraz z materiałem zawieszonym. W potoku Bystrzanka próbki pobierano w 3 miejscach wzdłuż profilu podłużnego (ryc. 44). W zlewni wytypowano 5 miejsc monitoringowych oznaczonych jako: 1 – Gerucha powyżej ujścia do Bystrzanki, 2 – Bystrzanka powyżej ujścia Geruchy, 3 – Bystrzanka most – poniżej ujścia Geruchy, 4 – potok pogórski, 5 – Bystrzanka, wodowskaz Stacji Naukowej IGiPZ PAN w Szymbarku (tab. 14).



Ryc. 44. Miejsca poboru próbek wody wraz z materiałem zawieszonym w czasie wezbrań. 1 – Gerucha powyżej ujścia do Bystrzanki; 2 – Bystrzanka powyżej ujścia Geruchy; 3 – Bystrzanka przed mostem; 4 – potok pogórski/foothill stream; 5 – Bystrzanka wodowskaz

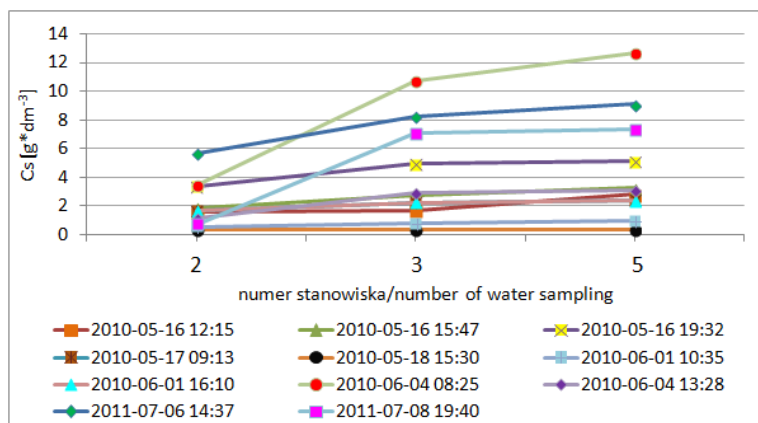
Fig. 44. Location of sampling sites during floods. 1 – the Gerucha stream above mouth of the Bystrzanka stream; 2 – the Bystrzanka stream above the mouth of the Gerucha stream; 3 – the Bystrzanka stream before the bridge; 4 – foothill stream; 5 – water gauge at the Bystrzanka stream

Tabela 14. Charakterystyka miejsc poboru prób z materiałem zawieszonym

Nr punktu	Ciek	Miejsce poboru prób	Powierzchnia zlewni [km ²]	Maksymalna koncentracja zawiesiny w latach 2010–2011 [g*dm ⁻³]
1	Gerucha	Bystra	3,5	14,3
2	Bystrzanka	Bystra	5,6	5,7
3	Bystrzanka	Szymbark	11,9	10,7
4	Potok pogórski	Szymbark	0,05	6,8
5	Bystrzanka	Szymbark	13,0	45,0

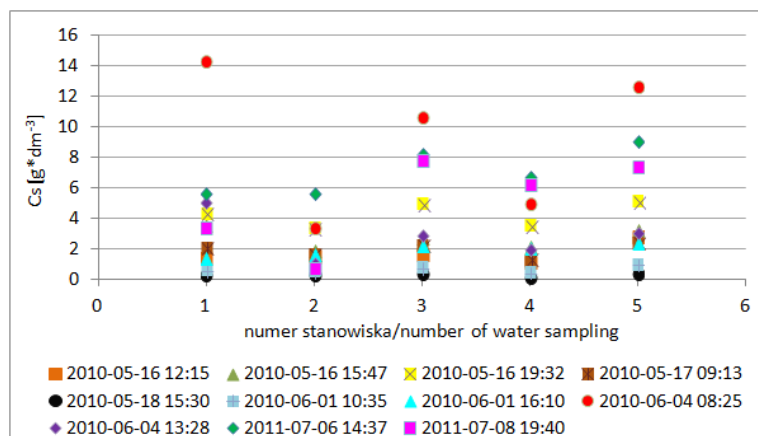
Źródło: Opracowanie własne

Próbki w poszczególnych miejscach pobierano w odstępach co około 3–5 minut, zaczynając od punktu 1 i kolejno w kierunku ujściowym aż do punktu 5. Pomiary przeprowadzono w trakcie wezbrań opadowych, które wystąpiły w 2010 i 2011 r.: 16–18 maja 2010 r., 1 czerwca 2010 r., 3 czerwca 2010 r., 6 lipca 2011 r. oraz wezbranie w dniu 8 lipca 2011 r.



Ryc. 45. Zróżnicowanie koncentracji zawiesiny w profilu podłużnym Bystrzanki. Objaśnienia jak do ryc. 44.

Fig. 45. Differentiation of concentration of suspended sediment in the Bystrzanka stream along its longitudinal profile. Explanations see fig. 44.



Ryc. 46. Zróżnicowanie koncentracji zawiesiny w profilu podłużnym Bystrzanki i w wybranych dopływach. Objaśnienia jak do ryc. 44.

Fig. 46. Differences in the concentration of suspended sediment in the Bystrzanka longitudinal profile and in selected tributaries. Explanations see fig. 44.

Analiza wykazała, że wraz ze wzrostem długości ciek, w Bystrzance wzrasta koncentracja zawiesiny (ryc. 45, 46). W 63% przypadków koncentracja materiału zawieszonoego była najwyższa w odcinku ujściowym cieków głównego. Koncentracja zawiesiny jest wprost proporcjonalna do powierzchni zlewni, co jest charakterystyczne dla rzek górskich. Związane jest to m.in. z faktem, że w czasie wysokich stanów wody w ciekach wzrasta powierzchnia podmywanych brzegów koryta, z których następuje dostawa materiału do transportu zawiesiny. Materiał uruchamiany jest wówczas poprzez procesy

erozji bocznej, ruchy masowe i spływ powierzchniowy. Jednak w przeliczeniu na jednostkę powierzchni zlewni wielkość transportowanego materiału zawieszonoego maleje z biegiem cieku. Na ten aspekt transportu zawiesiny, czyli jednostkową denudację odpływową w zlewniach rzek polskich Karpat zwracali uwagę J. Brański (1980) i A. Łajczak (1989, 1992).

W 27% analizowanych zdarzeń hydrometeorologicznych najwyższą koncentrację notowano w najdłuższym dopływie Bystrzanki (Gerucha), który posiada zlewnię w większości zalesioną. Podczas wezbrania w maju 2010 r. koncentracja zawiesiny była tu wyższa niż na pozostałych stanowiskach. W punktach pomiarowych: 2, 3 i 5 koncentracja zawiesiny stanowiła odpowiednio: 53, 76 oraz 91% koncentracji w potoku Gerucha. W czasie wezbrań w dniach 3.06.2010 r. i 8.07.2011 r. koncentracja zawiesiny w dopływie beskidzkim była odpowiednio 4,5 oraz 4,1 razy wyższa od koncentracji w Bystrzance w punkcie 2. Przyczyną tego stanu było przygotowanie materiału do transportu przez wcześniejsze wezbrania. Okres poprzedzający oba zdarzenia charakteryzował się wysokimi opadami, których dobową sumę wyniosła aż 27 mm. Dodatkowo przed wezbraniem z 8.07.2011 r. opady deszczu trwały nieprzerwanie przez 10 dni (rozd. 3.3).

A. Łajczak (1989) uważa, że nawet w ciekach odwadniających prawie całkowicie zalesione zlewnie karpackie koncentracja zawiesiny podczas dużych wezbrań jest wysoka. Wysoką koncentrację zawiesiny w Gerusze należy wiązać przede wszystkim z wyższymi opadami w obrębie Trzech Kopców, gdzie występują źródła tego dopływu, oraz z dużą erozją głęboko wciętego i wyciętego w łupkach pstrych koryta. To podłoże skalne jest bardzo podatne na erozję. Przeprowadzone badania potwierdzają wyniki uzyskane przez A. Welca (1988), który prowadząc pomiary w latach 70. XX w. wykazał, że koncentracja materiału zawieszonoego w cieku jest w związana m.in. z wysokością oraz natężeniem opadu, który wystąpił w zlewni. Stwierdził on, że w wezbraniach spowodowanych ulewami o najwyższych opadach w górnej części zlewni, transport zawiesiny jest wielokrotnie większy niż w przypadku podobnych opadów w ujściowej części zlewni. Na takie zróżnicowanie w głównej mierze wpływa kształt zlewni i przyrost jej powierzchni na jednostkę długości cieku w środkowej i górnej części zlewni w odniesieniu do powierzchni zamkniętej wodowskazem przy ujściu do Ropy.

Wzrost koncentracji zawiesiny w Gerusze powoduje wzrost koncentracji materiału w cieku głównym ($C_{s_B} = 0,8523C_{s_G} + 1,2496$), co potwierdza współczynnik korelacji liniowej równy $r = 0,89$ ($p < 0,05$).

W analizowanym okresie koncentracja zawiesiny w stanowisku numer 2 stanowiła od 30 do 80% koncentracji mierzonej w punkcie ujściowym cieku (ryc. 60). Odległość stanowiska 2 od stanowiska numer 5 wynosi 3,5 km, a więc koncentracja powinna wzrastać średnio o 28,5% na każdym kilometrze. Przyjmując tę zależność porównano koncentracje materiału

zawieszonego z wynikami uzyskanymi z pomiarów. Różnica w poszczególnych przypadkach pomiarowych wyniosła od 0,03 g do 0,78 g w litrze wody, czyli błąd w granicach od 5 do 20%. Odnosząc maksymalne koncentracje zawiesiny mierzone w latach 2010 i 2011 do powierzchni cząstkowych zlewni można wskazać, że najwyższe wartości zawiesiny notowane są w badanym dopływie pogórskim i beskidzkim (Gerusze).

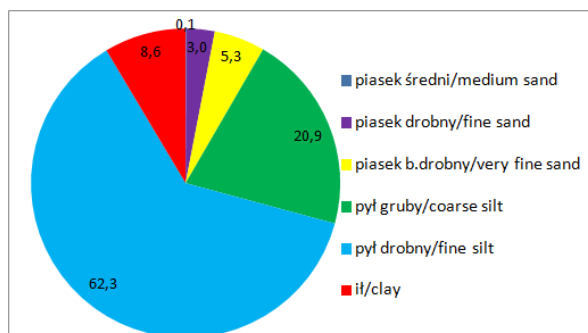
Porównanie wyników koncentracji zawiesiny potoku beskidzkiego (Geruchy) i pogórskiego nie odzwierciedla jednak rzeczywistych różnic w użytkowaniu ziemi w analizowanych zlewniach. Potok pogórski, z którego pobierano próbki, odprowadza wody ze zlewni, w której w ostatnich latach prowadzono liczne prace inżynierskie stabilizujące osuwisko i naruszające szorstkość gruntu, co przyczyniło się do znacznej produkcji materiału do transportu rzeczno. Natomiast porównanie stanowiska 1 i 2 (ryc. 44) daje obraz relacji pogórsko-beskidzkich. W 64% przypadków koncentracja zawiesiny w potoku beskidzkim (Gerucha) była wyższa od koncentracji w Bystrzance powyżej ujścia tego dopływu. Wskazuje to na znaczącą rolę dopływów beskidzkich w kształtowaniu ilości ładunku zawieszonego wynoszonego ze zlewni.

ANALIZA SKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO ZAWIESINY PODCZAS WYBRANYCH WEZBRAŃ

Skład granulometryczny materiału transportowanego w zawieszynie i jego zmienność w czasie wraz ze zmiennym przepływem stanowi cenne źródło informacji o transporcie osadów rzecznych (Banasik, Hejduk 2005).

Wielkość ziaren transportowanych w postaci zawiesziny w dużym stopniu związana jest ze źródłami osadu oraz z warunkami hydraulicznymi (Walling, Moorehead 1989; Walling, Webb 1992). Jak wykazały badania prowadzone przez W.W. Polakowa (1948) drobne cząstki o średnicy mniejszej niż 0,05 mm układają się w profilu poprzecznym cieków niemal regularnie na całej głębokości, w przeciwieństwie do frakcji grubszej. Dotychczasowa wiedza o składzie granulometrycznym cząstek zawieszonych wskazuje na jego dużą złożoność czasową i przestrzenną. W zależności od wielkości ziaren, prędkości przepływu wody i stopnia turbulencji, koncentracja cząstek zmienia się w przekroju poprzecznym koryta (Bogen 1992).

W Bystrzance, pomimo wieloletniej serii obserwacji zawiesziny, nie prowadzono badań dotyczących składu granulometrycznego zawiesziny. W 2010 i 2011 r. wykonano analizę uziarnienia zawiesziny w 47 próbkach pobranych podczas wezbrań w profilu podłużnym Bystrzanki a także dopływie beskidzkim (potok Gerucha) i pogórskim (ryc. 44). Przyjęto klasyfikacje uziarnienia stosowaną przez Polskie Towarzystwo Gleboznawcze (2008).



Ryc. 47. Procentowy udział klas składu granulometrycznego w materiale zawieszonym, transportowanym w czasie wezbrań w Bystrzance (wodowskaz obok Stacji w Szymbarku)

Fig. 47. Grain-size composition of the suspended sediment transported during the floods in the Bystrzanka stream (water gauge next to the Research Station in Szymbark)

W celu ustalenia dominującego rodzaju uziarnienia materiału zawieszonego obliczono procentową zawartość podstawowych frakcji. W ujściowym odcinku Bystrzanki, w pobranych w trakcie wezbrań próbkach wody dominowała frakcja pyłu (0,05–0,002), stanowiąca 80% transportowanego w zawiesinie materiału. Najwyższy udział miał pył drobnny (0,02–0,002), który stanowił 62% (ryc. 47). Frakcja iłu stanowiła 9% materiału. Taki skład mechaniczny zawiesiny jest typowy dla rzek beskidzkich (Cyberski, Pasternak 1973; Froehlich 1975). Opierając się na wartościach współczynnika zmienności można wskazać, że frakcja piasku drobnego ulegała w profilu podłużnym Bystrzanki największym zmianom ($C_v = 76\%$), natomiast najmniejszym zmianom pył drobnny ($C_v = 9\%$), (tab. 15).

Tabela 15. Średnia zawartość poszczególnych frakcji zawiesiny w próbkach pobranych w ujściowym odcinku Bystrzanki (wodowskaz)

Frakcja	Piasek drobnny	Piasek bardzo drobnny	Pył gruby	Pył drobnny	Ił
(mm)	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,02	0,02–0,002	<0,002
Średnia zawartość (%)	3,0	5,3	20,9	62,2	8,6
SD	2,3	2,9	2,7	5,4	1,5
C_v (%)	75,9	53,7	12,9	8,7	17,7

Źródło: Opracowanie własne

Udział frakcji pyłu drobnego w całkowitej ilości transportowanej zawiesiny był największy w próbkach pobranych z potoku pogórskiego (68%), a najmniejszy w próbkach pobranych w odcinku środkowym Bystrzanki (tab. 16). Pył gruby w Bystrzance powyżej ujścia Geruchy (stanowisko 2) stanowił 23% zawiesiny i był to najwyższy średni udział w odniesieniu do pozostałych punktów poboru prób. Najmniejszy procentowy udział piasku bardzo drobnego, podobnie jak piasku drobnego notowany był w dopływie

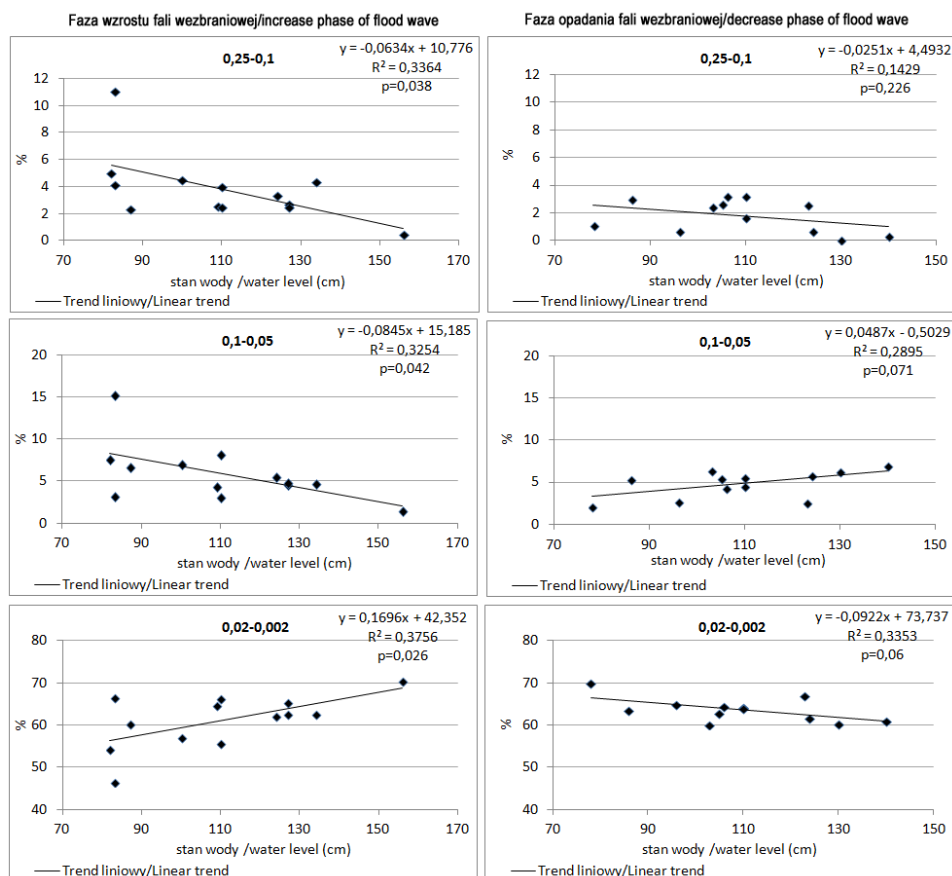
pogórskim. Natomiast udział frakcji iłowej w tym dopływie był najwyższy. Zauważono także zależność procentowego spadku frakcji piasku od wzrostu zawartości pyłu drobnego w miarę zwiększania się powierzchni zlewni (tab. 16). Należy wiązać to ze zmniejszeniem spadku koryta i prędkości wody, a także z rozmieszczeniem wychodni piaskowców i łupków w zlewni. Te ostatnie zajmują większą powierzchnię w niżej położonych odcinkach dolin. Poprzez sortowanie, ziarna drobniejsze są włączane do transportu znacznie szybciej i na większą odległość niż ziarna grubsze (Allen 1965). W Bystrzance procentowy udział poszczególnych frakcji transportowanych w zawieszynie podczas wezbrań jest bardziej zbliżony do składu granulometrycznego zawieszyny notowanego w beskidzkiej części Karpat. Wskazuje to na większy wpływ dopływów beskidzkich niż pogórskich na kształtowanie przepływów wezbraniowych Bystrzanki i dostawę materiału.

Tabela 16. Procentowa zawartość poszczególnych frakcji zawieszyny w próbkach pobranych w różnych punktach w zlewni Bystrzanki

Miejsce poboru próbki (wielkość ziaren w mm)	Potok pogórski	Potok beskidzki (Gerucha)	Bystrzanka powyżej ujścia Geruchy	Bystrzanka poniżej ujścia Geruchy	Bystrzanka wodowskaz
Piasek średni (0,5–0,25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Piasek drobny (0,25–0,1)	0,8	2,0	3,2	2,9	3,0
Piasek bardzo drobny (0,1–0,05)	3,6	4,6	6,4	5,7	5,3
Pył gruby (0,05–0,002)	18,0	20,6	22,9	21,7	20,9
Pył drobny (0,02–0,002)	67,7	63,4	59,8	60,9	62,3
Frakcja iłu (<0,002)	9,9	9,4	7,7	8,8	8,4
Suma	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Źródło: Opracowanie własne

Przeprowadzono także analizę składu granulometrycznego próbek pobranych w czasie wzrostu i opadania fali wezbraniowej, w ujściowej części potoku (wodowskaz). Badania wykazały, że w fazie wzrostu fali wezbraniowej zmniejsza się procentowy udział piasku drobnego, bardzo drobnego i pyłu grubego a wzrasta udział drobniejszej frakcji: pyłu drobnego i frakcji ilastej. Silna turbulencja w początkowej fazie wezbrania ułatwia utrzymywanie w zawieszeniu frakcji piaszczystej. W fazie opadania zależność ta jest odwrotna (ryc. 48).



Ryc. 48. Procentowy udział wybranych frakcji zawiesiny przy określonym stanie wody w fazie wzrostu i opadania fali wezbraniowej w Bystrzance

Fig. 48. Percentage of select fractions of the suspended sediment at a particular water level in the increase and decrease phase of flood wave in the Bystrzanka stream

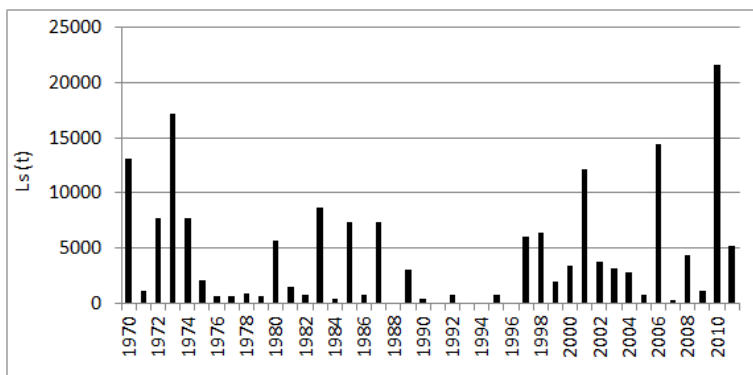
Zaobserwowano jednocześnie, że przy takim samym stanie wody zawartość frakcji piasku w fazie wzrostu wykazuje procentowo wyższą zawartość w próbce niż w fazie opadania fali, i odwrotnie w przypadku frakcji najdrobniejszej. Związane jest to z większą możliwością utrzymywania w zawieszynie grubszych ziaren podczas zwiększenia się przepływu (efekt turbulencji wody), a także z opadaniem większych ziaren w czasie zmniejszania się przepływu wody. Przykładem jest wezbranie z czerwca 2010 r., kiedy w czasie wzrostu przepływu odnotowano wyższy procentowy udział frakcji piasku (8%) niż w fazie opadania wezbrania (4%), odwrotnie niż w przypadku frakcji łu. Wysokie wartości koncentracji zawiesiny, notowane w czasie tego wezbrania zwiększyły lepkość wody, co łącznie ze znaczną turbulencją ułatwiło utrzymanie w zawieszeniu cząstek piaszczystych i pylistych. Końcowe fazy

wezbrania charakteryzowały się niewielką koncentracją zawiesiny, pomimo intensywnego szarobrunatnego koloru świadczącego o stosunkowo dużej ilości frakcji koloidalnej.

Podczas wezbrania 31.08–1.09.2010 r., w fazie wzrostu fali wezbrania został zanotowany najwyższy udział frakcji piasku, 28%. Maksymalny przepływ wyniósł $5,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a maksymalna dobową sumą opadów wyniosła 42 mm. W. Froehlich (1982), podobny udział frakcji piaszczystej (35%) zanotował w potoku Homerka, podczas wezbrań wywołanych gwałtownymi ulewami. Wysoki udział frakcji piaszczystej w potoku w czasie tego wezbrania wskazuje na allochtoniczne pochodzenie materiału. Znaczna część materiału zawieszzonego mogła więc być efektem przeprowadzonych wcześniej prac inżynierskich mających na celu umocnienie wybranych, znacznie przekształconych odcinków koryta Bystrzanki, uszkodzonych podczas wezbrania w maju i czerwcu 2010 r. Dodatkowo duża zawartość piasku może wskazywać na pochodzenie materiału z udrażnianych rowów przydrożnych. Nie wykluczone, że piasek niesiony w zawieszynie może też pochodzić z erozji bocznej koryta.

8. ZMIENNOŚĆ ŁADUNKU MATERIAŁU ZAWIESZONEGO W LATACH 1970–2011

Roczne ładunki zawiesiny transportowane przez Bystrzanę w latach 1970–2011 wykazywały duże zróżnicowanie (ryc. 49), które wynikało głównie z wielkości wezbrań, a w ostatniej dekadzie także z intensywnej działalności człowieka w zlewni, zwłaszcza w pobliżu potoku. W latach 1970–1979 wartości ładunku zawiesiny zawierały się w granicach od 566 t w 1977 r. do 17236 t w 1973 r., natomiast w okresie 2000–2011 wyniosły od 243 ton w 2007 r. do 21658 ton w 2010 r. Przeprowadzona analiza nie uwzględnia jednak lat 1988, 1991, 1993, 1994, 1996 ze względu na brak szczegółowych danych. W półroczu hydrologicznym letnim (V–X) było odprowadzane około 97% rocznego ładunku zawiesiny. Współczynnik zmienności (C_v) rocznego ładunku zawiesiny dla czterdziestoletniego okresu badań wyniósł 110% i był najwyższy w latach 1970–1979, kiedy osiągnął 117%.



Ryc. 49. Roczne ładunki zawiesiny (L_s) wynoszonej ze zlewni Bystrzanki w latach 1970–2011

Fig. 49. Annual loads of suspended sediment (L_s) carried out of the Bystrzanka catchment in the period 1970–2011

Średni roczny transport zawiesiny w latach 1970–1979 był wyższy o 517 ton od ładunku materiału zawieszonego wyniesionego ze zlewni w okresie 2000–2011, jednak bez uwzględnienia roku 2010. Ilość wyniesionego w 2010 r. ładunku była bardzo wysoka i znacznie zawiąza średnie wartości dla ostatniego okresu (tab. 17). Odnotowany w 1973 r. maksymalny ładunek zawiesiny równy 17236 t znacznie przewyższa ilość zawiesiny wyniesionej ze zlewni w kolejnych latach. Jest jednak niższy o 4422 t od ładunku zawiesiny w 2010 r.

Tabela 17. Średni roczny ładunek materiału zawieszonoego w Bystrzance wraz z podstawowymi charakterystykami czynników wpływających na transport zawiesiny w poszczególnych przedziałach czasowych

	1970–1979	1980–1989	1990–1999	2000–2009	2000–2011	2000–2011 (bez 2010)	1970–2011
Średni roczny ładunek zawiesiny (t)	5174,2	3924,3	2713,0	4606,2	6073,9	4657,2	4762,9
Maksymalny roczny ładunek zawiesiny (t)	17236	8645	6353	14446	21658	14446	21658
Średnia roczna liczba wezbrań	7,6	7,4	4,9	5,9	6,3	5,9	6,5
Średni roczny przepływ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	0,187	0,158	0,155	0,168	0,185	0,169	0,17
Średni przepływ V–X ($m^3 \cdot s^{-1}$)	0,174	0,139	0,132	0,152	0,186	0,159	0,16
Maksymalny przepływ chwilowy ($m^3 \cdot s^{-1}$)	45,0	15,6	30,6	37,0	57,7	37,0	57,7
Średnia roczna suma opadu (mm)	852,6	805,3	797,4	860	888,7	862,9	838,5
Średnia suma opadu V–X (mm)	586,1	546,5	523,7	571,4	601,1	579,6	571,1
Średnia liczba dni z opadem >15mm V–X	9,9	9,6	9,5	10,2	10,9	10,8	12,4

Źródło: Opracowanie własne

Brak znaczących różnic w ładunku zawiesiny odprowadzanej ze zlewni w latach 1970–1979 oraz 2000–2011, pomimo zmniejszenia powierzchni gruntów ornych, wskazuje na brak wyraźnego powiązania systemu stokowego i korytowego i potwierdza duże znaczenie ekstremalnych przepływów w ilości materiału wynoszonego poza zlewnię. Podobną prawidłowość stwierdzono w innych częściach Karpat (Świąchowicz 2002; Łajczak i in. 2008). Na wysoką średnią roczną wartość ładunku zawiesiny wynoszonej w ostatnim okresie (2000–2011) wpłynęła wysoka ilość zawiesiny w roku 2001, 2006, 2010. Do właściwej interpretacji wyników niezbędna jest znajomość, oprócz podstawowych parametrów hydrometeorologicznych, rodzaju ingerencji człowieka w środowisko geograficzne zlewni w poszczególnych latach.

Znaczne ilości materiału zawieszonoego wyniesione ze zlewni w 2001 r. można wiązać z wysoką roczną sumą opadów, przekraczającą 1000 mm (rok wilgotny) oraz z dużą liczbą wezbrań i wysokimi przepływami wody (do $34 m^3 \cdot s^{-1}$), w czasie których notowano koncentracje zawiesiny przekraczające $22 g \cdot dm^{-3}$. W lipcu 2001 r. wezbranie ($>0,7 m^3 \cdot s^{-1}$) trwało nieprzerwanie przez 9 dni. W tym czasie, aż dwukrotnie, średni dobowy przepływ przekroczył $4 m^3 \cdot s^{-1}$.

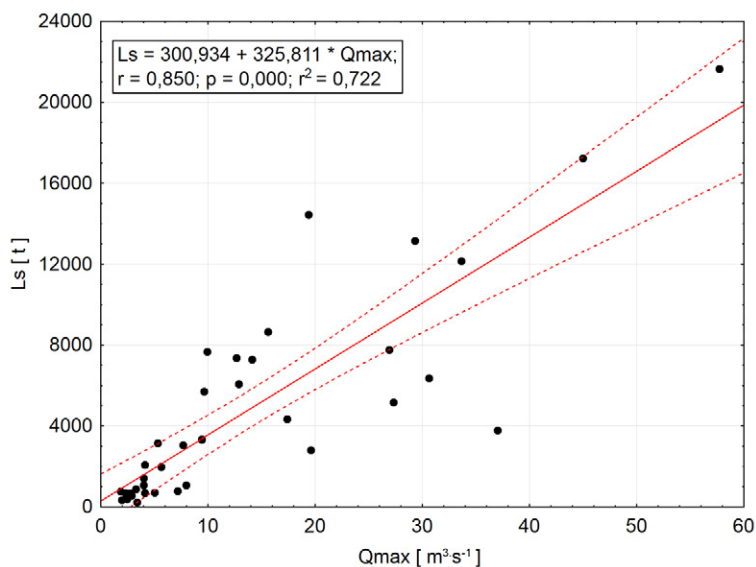
W 2006 r. wysoki roczny ładunek zawiesiny związany był zarówno z czynnikiem naturalnym jak i antropogenicznym. Mimo, że był to rok normalny pod względem wysokości opadu atmosferycznego (821 mm), (wg klasyfikacji H. Lorenc 1994), w czerwcu notowano ponadprzeciętne opady, przekraczające 230 mm (miesiąc skrajnie wilgotny), z maksymalnym dobowym opadem 65 mm. Dodatkowo w tym czasie notowano opady nieprzerwalnie przez 15 dni, które doprowadziły do znacznego nasączenia gleby wodą i sprzyjały powstawaniu osuwisk przykorytowych. Przepływy osiągały wówczas wartość ponad $19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Jak wynika z informacji uzyskanych z Urzędu Gminy w Gorlicach w 2006 r. prowadzono szereg prac inżynieryjnych, polegających na utwardzaniu dróg w bezpośrednim sąsiedztwie Bystrzanki, co w znaczący sposób przyczyniło się do wysokich koncentracji i ładunków zawiesiny. Nakładanie tych dwóch czynników, tzn. antropogenicznego i naturalnego, znacznie utrudnia ocenę wpływu człowieka na ilość transportowanej zawiesiny w Bystrzance w 2006 r.

Rok 2009 jest przykładem wysokiej koncentracji zawiesiny w potoku wyłącznie za sprawą działalności człowieka. Pod względem opadów był to rok normalny (wg klasyfikacji H. Lorenc 1994). Niskie przepływy i niewielkie wezbrania w 2009 r. charakteryzowały się wysokimi koncentracjami zawiesiny (do $7,2 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$). W ciągu całego roku ze zlewni odprowadzone zostało aż 1089 t zawiesiny. Materiał gromadzony był w korycie od sierpnia, kiedy rozpoczęto prace inżynieryjne przy użyciu ciężkiego sprzętu mające na celu m.in. przebudowę mostu, budowę drogi i stabilizację osuwisk, głównie przy korycie potoku.

Podobnie w latach 1997 i 1998 przeprowadzone inwestycje w korycie Bystrzanki, polegające głównie na zabezpieczeniu kładki oraz mostu przez umocnienie kamieniami, a także na wykonaniu nawierzchni asfaltowej biegnącej równoległe do potoku wraz z rowami odwadniającymi, spowodowały nagromadzenie znacznych ilości materiału do transportu rzecznego. W 1997 r. nie notowano bardzo wysokich przepływów w korycie (maksymalnie $13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), jednak w czasie niewielkich przepływów koncentracje zawiesiny osiągały wartość ponad $15 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. W 1998 r. dodatkowo, przy użyciu sprzętu ciężkiego, wykonano przejazd w bród przez Bystrzankę poprzez ułożenie w korycie betonowych płyt, co przyczyniło się do wytworzenia dużej ilości zwierzeliny. Wysokie ładunki zawiesiny (6353 t) w tym roku związane były także z wysoką roczną sumą opadu (rok wilgotny, 957 mm).

W celu zbadania związków pomiędzy ładunkiem zawiesiny odprowadzanej ze zlewni, a odpływem wody ze zlewni Bystrzanki w ciągu roku, maksymalnym przepływem oraz opadem, obliczono współczynnik Beta (Statistica v. 10.0). Ocenia on relatywny wkład każdej ze zmiennych niezależnych do predykcji zmiennej zależnej, którą jest ładunek roczny zawiesiny. Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, z istotnością $p < 0,05$, że w największym stopniu na roczny ładunek zawiesiny wpływają maksymalne

wartości przepływów, co wyjaśnia współczynnik Beta = 0,79, $r = 0,85$ (bardzo wysoka korelacja). Ładunek zawiesiny wynoszonej ze zlewni w ciągu roku (L_s), w relacji do maksymalnego chwilowego przepływu (Q_{max}) może być wyrażony formułą $L_s = 450,4239 + 334,6306 \cdot Q_{max}$ (ryc. 50).

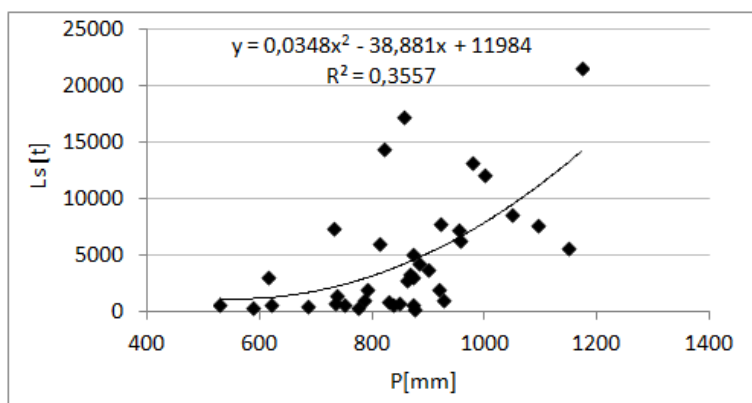


Ryc. 50. Zależność między maksymalnym przepływem Bystrzanki (Q_{max}) a rocznym ładunkiem zawiesiny (L_s) wynoszonej ze zlewni w latach 1970–2011

Fig. 50. The relationship between the maximum discharge (Q_{max}) and the annual load of suspended sediment carried out from the Bystrzanka catchment in the period 1970–2011

Dodatkowo przeprowadzona analiza statystyczna wykazała związek między rocznym ładunkiem zawiesiny wynoszonej ze zlewni a liczbą wezbrań w danym roku ($L_s = 704,2019L_{wezb} + 243,0847$). Ilość zawiesiny jest zatem wprost proporcjonalna do maksymalnego przepływu ($p < 0,00$) i liczby wezbrań ($p < 0,04$), przy czym w tym ostatnim przypadku korelacja jest przeciętna.

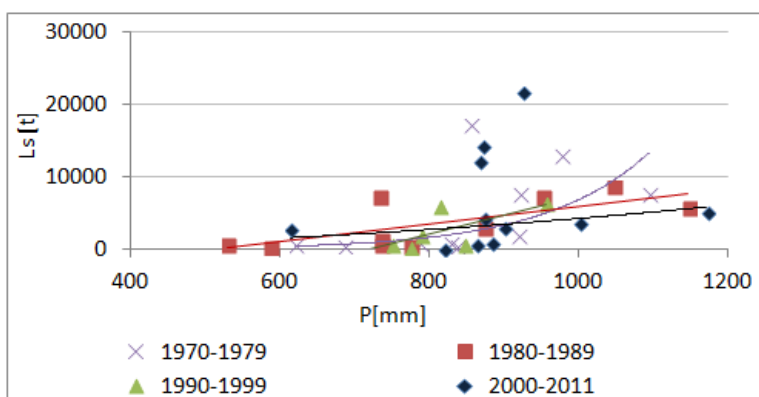
Relację między opadami atmosferycznymi a ilością zawiesiny odtransportowanej ze zlewni Bystrzanki opisuje równanie wielomianu drugiego stopnia $L_s = 0,0348 \cdot P^2 - 38,881 \cdot P + 11984$ (ryc. 51).



Ryc. 51. Zależność rocznego ładunku zawiesiny (L_s) wynoszonej przez Bystrzankę od rocznej sumy opadu (P) w latach 1970–2011

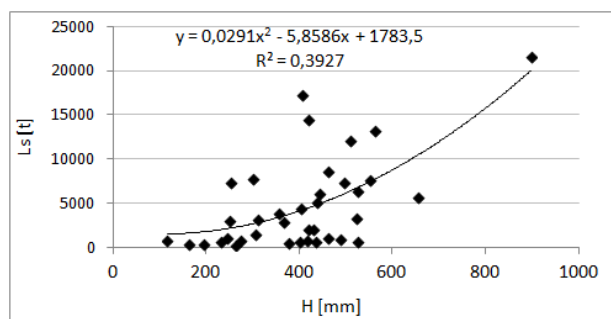
Fig. 51. Dependence of the annual load of suspended sediment (L_s) carried out from the Bystrzanka stream of the annual precipitation (P) in the period 1970–2011

Współczynnik korelacji wynosi $r = 0,60$, na poziomie istotności $p < 0,05$, przy czym najwyższa korelacja obejmuje lata 1980–1989 (ryc. 52, tab. 18). Wyższe wartości współczynnika korelacji ($r = 0,63$) uzyskano w przypadku zależności pomiędzy ładunkiem transportowanej zawiesiny, a odpływem w Bystrzance (ryc. 53), co potwierdzają uzyskane wyniki testowania statystycznego. Porównano także ładunek przetransportowanej zawiesiny w potoku w ciągu roku ze spłukiwaniem na stokach, przy czym wybrano tylko lata, w których zanalizowano spłukiwanie na trzech formach użytkowania (ziemniaki, zboże, łąka). Zależność ta, jest typu potęgowego ($y = 15,391x^{0,571}$) ze współczynnikiem korelacji $r = 0,56$ ($p < 0,05$).



Ryc. 52. Zależność ładunku zawiesiny (L_s) wynoszonej w Bystrzance w ciągu roku od rocznej sumy opadu (P) w kolejnych przedziałach czasowych

Fig. 52. Dependence of the annual load of suspended sediment (L_s) carried out from the Bystrzanka stream of the annual precipitation (P) in successive intervals



Ryc. 53. Zależność ładunku zawiesiny (L_s) wynoszonej ze zlewni Bystrzanki w ciągu roku od wielkości odpływu (H) w latach 1970–2011

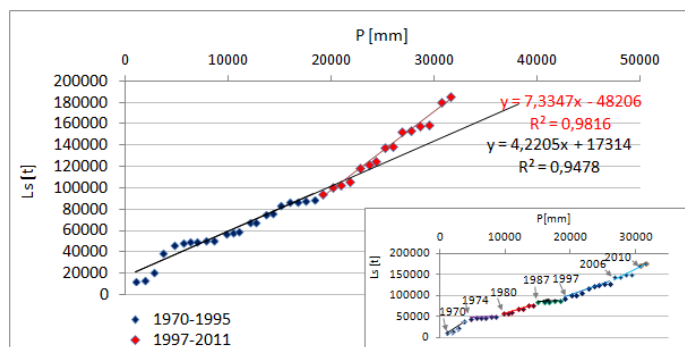
Fig. 53. Dependence of the annual load of suspended sediment (L_s) carried out from the Bystrzanka stream of the outflow (H) in the period 1970–2011

Tabela 18. Korelacja rocznego ładunku zawiesiny w Bystrzance i rocznej sumy opadu w Szymbarku w poszczególnych okresach

Lata	Równanie regresji	Współczynnik determinacji r^2	Współczynnik korelacji r	Poziom istotności statystycznej p
1970–1979	$L_s = 16,705e^{0,0057P}$	0,51	0,71	<0,05
1980–1989	$L_s = 12,10P - 6254$	0,49	0,71	<0,05
1990–1999	$L_s = 25,50P - 18265$	0,46	0,68	>0,05
2000–2011	$L_s = 0,004P^{1,982}$	0,05	0,23	>0,05
1992–2011	$L_s = 30,695P - 20955$	0,34	0,59	<0,05

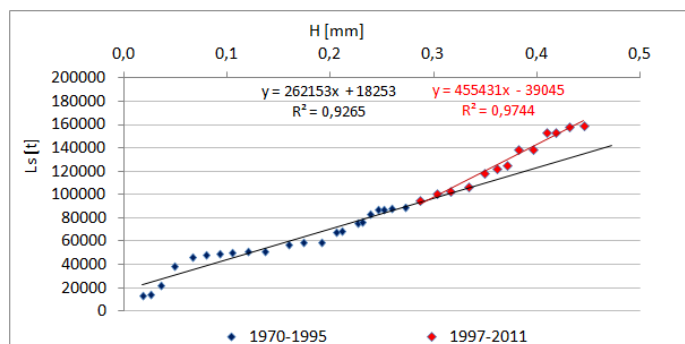
Źródło: Opracowanie własne

Dodatkowo dla całego okresu badawczego skonstruowano podwójną krzywą kumulacyjną, która jest prostą praktyczną metodą mającą szerokie zastosowanie do badań regularności długoterminowych danych hydrometeorologicznych. Metoda pozwala skonstruować wykres dwóch skumulowanych wartości w tym samym okresie i pozwala wskazać pojawiające się zmiany. Krzywa uzyskana dla ładunku zawiesiny posiada sześć istotnych załamań wskazujących okresy o szybszym lub wolniejszym przyroście zawiesiny (ryc. 54, tab. 19). Niewielkimi różnicami w ładunku zawiesiny charakteryzuje się okres 1974–1979 oraz 1989–1995. Wyraźny wzrost wynoszonego ładunku widoczny jest w okresach, w których odnotowano wysokie opady i dużą liczbę wezbrań (1974, 1980, 1987, 1997) lub wysokie przepływy maksymalne i znaczną liczbę prac inżynierskich na obszarze zlewni (2006, 2010). W krzywej dotyczącej odpływu wody zaobserwowano wyraźne załamanie w roku 1997 (ryc. 55, tab. 20).



Ryc. 54. Krzywa kumulacyjna opadu (P) w Szymbarku i ładunku materiału zawieszonego (Ls) w Bystrzance w okresie 1970–2011

Fig. 54. Double mass curve of precipitation (P) and load of suspended sediment (Ls) during 1970–2011



Ryc. 55. Krzywe kumulacyjna odpływu wody (H) i ładunku materiału zawieszonego (Ls) w Bystrzance w okresie 1970–2011

Fig. 55. Double mass curve of outflow (H) and load of suspended sediment (Ls) during 1970–2011

Tabela 19. Korelacja skumulowanych wartości opadu w Szymbarku i ładunku zawiesiny w Bystrzance w różnych przedziałach czasowych

Okres	Równanie regresji	Współczynnik determinacji r^2	Współczynnik korelacji r	Poziom istotności statystycznej p
1970–1995	$\Sigma L_s = 4,2205 \Sigma P + 17314$	0,95	0,97	<0,05
1970–1973	$\Sigma L_s = 10,036 \Sigma P - 351,15$	0,86	0,93	>0,05
1974–1979	$\Sigma L_s = 1,1799 \Sigma P + 42008$	0,95	0,97	<0,05
1980–1986	$\Sigma L_s = 4,6995 \Sigma P + 10488$	0,97	0,98	<0,05
1987–1995	$\Sigma L_s = 1,3759 \Sigma P + 64240$	0,98	0,99	<0,05
1997–2005	$\Sigma L_s = 5,4798 \Sigma P - 8959,8$	0,97	0,99	<0,05
2006–2011	$\Sigma L_s = 7,4403 \Sigma P - 50740$	0,86	0,93	<0,05

ΣL_s – skumulowane wartości ładunku materiału zawieszonego ; ΣP – skumulowane wartości opadu

Źródło: Opracowanie własne

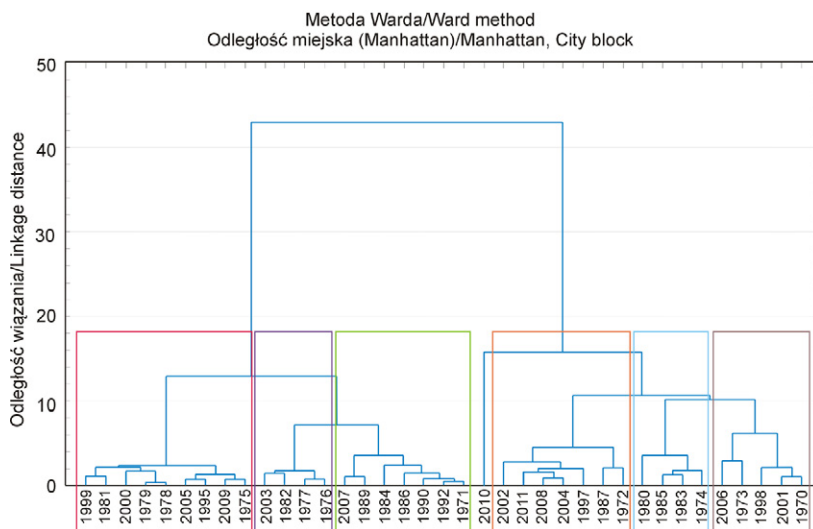
Tabela 20. Korelacja skumulowanych wartości ładunku zawiesiny (Ls) i odpływu (H) w Bystrzance w dwóch przedziałach czasowych

Okres	Korelacja	Współczynnik determinacji r^2	Współczynnik korelacji r	Poziom istotności statystycznej p
1970–1995	$\Sigma L_s=262153 \Sigma H+18253$	0,93	0,96	<0,01
1997–2011	$\Sigma L_s=455431 \Sigma H-39045$	0,97	0,99	<0,01

Źródło: Opracowanie własne

W kolejnych latach w okresie 1997–2011 ładunki zawiesiny wynoszonej ze zlewni, oszacowane na podstawie równania regresji liniowej dla lat 1970–1995 są o około 20% niższe od wartości obliczonej. O wyższych rzeczywistych wartościach ładunku zawiesiny w ostatnich latach zdecydował w głównej mierze wzrost częstości zdarzeń hydrometeorologicznych o charakterze ponadprzeciętnym oraz wzmożona aktywność człowieka w pobliżu koryta.

W celu wskazania podobnych lat pod względem ładunku transportowanej zawiesiny (Ls), odpływu ze zlewni (H), maksymalnego przepływu wody (Qmax) oraz rocznej sumy opadu (P) wykorzystano metodę analizy skupień (Statistica v. 10.0). Wydzielono 7 głównych grup różniących się pod względem poszczególnych wartości wprowadzanych zmiennych (ryc. 56). W grupie pierwszej znalazły się lata (1975, 1978, 1979, 1981, 1995, 1999, 2000, 2009) o rocznym ładunku wynoszonej zawiesiny od 706 do 3333 t, odpływie od 416 do 525 mm, przepływie maksymalnym $2,3-9,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz opadzie w zakresie od 736 do 926 mm. Jest to najliczniejsza grupa. Grupa druga (lata 2003, 1987, 1977, 1976) charakteryzuje się niższymi wartościami odpływu rzeczno (312–403 mm), przepływów maksymalnych ($2,8-5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) oraz opadu (530–685 mm) i podobnymi wartościami ładunku zawiesiny. Grupa trzecia cechuje się niskimi wartościami odpływu rocznego (do 265 mm) i stosunkowo dużym zróżnicowaniem ilości wyniesionego materiału zawieszonoego ze zlewni (243–3055 t). W grupie czwartej znalazły się lata z ładunkami zawiesiny do 7368 t (1987) i przepływami maksymalnymi do $37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Do tej grupy zaliczono m.in. rok 2008 z ładunkiem 4342 t oraz rok 1972 kiedy roczny transport zawiesiny był wyższy o 3420 t. Grupę piątą tworzą niektóre lata z dekady lat 80. XX w. charakteryzujące się najwyższymi sumami opadów i ładunkami materiału zawieszonoego w granicach 5710–8645 t. Grupa przedostatnia to lata podobne pod względem przepływu maksymalnego oraz odpływu ze zlewni. Znalazły się w niej m.in. lata 1970 oraz 2001, kiedy ilość wyniesionej zawiesiny, roczna suma opadu i odpływ były podobne. Wszystkie wyniki potwierdzają, że zmiany użytkowania ziemi nie znajdują jednoznacznego odbicia w transporcie zawiesiny. Oddzielną grupę tworzy rok 2010, o ekstremalnie wysokich wartościach, wszystkich analizowanych danych.



Ryc. 56. Dendrogram grupowania charakteryzujący powiązania między rocznym ładunkiem materiału zawieszonoego wynoszonego ze zlewni Bystrzanki, rocznym odpływem ze zlewni, maksymalnymi wartościami przepływu i sumą roczną opadu w Szymbarku w okresie 1970–2011.

Fig. 56. Dendrogram illustrated relationships between the annual load of suspended sediment carried out from the Bystrzanka catchment and the annual outflow, maximum discharge and the annual precipitation in Szymbark in the period 1970–2011

L. Starkel i E. Gil (1994) porównali rozmiary erozji gleb na stokach z ilością materiału zawieszonoego wynoszonego ze zlewni. Uzyskane wyniki dowodzą, że w latach 1973–1980 denudacja jednostkowa na stokach wyniosła 555 t*km^{-2} i była wyższa o 227 t*km^{-2} od ilości zawiesiny wyniesionej przez potok. W ostatnim okresie w zlewni dominują użytki zielone, których powierzchnia w 2010 r. wyniosła 419 ha. Według E. Gila (2009) średnie spłukiwanie z łąk wynosi $76,2 \text{ kg*ha}^{-1}$, a więc w latach 2000–2011 jedynie około 30 ton materiału zostało wyerodowane z powierzchni użytkowanych jako łąki, podczas gdy średni transport zawiesiny w potoku w tym czasie wyniósł 6074 t*rok^{-1} (4657 t*rok^{-1} bez 2010 r.). Zgodnie z modelem RUSLE w 2010 r. erozja z obszaru zlewni wyniosła $2,9 \text{ t*ha*rok}^{-1}$. Na duże ilości transportowanej zawiesiny wpływały m.in. prace inżynierskie w korycie potoku, wzrost inwestycji drogowych i wzmożona erozja w korycie.

Obliczono także, że średnia jednostkowa denudacja odpływowa (denudacja mechaniczna) w zlewni w latach 1970–1979 wyniosła $400 \text{ t*km}^{-2*rok}^{-1}$, natomiast 30 lat później $358 \text{ t*km}^{-2*rok}^{-1}$ (bez 2010 r.; $467 \text{ t*km}^{-2*rok}^{-1}$ z 2010 r.) Dla okresu 2000–2011 średnia roczna denudacja odpływowa zawierała się w granicach od $19 \text{ t*km}^{-2*rok}^{-1}$ (2007) do $1666 \text{ t*km}^{-2*rok}^{-1}$ (2010). Oszacowany na podstawie ładunku zawiesiny średni wskaźnik

obniżenia powierzchni terenu w zlewni w okresie 1970–1979 oraz 2000–2011 wyniósł odpowiednio 0,4 oraz 0,5 mm*rok⁻¹ (0,4 bez 2010 r.). Wartość wskaźnika obliczona przez E. Gila (1999) dla wszystkich upraw w zlewni, dla okresu 1980–1990, wyniosła 0,3 mm*rok⁻¹. Należy jednak zaznaczyć, że jest to jedynie wartość szacunkowa. Liczni autorzy zwracają uwagę na to, że nie można wnioskować o wielkości denudacji mechanicznej zlewni na podstawie ładunku zawiesiny transportowanego w korytach potoków. Materiał transportowany w potoku, oprócz erozji koryta, pochodzi z sieci dróg, rozcięć holocenijskich, wąskiej strefy przykorytowej (Froehlich 1978, 1982; Froehlich, Słupik 1980, Łajczak 1992), a w wielu przypadkach jest również efektem działalności człowieka. Dodatkowo drobnoziarnisty materiał nie jest wynoszony równomiernie z obszaru całej zlewni. W. Froehlich (1975) zwraca uwagę na to, że wskaźnik ten może być jednak podstawą porównania ilości usuniętego materiału z różnych rozmiarów dorzeczy.

Według A. Łajczaka (1989, 1992) średnia denudacja odpływowa na przedpolu Karpat nie przekracza 20 t*km⁻²*rok⁻¹, przy średniej wartości dla Polski wynoszącej 9 t*km⁻²*rok⁻¹ (Brański, Banasik 1996). Na wylesionym i rolniczo użytkowanym Pogórzu Karpackim zawiera się w szerokim przedziale od 200–1000 t*km⁻²*rok⁻¹, a we wschodniej części Beskidów oraz w Beskidzie Śląskim i Małym nie przekracza 90 t*km⁻²*rok⁻¹. Wysokie wartości denudacji odpływowej na obszarze Pogórza Karpackiego są według A. Łajczaka (1989, 1992) głównie skutkiem erozji brzegów koryt dużych rzek, zwłaszcza w dorzeczach Wisłoki i Sanu. W pozostałej części Beskidów oraz w kotlinach śródgórskich denudacja odpływowa wynosi od 150–270 t*km⁻²*rok⁻¹ (Łajczak 1989). Badania K. Krzemienia i K. Sobieckiego (1998) dowodzą jednak, że dla obszaru pogórskiego polskich Karpat podane wyżej wartości są nawet 40–krotnie zawyżone. Różnice wynikają z wyboru obszaru badań z odmiennymi deniwelacjami terenu, różnej wielkości ciekami oraz różną częstością opadów o dużej wydajności. Podawane w literaturze wartości wskaźnika denudacji odpływowej dla małych zlewni pogórskich mieszczą się w przedziale od 3,2 do 43 t*km⁻²*rok⁻¹ (Krzemień, Sobiecki 1998), a dla zlewni większych od 9,5 t*km⁻²*rok⁻¹ (Krzemień 1995) do 100 t*km⁻²*rok⁻¹ (Drużkowski 1998). J. Święchowicz (2002) podaje, że tempo odpływowej denudacji mechanicznej w zlewni Starej Rzeki (22,4 km²) zamyka się w przedziale od 12,3 t*km⁻²*rok⁻¹ (1990) do 75,6 t*km⁻²*rok⁻¹ (1987). W mniejszej zlewni potoku Trzemiśniańka (pow. 29 km², Pogórze Wiśnickie) w latach 2007–2008 denudacja odpływowa wyniosła 1,1 t*km⁻²*rok⁻¹ (Kopacz i in. 2011). W obszarach beskidzkich ładunki wynoszonej zawiesiny są znacznie wyższe. W zlewni Kamienicy Nawojowskiej (Beskid Sądecki) denudacja mechaniczna w mokrym roku 1970 wyniosła aż 1196 t*km⁻²*rok⁻¹, a w suchym 1971 r. 59 t*km⁻²*rok⁻¹ (Froehlich 1975).

Denudacja odpływowa w innych regionach świata wykazuje dość duże zróżnicowanie i nawiązuje do rzeźby terenu i użytkowania ziemi (m.in. Lenzi, Marchi 2000; Garcia-Ruiz i in. 2008; Navratil i in. 2012). Dla przykładu w Pirenejach wartości wskaźnika wynoszą od $120 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ (zlewnia San Salvador $0,92 \text{ km}^2$) do $57\,500 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ (zlewnia Araguas, $0,45 \text{ km}^2$) (Nadal-Romero i in. 2008), a w alpejskiej zlewni Galabre (22 km^2) od 200 do $680 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ (Navratil i in. 2012).

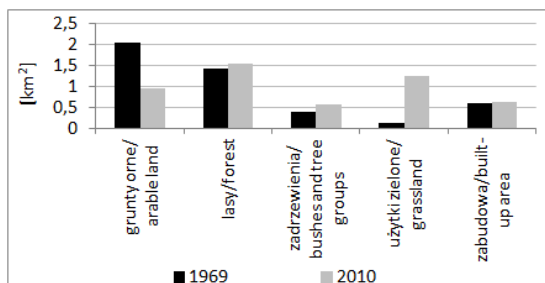
Powyższe przykłady denudacji odpływowej w różnych obszarach pozwalają wskazać, że Bystrzanka pod względem ładunku zawiesiny wykazuje cechy zlewni górskiej.

9. IMPLIKACJE ZMIAN ANTROPOPRESJI DLA DOSTAWY ZAWIESINY DO KORYTA

Rozpoznanie elementów systemowych zlewni, takich jak: stok, dno doliny czy też koryto, pozwala wyodrębnić zgodnie z założeniami uniwersalnego modelu systemu fluwialnego S.A. Schumm'a (1977) funkcjonowanie dwóch zasadniczych podsystemów: stokowego i korytowego cieku. Zachodzące zmiany w użytkowaniu ziemi mają swoje odzwierciedlenie w przebiegu procesów geomorfologicznych w zlewni. Wpływają one w głównej mierze na procesy spływu wody i spłukiwania gleby na stokach. Procesy te uzależnione są od wielu czynników. Według E. Gila (2009) średnia roczna wielkość spłukiwania gleby w latach 1969–2000, notowana na polach z uprawą ziemniaków w Szymbarku, wynosiła $25,7 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$. Była 18 razy większa niż na polach z uprawami zbóż i prawie 340 razy większa aniżeli na łąkach. Największe rozmiary spłukiwanie gleby osiąga podczas opadów typu nawalnego, o wysokości ponad 60 mm, czasie trwania 1–3 godzin i maksymalnym natężeniu chwilowym $1\text{--}4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

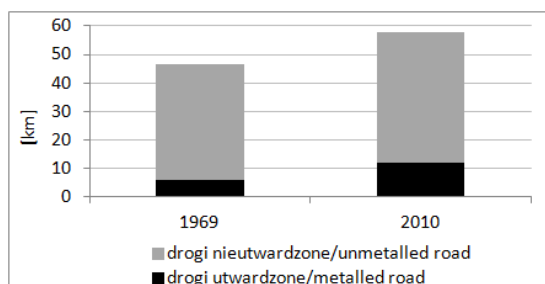
Jak wykazały badania prowadzone w różnych regionach świata, w zasileniu cieków w drobnoziarnisty materiał aktywny udział bierze tylko niewielka część powierzchni zlewni. Obejmuje ona wąską strefę wzdłuż koryta cieku głównego i dopływów (Froehlich 1978; Łajczak 1989, 1992; Walling, Webb 1992; Siakeu i in. 2004). W celu wykazania wpływu zmian w użytkowaniu ziemi w tej strefie na transport zawiesiny w Bystrzance, przy pomocy narzędzi ArcGis obliczono powierzchnie poszczególnych użytków rolnych i dróg w najbliższym sąsiedztwie cieku tj. w pasie 200 m od cieku głównego i najważniejszych dopływów, dla lat brzegowych analizowanego okresu. Analiza danych wykazała znaczące różnice w użytkowaniu ziemi w strefie przykorytowej, stanowiącej około 36% zlewni, pomiędzy rokiem 1969 i 2010. W 1969 r. w pobliżu cieków największą powierzchnię zajmowały grunty orne oraz las, odpowiednio $2,1 \text{ km}^2$ i $1,4 \text{ km}^2$. Użytki zielone zajmowały najmniejszą powierzchnię, jedynie $0,1 \text{ km}^2$ (ryc. 57). Długość sieci drogowej wynosiła wówczas 46,7 km, w tym dróg utwardzonych 6,1 km (ryc. 58). W 2010 r., wzdłuż potoku największą powierzchnię zajmowały lasy, które w sumie z przejściowymi terenami leśnymi (zespoły roślinności drzewiastej i krzewiastej) stanowiły 43% obszaru strefy przykorytowej. W tej strefie zmniejszyła się powierzchnia gruntów ornych o $1,1 \text{ km}^2$. Największa różnica dotyczy użytków zielonych, które zwiększyły powierzchnię o 22%. Spłukiwanie gleby uległo znacznemu zmniejszeniu. Średnie spłukiwanie gleby w 1969 r. wyniosło 2559 tony, natomiast w 2000 r. jedynie 432 tony (wyłączając drogi),

co stanowi jedynie 13% odtransportowanej zawiesiny ze zlewni. W 2010 r. długość dróg w strefie przykorytowej zwiększyła się o 11 km, co należy wiązać ze wzrostem liczby ludności i budynków w pobliżu koryta cieku. Zanotowano wtedy wzrost o 6% zarówno długości dróg o utwardzonej jak i nieutwardzonej nawierzchni.



Ryc. 57. Powierzchnia poszczególnych form użytkowania ziemi w pasie 200 m od koryta Bystrzanki i jej głównych dopływów w roku 1969 oraz 2010

Fig. 57. Land use in the 200 m width zone along the channels of Bystrzanka and its major tributaries in year 1969 and 2010



Ryc. 58. Długość dróg w pasie 200 m od koryta Bystrzanki i jej głównych dopływów w roku 1969 oraz 2010

Fig. 58. The length of roads in the 200 m width zone along the channels of Bystrzanka and its major tributaries in year 1969 and 2010

Wzrost powierzchni utwardzonych w zlewni przyczynia się do szybszego formowania fali kulminacyjnej wezbrania. Poprzez gęstą sieć dróg utwardzonych (ograniczona infiltracja) możliwość dostawy materiału z obszarów zasilania do koryta jest znacznie ułatwiona. Ponadto na powierzchni dróg, w okresach bez spływu powierzchniowego gromadzą się różnego rodzaju zanieczyszczenia komunikacyjne oraz luźny materiał klastyczny. Podczas opadów substancje te są z łatwością spłukiwane i wraz z wodą odpływają gęstym systemem dróg i przydrożnych rowów do koryta. Istotne dla dostawy i wielkości ładunku zawiesiny jest odnawianie i pogłębianie w ostatnim 10-letniu rowów przydrożnych. Jak wynika z danych z Urzędu Gminy w ostatnich

10 latach w zlewni Bystrzanki wykonywano wiele prac ziemno–budowlanych i modernizacyjnych, które przyczyniły się do wzrostu koncentracji zawiesiny podczas wezbrań, a w konsekwencji wzrostu ładunku zawiesiny wyniesionej ze zlewni.

Pomimo zmian w użytkowaniu ziemi w zlewni Bystrzanki, przejawiających się głównie zmniejszeniem powierzchni gruntów ornych, zanotowano wzrost ilości transportowanej w potoku zawiesiny. Nie można wykluczyć, że wzrost transportu zawiesiny wywołany przez inne formy antropopresji jest większy niż spadek ilości dostarczanego materiału przez zmianę gruntów ornych w łąki. Wzrost ilości materiału wynoszonego ze zlewni może być także spowodowany wzrostem długości dróg w zlewni, które ułatwiają i przyspieszają dostawę osadu do koryta potoku. Wskazuje na to wzrost gęstości dróg o $2,8 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ w 2010 r. w stosunku do 1965 r. Transport zawiesiny w cieku jest więc uzależniony od intensywnych prac regulacyjnych i stabilizacyjnych w potoku i jego bliskim sąsiedztwie. W ostatniej dekadzie materiał transportowany w potoku pochodzi zatem głównie z erozji koryt cieku głównego i dopływów, dróg, poboczy i rowów przydrożnych. Zdarzenia hydrometeorologiczne o charakterze ponadprzeciętnym a także antropopresja w zlewni Bystrzanki, spowodowały zwiększenie ilości zawiesiny wynoszonej ze zlewni w latach 2000–2011 w odniesieniu do okresu 1970–1979. Podobne wyniki uzyskali M. Kopacz i in. (2011), którzy prowadzili badania nad ładunkiem zawiesiny w latach 1982–1984 oraz 2007–2008 w zlewni górnej Raby. W przekroju Stróża wzdłuż biegu rzeki prowadzono intensywne prace ziemno–budowlane związane z modernizacją i przebudową drogi krajowej Kraków–Zakopane. Była to, podobnie jak w Bystrzance, jedna z najważniejszych przyczyn gwałtownego wzrostu zawartości zawiesiny w wodach Raby na tym odcinku.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że aktywność człowieka może spowodować istotne zmiany w wielkości ładunku zawiesiny wynoszonej z małej zlewni. Różnice w ilości wynoszonego ładunku zawiesiny w latach 1970–1979 oraz 2000–2011 nie odzwierciedlają zmian w użytkowaniu ziemi. Bardzo trudno jest jednoznacznie wskazać rolę człowieka w dostawie transportowanego materiału do koryta, gdyż z jednej strony zmniejszenie powierzchni użytkowanej jako grunty orne powoduje zredukowanie rozmiarów erozji, ale z drugiej strony aktywność człowieka przejawia się szeregiem prac w pobliżu potoku lub w samym jego korycie, co w znaczący sposób przyczynia się do wzrostu ładunku materiału wynoszonego ze zlewni. Należy jednak pamiętać, że działalność człowieka nakłada się na pojawiające się coraz częściej w ostatnim okresie zdarzenia hydrometeorologiczne o ponadprzeciętnym nasileniu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy środowiska geograficznego i transportu zawiesiny w ostatnim 40-leciu można wskazać dwa główne możliwe kierunki przyszłych zmian środowiska, mogące wpływać na ilość transportowanej zawiesiny w zlewni Bystrzanki. Antropopresja na obecnym poziomie lub jej wzrost będzie skutkowała pojawieniem się nowych form antropogenicznych (m.in. gabiony, rowy melioracyjne, mosty) i dalszym wzrostem sieci dróg o nieutwardzonej oraz utwardzonej nawierzchni. Ponadto prowadzenie dalszych prac inżynierskich w zlewni, zwłaszcza w pobliżu koryta, będzie skutkowało wzrostem ilości materiału drobnoziarnistego dostępnego do transportu rzeczno-geologicznego, zwłaszcza w zawieszeniu. Z kolei osłabienie antropopresji związane ze zmianą form działalności rolniczej, wzrostem powierzchni z użytkami zielonymi i obniżaniem granicy rolno-leśnej, będzie skutkowało zmniejszeniem natężenia procesów stokowych. Może to spowodować dalsze niedociążenie wód w korycie i w efekcie nasilenie erozji bocznej i wgłębnej. Jak podaje L. Starkel (1990) ograniczenie dostawy materiału ze stoków może prowadzić do zwiększenia drenażu wód podziemnych i przesuszania pokryw glebowo-stokowych w dnie doliny i na przyległych stokach. Ponadto może zmniejszyć się częstość i wielkość większych wezbrań, podczas których wody mogą zatapiać równinę zalewową w dnie doliny, gdyż zwiększa się zdolność pogłębianego koryta do prowadzenia większych ilości wód. W tych warunkach może dojść do zahamowania nadbudowania równiny zalewowej (Froehlich 1982; Łajczak 1992).

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analiza środowiska przyrodniczego i działalności człowieka w zlewni Bystrzanki w ostatnim 40-leciu, przeprowadzona na podstawie badań terenowych, laboratoryjnych oraz materiałów archiwalnych wykazała, że obok warunków hydrometeorologicznych, antropopresja ma wpływ na transport zawiesiny w zlewni Bystrzanki.

Przeprowadzone badania pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. Transport zawiesiny o znacznej zmienności nie wykazywał w latach 1970–2011 widocznych tendencji, a wartości ładunku tego materiału są zbliżone do obserwowanych w innych obszarach beskidzkich w Karpatach.
2. Przemiany społeczno-gospodarcze w latach 1970–2011 przyczyniły się do znacznych zmian w strukturze użytkowania ziemi w zlewni Bystrzanki. Zmiany te mają wielokierunkowe oddziaływanie na przebieg procesów modelujących koryto potoku i dostawę materiału ze stoków, takie jak:
 - W wyniku zmniejszenia powierzchni gruntów ornych (o 34%) na korzyść użytków zielonych (o 27%), wielkość splukiwania na stokach została zredukowana z 8,3 do 2,9 t*ha⁻¹*rok⁻¹.
 - Wzrost długości sieci drogowej (o 36 km), w tym dróg nieutwardzonych (o 28 km) oraz rowów przydrożnych, erodowanych w czasie intensywnych opadów, istotnie wpływa na dynamikę i wzrost wielkości ładunku transportowanej w korycie zawiesiny.
 - Wzrost powierzchni utwardzonych w zlewni przyczynia się do przyspieszenia formowania się kulminacji fal wezbraniowych, poprzez zmniejszenie zdolności infiltracji, a tym samym ułatwia dostawę materiału do koryta.
 - Intensyfikacja prac inżynierskich na obszarze zlewni, polegająca głównie na stabilizacji osuwisk, modernizacji przejazdów, mostów i dróg, udroźnieniu rowów przydrożnych oraz regulacji koryta potoku, zwiększyła w ostatnich latach dostępność drobnoziarnistego materiału do transportu rzecznego i przyczyniła się to wzrostu ładunku zawiesiny wynoszonej ze zlewni.
3. Jednym z najważniejszych źródeł dostawy zawiesiny do transportu rzecznego jest obecnie erozja boczna koryta głównego i jego dopływów o czym świadczą wyższe wartości koncentracji zawiesiny w czasie opadania fali wezbraniowej, stwierdzone w latach 2009–2011, odwrotnie niż w latach 70. XX w. Za główne źródła materiału transportowanego w czasie wezbrań należy również uznać osuwiska przykorytowe, których jęzory są

podcinanie przez cieki, pakiety materiału brzegowego odrywane wskutek znacznego nasiąkania gruntu wodą i obniżania stanu wody w korycie, a także działalność człowieka w pobliżu i w samym korycie potoku.

4. Czynniki naturalne podobnie jak czynniki antropogeniczne przyczyniają się do zmian w transportowanej zawieszynie:

- W latach 2000–2011, zanotowano o 14 dni z opadem więcej niż w latach 1970–1979, co przyczyniło się do wyższego współczynnika nieregularności odpływu oraz większej liczby wezbrań, które wywierają istotny wpływ na wielkość ładunku zawiesziny wynoszonej ze zlewni.
- Zróżnicowanie przestrzenne opadów deszczu ma kluczowe znaczenie dla wielkości wezbrań i przebiegu transportu zawiesziny w asymetrycznej, zróżnicowanej pod względem rzeźby, zlewni Bystrzanki. Wzrost wysokości opadów o charakterze burzowym w kierunku źródłowym powoduje wyższe wartości koncentracji zawiesziny po kulminacji wezbrania. Ponadto opady ulewne powodują wyższe przepływy i maksymalne koncentracje zawiesziny. Długi czas trwania opadów rozlewnych przyczynia się natomiast do zwiększenia rozmiarów ładunku zawiesziny wynoszonego ze zlewni.
- Najważniejszą rolę w transformacji koryta rzecznego Bystrzanki odgrywają przepływy o charakterze ekstremalnym ($\max 57 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). W dostawie materiału znacząca jest także rola dopływów, głównie z części beskidzkiej zlewni, gdzie stwierdzano niejednokrotnie wyższe koncentracje zawiesziny (nawet 4-krotne) niż w potoku głównym.

5. Nakładanie się czynników antropogenicznych na czynniki naturalnych bardzo utrudnia ocenę wpływu antropopresji na transport materiału zawieszzonego w korycie. Zmniejszenie powierzchni gruntów ornych w latach 1970–2011 o 34%, nie znalazło jednoznacznego odzwierciedlenia w spadku transportu zawiesziny w Bystrzance. Średni roczny transport zawiesziny w latach 1970–1979 był większy o 517 ton od ładunku materiału zawieszzonego wyniesionego ze zlewni w okresie 2000–2011, bez uwzględnienia roku 2010 oraz niższy o 900 ton od pełnego okresu 2000–2011. Relacja ta jest zakłócona przez działalność człowieka, która przejawia się w ostatnich latach pracami inżynieryjnymi w korycie potoku, dnie doliny i na stokach oraz wzrostem gęstości dróg. Potwierdzeniem jest wysoki udział frakcji piaszczystej w potoku w czasie wezbrań co wskazuje na allochtoniczne pochodzenie materiału (prace inżynieryjne znacznie przekształconych odcinków koryta Bystrzanki, uszkodzonych podczas wezbrań, udrażnianie rowów przydrożnych). Można zatem wnioskować, że to właśnie te formy antropopresji w głównej mierze decyduje o ilości zawiesziny wynoszonej ze zlewni.

6. Zmiany wprowadzone przez człowieka (inwestycje w korycie), podobnie jak ekstremalne opady, mają największy wpływ na transport zawiesiny i maskują efekty wpływu powolnych zmian antropogenicznych (użytkowanie ziemi) na procesy morfogenetyczne w zlewni.
7. W kolejnych latach natężenie erozji na stokach w badanej zlewni będzie prawdopodobnie maleć lub ukształtuje się na stałym poziomie, charakterystycznym dla obszarów zajętych przez trwałe użytki zielone. Jednocześnie nowe inwestycje i prace ziemno–budowlane w zlewni Bystrzanki oraz pojawiające się intensywne opady powodujące ekstremalne przepływy wody, przyczynią się będą do znacznej erozji w korycie i wynoszenia wysokich ładunków zawiesiny.

LITERATURA

- Adamczyk B., Maciaszek W., Januszek K., 1973, *Gleby gromady Szymbark i jej wartość użytkowa*, [w:] L. Starkel (red.), *Gleby i zbiorowiska leśne okolic Szymbarku*, Dokumentacja Geograficzna, 1, s. 16–66.
- Allen J.R.L., 1965, *A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments*, *Sedimentology*, 5, s. 89–191.
- Asselman N.E.M., 1999, *Suspended sediment dynamics in a large drainage basin—the River Rhine*, *Hydrological Processes*, 13, s. 1437–1450.
- Baca P., 2008, *Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybarik basin, Slovakia*, *Hydrological Processes*, 53, s. 224–235.
- Bagnold R.A., 1966, *An approach to the sediment transport problem from general physics*, *Prof. Paper 422–1*, U. S. Geol. Surv., 37 ss..
- Banasik K., Hajduk L., 2005, *Badania granulometrii rumowiska unoszonego w małej rzece nizinnej*, *Acta Agrophysica*, 5, 2, s. 253–262.
- Bochenek W., Gil E., 2010, *Zróżnicowanie spływu powierzchniowego i splukiwania gleby na polstkach doświadczalnych o różnej długości (Szymbark, Beskid Niski)*, *Prace i Studia Geograficzne*, 45, s. 265–278.
- Boer D.H., 1997, *Changing contribution of suspended sediment sources in small basins resulting from European settlement on the Canadian prairies*, *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, s. 623–639.
- Bogen J., 1980, *The hysteresis effect of sediment transport systems*, *Norsk geogr. Tidsskr.*, 34, s. 45–54.
- Bogen J., 1992, *Monitoring grain size of suspended sediments in rivers*, *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*, IAHS Publ., 210.
- Brański J., 1980, *Sediment run-off from the catchment area of the Carpathians rivers*, *Acta Hydrobiol.*, Kraków, 1, s. 89–100.
- Brański J., 2003, *Współczesne i przyszłe zmiany w strukturze przestrzennej obszarów wiejskich – wybrane zagadnienia*, [w:] B. Górz, C. Guzik (red.), *Współczesne przeobrażenia i przyszłość polskiej wsi*, *Studia Obszarów Wiejskich*, 4, s. 11–25.
- Brański J., Banasik K., 1996, *Sediment yields and denudation rates in Poland* [w:] *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives* (Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996), IAHS, 236.
- Bielecki H., 1975, *Las a gospodarka wodna*, *Zeszyty Prob. Post. Nauk Rol.*, 162, s. 389–401.
- Brasington J., Richards, K., 2000, *Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills*, *Hydrological Processes*, 14, s. 2559–2574.
- Bryndal T., Cabaj W., Gębica P., Krocak R., Suligowski R., 2010, *Gwałtowne wezbrania spowodowane nawałnymi opadami deszczu w zlewni potoku Wątok (Pogórze Ciężkowickie)*, [w] T. Ciupa, R. Suligowski (red.), *Woda w badaniach geograficznych*, Wyd. Instytut Geografii Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Kielce, s. 307–319.
- Bucała A., 2012, *Współczesne zmiany środowiska przyrodniczego dolin potoków Jaszczce i Jamne*, *Prace Geograficzne IGiPZ PAN*, Warszawa, 231, 145 ss.
- Bucała A., Budek A., 2011, *Zmiany morfologii koryt wskutek opadów ulewnych na przykładzie potoku Suszanka, Beskid Średni*, *Czasopismo Geograficzne*, 82, s. 321–332.
- Bucała A., Starkel L., 2013, *Postępująca recesja rolnictwa a zmiany w środowisku przyrodniczym polskich Karpat*, *Przegląd Geograficzny*, 85, s. 15–29.

- Bull L.J., Lawler D.M., 1995, *Downstream changes in suspended sediment fluxes in the River Severn, UK*, [w:] W. R. Osterkamp (red.) *Effects of scale on interpretation and management of sediment and water quality*, IAHS Publ., 226, s. 27–36.
- Byczkowski A., 1999, *Hydrologia*, SGGW, Warszawa.
- Cebulak E., Limanówka D., Malota A., Niedbała J., Pyrc R., Starkel L., 2008, *Przebieg i skutki ulewy w dorzeczu górnego Sanu w dniu 26 lipca 2005 roku*, Materiały Badawcze: Seria Meteorologia, 40, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, 56 ss.
- Chelmecki W., Skąpski R., Soja R., 1998–1999, *Reżim rzek karpaccich w Polsce*, [w:] W. Chelmecki, R. Soja (red.), *Hydrologia karpacka z perspektywy końca XX wieku*, Folia Geogr., ser. Geogr.–Phys., 29–30, s. 67–80.
- Chomicz K., 1951, *Ulewy i deszcze nawalne w Polsce*, Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej, 2, 3, s. 17–88.
- Church M., Slaymaker D., 1989, *Disequilibrium of Holocene sediment yield in glaciated British Columbia*, Nature, 337, s. 452–454.
- Ciepielowski A., 1987, *Badania związków pomiędzy podstawowymi parametrami fal wezbraniowych w wybranych profilach rzek*, SGGW–AR, Warszawa, 113 ss.
- Ciupa T., 2003, *Procesy fluwialne w zlewni o wysokim stopniu urbanizacji na przykładzie Kielc*, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska SGGW, Warszawa, 12, 1, s. 24–34.
- Ciupa T., 2008, *Wpływ częstotliwości pomiarów transportu fluwialnego na określenie jego wielkości i dynamiki podczas wezbrań w zlewniach o zróżnicowanym użytkowaniu na przykładzie rzeki Silnicy i Sufraganiec (Kielce)*, Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, SGGW, Warszawa, 17, 2, s. 117–126.
- Ciupa T., 2009, *Wpływ zagospodarowania terenu na odpływ i transport fluwialny w małych zlewniach na przykładzie Sufragańca i Silnicy (Kielce)*, Wyd. UJK, Kielce.
- Ciupa T., 2012, *Znaczenie dróg na obszarze zurbanizowanym w kształtowaniu odpływu i transportu fluwialnego (Kielce)*, Landform Analysis, 19, s. 17–28.
- Costa J.E., Miller A.J., Potter K.W., Wilcock P.R. (red.), 1995, *Natural and anthropogenic influences in fluvial geomorphology*, Geophys. Monogr. Ser., AGU, Washington, 89, 239 ss.
- Cyberska K., Cyberski J., 1964, *Wezbranie potoku Świdnik po ulewnych deszczach w maju 1963 r.*, Gazeta Obserwatora, PIHM, 2, s. 3–6.
- Cyberski J., Pasternak K., 1973, *Skład granulometryczny unosi wód rzek karpaccich na tle jakości podłoża ich zlewni*, Probl. Zagosp. Ziem Górskich, 12, s. 131–152.
- Dauksza L., Gil E., Kotarba A., Kramarz K., Niemirowska J., Słupik J., Starkel L., 1970, *Badania fizycznogeograficzne otoczenia Stacji Naukowo-Badawczej Instytutu Geografii PAN w Szymbarku*, Dokumentacja Geogr., 3, 72 ss.
- Dębski K., 1954, *Prawdopodobieństwo zjawisk hydrologicznych i meteorologicznych*, PIHM, Warszawa.
- Drużkowski M., 1998, *Współczesna dynamika, funkcjonowanie i przemiany krajobrazu Pogórza Karpackiego*, Instytut Botaniki UJ, Kraków, 285 ss.
- Dynowska I., 1971, *Typy reżimów rzecznych w Polsce*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., 28, 150 ss.
- Dynowska I., Jankowski A. T., Soja R., 1985, *Metody oceny wpływu gospodarczej działalności człowieka na odpływ*, Folia Geographica, 18, s. 105–119.
- Faluccci A., Maiorano L., Boitani L., 2007, *Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation*, Landscape Ecology, 22, s. 617–631.

- Figuła K., 1966, *Badania transportu rumowiska w ciekach górskich i podgórskich o różnej budowie geologicznej i użytkowaniu*, Wiad. IMUZ, 3, 6, s. 131–145.
- Frandonfer M., Lehotsky M., 2011, *Channel adjustment of a mixed Bedrock-alluvial river in response to recent extreme flood events (the Upper Topľa River)*, *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 11, 2, s. 59–71.
- Froehlich W., 1975, *Dynamika transportu fluwialnego Kamienicy Nawojowskiej*, *Prace Geogr.*, IGiPZ PAN, 114 ss.
- Froehlich W., 1978, *The role of land use in varying the suspended load during continuous rainfall (Kamienica Nawojowska catchment, Flysch Carpathians)*, *Geographia Polonica*, 41, s. 27–37.
- Froehlich W., 1982, *Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryta w górskiej zlewni fliszowej*, *Prace Geogr.*, IGiPZ PAN, 143, 144 ss.
- Froehlich W., 1986, *Sediment delivery model for the Homerka drainage basin*, [w:] R.F. Hadley (red.), *Drainage basin sediment delivery*, IAHS Publ., 159, s. 403–412.
- Froehlich W., 1991, *Sediment production from unmetalled road surface*, *Sediment and stream water quality in a changing environment: trends and explanation* (Proceeding of the Vienna Symposium, August 1991), IAHS, 203, s. 21–30.
- Froehlich W., Słupik J., 1980, *Drogi polne jako źródło dostawy wody i zwietrzelin do koryta cieku*, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 235, s. 257–268.
- Froehlich W., Walling, D.E., 1997, *The role of unmetalled roads as a sediment source in the fluvial systems of the Polish Flysch Carpathians*, [w:] D.E. Walling, J.L. Probst (red.) *Human Impact on Erosion and Sedimentation*, IAHS Publ., 245, s. 159–168.
- Gao P., Pasternack G.B., Bali K.M., Wallender W. W., 2007, *Suspended-sediment transport in an intensively cultivated watershed in southeastern California*, *Catena*, 69, 3, s. 239–25.
- García-Ruiz J. M., Regüés D., Alvera B., Lana-Renault N., Serrano-Muela P., Nadal-Romero E., Navas A., Latron J., Martí-Bono C., Arnáez J., 2008, *Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the Central Pyrenees*, *Journal of Hydrology*, 356, s. 245–260.
- Gellis A.C., 2012, *Factors influencing storm-generated suspended-sediment concentrations and loads in four basins of contrasting land use, humid-tropical Puerto Rico*, *Catena*, 19 ss.
- Gerlach T., 1976, *Współczesny rozwój stoków w polskich Karpatach fliszowych*, *Prace Geograficzne IG PAN*, 122, 116 ss.
- Gil E., 1976, *Splukiwanie gleby na stokach fliszowych w rejonie Szymbarku*, *Dokumentacja Geograficzna*, 2, 65 ss.
- Gil E., 1979, *Typologia i ocena środowiska przyrodniczego okolic Szymbarku*, *Dokumentacja Geograficzna*, 5, 91 ss.
- Gil E., 1999, *Obieg wody i splukiwanie na fliszowych stokach użytkowanych rolniczo w latach 1980–1990*, *Zeszyty IGiPZ PAN*, 60, 78 ss.
- Gil E., 2009, *Ekstremalne wartości splukiwania gleby na stokach użytkowanych rolniczo w Karpatach Fliszowych*, [w:] W. Bochenek, M. Kijowska (red.), *Funkcjonowanie środowiska przyrodniczego w okresie przemian gospodarczych w Polsce*, *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, s. 191–218.
- Gil E., Słupik J., 1972, *The influence of the plant cover and land use on the surface run-off and wash down during heavy rain*, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 6, s. 181–189.
- Gorczyca E., 2004, *Przekształcenie stoków fliszowych przez procesy masowe podczas katastrofalnych opadów (dorzecze Łososiny)*, *Wydawnictwo UJ, Kraków*, s. 101.

- Goudie A.S., 2006, *Global warming and fluvial geomorphology*, *Geomorphology*, 79, s. 384–394.
- Gregory K.J., 2006, *The human role in changing river channels*, *Geomorphology*, 79, s. 172–191.
- Gregory K.J., Walling D.E., 1973, *Drainage basin: form and processes*, London, Edward Arnold, 458 ss.
- Hess M., 1965, *Piętra klimatyczne w Polskich Karpatach Zachodnich*, *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geogr.*, 11, 268 ss.
- Hess M., Niedźwiedź T., Obrębka–Starkłowa B., 1977, *Stosunki termiczne Beskidu Niskiego (metoda charakterystyki reżimu termicznego obszarów górskich)*, *Prace Geogr. IGiPZ PAN*, 123, 101 ss.
- Instrukcja urządzania lasów*, 2003, Państwowe Gospodarstwo leśne, Lasy Państwowe, załącznik do zarządzenia nr 43 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 18 kwietnia 2003 r.
- Kaczmarek Z., 1970, *Metody statystyczne w hydrologii i meteorologii*, WKiŁ, Warszawa.
- Kaczorowska Z., 1962, *Opady w Polsce w przebiegu wieloletnim*, *Prace Geogr.*, PAN, 33.
- Kasza I., 1992, *Laserowa metoda określania składu granulometrycznego utworów gliniastych, pylastych i ilastych*, *Przegląd Geologiczny*, 40, 5, s. 323–325.
- Kaszowski L., Kotarba A., 1970, *Wpływ katastrofalnych wezbrań na przebieg procesów fluwialnych*, *Prace Geogr. IG PAN*, 80, s. 5–87.
- Kijowska M., 2010, *Charakterystyka okresu wegetacyjnego w Szymbarku w latach 1968–2009*, *Rocznik Świętokrzyski, Nauki Przyrodnicze B, KTN, Kielce*, s. 29–43.
- Kijowska M., 2011, *Geneza i przebieg wezbrań we fliszowej zlewni Bystrzanki w latach 1995–2009*, *Monitoring Środ. Przyr.*, 12, s. 59–68.
- Kijowska M., Bochenek W., 2011, *Dynamics of suspended material carried out from the flysch Bystrzanka catchment during selected rainfall events in the period of 1997–2008*, *Quaest. Geogr.*, 30, 1, s. 47–56.
- Kijowska-Strugała M., 2011, *The role of downpours in transformation of slopes in the Polish Carpathian Foothills*, *Studia Geomorphologica Carpatho–Balcanica*, 45, s. 67–85.
- Kijowska-Strugała M., 2012, *Impact of downpours on fluvial processes in the Polish Carpathians as exemplified by the Bystrzanka stream*, *Studia Geomorphologica Carpatho–Balcanica*, 46, s. 25–40.
- Kijowska-Strugała M., Demczuk P., 2013, *Modelowanie procesów stokowych: erozji i depozycji w okresie przemian środowiskowych (1969–2010) w małej fliszowej zlewni karpackiej*, *maszynopis*, 16 ss.
- Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008, 2009*, *Rocz. Glebozn.*, 60, 2, s. 5–16.
- Klimek K., 1987, *Man's impact on fluvial processes in the Polish Western Carpathians*, *Geografiska Annaler*, 69A, 1, s. 123–131.
- Knighton A.D., 1987, *River channel adjustment – the downstream dimension*, [w:] K. Richards (ed.), *River Channels: Environment and Process*, s. 95–128.
- Kopacz M., Drzewiecki W., Twardy S., 2011, *Badania nad zawartością zawiesiny ogólnej w wodach powierzchniowych zlewni Raby zasilających Zbiornik Dobczycki*, *Nauka Przyr. Technol.*, 5, 4, s. 1–9.
- Kostrowicki A.S., 1992, *System człowiek – środowisko w teorii ocen*, *Prace Geograficzne IGiPN PAN*, 156, 115 ss.

- Kostrzewski A., Mazurek, A., Zwoliński, Z., 1994, *Dynamika transportu fluwialnego górnej Parsęty jako odbicie funkcjonowanie systemu zlewni*, Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich, Instytut Badań Czwartorzędu Uniwersytetu im. A. Mickiewicza, 165 ss.
- Kotarba A., 1970, *Charakterystyka rzeźby okolic Szymbarku*, [w:] L. Starkel (red), *Badania fizycznogeograficzne otoczenia Stacji Naukowo-Badawczej Instytutu Geografii PAN w Szymbarku*, Dokumentacja Geograficzne, 3, s. 7–24.
- Kotarba A., 1986, *Rola osuwisk w modelowaniu rzeźby beskidzkiej i pogórskiej*, Przegląd Geograficzny, 3, s. 7–24.
- Kozak J., 2005, *Zmiany powierzchni lasów w Karpatach Polskich na tle innych gór świata*, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 135 ss.
- Kozikowski H., 1956, *Geologia płaszczowiny magurskiej i jej okien tektonicznych na południowy zachód od Gorlic*, Z badań geologicznych w Karpatach, 1, s. 47–91.
- Kroczak R., 2010, *Geomorfologiczne i hydrologiczne skutki funkcjonowania dróg polnych na Pogórzu Ciężkowickim*, Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 225, 138 ss.
- Kroczak R., Soja R., 2011, *Gęstość dróg polnych na Pogórzu Ciężkowickim na tle regionów południowej Polski*, Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich, PAN, Kraków, 58, s. 41–52.
- Krzemień K., 1976, *Współczesna dynamika koryta potoku Konina w Gorcach*, Folia Geographica, 10, s. 87–122.
- Krzemień K., 1992, *The high mountain fluvial system the western Tatra perspective*, Zesz. Nauk., UJ Prace Geogr., 60, s. 51–65.
- Krzemień K., 1995, *Odprowadzanie materiału rozpuszczonego i zawiesiny z pogórskiej zlewni Starej Rzeki i Dworskiego Potoku*, [w:] L. Kaszowski (red.), *Dynamika i antropogeniczne przeobrażenia środowiska przyrodniczego Progu Karpat między Rabą a Uszwicą*, IG UJ, Kraków, s. 227–239.
- Krzemień K., 2003, *The Czarny Dunajec River, Poland, as ex ample of human – induced development tendencies in a mountain river channel*, Landform Analysis, 4, s. 57–64.
- Krzemień K., Gorczyca E., 2010, *Ewolucja systemów korytowych pod wpływem antropopresji (na przykładzie wybranych rzek karpaccich)*, [w:] S. Cioka, P. Migoń (red.), *Przekształcenia struktur regionalnych, Aspekty społeczne, ekonomiczne i przyrodnicze*, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego UW, Wrocław, s. 431–439.
- Krzemień K., Sobiecki K., 1998, *Transport of dissolved and suspended matter in small catchments of the Wieliczka Foothills near Łazy*, [w:] W. Chelmiński (red.), *The Carpathian Foothills Marginal zone, Man and Environment*, Prace Geograficzne IG UJ, 103, s. 83–100.
- Kundzewicz Z. W., 2011, *Zmiany klimatu i ich skutki – obserwacje i projekcje*, Landform Analysis, 15, s. 39–49.
- Lach J., 1984, *Geomorfologiczne skutki antropopresji rolniczej w wybranych częściach Karpat i ich Przedgórz*, Prace Monogr., WSP, Kraków, 64, 142 ss.
- Lach J., Wyźga B., 2002, *Channel incision and flow increase of the upper Wisłoka River, southern Poland, subsequent to the reforestation of its catchment*, Earth Surface Processes and Landforms, 27, s. 445–462.
- Latocha A., 2006, *Zmiany użytkowania ziemi w czasach historycznych i ich wpływ na procesy rzeźbotwórcze na stokach i w korytach rzecznych w Sudetach Kłodzkich*, Przegląd Geograficzny, 78, 3, s. 339–363.

- Lawler D.M., Grove J.R., Couperthwaite J.S., Leek J.G.L., 1999, *Downstream change in river bank erosion rates in the Swale–Ouse system, Northern England*, Hydrological Processes 13, s. 977–992.
- Lenzi M., Marchi, L., 2000, *Suspended sediment load during floods in a small stream of the dolomites (northeastern Italy)*, Catena, 39, s. 267–282.
- Lipský Z., 2001, *Present land use changes in the Czech cultural landscape: driving forces and environmental consequences*, Moravian Geographical Reports, 9, 2, s. 2–14.
- Lorenc H., 1994, *Ocena zmienności temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w okresie 1901–1993 na podstawie obserwacji z wybranych stacji meteorologicznych w Polsce*, Wiadomości IMGW, 38, s. 43–59.
- Loughran R.J., Campbell, B.L., Elliott, G.L., 1986, *Sediment dynamics in a partially cultivated catchment in New South Wales, Australia*, Journal of Hydrology, 83, s. 285–297.
- Ludwig W., Probst J. L., 1998, *River sediment discharge to the oceans: present–day controls and global budgets*, Am. Journ. Sci., 298, s. 265–295.
- Łajczak A., 1989, *Zróżnicowanie transportu zawiesziny w karpackiej części dorzecza Wisły*, Dokumentacja Geograficzna, 5, 85 ss.
- Łajczak A., 1992, *Odptyw materiału unoszonego ze zlewni karpackich dopływów Wisły*, Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich, 35, s. 61–75.
- Łajczak A., Margielewski W., Starkel L., Święchowicz J., Pietrzak M., 2008, *Współczesna ewolucja Karpat sflizowych*, [w:] L. Starkel, A. Kostrzewski, A. Kotarba, K. Krzemień (red.), *Współczesne przemiany rzeźby Polski*, IGiGP UJ, Kraków, s. 57–133.
- MacDonald D., Crabtree J., Wiesinger G., Dax T., Stamou N., Fleury P., Gutierrez Lazpita J., Gibon A., 2000, *Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: Environmental consequences and policy response*, Journal of Environmental Management, 59, s. 47–69.
- Marcus W.A., 1989, *Lag–time routing of suspended–sediment concentrations during unsteady flow*, Bulletin of the Geological Society of America, 101, s. 644–651.
- Messerli B., Grosjean M., Hofer T., Nuñez L., Pfister C., 2000, *From nature–dominated to human–dominated environmental changes*, Quaternary Science Reviews, 19, s. 459–479.
- Mitasova H., Mitas L., Brown W.M., Johnston D.M., 1998, *Multidimensional soil erosion/deposition modeling and visualization using GIS*, Final report for USA CERL, University of Illinois, Urbana–Champaign, IL.
- Mokwa M., 2002, *Sterowanie procesami fluwialnymi w korytach rzek przekształconych antropogenicznie*, Zesz. Nauk. AR, Wrocław, 439, 189, 135 ss.
- Morawski S., 1883, *Sąddeckczyzna*, Kraków, 237 ss.
- Mrozek T., Wójcik A., Granoszewski W., 2008, *Osuwiska okolic Szymbarku – od kartowania geomorfologicznego do ograniczania zagrożeń*, Konferencja Jubileuszowa – 40–lecie Stacji Naukowo–Badawczej IGiPZ PAN w Szymbarku, XVIII Ogólnopolskie Sympozjum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, Streszczenia referatów i posterów, 1ss.
- Nadal–Romero E., Latron J., Marti–Bono C., Regüés D., 2008, *Temporal distribution of suspended sediment transport in a humid Mediterranean badland area: The Arauás catchment, Central Pyrenees.*, Geomorphology, 97, s. 601–616.
- Navratil O., Evrard O., Esteves M., Legout C., Ayrault S., Némery J., Mate–Marin A., Ahmadi M., Lefèvre I., Poirel A., Bonté P., 2012, *Temporal variability of suspended sediment sources in an alpine catchment combining river/rainfall monitoring and sediment fingerprinting*, Earth Surface Processes and Landforms, (wileyonlinelibrary.com).

- Niedbala J., Soja R., 1998, *Odplyw z opadu nawalnego w dniu 18 maja 1996 roku w Suloszowej*, Dokumentacja Geograficzna, IGiPZ PAN, 11, s. 31–38.
- Niemirska J., 1970, *Charakterystyka hydrograficzna zlewni Bystrzanki i Bielanki*, Dokum. Geogr., 3, s. 25–38.
- Niemirski M., 1974, *Dynamika wspolczesnych koryt potokow gorskich*, Zesz. Nauk. UJ Prace Geogr., 34, 98 ss.
- Nowocien E., Podolski B., Wawer R., 2002, *Characteristics of agriculture development in Polish Carpathian Mountains*, Visnyk of Lviv State Agrarian University, Organization of Land Exploitation and Land Cadastre, 5, s. 87–91.
- Obrębska-Starkel B., 1968, *Pokrywa sniezna we wschodniej czesci Gorców*, Prace Geograficzne UJ, 18, 27–51.
- Obrębska-Starkel B., 1973, *Stosunki mezo- i mikroklimatyczne w Szymbarku*, Dokum. Geogr. IG PAN, 5, 123 ss.
- Olędzki J. R., 2011, materiały archiwalne, Katedra Geoinformatyki i Teledetekcji, Uniwersytet Warszawski.
- Oygarden L., Deelstra J., Eggestad H. O., Vandsemb S.M., 2003, *Sediment transport in agricultural catchments—the need for methods to trace sediment sources*, [w:] J. Bogen, T. Fergus, D. E. Walling (red.), *Erosion and sediment transport measurement in rivers: technological and methodological advances*, IAHS Press, Wallingford, UK, 283, s. 79–87.
- Ozga-Zielińska M., Brzeziński J., 1994, *Hydrologia stosowana*, PWN, Warszawa.
- Pardé M., 1957, *Rzeki*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Park J.K., 1991, *Characteristics of sediment discharge in a mountain stream viewed from the variation pattern of suspended sediment concentration*, Transactions, Japanese Geomorphological Union, 12, s. 51–67.
- Phillips J.D., 2003, *Alluvial storage and the long-term stability of sediment yields*, Basin Research, 15, s. 153–163.
- Polakow W.W., 1948, *Gidologiczeskije rasczoty pri projektirowanii sooruzenij na riekach malych bassiejnow*, Gosenergoizdat, Moskwa – Leningrad.
- Prokop P., Soja R., 1995, *Drogi jako element antropogenicznego przekształcenia środowiska*, Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Monitoring Geosystemów Górskich, Szymbark, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, s. 91–98.
- Radecki-Pawlik A., 2006, *Podstawy hydrogeomorfologii cieków górskich dla inżynierów środowiska, biologów, geografów i ekologów*, Instytut Nauk o Środowisku UJ, Kraków, 125 ss.
- Radwan-Debski R., 1995, *Szacunek opadu efektywnego na podstawie stopnia uszczelnienia terenu*, Gospodarka Wodna, 12, s. 315–318.
- 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*, Kraków–Zakopane, Wydaw. Instytutu Botaniki PAN, s. 403–406.
- Reid L.M., Dune T., 1984, *Sediment production from forest road surfaces*, Water Resources Research, 20, 11, s. 1753–1761.
- Renard K.G., Foster G. R., Weesies G.A., Porter J.P., 1991, *RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation*, Journal of Soil and Water Conservation, 46, s. 30–33.

- Richards K.S., 2002, *Drainage basin structure, sediment delivery and the response to environmental change*, [w:] S.J. Jones, L.E. Frostick (red.), *Sediment flux to basins: causes, controls and consequences*, Special Publications, London, s. 149–160.
- Rinaldi M., Casagli N., Dapporto S., Gargini A., 2004, *Monitoring and modeling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events*, *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 2, s. 237–254.
- Russell M.A., Walling D.E., Hodgkinson R.A., 2001, *Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK*, *Journal of Hydrology*, 252, s. 1–24.
- Schumm S.A., 1969, *River Metamorphosis*, *Journal of the Hydraulics Division American Society of Civil Engineers*, 95, 1, s. 255–73.
- Schumm S. A., 1977, *The fluvial system*, John Wiley and Sons, New York, 338 ss.
- Siakeu J., Oguchi T., Aoki T., Esaki Y., and Jarvie H. P., 2004, *Change in river in suspended sediment concentration in central Japan in response to late 20th century human activities*, *Catena*, 55, 2, s. 231–254.
- Simon, A., Curini, A., Darby, S., Langendoen, E. J., 2000, *Bank and near-bank processes in an incised channel*, *Geomorphology*, 35, s. 193–217.
- Ślupik J., 1973, *Zróźnicowanie spływu powierzchniowego na fliszowych stokach górskich*, *Dokumentacja Geograficzna*, 2, 108 ss.
- Ślupik J., 1976, *Zastosowanie zdjęć lotniczych w określeniu wpływu bruzd i dróg polnych na strukturę bilansu wodnego stoków górskich*, *Prace Nauk. UŚ, Fotointerpretacja w Geogr.*, 11, s. 31–38.
- Ślupik J., 1981, *Rola stoku w kształtowaniu odpływu w Karpatach fliszowych*, *Prace Geograficzne, IGiPZ PAN*, 142, s. 98.
- Soczyńska U., 1977, *Prognoza wezbrań roztopowych*, *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności*, Warszawa, 354, 1–66.
- Soja M., 2001, *Rozwój ludnościowy a zmiany użytkowania ziemi w Beskidzie Niskim w XIX i XX wieku*, *Problemy Ekologii Krajobrazu*, 10, s. 686–691.
- Soja M., 2008, *Cykle rozwoju ludności Karpat Polskich w XIX i XX wieku*, *IGiP UJ*, Kraków, 141 ss.
- Soja R., 1972, *Opad i odpływ w czasie wezbrania w lipcu 1970r. w zlewni Bystrzanki*, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 6, s. 203–206.
- Soja R., 1977, *Przestrzenne zróźnicowanie opadów w dorzeczu Ropy*, *Dokum. Geogr.*, 6, s. 9–22.
- Soja R., 1981, *Analiza odpływu z Fliszowych zlewni Bystrzanki i Ropy (Beskid Niski)*, *Dokumentacja Geograficzna IGiPZ PAN*, 1, 91 ss.
- Soja R., 2002, *Hydrologiczne aspekty antropopresji w Polskich Karpatach*, *Prace Geogr. IGiPZ PAN*, Warszawa, 186, 130 ss.
- Starkel L., 1972, *Charakterystyka rzeźby Polskich Karpat*, *Problemy zagospodarowania ziem górskich*, 10, s. 75–150.
- Starkel L., 1976, *The role of extreme (catastrophic) meteorological events in contemporary evolution of slopes*, [w:] E. Derbyshire (red.), *Geomorphology and Climate*, Wiley, Chichester, s. 203–246.
- Starkel L., 1990, *Zróźnicowanie przestrzenne środowiska Karpat i potrzeby zmian w użytkowaniu ziemi*, *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich*, 30, s. 11–29.
- Starkel L., 1996, *Geomorphic role of extreme rainfall in the Polish Carpathian example*, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 30, s. 21–38.
- Starkel L., Gil. E. (red.), 1994, *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Stacja Bazowa Szymbark (Karpaty Fliszowe)*, *Biblioteka Monitoringu Środowiska*, 169 ss.

- Starkel L., Pietrzak M., Łajczak M., 2007, *Wpływ zmian użytkowania ziemi i wzrostu częstotliwości ekstremalnych opadów na obieg wody i erozję oraz ochronę zasobów przyrodniczych Karpat*, Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich, 54, s. 19–31.
- Staszkievicz J., 1973, *Zbiorowiska leśne okolic Szymbarku (Beskid Niski)*, Dokumentacja Geograficzna, 1, s. 73–94.
- Szafer W., Zarzycki K., 1972, *Szata roślinna Polski*, PWN, Warszawa, 616 ss.
- Świdziński H., 1973, *Z badań geologicznych w Karpatach*, Prace Geologiczne, Warszawa, 80, s. 11–62.
- Świąchowicz J., 2002, *Współdziałanie procesów stokowych i fluwialnych w odprowadzaniu materiału rozpuszczonego i zawiesiny w zlewni pogórskiej, Przemiany Środowiska na Pogórzu Karpackim*, IGiGP UJ, Kraków, 3, 150 ss.
- Świąchowicz J., 2012, *Wartości progowe parametrów opadów deszczu inicjujących procesy erozyjne w zlewni użytkowanej rolniczo*, IGiGP UJ, Kraków, 282 ss.
- Tekielak T., Michalik A., Bąk Ł., 2007, *Morfologiczne skutki wezbrań na odcinku koryta rzeki Łososiny*, Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich, Kraków, 4, 2, s. 193–202.
- Trimble S. W., 1999, *Decreased rates of alluvial sediment storage on the Coon Creek Basin, Wisconsin, 1975–1993*, Science, 285, s. 1244–1246
- Verstaeten G., Rommens T., Peeters I., Poesen J., Govers G., Lang A., 2009, *A temporarily changing Holocen sediment budget for loess-covered catchment (central Belgium)*, Geomorphology, 108(1), s. 24–34.
- Walling D.E., 1974, *Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization*, [w:] K.J. Gregory, D.E. Walling (red.), *Fluvial processes in instrumented watersheds*, Institute of British Geographers Special Publication, 6, s. 169–192.
- Walling D.E., 1983, *The sediment delivery problem*, J. Hydrol., 65, s. 209–237.
- Walling D.E., 1990, *Linking in field to the river: sediment delivery from agricultural land*, [w:] J. Boardman, I.D.E. Foster, J.A. Dearing (red.), *Chicister*, John Wiley & Sons, s. 129–152.
- Walling D.E., Moorehead P.W., 1989, *The particle size characteristics of fluvial suspended sediment: an overview*, Hydrobiologia, 176–177, s. 125–149.
- Walling D. E., Webb, B. W., 1992, *Water quality, Physical characteristics*, [w:] P. Callow, G. Petts (red.), *The river handbook*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK, s. 48–72.
- Wałykowski P., 2006, *Wpływ dróg górskich na dynamikę procesów morfogenetycznych w rejonie Turbacza, Ochrona Beskidów Zachodnich*, Gorczański Park Narodowy, Poręba Wielka, 1, s. 67–79.
- Welc A., 1972, *Transportation of suspended matter in the rivers Ropa and Bystrzanka and magnitude of wash down during the flood in July 1970*, Studia Geomorphologica Carpatho–Balcanica, 7, s. 131–141.
- Welc A., 1973, *Transport of material carried out from the Bystrzanka catchment area during snow melt in 1971*, Studia Geomorphologica Carpatho–Balcanica, 7.
- Welc A., 1977, *Procesy eoliczne w zlewni Bystrzanki koło Szymbarku 1969–1971*, Dokum. Geogr., 6, s. 67–85.
- Welc A., 1985, *Zmienność denudacji chemicznej w Karpatach fliszowych, (na przykładzie potoku Bystrzanka)*, Dokum. Geogr., 5, 102 ss.
- Welc A., 1988, *Wpływ opadów na wielkość i czas trwania transportu zawiesiny w potoku Bystrzanka (Karpaty Zachodnie)*, Studia Geomorphologica Carpatho–Balcanica, s. 145–165.

- Wemple B. C., Swanson F. J., Jones J. A., 2001, *Forest roads and geomorphic process interactions*, Cascade Range, Oregon, *Earth Surface Processes and Landforms*, John Wiley&Sons, 26, 2, s. 191–204.
- Williams G. P., 1989, *Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers*, *Journal of Hydrology*, 111, s. 89– 106.
- Wischmeier W. H., Smith D. D., 1978, *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*, *Agricultural Handbook*, USDA, Washington, DC, 537, 58 ss.
- Wolman M. G., Miller J. P., 1960, *Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes*, *J. Geol.*, 68, s. 54– 74.
- Wolski J., 2007, *Przekształcenia krajobrazu wiejskiego Bieszczadów Wysokich w ciągu ostatnich 150 lat*, *Prace Geograficzne IG PAN*, 214, 228 ss.
- Wójcik Z., 1977, *Charakterystyka siedlisk polnych na pogórzu Beskidu Niskiego metodami biologicznymi*, *Prace Geograficzne IGiPZ PAN*, 121, 111 ss.
- Wójcik A., Rączkowski W., Mrozek T., Gil E., Zabuski L., Bochenek W., 2003, *Alarm Project final raport*, maszynopis, 10 ss.
- Zabuski L., Wójcik A., Gil E., Mrozek T., Rączkowski W., 2009, *Landslide processes In a flysch massif – case study of the Kawiory landslide, Beskid Niski Mts. (Carpathians, Poland)*, *Geological Quarterly*, 53, 3, s. 317–332.
- Zhang S. R., Lu X. X., 2009, *Hydrological responses to precipitation variation and diverse human activities in a mountainous tributary of the lower Xijiang, China*, *Catena*, 77, s. 130–142.
- Ziemońska Z., 1973, *Stosunki wodne w Polskich Karpatach Zachodnich*, *Prace Geograficzne*, 103, 124 ss.
- Ziętara T., 1968, *Rola gwałtownych ulew i powodzi w modelowaniu rzeźby Beskidów*, *Prace Geograficzne*, 60, 116 ss.
- Zwoliński Z., 1989, *Geomorfologiczne dostosowanie się koryta Parsęty do aktualnego reżimu rzecznego*, *Dok. Geogr.*, 3–4, 144 ss.
- Zwoliński Z., Gudowicz J., 2011, *Pokrycie terenu i użytkowania ziemi w zlewniach Stacji Bazowych ZMŚP – mapy inwentaryzacyjne*, *Raport ZMŚP*, maszynopis.
- Żarnecka Z., 1986, *Nad rzeką Ropą. Szkice historyczne*, *Kraków*, 3, 825 ss.
- Żychowski J., 2000, *Przyczyny różnej transformacji opadów w odpływy w dwóch zlewniach Beskidu Niskiego*, [w:] Z. Ziolo (red.), *Działalność człowieka i jego środowisko*, *Wyd. Nauk. AP, Kraków*, s. 93 – 121.

TRANSPORT OF SUSPENDED SEDIMENT IN THE BYSTRZANKA STREAM (POLISH FLYSCH CARPATHIANS) UNDER CHANGING ANTROPOPPRESSURE

Summary

The main purpose of the study was to determine regularities in as well as temporal and spatial variability of suspended sediment transport in the small flysch Bystrzanka catchment under changing human activity. The study involved the period of 1970–2011, i.e. a period of considerable socioeconomic changes. The analysis was conducted on the data collected in the study concerning suspended sediment transport in the Bystrzanka stream, which began towards the end of the 1960s at the Research Station in Szymbark.

The study was conducted in the Bystrzanka catchment (13 km² in area), which is located within two geomorphological units of the Carpathians (the Low Beskids and the Carpathian Foothills). The area of the Bystrzanka catchment rises to the height of 300-750 m a.s.l. The Bystrzanka stream is a 7.1-km-long left tributary of the Ropa River with the mean gradient of 26%. The mean annual discharge is 0.17 m³/s (the average maximum 18.1 m³/s and minimum 0.001 m³/s). The mean specific runoff in the Bystrzanka stream is 0.013 m³/s/km². The dominant soil type in the Bystrzanka catchment is Cambisol, classified as sandy clay loam and clay loam, with a relatively low water capacity. The weathered cover, with a large content of skeletal fraction on the slopes, reaches several meters in thickness. The northeast-facing Low Beskid slopes (15-35° gradient) of the Bystrzanka catchment are overgrown with forest. The remaining part of the catchment, belonging mainly to the Carpathian Foothills and composed of wide, flat-topped hummocks inclined at 8-15°, is covered with grasslands and, to a lesser extent, farmlands.

In the period of 1968-2010, a decrease of arable land from 48% in 1969 to 14% in 2010, and an increase of grasslands from 3% in 1969 to 30% in 2010 were observed in the Bystrzanka catchment (Fig 2). Minor changes were noticed in the forest area (increase from 36% in 1969 to 40% in 2010). These changes result primarily from the socioeconomic transformation after 1989 related to the collapse of the communist system in Poland. As a result, the amount of fine-grained sediment, which eroded from cultivated slopes and was delivered to drainage network, was restricted. In the Bystrzanka catchment, the average soil erosion rates, estimated using the RUSLE model, decreased from 8.3 t/ha/year (1970s) to 2.9 t/ha/year (2010).

Human activity resulted in changes in land use as well as in transformations on the slope and in the Bystrzanka channel. They led to anthropogenic formations, mainly in the mouth of the stream. After 2000, works in the area of the Bystrzanka catchment became more intensive. The most important investments which led to considerable changes in the catchment began in the second half of 2009. They contributed to an increase in the amount of sediment in the river channel. This was when the Bystrzanka bridge was rebuilt, culverts and drains were created under the road, the Bystrzyca landslide was stabilised and roadside ditches were tightened. This interference led to increased delivery of loose material to the riverbed. It was easily eroded and carried during subsequent river swelling events.

As the land use was changing, it was observed that the frequency of extraordinary events increased. The changes in the Bystrzanka channel following intense rainfall in May and June 2010 indicate that it is one of the most significant sources or transported sediment material. Erosional undercutting, the sum of which reached 1.305 m, was noted along the entire length of the mapped Bystrzanka channel (5.5 km). These swelling episodes resulted in a considerable erosion of instable and newly formed banks. Along the entire river channel, lateral fluvial deposits and intra-bed bars with various sizes (up to 250 m²) and shapes, depending on the morphology of the riverbed, were observed. At the outlets of the lateral valleys, alluvial fans were observed with their width of 25 m and thickness of 0.6 m. This indicates that the role of the lateral tributaries in shaping the river channel and delivering material for fluvial transport is considerable. Moreover, the activation of landslides, the heads of which have covered up nearly the entire floor of the river channel causing water swirling, was also noted. Landslides in the Bystrzanka catchment constitute 30% of the area and are observed mainly at the river channel of the Bystrzanka stream and its tributaries. They deliver mainly clay material with numerous trees and bushes.

Despite the changes in land use, the density of roads in 2010 was greater by 1.8 km/km² than in 1995 and by 2.8 km/km² compared to 1965. As in other parts of the Carpathians, unpaved roads are quite common in this catchment. Their total length in 2010 was 123 km. Compared to the year 1965, it increased by 28 km. During rainfall, they deliver sediment eroded in their areas and cultivated lands to the river channel. Some of the roads were paved in the 1990s and at the beginning of the 21st century. This concerns mainly the short fragments—the ones that connect to the main roads. Currently, the density of paved roads is 1.2 km/km². An increase in the paved roads in the catchment accelerates the culmination of floods waves by reducing the infiltration capacity thus facilitating the delivery of sediment material to the river channel.

It was found that in the 1970s and between the year 2000 and 2011, similar discharges were characterised by similar suspended sediment concentrations. The concentration values show no significant differences despite the changes in land use. However, different dynamics of the concentration during the floods in the 1970s and at the beginning of the 21st century indicates that the sediment for fluvial transport came from different sources. Considerably lesser erosion on the slopes causes a decrease in the delivery of sediment to the river channel, which, in turn, results in an increased transport capacity of the river and increased erosion in the river channel.

The analysis of the spatial diversity of suspended sediment concentration revealed that it increases with the increasing length of the stream. In 63% of cases, suspended sediment concentration was the highest in the river mouth of the main stream. In 27% of cases, the highest concentration was noted in the Beskid tributary of the main stream. This high concentration should be associated primarily with considerable erosion of the river channel which is deeply cut in the variegated shales.

Anthropogenic factors overlapping with natural ones make it difficult to assess the impact of human activity on suspended sediment transport in the stream. A decrease in arable land by 34%, which took place in the period of 1970-2011, is not unambiguously reflected by a decrease in suspended sediment transport in the Bystrzanka stream. Annual suspended sediment load, transported by the Bystrzanka stream in 1970-2011, demonstrated considerable

variability, which mainly resulted from the number and size of floods, as well as – in the last analysed decade – from intense human activity in the catchment, mainly in the vicinity of the stream. The mean annual suspended sediment transport in 1970-1979 was lower by 899.7 t from the suspended sediment load carried from the catchment in 2000-2011, and higher by 517 t when the year 2010 was excluded. The mean runoff denudation in the catchment in 1970-1979 was $400 \text{ t}^*\text{km}^{-2}\text{year}^{-1}$, and 30 years later it was $467 \text{ t}^*\text{km}^{-2}\text{year}^{-1}$ ($358 \text{ t}^*\text{km}^{-2}\text{year}^{-1}$ excluding the year 2010).

Therefore, it must be emphasised that the changes introduced by human activity (investments carried out in the riverbed) and extreme rainfall have the greatest influence on the suspended sediment transport and mask the effects of slow anthropogenic changes (land use) on morphogenetic processes in the catchment.

Translated by: Małgorzata Kijowska-Strugała

Adres Autora:

Małgorzata Kijowska-Strugała

Zakład Badań Geośrodowiska

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania

im. Stanisława Leszczyckiego

Polska Akademia Nauk

Stacja Naukowa w Szymbarku

38-311 Szymbark 430

E-mail: mkijowska@zg.pan.krakow.pl



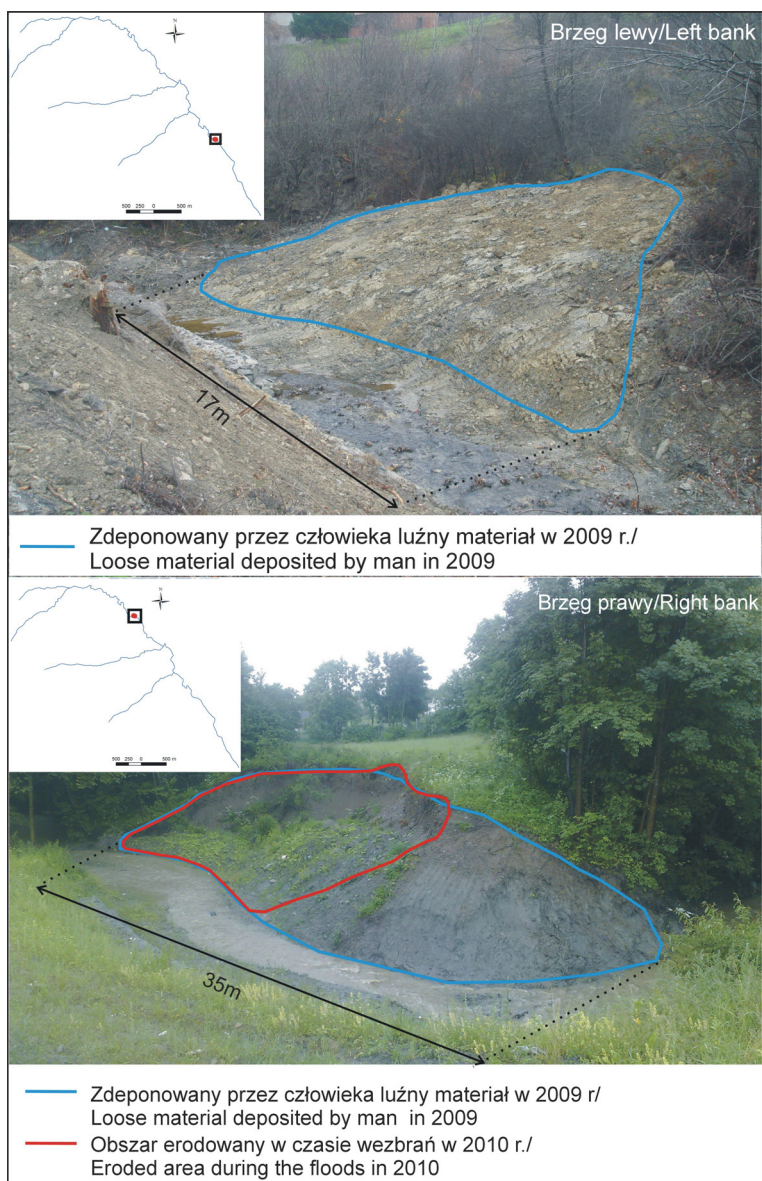
Fot. 1. Osuwisko przykorytowe uaktywnione po opadach w maju i czerwcu 2010 r.
Photo 1. Landslide near Bystrzanka channel activated after rainfall in May and June 2010



Fot. 2. Budowa mostu na Bystrzance w 2009 r. powodująca dostarczenie luźnego materiału do koryta. Materiał został wyniesiony podczas wezbrań w 2009 i 2010 r.
Photo 2. Construction of a bridge over the Bystrzanka stream in 2009, causing delivering of loose material into the riverbed. Material transported during floods in 2009 and 2010.



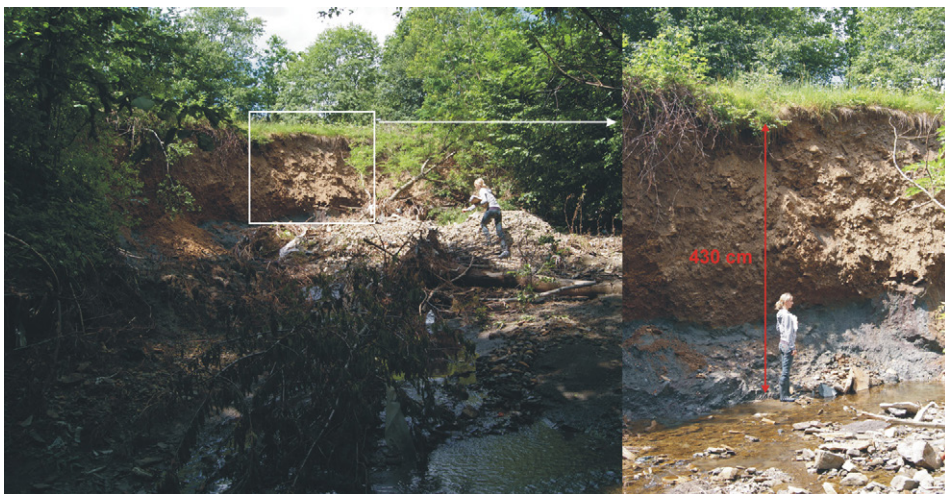
Fot. 3. Stabilizacja osuwiska Bystrzyca w pobliżu koryta Bystrzanki w 2009 r.
Photo 3. Stabilization of the landslides near the Bystrzanka stream in 2009



Fot. 4. Materiał nawieziony na brzegi koryta Bystrzanki
Photo 4. The material deposited on the banks of the Bystrzanka channel



Fot. 5. Erozja boczna w korycie Bystrzanki podczas wezbrań w 2010 r.
Photo 5. Bank erosion in Bystrzanka stream channel during the floods in 2010



Fot. 6. Potok Bystrzanka – wysokie podcięcie erozyjne wraz z łacją i rumoszem drzewnym u podnóża, powstałe po wezbraniach wiosennych w 2010 r.

Photo 6. The Bystrzanka stream – high erosional undercut with bar and wood rubble below, formed after spring floods in 2010



Fot. 7. Stożek napływowy u wylotu bocznej rynny erozyjnej odwadnianej epizodycznie (uformowany po opadach wiosną 2010 r.)

Photo 7. Alluvial fan at the outlet of tributary erosional gully, episodically drained (formed after the heavy spring rainfall in 2010)



Fot. 8. Materiał nagromadzony na równinie zalewowej Bystrzanki po wezbraniu w czerwcu 2010 r.

Photo 8. Material deposited on the floodplain of the Bystrzanka stream after floods in June 2010



Fot. 9. Łacha środkokorytowa z rumoszem drzewnym, powstała w korycie Bystrzanki podczas wezbrań wiosennych w 2010 r.

Photo 9. The middle bar with the wood rubble, formed in the Bystrzanka channel after spring floods in 2010



Fot. 10. Fragment prawego brzegu oderwany wskutek rozlewnych opadów deszczu i zmian przepływu wody w 2011 r.

Photo 10. Detached fragment of the Bystrzanka right bank as a result of the continuous rainfall and water level change in 2011



Fot. 11. Prace inżynierskie w korycie Bystrzanki prowadzone we wrześniu 2010 r. z użyciem ciężkiego sprzętu zmechanizowanego, w celu umocnienia erodowanego brzegu wzdłuż drogi powiatowej podciętej w czerwcu 2010 r.

Photo 11. Engineering works in the Bystrzanka channel in September 2010 with using of the heavy mechanical equipment for protection of eroded bank, along local road undercut in June 2010



Fot. 12. Geomorfologiczne skutki opadów w 2010 r. na drodze nieutwardzonej w dolinie Bystrzanki

Photo 12. Geomorphological effects of precipitation in 2010 on unmetalled road in the Bystrzanka valley

W opracowaniu przedstawiono wyniki badań nad transportem materiału zawieszonoego w potoku Bystrzanka (polskie Karpaty) w okresie przemian społeczno-gospodarczych w latach 1970-2011. Ich celem było wskazanie prawidłowości określających czasową zmienność i przestrzenne zróżnicowanie odprowadzania zawiesiny w analizowanej zlewni w warunkach zmieniającej się antropopresji.

Analizę oparto na archiwalnych danych zbieranych na Stacji Naukowej IGiPZ PAN w Szymbarku koło Gorlic od końca lat 60. XX w. oraz na wynikach badań terenowych przeprowadzonych w latach 2009-2011.

Stwierdzono, że jednym z z najważniejszych źródeł dostawy zawiesiny do transportu rzecznoego w zlewni Bystrzanki jest erozja boczna koryta, osuwiska przykorytowe a także działalność człowieka w pobliżu i w samym korycie potoku. Zmniejszenie powierzchni gruntów ornych w latach 1970-2011 o 34%, przy równoczesnym wzroście powierzchni użytków zielonych i lasów o 4 i 27%, nie znalazło jednoznacznego odzwierciedlenia w spadku transportu zawiesiny w Bystrzance. Relacja ta została zakłócona przez dostawę zawiesiny w ostatnich latach wskutek prac inżynieryjnych w korycie potoku, dnie doliny i na stokach oraz wskutek wzrostu gęstości dróg.