

Roman Malarz

GEOMORFOLOGICZNE SKUTKI DZIAŁANIA ZAPÓR WODNYCH W OKRESACH POWODZIOWYCH W DOLINIE SOŁY

Jedną z głównych funkcji zapór wodnych zbudowanych na rzekach karpackich jest przeciwdziałanie bądź łagodzenie negatywnych skutków powodzi. W dolinie Soły funkcjonuje zespół trzech zapór i zbiorników: w Tresnej, Porąbce i Czańcu. W trakcie katastrofalnych powodzi, rezerwy powodziowe zbiorników są szybko wypełniane i pojawia się konieczność zrzutu dużych ilości wody. Wezbranie zostaje tylko złagodzone, natomiast trwa dłużej niż w rzekach nieprzegrodzonych zaporami np. na Skawie. W efekcie, geomorfologicznie skuteczny przepływ poniżej kaskady trwa znacznie dłużej niż na rzekach pozbawionych sztucznych przegród. Uwzględnić jeszcze należy zatrzymanie całości mineralnego materiału wleczonego i wytrącenie znacznych ilości zawiesiny powyżej zapór. Brak uzupełniania osadów poniżej zapór prowadzi do szybkiego pogłębiania koryta, co zagraża stabilności zapory w Czańcu i wielu mostów poniżej tej zapory.

Słowa kluczowe: powódzie, erozja rzeczna, karpackie zapory wodne
Key words: floods, fluvial erosion, Carpathian dams

WSTĘP

Budowa zapór wodnych jest istotną ingerencją człowieka w naturalny obieg wody w zlewni. Celem posadowienia kosztownych budowli hydrotechnicznych jest, w warunkach karpackich, zmniejszenie strat materialnych wywołanych katastrofalnymi wezbraniem. W polskich Karpatach funkcjonuje obecnie kilkanaście zapór, które przegradzają doliny górskich dopływów Wisły. Budowę tych obiektów rozpoczęto po tragicznej powodzi, jaka wystąpiła w dorzeczu górnej Wisły w roku 1934. W roku 1936 oddano do użytku zapórę wodną w Porąbce na Sole, a na początku lat czterdziestych — zapórę w Rożnowie na Dunajcu. Obie te zapory miały pełnić przede wszystkim funkcję przeciwpowodziową na najbardziej „powodziowych” rzekach polskich Karpat — Dunajcu i Sole. Temu „dobroczynnemu” oddziaływaniu zapór podczas powodzi towarzy-

szą także zjawiska niekorzystne, na które przed budową zapór nie zawsze zwracano uwagę.

Celem pracy jest analiza wybranych skutków geomorfologicznych wywołanych działaniem zapór kaskady Soły podczas powodzi. Artykuł opracowano na podstawie wyników badań terenowych autora prowadzonych po powodziach w latach 1996, 1997 i 2001, danych hydrologicznych i meteorologicznych zakupionych w IMiGW w Krakowie, a także wykorzystano opracowania innych autorów.

POWODZIE W DOLINIE SOŁY NA PRZEŁOMIE XX I XXI WIEKU

Na przełomie XX i XXI wieku wystąpiły w dorzeczu Soły trzy duże powodzie w latach: 1996, 1997 i 2001. Były to typowe powodzie opadowe (Soja 1997) wywołane rozlewnymi opadami, na które nakładały się deszcze nawalne (Cebulak 1998, 1999; Niedźwiedź, Czekierda 1998)

Powódź w 1996 r. wystąpiła w nietypowym, wrześnieowym terminie. Najczęściej powodzie w dorzeczu Soły występowały w lipcu, czerwcu i sierpniu. Powodzie wrześnieowe zanotowano poprzednio w latach: 1582, 1587, 1603 i 1713 (Malarz 1997). W ostatnich dniach sierpnia dobowe sumy opadów w dorzeczu górnej Wisły przekraczały 40 mm. 7 września Polska znalazła się pod wpływem układu niżowego w cyrkulacji północno-wschodniej (Sasim, Wawerek 1996). Deszcz padał od rana. W dorzeczu Soły w ciągu tego dnia rekordowe sumy opadów odnotowały posterunki w Kocierzu Moszczanickim (129,2 mm), Żabnicy (98 mm) i Ślemieniu (97,3 mm). Deszcz padał również następnego dnia. Suma opadów tych dwu dni prawie na wszystkich posterunkach w Beskidach Zachodnich przekroczyła 100 mm. To więcej niż wynoszą średnie miesięczne sumy opadów dla całego września. Przy takich opadach poprzedzonych „mokrymi” lipcem i sierpniem powódź była nieunikniona. Na wszystkich karpackich dopływach Wisły przekroczone zostały stany alarmowe. 7 września poziom wód Soły przekroczył stan alarmowy w górskiej części doliny. Trzy zapory nie zdołały zatrzymać spływających z gór potężnych ilości wody. Praktycznie, liczącą się rezerwę powodziową miała tylko zaporą w Tresnej. Po zbudowaniu elektrowni szczytowo-pompowej na górze Żar zaporą wodną w Porąbce cały czas utrzymuje wysoki stan wody. Muszą być zalane wyloty sztolni, którymi woda dostaje się do górnego zbiornika i którymi spływa podczas pracy elektrowni Żar (Malarz, Mądry 1996). Zbiornik wyrównawczy w Czańcu jest zbyt mały, aby odegrać znaczącą rolę w wyłapywaniu fali powodziowej. W wyniku tej sytuacji, w nocy z 7 na 8 września wszystkie rezerwy zostały wyczerpane i na zaporach otwarto wszystkie przepusty. Średni przepływ

Soły poniżej zapory w Czańcu w normalne dni wynosi $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. W sobotę 7 września zaporą w Czańcu zrzuciła $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a w niedzielę już $620 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Taka ilość wody opuszczała zbiornik od godz. 9:00 8 września do 2:00 9 września. Fala powodziowa szybko dotarła do Oświęcimia, a stan alarmowy został tu przekroczony o 158 cm.

Straty wywołane przez powódź były znaczne. Zniszczone zostały całkowicie kładki na rzece Sole w okolicach Rajczy i Milówki. Znacznie uszkodzone zostały mosty w Złatnej i Łękawicy. Soła przerzuciła swoje koryto omijając mosty w Ciścu i Kobiernicach. Straty te opisane zostały w publikowanych materiałach dotyczących tej powodzi (Chojnacki 1998), a także w jednej ze wcześniejszych publikacji autora (Malarz 1997).

W lipcu 1997 r. intensywne opady wystąpiły w Beskidzie Śląskim, Żywieckim i Małym. Poprzedziły je chłodne i deszczowe dni ostatniej dekady czerwca. W dorzeczu Soły intensywne opady rozpoczęły się 4 lipca i trwały do 9 lipca. Największe ich natężenie pojawiło się 8 lipca. W tym dniu w Żabnicy spadło 144,9 mm opadu. Maksymalne sumy dobowe znacznie przekroczyły te, które wywołały powódź w 1996 r. W ciągu 6 dni tego miesiąca w dorzeczu Soły spadło ponad 300 mm deszczu (Szczyrk 374,6; Kocierz Moszczanicki 317,8; Żabnica 310,6). Największe opady wystąpiły w Beskidzie Śląskim i Żywieckim.

Fala powodziowa na Sole dotarła do Żywca w nocy z 8 na 9 lipca. Stan alarmowy został tu przekroczony o 102 cm i wyniósł 442 cm. Absolutne maksimum odnotowane na wodowskazie w Żywcu wynosiło 525 cm (1958 r.). 8 lipca o godz. 24:00 wystąpił tu największy przepływ — $992 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Przepływ wielkości ponad $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ utrzymywał się w Żywcu przez 11 godzin. 8 lipca o godz. 21:00 do Jeziora Żywieckiego dopływało $1641 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i taki zapewne byłby przepływ w Tresnej, gdyby nie działanie zapór kaskady Soły.

Do Oświęcimia fala dotarła 9 lipca. Tu stan maksymalny wynosił 670 cm i był wyższy od poprzednio odnotowanych rekordów z lat 1958 (665 cm) i 1970 (668 cm). Maksymalny przepływ wystąpił 9 lipca o godz. 14:00 i wynosił $1080 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Działanie zbiorników retencyjnych, podobnie jak podczas powodzi w 1996 r., doprowadziło do dłuższego niż w Żywcu trwania wysokich stanów wody i przepływów poniżej Czańca.

W klasyfikacji wezbrań lipcowa powódź na Sole w 1997 r. zaliczana jest do katastrofalnie wielkich (Niedbała 1998). Prawdopodobieństwo wezbrania lipcowego z 1997 r. zostało ocenione na poziomie 2% tj. raz na 50 lat. Przepływ maksymalny Soły w Oświęcimiu wyniósł $1080 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i był to najwyższy przepływ, jaki kiedykolwiek zanotowano w tym profilu. Szacunkowa ocena objętości fali wezbraniowej za okres 1–14 lipca 1997 wyniosła 325 mln m^3 (Niedbała 1998).

Straty w dorzeczu Soły były tym razem znacznie wyższe niż podczas powodzi w 1996 r. Uszkodzonych lub zerwanych zostało kilka mostów. Całkowitemu zniszczeniu uległ most kolejowy w Milówce, co spowodowało zawieszenie na długi okres komunikacji kolejowej do Zwardonia. Na skutek podmycia i obniżenia się jednego z filarów mostu kolejowego w Żywcu łączność kolejowa z Suchą Beskidzką odbywała się z dużymi perturbacjami. Zniszczony został kilkusetmetrowy odcinek drogi na północnych peryferiach Rajczy. Soła zrujnowała tam dwa budynki mieszkalne. W tym czasie zdewastowane zostały przez osuwisko tory kolejowe w Rajczy. Dopływy Soły — Żabnica i Żylica zniszczyły po jednym moście i w kilku miejscach podcięły drogi. W Jeleśni Koszarawa poważnie uszkodziła lewy przyczółek mostu na drodze prowadzącej do Pewli. Straty wystąpiły także poniżej kaskady Soły. W Kobiernicach Dolnych Soła ponownie (wcześniej w 1996 r.) zniszczyła prawy przyczółek mostu. Straty były ogromne i ich wstępne szacunki zaprezentowano w niecałe pół roku po powodzi (Chojnacki 1998).

W 2001 r. na obszarze Polski w różnym czasie pojawiały się lokalne powodzie obejmujące swym zasięgiem niewielkie obszary. Wywoływane one były przez burzowe deszcze nawalne nakładające się na trwający od dłuższego czasu okres deszczów rozlewnych. Powodzie wystąpiły w różnych regionach kraju, w niektórych kilkakrotnie. Lokalne klęski żywiołowe wywołane burzami i krótkotrwałymi, obfitymi ulewami wystąpiły w Jeleniej Górze, Ostrowcu Świętokrzyskim i w wielu innych miejscach południowej Polski. Podobna sytuacja panowała po południowej stronie Karpat, na Słowacji. Tam najbardziej ucierpiały miejscowości w powiatach Stara Lubownia, Kežmarok, Preszow i Medzilaborce.

W dorzeczu Soły znaczące sumy opadów wystąpiły 20 lipca 2001 r. Przez 8 kolejnych dni na rozlewnie deszcze nakładały się burze z „oberwaniami chmury”. W tym okresie posterunki meteorologiczne odnotowały 6 burz w Ślemieniu i 4 w Szczyrku. W Korbielowie 20 lipca burzy z wyładowaniami atmosferycznymi towarzyszył opad gradu.

Najwyższe dobowe sumy opadów wystąpiły w dorzeczach Soły 24, 25 i 26 lipca 2001 r. Przekraczały one 50 mm/dobę. Najwyższe opady dobowe zarejestrowano 26 lipca na stacji Ślemień. Spadło tam 82,9 mm deszczu. Te deszcze nawalne spowodowały gwałtowny przybór wód w dorzeczu. Wystąpiły tu dwie kulminacje, kolejno 26 i 27 lipca. Najwyższy przepływ Soły w Oświęcimiu zaobserwowano 27 lipca w godzinach południowych i wynosił on około $605 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. To znacznie mniej niż podczas powodzi w 1996 r. ($750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) i 1997 r. ($1080 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

GEOMORFOLOGICZNE SKUTKI DZIAŁANIA ZAPÓR NA SOŁE

Górska część dorzecza Soły ma specyficzny układ sieci hydrograficznej (Pydziński 1962; Ziętara 1972). Obserwuje się tu koncentryczny układ głównych dopływów Soły i trzy węzły hydrograficzne w okolicach Żywca, Jeleśni i Rajczy. Taki układ sieci rzecznej powoduje, że w wymienionych miejscach zachodzi nakładanie się fali powodziowej dopływów i rzeki głównej, skutkiem czego, poniżej tych miejsc, następuje szybki wzrost przepływu. Trzy zapory tworzące kaskadę Soły mają na celu redukcję wielkości wezbrania i łagodzenie negatywnych skutków działania wód powodziowych. Podczas powodzi w 1997 r. zapory nie były w stanie przechwycić nadmiaru wody, a ich działanie, zdaniem autora, doprowadziło do większych strat materialnych i zwielokrotnienia siły procesów geomorfologicznych poniżej zapory w Czańcu. Było to nieuniknione, gdyż wielkość rezerwy powodziowej w stosunku do całkowitej objętości wód powodziowych jest niewystarczająca. Według J. Niedbały (1998) całkowita objętość wód wezbraniowych Soły od 1 do 14 lipca 1997 r. wynosiła 325 mln m³. Rezerwa powodziowa zbiorników kaskady Soły wynosi 31 mln m³. Oznacza to, że tylko 10% objętości fali powodziowej w 1997 r. zdołały przechwycić zbiorniki na Sole.

Choć działanie zapór podczas dużych powodzi w ograniczonym zakresie łagodzi ich skutki, to przegrodzenie doliny budowlami hydrotechnicznymi wywołuje znaczące zaburzenia w procesach geomorfologicznych w dnach dolin. Na trzy przejawy tych procesów należy zwrócić uwagę:

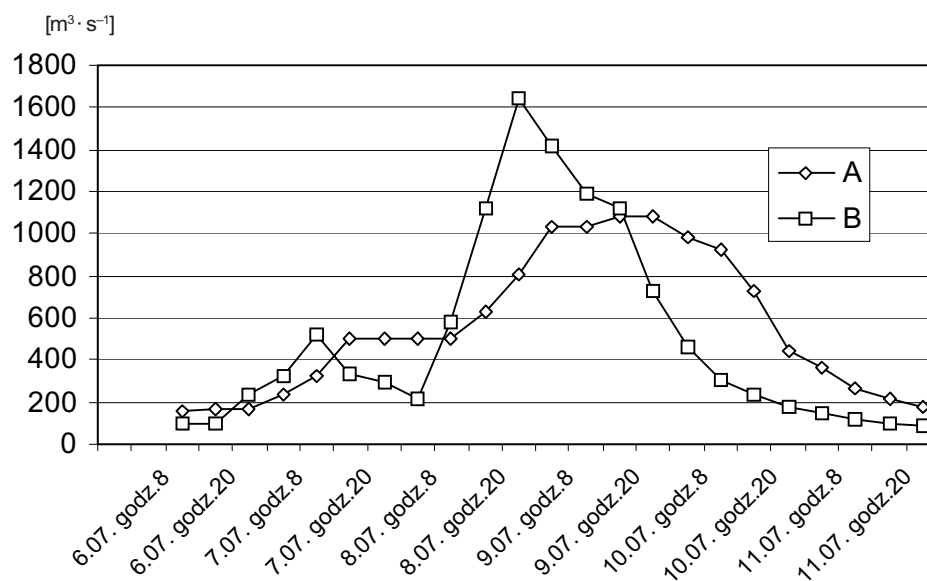
1. Zatamowanie transportu fluwialnego i depozycja materiału wleczonego i zawieszonego w zbiornikach.
2. Wzmocnienie erozji wgłębnej poniżej zapory w Czańcu.
3. Powstawanie specyficznych form akumulacyjnych poniżej kaskady Soły.

W trakcie powodzi następuje skokowy wzrost ilości transportowanego materiału, zarówno wleczonego jak i zawiesinowego. W dolinach karpackich nieprzegrodzonych zaporami transportowany materiał wynoszony zostaje na przedpole gór. Przy opadającej fali wezbrania materiał ten jest deponowany w postaci łąch. Naturalna relaksacja aluwii trwa aż do następnej powodzi. W dolinie Soły ten naturalny obieg materii został zaburzony. Wody powodziowe uchodzące do Jeziora Żywieckiego, wraz z gwałtownym wytraceniem prędkości, akumulują transportowany materiał. Zarówno Soła z Koszarawą, jak i Żylica i Łękawka usypują delty. Akumulacji podlega cały materiał transportowany w postaci wleczonej (żwiru i piaski), a także znaczna ilość materiału zawiesinowego. Gdyby nie zapory, zawiesina transportowana przez Solę w Żywcę dotarłaby bez przeszkód do Oświęcimia. Tymczasem mniej niż 14% zawiesiny

przechodzi przez zbiorniki kaskady Soły. Całkowity miesięczny transport zawiesiny w profilu Żywiec w lipcu 1997 r. wynosił 269 000 ton, zaś w Oświęcimiu tylko 33 100 ton (dane IMiGW). Oznacza to, że obok akumulacji dużych ilości frakcji piaszczysto-żwirowej w zbiornikach następuje sedimentacja frakcji ilastej. W ciągu jednego, „powodziowego” miesiąca (lipiec 1997) w zbiornikach kaskady Soły nastąpiła akumulacja około 230 000 ton materiału transportowanego w formie zawiesiny. Proces ten prowadzi do szybkiego spłykania zbiorników i zmniejszania ich powierzchni i objętości. Ponad 90% materiału transportowanego przez Solę nie opuszcza Karpat.

Drugim niezmiernie ważnym geomorfologicznym następstwem funkcjonowania zapór jest wzmożenie erozji wgłębnej na ich przedpolu. W przypadku kaskady Soły intensywność erozji ma dwie przyczyny. Pierwsza wynika z długości okresu geomorfologicznie skutecznego, na skutek wydłużenia czasu wezbrania. Druga wiąże się z zatamowaniem dostawy świeżego materiału, który mógłby uzupełnić erozyjne ubytki.

Maksymalny zanotowany podczas powodzi w 1997 r. przepływ na Sole wynosił $1641 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 1). Wyliczono go na podstawie dopływu



Ryc. 1. Hydrogramy fal powodziowych Soły w Oświęcimiu z lipca 1997.
A — rzeczywisty przebieg wezbrania, B — przebieg wezbrania przy założeniu braku zapór na Sole

Fig. 1. Hydrographs of the flood in July 1997 on the River Soła in Oświęcim.
A — actual flood hydrograph, B — estimated flood hydrograph assuming the lack of dams

wód powodziowych do Jeziora Żywieckiego 8 lipca 1997, w godzinach wieczornych. Tyle wynosiłby kulminacyjny przepływ w przełomowym odcinku Soły i w Kotlinie Oświęcimskiej, gdyby nie działanie trzech zbiorników kaskady Soły. Obniżyły one maksymalny przepływ o ponad 1/3, do $1080 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ w Oświęcimiu. Podobne redukcje wielkości przepływu wystąpiły podczas powodzi w latach 1996 i 2001. Redukcja fali powodziowej i zmniejszenie przepływu wód powodziowych poniżej kaskady Soły nie zmniejszyło jednak działania procesów erozyjnych i transportu materiału korytowego w dół doliny. Obserwacje terenowe autora pozwoliły stwierdzić, iż uruchomienie najgrubszych frakcji korytowych zachodzi przy przepływie $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i prędkości przepływu ponad $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Przepływ taki nazwano geomorfologicznie skutecznym. Gdyby nie działanie zbiorników dysponujących rezerwą powodziową o wielkości ponad 30 mln m^3 (tab. 1) przepływ byłby co prawda większy, ale jego

Tabela 1 — Table 1

Pojemność zbiorników wodnych kaskady Soły
Capacities of the reservoirs of the River Soła

Lokalizacja zapory Reservoir location	Powierzchnia zbiornika Reservoir area [km^2]	Pojemność całkowita [mln m^3] Total storage capacity [10^6 m^3]	Rezerwa powodziowa [mln m^3] Floods storage [10^6 m^3]
Tresna	10,2	100,0	26,0
Porąbka	3,7	23,0	5,0
Czaniec	0,5	1,3	—

geomorfologiczna skuteczność trwałaby krócej. Tymczasem zrzut wód powodziowych zgromadzonych w zbiornikach trwa długo, a czas trwania przepływu geomorfologicznie skutecznego zostaje sztucznie wydłużony (tab. 2)

Podczas powodzi w latach 1996, 1997 i 2001, geomorfologicznie skuteczny przepływ poniżej zapory w Czańcu trwał od 71 godzin (1996 r.) do 102 godzin (2001 r.). Gdyby Soła nie była przegrodzona zaporami i stany wody kształtowały się w sposób naturalny, czas trwania przepływu geomorfologicznie skutecznego ($> 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) byłby dwukrotnie krótszy (ryc. 1).

W rezultacie, skutki działań procesów geomorfologicznych, głównie erozji i transportu są znacznie większe niż w dolinach nieprzegrodzonych zaporami. Proces erozji wzmacnia ponadto brak materiału, który mógłby uzupełnić ubytki materiału korytowego. Zapory skutecznie blokują transfer materiału w dół doliny. W rezultacie, w dolinie Soły po-

Tabela 2 — Table 2

Czas trwania przepływów geomorfologicznie skutecznych na Sole poniżej zapory
w Czańcu

Duration of geomorphically effective flows of the River Soła downstream
of the Czaniec Reservoir

Profil Gauging station	Data powodzi Date of flood occurrence	Czas trwania przepływów [godz.] Flow duration [hrs]		
		$> 300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$> 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$> 500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Oświęcim	Wrzesień 1996 September 1996	73	71	61
Oświęcim	Lipiec 1997 July 1997	96	88	69
Oświęcim	Lipiec 2001 July 2001	138	102	84

niżej Czańca obserwuje się nasilenie erozji dennej prowadzącej do pogłębiania koryta rzeki (fot. 1). Podobny proces obserwuje się poniżej wielu sztucznych zapór. W przypadku zapory we Włodawku tempo erozji jest tak duże, że stwarza zagrożenie dla stabilności samej zapory (B a -



Fot. 1. W wyniku erozji wgłębnej poniżej zapory w Czańcu odsłonięte zostały palisady dawnych mostów zniszczonych przez wcześniejsze powodzie

Photo 1. Bed degradation below the Czaniec dam exposed abutments of old bridges damaged by earlier floods

biński 1995). Tam także nastąpiło odciążenie wód od rumowiska wleczonego, w całości akumulowanego w czaszy zbiornika. W ciągu 27 lat obserwacji koryta poniżej zapory we Włocławku stwierdzono ubytek materiału rzędu 17,6 mln m³, a czoło „fali erozyjnej” przemieściło się na odległość 28 km (Babiński 1995). W korycie Soły w ciągu 5 lat obserwacji (1996–2001) przeciętne pogłębienie wyniosło około 0,5 m (fot. 1), przy równoczesnym poszerzeniu koryta i stwierdzeniu kilku przypadków awulsji. Czoło „fali erozyjnej” po powodzi 2001 r. znalazło się w Bielanach 11 km poniżej zapory w Czańcu.

Wydłużenie czasu trwania stanów powodziowych poniżej zapór prowadzi do powstania form, które w warunkach naturalnego kształtowania się stanu wód nie powstałyby. Należą do nich stożki i rynny awulsyjne. Formy takie zaobserwowano po powodzi w 1996 r. w dolinie Soły, 3 km poniżej zapory w Czańcu. Powstają one podczas przerzucania powodziowego nurtu poza poprzednie koryto. Tworzy się nowe koryto, a zasypywane jest dotychczasowe. Stożki takie zbudowane są ze żwirów u wylotu rynien ułożonych poprzecznie do przebiegu doliny (fot. 2). W przypadku stożków z Kobiernic, nie sama forma, lecz jej rozmiary, są ewenementem. Choć podobne formy występują często, to jednak ich



Fot. 2. Stożki przelewowe w Kobiernicach Dolnych osiągają grubość ponad 1,5 m

Photo 2. Over 1.5 m high overspill lobes in Kobiernice Dolne

rozmiary są niewielkie. Najczęściej grubość stożków powstających w warunkach naturalnych nie przekracza 0,5 m. Stożki z Kobiernic miały grubość ponad 1,5 m, a ich powstanie było możliwe dzięki trwającemu wiele godzin jednakowo wysokiemu stanowi wody. Również materiał je budujący wskazywał na dużą i długotrwałą siłę transportową wód. Dominowały tam otoczaki o średnicach ponad 125 mm. Nienaturalny jest także skład mechaniczny żwirowisk poniżej zapór. Pozbawione są one najdrobniejszych frakcji wymytych w trakcie mniejszych wezbrań. W rezultacie żwirowe koryto Soły bezpośrednio poniżej zapory w Czańcu budują otoczaki największe, a krzywa uziarnienia wskazuje na nadmiernie wysoki udział frakcji najgrubszej.

WNIOSKI

Obserwacje skutków działania zapór na Sole prowadzą do następujących wniosków:

1. Przegrodzenie rzeki górskiej trzema zaporami odcina skutecznie transport materiału wleczonego. Aluwia denne w całości są deponowane w trzech zbiornikach powyżej zapór w Tresnej, Porąbce i Czańcu. Poniżej kaskady Soły ubytki po wyerodowanych osadach nie są uzupełniane dostawą świeżego materiału z górskich części dorzecza. Ponadto, Soła nie przyjmuje na przedpolu gór żadnego znaczącego dopływu, który mógłby uzupełnić owe ubytki.

2. Przeciwpowodziowa funkcja dwu największych zbiorników kaskady Soły nie idzie w parze z przeciwdziałaniem niekorzystnym procesom geomorfologicznym. Rezerwy powodziowe nie są wystarczająco wielkie, aby obniżyć przepływ do rozmiarów geomorfologicznie obojętnych. Wręcz odwrotnie. Utrzymywanie wysokich przepływów w długim okresie wzmacnia procesy transportu i erozji dennej. W rezultacie skutki erozyjne poniżej zapory w Czańcu są kilkakrotnie większe niż na rzekach nieprzegrodzonych zaporami, na przykład na Skawie. Kolejne powodzie, które niewątpliwie wystąpią, mogą doprowadzić do zagrożenia stabilności zapory w Czańcu.

3. Długotrwałość procesów erozji, transportu i akumulacji spowodowana działaniem zapór na Sole prowadzi do powstania form, które nie utworzyłyby się w warunkach naturalnych. Należą do nich stożki przelewowe (awulsyjne) o rozmiarach niespotykanych w rzekach, gdzie przepływ kształtowany jest w sposób naturalny. Także wędrujące w dół czoło „fali erozyjnej” jest rezultatem ingerencji człowieka w naturalny przepływ rzeki.

Planując budowę sztucznych zbiorników na rzekach karpackich należy uwzględniać wymienione wyżej procesy.

Akademia Pedagogiczna w Krakowie
Instytut Geografii
ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków
e-mail: rmalarz@ap.krakow.pl

LITERATURA

- Babiński Z., 1995, *Procesy erozyjno-akumulacyjne poniżej stopnia wodnego Włocławek*, Przewodnik Wycieczki 44 Zjazdu PTG, Toruń.
- Cebulak E., 1998, *Przegląd opadów ekstremalnych, które wywołały powódzie w XX wieku w dorzeczu górnej Wisły* [w:] *Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 r.*, red. L. Starkel, J. Grela, Wyd. Oddziału PAN, Kraków.
- Cebulak E., 1999, *Charakterystyka wysokich opadów wywołujących wezbrania rzek karpackich*, *Folia Geogr.*, ser. Geogr. Phys. 29–30.
- Chojnacki J., 1998, *Analiza strat w powodzi lipcowej 1997*, *Gazeta Obserwatora IMGW* 2.
- Malarz R., 1997, *Powódzie w dorzeczu Soły*, *Wiadomości Ziem Górskich* 6.
- Malarz R., 2002, *Powodziowa transformacja gruboklastycznych aluwii w żwirowatych rzekach Zachodnich Karpat fliszowych*, *Prace Monograficzne Akademii Pedagogicznej w Krakowie* 335.
- Malarz R., Mądry J., 1996, *Zmiany środowiska przyrodniczego w Beskidzie Małym pod wpływem hydrotechnicznej zabudowy dolin Soły i Skawy*, *Ogólnopolskie Sympozjum Dynamika zmian środowiska geograficznego pod wpływem antropopresji*, Materiały z konferencji, Kraków.
- Niedbała J., 1998, *Charakterystyka hydrologiczna wezbrania z lipca 1997* [w:] *Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 roku*, red. L. Starkel, J. Grela, Wyd. Oddziału PAN, Kraków.
- Niedźwiedz T., Czekierda D., 1998, *Cyrkulacyjne uwarunkowania katastrofalnej powodzi w lipcu 1997 roku* [w:] *Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 r.*, red. L. Starkel i J. Grela, Wyd. Oddziału PAN, Kraków.
- Prochal P., 1989, *Zasoby wodne obszarów górskich i kierunki ich wykorzystania*, *Problemy Zagospodarowania Ziem Górskich* 29.
- Pydziński B., 1962, *Stosunki wodne w górnej części dorzecza Soły*, *Rocznik Naukowo-Dydaktyczny WSP w Krakowie* 10, *Prace Geograficzne*.
- Sasim M., Wawerek T., 1996, *Powódź we wrześniu 1996*, *Gazeta Obserwatora IMGW* 5.
- Soja R., 1997, *Typy genetyczne wezbrań w dorzeczu górnej Wisły*, *Wiadomości Ziem Górskich* 6.
- Ziętara T., 1972, *Rzeźba beskidzkiej części dorzecza Soły*, *Czasop. Geogr.* 43.

GEOMORPHIC EFFECTS OF RESERVOIR OPERATION DURING FLOODS
IN THE SOŁA VALLEY

Summary

Floods which occurred in the Soła catchment in 1996, 1997 and 2001 caused considerable material loss and substantial changes in geometry of channels in both mountain and foremountain parts of the catchment. Three reservoirs, in Tresna, Porąbka and Czaniec, are located in the gorge of the Soła valley in the Beskid Mały Mts. The total flood storage of these reservoirs is estimated at approximately $30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. During the three floods, the flood storage capacity was soon exceeded and considerable volumes of water had to be released into the Soła channel downstream of the Czaniec dam. During the flood of July 1997, the largest recorded in the 20th c., maximum discharge below Żywiec computed from the flood water inflow to the Tresna reservoir exceeded $1,600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Although peak flow was reduced by the three reservoirs to $1,080 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ at Oświęcim, it represents the largest discharge ever recorded at that gauging station. The flood, though less severe, lasted considerably longer downstream from the reservoir system than it did in the mountain section upstream from Żywiec with non-regulated flow.

Morphologically effective discharge, capable of mobilizing even the coarsest fractions of bed material, lasted two-three times longer than it would have on a river without impoundments. Consequently, the channel of the Soła was deepened and widened by erosion while the eroded sediment was transported some kilometres downstream. The effect of dams was that of accelerating erosional processes. Bed degradation threatened stability of bridges and in the long-term, the Czaniec dam stability may be at risk.

The long-lasting flood downstream of the reservoir system created interesting channel features, such as chutes and overspill lobes. Although such features exist also in the mountain section of the Soła upstream from Żywiec, they are considerably smaller than the ones formed during the flood lasting several dozen hours.