

## **BUDOWA MORFOLOGICZNA I JEJ WPŁYW NA WARUNKI PRZEJŚCIA WÓD WEZBRANIOWYCH PRĄDNIKA NA ODCINKU SĄSPÓWKA–KORZKIEWKA**

Jacek Florek, Maciej Wyrębek

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

**Streszczenie.** Prądnik jest ciekim o charakterystycznej, głęboko wciętej, wąskiej, dolinie, słabo zagospodarowanej na skutek dominującego wpływu zagrożenia powodziowego. Profil podłużny doliny wskazuje na stopniowo malejący spadek jej dna i jednocześnie dużo mniejszy spadek brzegów doliny w układzie podłużnym, co powoduje, że na znacznej długości cieku dno doliny jest łatwo dostępne dla zalewu wód wezbraniowych. Znaczne nieregularności w kierunku przebiegu zarówno cieku jak i doliny oraz przepustowości poszczególnych przekrojów poprzecznych na jej długości są wywołane nierównomiernością w dostarczaniu materiału ze stoków i bocznych dopływów oraz zróżnicowaniem w budowie podłoża. Dynamiczne zmiany w budowie Prądnika na jego długości przedstawia analiza zmian wielkości parametrów określonych za pomocą modelowania hydraulicznego takich jak: graniczne i rzeczywiste naprężenia ścinające, wielkości przepływów korytowego i brzegowego, szerokości zalewu, prędkości ruchu wody i spadki. Prądnik może stanowić swoiste studium zjawisk tworzących warunki do przyspieszonych zmian w budowie morfologicznej doliny cieku. Szczególnie wobec perspektyw nasilenia zjawisk powodziowych, jakie obserwowane są w Polsce, warto śledzić zdarzenia hydrologiczne tej doliny i ich efekty oddziaływania na jej budowę.

**Słowa kluczowe:** budowa morfologiczna, stabilność dna, wezbranie

### **WSTĘP**

Budowa podłoża, warunki wysokościowe, położenie geograficzne, uwarunkowania klimatyczne są podstawą finalnego efektu jakim jest kształtująca się morfologia doliny rzecznej. Należy przez to rozumieć, że szereg złożonych wzajemnie czynników prowadzi do powstania określonego efektu przestrzennego doliny i koryta cieku przez

---

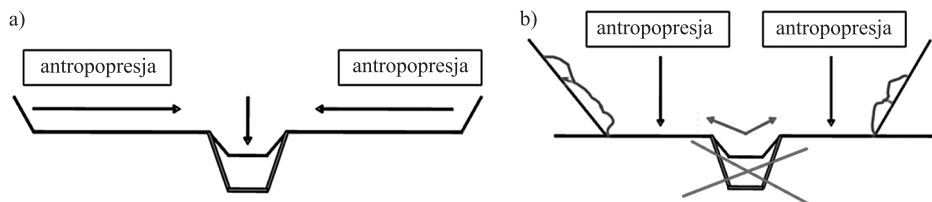
Adres do korespondencji – Corresponding author: dr inż. Jacek Florek, dr inż. Maciej Wyrębek, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków; e-mail: [rmflorek@cyf-kr.edu.pl](mailto:rmflorek@cyf-kr.edu.pl), [m.wyrebek@gmail.com](mailto:m.wyrebek@gmail.com).

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2017

nią przebiegającego. Zjawiska te mają różny charakter, tempo i czasotrwałość w jakiej zachodzą, przestrzenny zakres oddziaływania, powodując różne nasilenie efektów w poszczególnych częściach doliny i ciekę [Strużyński i in. 2013]. Efektem ich działania jest powstanie szczególnej budowy morfologicznej Prądnika i jej oddziaływanie na warunki przejścia wód wezbraniowych. Budowa ta powstała na skutek długotrwałego oddziaływania szeregu procesów spośród których warto wymienić: erozję, sedymentację, wietrzenie w tym wietrzenie chemiczne ze szczególnym uwzględnieniem karbonatyzacji i okresowo odwrotnego procesu rozpuszczania, osuwanie i obrywanie materiału zboczy. Tego rodzaju zmiany morfologiczne postępujące w długim czasie mogą wpływać na hydrauliczne warunki przepływu podczas powodzi [Radice i in. 2016]

Procesy związane z transportem rzeczny powodują powstawanie charakterystycznych elementów budowy morfologicznej takich jak: koryto ciekę, brzegi, terasa zalewowa (w warunkach Prądnika zarówno akumulacyjna, jak i erozyjna, to jest w materiale skalnym). W polskich warunkach najczęściej występują nadzalewowe terasy rzek powstałe w plejstocenie [Mizerski 2006], do których dostęp wód wezbraniowych jest niezwykle rzadki. W znacznej części Prądnika sytuacja jest zupełnie inna. Szybka erozja denną i wgłębna spowodowała pogłębienie dna do tego stopnia, że nie nadążająca za nimi erozja zboczy, w znacznej części zbudowanych ze skał wapiennych, doprowadziła do powstania płaskich teras, spośród których znaczna część jest regularnie zalewana wodami wezbraniowymi, osiagającymi bezpośrednio zbocza dolinowe. Praktycznie każde więc wezbranie jest tu zjawiskiem dolinowym, kreującym budowę morfologiczną doliny w jej dolnej części. Nierównomierne ukształtowanie dna wynika z różnej wytrzymałości podłoża, krętości ciekę i doliny oraz z obecności stożków nasypowych dopływów wytworzonych w 200 m miąższości wapieniach górnourajskich pochodzących sprzed 150 mln lat [OPN]. W rezultacie powstania tej szczególnej budowy morfologicznej, w głównej mierze typowej dla obszaru Prądnika w rejonie Ojcowskiego Parku Narodowego, mamy do czynienia z niepowtarzalną, z punktu widzenia hydrauliki przepływu w korytach otwartych, sytuacją, w której zjawiska zachodzą w innej skali częstotliwości, a każde wezbranie ma charakter dolinowy. Takie pozorne nasilenie zjawisk pozwala w nieproporcjonalnej skali wyodrębnić ich przyczyny w budowie koryta rzeczny oraz ich wpływ na morfologię i warunki przejścia wezbrania.

Dodatkowym elementem oddziaływania na warunki przejścia wezbrania jest antropopresja. Antropopresją nazywamy ogół działań człowieka który wywiera wpływ na środowisko przyrodnicze. W dolinach rzecznych objawia się ona skróceniem biegu ciekę co wpływa na zwiększenie spadku podłużny. Wpływa to na pogłębianie się koryt rzecznych [Bojarski i in. 2005]. W warunkach płaskiej szerokiej terasy zalewowej oddziaływanie koryta rzeczny na dolinę jest rzadkie i powstaje naturalna tendencja do zagospodarowania takiego obszaru. Jest on płaski i łatwo dostępny, urodzajny bo powstał w procesie zalewu wodą wezbraniową, a samo wezbranie pojawia się na nim na tyle rzadko, że nieuchronnie powstaje wrażenie, że zagrożenia powodzią nie ma. W efekcie terasa zalewowa jest stopniowo zabudowana z infrastrukturą antropogeniczną dochodzącą do samego brzegu ciekę [Twardy 2013]. Proces ten ulega zahamowaniu lub nawet czasowo wstrzymaniu po większym wezbraniu. Taki cykl występuje nawet w przypadku rzeki uregulowanej i umocnionej systemem obwałowań gdzie dodatkowo umocnienia brzegowe nasilają proces wcięcia koryta (ryc. 1a).



Ryc. 1. Warunki powszechnie występujące w dolinach rzek i potoków w Polsce: a) antropopresja postępująca w kierunku koryta rzeki, b) dominujący wpływ sił związanych z wezbraniem  
 Fig. 1. Typical conditions occurring in the Polish valleys: a) antropogenic influence approaching closing on river bed, b) dominating influence of forces coming with the flood

W warunkach doliny Prądnika mamy zupełnie inną sytuację. Dolina jest tu wcięta i wąska, w całości dostępna wodom wezbraniowym stąd praktycznie każde wezbranie o wielkości przekraczającej przepływ korytowej [Radecki-Pawlik 2011] powoduje zalew doliny. Presja wezbraniowa koryta rzecznej jest więc nieproporcjonalnie większa (ryc. 1b).

#### UWARUNKOWANIA GEOGRAFICZNE I KLIMATYCZNE ORAZ UŻYTKOWANIE TERENU

Potok Prądnik jest lewobrzeżnym dopływem Wisły, którego ujście znajduje się na obszarze miasta Krakowa [Czarnecka 2005]. Jego długość to 35,9 km, powierzchnia zlewni 193 km<sup>2</sup>, dominujące wysokości terenu mieszczą się w granicach od 200 do 500 m n.p.m. Zlewnia położona jest w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej. Miejscowości w dolinie Prądnika to Sułoszowa, Pieskowa Skała, Ojców, Prądnik Korzkiewski, Januszowice, Pękowice i Zielonki oraz częściowo miasto Kraków [Baścik i Partyka 2011]. W środkowej części zlewni znajduje się na podłożu z utworów wapiennych z okresu górnego jurajskiego, a na górnym odcinku na utworach lessowych. Charakterystyczny układ terenu to głębokie, wyłobione doliny dopływów w postaci jarów z płaskimi dolinami i stromymi zboczami, w znacznej części ten charakter ma sama dolina Prądnika. Lokalne nachylenia stoków w górnych i środkowych częściach zlewni przekraczają 20 stopni. Charakterystyczne jest występowanie wapiennych skał o wysokościach przekraczających kilkanaście metrów występujących na zboczach i lokalnie sięgających dna doliny.

Obszar zlewni charakteryzuje zimny region mezoklimatyczny den dolinowych o wysokiej różnicy temperatur dobowych, wilgotności przekraczającej 88% dla dna i poniżej 9% dla wierzchołków, opadzie 726 mm o opóźnionym, trwającym ok. 200 dni, skróconym w dnie doliny, o kilka tygodni okresie wegetacyjnym. Pokrywa śnieżna może zalegać do 136 dni. Najzimniejszy miesiąc to luty (-2,8°C), najcieplejsze to lipiec i sierpień (18,5°C). Dominujący kierunek wiatru w miesiącach lutym, kwietniu i maju, ze wschodu i południowego zachodu wywołany ukształtowaniem terenu o znacznym zróżnicowaniu ekspozycji i deniwelacji przekraczającej 100 m na niewielkim obszarze.

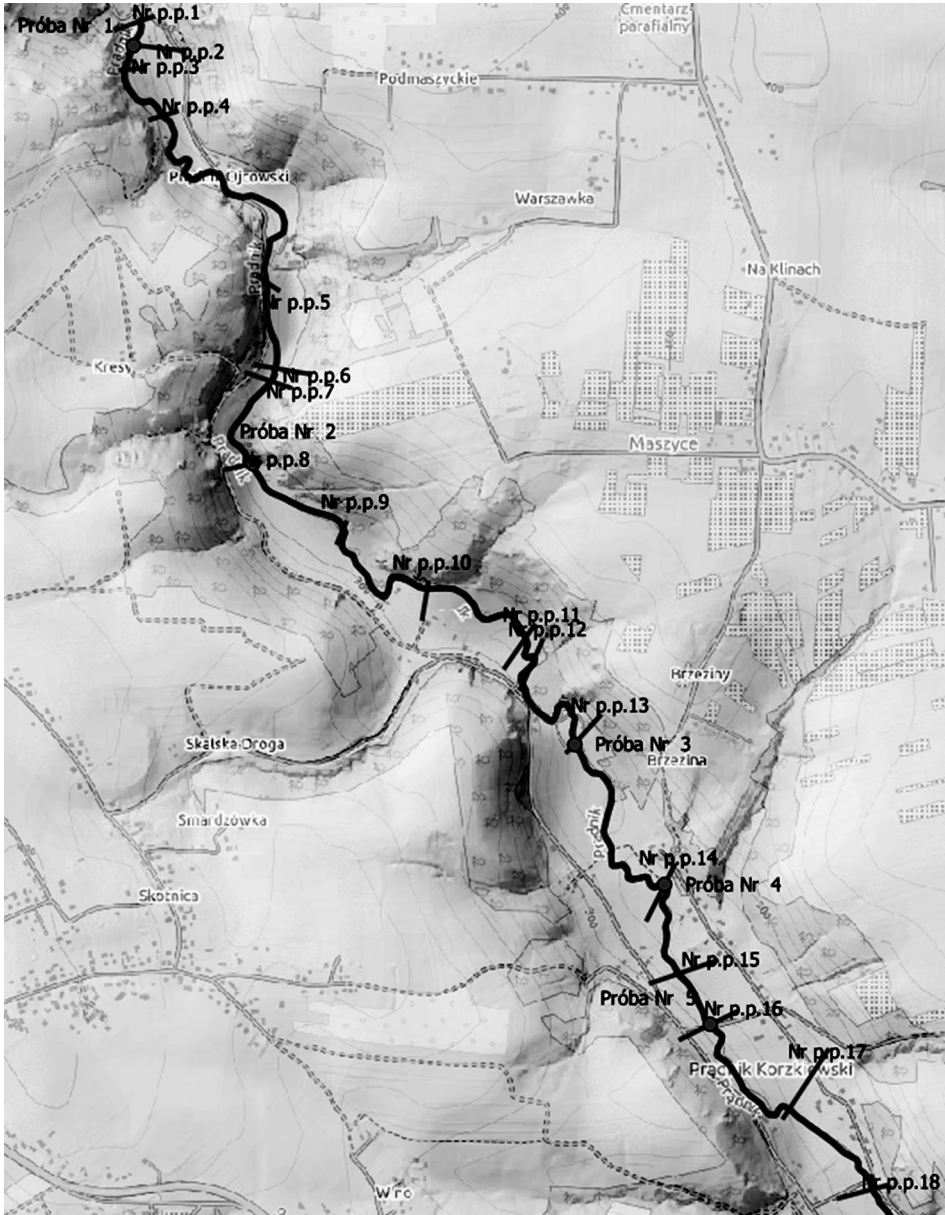
Zagospodarowanie terenu wywołało pokrycie gruntem ornym 75% powierzchni, lasy stanowiące 13%, w znacznej mierze skupione są wokół obszaru Ojcowskiego Parku Narodowego [OPN]. Znaczna część terenu użytkowana jest jako działki przyległe do

gospodarstw, a w południowej części występuje zabudowa wiejska, natomiast zwarta zabudowa i tereny przemysłowe głównie na obszarze Krakowa.

## METODYKA POMIAROWA

Badania na Prądniku przeprowadzono w kilku cyklach pomiarowych w latach 2013–2016. Polegały one na określeniu przebiegu koryta cieku w układzie poziomym, pomiarach przekrojów poprzecznych przy użyciu tachimetru lustrowego i GPS klasy RTK (Global Positioning System, Real Time Kinematic), pomiarze uziarnienia dna cieku za pomocą techniki przesiewu, wizji lokalnej z określeniem warunków porostu roślinnego. Podstawę pomiarową stworzyła osnowa lokalnych punktów o współrzędnych ustalonych dzięki GPS RTK. Jest to urządzenie będące obecnie standardem geodezyjnym w pomiarach, przy których dostęp do punktów osnowy geodezyjnej jest utrudniony. W czasie rzeczywistym, urządzenie odbiera sygnały z satelitów oraz poprzez system GSM, za pośrednictwem Internetu, łączy się z siecią naziemnych stacji referencyjnych skąd otrzymuje wartości poprawek pomiarowych i dla tak pozyskanych danych określa współrzędne punktu pomiarowego. Podczas wykonywania pomiaru użytkownik jest informowany o dokładności zarejestrowanego punktu, dane takie przypisane są również w postaci metryki do zapisanych współrzędnych punktów pomiarowych. Po wykonaniu nawiązania do punktów ustalonych przy użyciu GPS RTK pomiary odbywają się przy wykorzystaniu tachimetru. Efektem pomiarów są zorientowane w geodezyjnym systemie orientacji przestrzennej punkty o współrzędnych  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Pomiary obejmują przekroje poprzeczne zlokalizowane na odcinkach, na których dochodzi do zmian w charakterze bądź rozmiarze koryta rzecznego. Pomiar uziarnienia dennego polega na przesiewie i w ujęciu masowym określeniu procentowej zawartości poszczególnych frakcji materiału dennego cieku. Podobnie jak w przypadku przekrojów poprzecznych lokalizacja punktów poboru rumowiska dennego uzależniona jest od zaobserwowanej zmienności jego charakteru. Ostatnim elementem uzupełniającym pomiary była wizja w terenie, która miała za zadanie określenie charakteru porostu roślinnego w celu określenia zróżnicowania współczynnika szorstkości terenu zalewowego. Ze względu na szczególnie układ wysokościowy i zagospodarowanie doliny Prądnika powyższe pomiary były utrudnione. Pomiary z wykorzystaniem sygnałów satelitarnych wymagają określonej propagacji sygnału, m.in. konieczna jest dobra ekspozycja satelitów i możliwość połączenia z naziemną siecią GSM, co przy głębokim wcięciu dolinowym i znaczącym poroście roślinnym, zaburza jakość odbioru, pogarszając warunki pomiaru. Wydłuża to znacznie poszukiwanie punktów przydatnych do zbudowania osnowy. Nawet poza sezonem wegetacyjnym pojawiają się utrudnienia w pomiarach przekrojów poprzecznych. Na terenie zagospodarowanym lokalne ogrodzenia utrudniają dostęp i możliwość przemieszczania. W tak opisanym terenie pomiary mają sens wyłącznie przy sprzyjających warunkach pogodowych i najlepiej poza sezonem wegetacyjnym.

Uziarnienie pobrano w pięciu miejscach na długości analizowanego odcinka cieku (ryc. 2). Każdorazowo pobrano próbę o wadze ok. 100 kg którą przesiano przez sita o wymiarach oczek 0,02, 0,04, 0,06, 0,08 m. Dla każdej próby dodatkowo zmierzono maksymalną średnicę ziarna  $d_{\max}$ .



Ryc. 2. Lokalizacja przekrojów pomiarowych oraz miejsc poboru próbek rumowiska (OGC Web Map Service)

Fig. 2. Cross-sections and samples extraction location (OGC Web Map Service)

## MODELOWANIE HYDRAULICZNYCH WARUNKÓW PRZEPIYU

Modelowanie numeryczne przeprowadzono za pomocą modelu jednowymiarowego HEC-RAS. Obecnie na potrzeby tworzenia map zagrożenia powodziowego, jako przyjęty standard, wykorzystywany jest model MIKE11. Modele te przeprowadzają obliczenia hydrauliczne w przekrojach poprzecznych, uśredniając warunki hydrauliczne w przekroju poprzecznym. W programie MIKE11 występuje stała odległość pomiędzy przekrojami na całej szerokości koryta, natomiast wartości parametrów hydraulicznych są uśredniane dla całego przekroju poprzecznego. W programie HEC-RAS występuje podział koryta na trzy części: lewą terasę zalewą, koryto główne i prawą terasę zalewową. Dodatkowo wprowadzając odległości pomiędzy poszczególnymi przekrojami na linii ciekła istnieje możliwość wprowadzenia trzech różnych długości w każdej części koryta. Pozwala to na dokładniejszą analizę wyników obliczeń w poszczególnych częściach przekroju poprzecznego oraz na odzwierciedlenie układu ciekła w planie. Dla przeanalizowania budowy morfologicznej ciekła lepszym wyborem okazał się model HEC-RAS i przemówiło to za wyborem tego oprogramowania.

Model HEC-RAS został opracowany przez US Corps of Engineers. Model ten odtwarza ustalony i nieustalony przepływ wody w korycie rzeki. Program ten opiera się na formule Chezy:

$$v = c \cdot R_h^{1/2} \cdot S_f^{1/2} \quad R_h = \frac{F}{O_z}$$

gdzie:

- $C$  – współczynnik prędkości,  $s^{-1}$ ,
- $R_h$  – promień hydrauliczny, m,
- $O_z$  – obwód zwilżony, m,
- $F$  – pole przekroju poprzecznego,  $m^2$ ,
- $S_f$  – spadek linii energii (w modelu zastąpiony jest spadkiem zwierciadła wody).

Położenie zwierciadła wody obliczone jest wykorzystując zasadę zachowania energii. Równanie zachowania energii dla dwóch kolejnych przekrojów przepływu wygląda następująco:

$$Zd_1 + h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Zd_2 + h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = \bar{S}_f \cdot L_p + C_d \left[ \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right]$$

gdzie:

- $\bar{S}_f$  – spadek tarcia pomiędzy dwoma sąsiednimi przekrojami, –,
- $L_p$  – średnia ważona odległość między przekrojami, m,
- $C_d$  – współczynnik dyfuzji lub kontrakcji w zależności od kształtu strumienia, –.

Model został zbudowany w oparciu o pomiary terenowe. Analizowany odcinek rzeki Prądnik ma długość 4531 m i składa się z 19 przekrojów poprzecznych. Lokalizacja odcinka pomiarowego jest nieprzypadkowa. Znajduje się on na obszarze znacznego i zmieniającego się wcięcia dna doliny. Przekroje poprzeczne są w odległościach od 5 do 643 m (średnia odległość pomiędzy przekrojami wynosi ok. 250 m). Współczynniki szorstkości w korycie głównym obliczono na podstawie krzywych uziarnienia sporządzonych podczas pomiarów terenowych. Na lewej i prawej terasie zalewowej współczynniki szorstkości dobrano na podstawie użytkowania terenu ustalonego w wizji lokalnej.

## OBLICZENIA NAPRĘŻEŃ GRANICZNYCH

Naprężenia graniczne obliczono dla każdej frakcji wszystkich pomierzonych krzywych przesiewu z poniższego wzoru [Bartnik, Florek 2000]:

$$\tau_{gr} = f_i \cdot g \cdot \Delta\rho_s \cdot d_i$$

gdzie:

- $f_i$  – naprężenia styczne dla  $i$ -tej frakcji, –
- $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $m \cdot s^{-2}$ ,
- $\Delta\rho_s$  – gęstość rumowiska zanurzonego w wodzie,  $kg \cdot m^{-3}$ ,
- $d_i$  – średnica  $i$ -tej frakcji, m.

Aby wielkości naprężeń mogły uwzględnić wzajemne proporcje w składzie granulometrycznym bezwymiarowe naprężenia krytyczne dla  $i$ -tej frakcji rumowiska o średnicy  $d_i$  obliczono ze wzoru Wanga [Bartnik 1992]:

$$f_i = \frac{f_m}{1,786 \cdot \left(\frac{d_i}{d_m}\right)^{0,947}} \quad d_i/d_m \leq 0,4 \quad f_i = \frac{f_m}{\left(\frac{d_i}{d_m}\right)^{0,314}} \quad d_i/d_m > 0,4$$

gdzie:

$$d_m = \Sigma d_i \cdot p_i - \text{średnica miarodajna, m.}$$

Bezwymiarowe naprężenia  $f_m$  określono ze wzoru [Bartnik 1992]:

$$f_m = 0,039 \cdot \sigma^{0,26} \quad d_i/d_m < 0,6 \quad f_m = 0,028 \cdot \sigma^{0,26} \quad d_i/d_m \geq 0,6$$

gdzie:

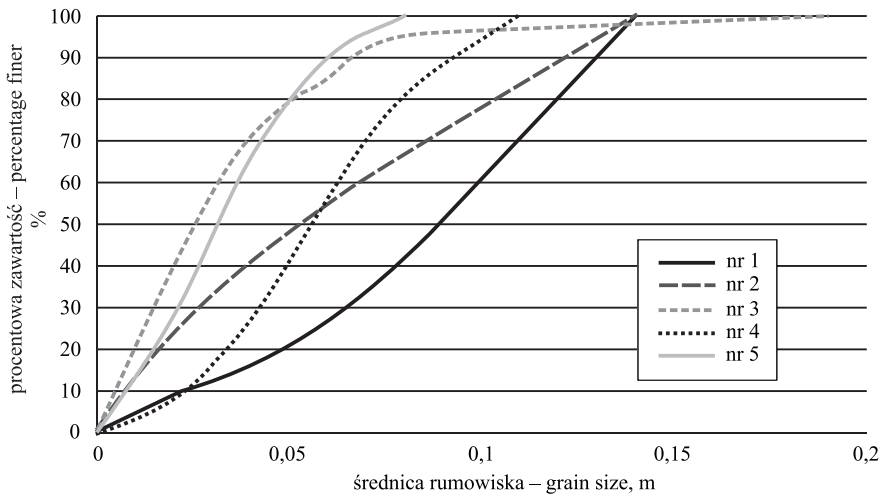
$$\sigma = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$$

$\sigma$  – odchylenie standardowe krzywej przesiewu, –.

Wykorzystanie powyższej procedury obliczeniowej pozwoliło uwzględnić rzeczywiste wielkości granicznych naprężeń ścinających dla poszczególnych frakcji pozyskanych krzywymi przesiewu, przy założeniu ich wzajemnych proporcji średnicy i zawartości w pobranej próbce [Gessler 1971, Graf 1971].

## WYNIKI

Wyniki pomiarów pozwoliły na określenie wartości: uziarnienia dennego, układu geometrycznego koryta cieką, parametrów hydraulicznych podczas szeregu analizowanych warunków przepływu w korycie głównym i na terasach zalewowych. Na długości całego odcinka pobrano pięć prób rumowiska dennego dla których sporządzono krzywe przesiewu (ryc. 3).



Ryc. 3. Krzywe uziarnienia

Fig. 3. Grain size distribution

Na podstawie krzywych przesiewu obliczono współczynniki szorstkości dna. Wartości te posłużyły do ustalenia oporów ruchu w obliczeniach modelem oraz niezależnie pozwoliły na określenie krytycznych parametrów ruchu rumowiska w obszarach poboru próbek. Tabela 1 przedstawia wielkości naprężeń bezwymiarowych początku ruchu  $f_m$ , naprężeń bezwymiarowych dla poszczególnych frakcji  $f_i$  oraz granicznych naprężeń ścinających frakcji  $\tau_{gri}$ , które uwzględniają ich wielkości w realnych warunkach aktualnego składu granulometrycznego.

Znaczna zmienność wielkości granicznych sił jednostkowych początku ruchu rumowiska wlezonego  $\tau_{gri} = 37,46-74,49 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  w dnie Prądnika na badanym odcinku odzwierciedla dynamikę tego odcinka. W sytuacji, jaka tu panuje, mamy do czynienia zarówno z tworzeniem się określonego składu granulometrycznego na skutek urozmaiconej budowy morfologicznej dna doliny jak i z oddziaływaniem odcinka o znacznej zmienności w zakresie krytycznych warunków ruchu ziarna na dynamikę zmian morfologicznych.



Tabela 1. Naprężenia graniczne  
Table 1. Critical shear stresses

Nr próby Sample no.	Średnica rumowiska Grain size m	Procentowa zawartość Percentage finer %	$f_m$ –	$f_i$ –	$\tau_{gri}$ $N \cdot m^{-2}$
1	0,02	9	0,045	0,121	40,72
	0,04	7	0,045	0,063	42,24
	0,06	11	0,045	0,054	54,29
	0,08	15	0,032	0,035	47,48
	0,14	58	0,032	0,030	69,70
2	0,02	24	0,051	0,102	34,21
	0,04	17	0,051	0,063	42,29
	0,06	14	0,037	0,040	40,10
	0,08	12	0,037	0,036	48,85
	0,14	33	0,037	0,030	71,71
3	0,02	40	0,051	0,066	22,15
	0,04	31	0,036	0,038	25,58
	0,06	14	0,036	0,033	33,78
	0,08	10	0,036	0,031	41,15
	0,19	5	0,036	0,023	74,49
4	0,02	8	0,045	0,080	26,82
	0,04	19	0,045	0,053	35,69
	0,06	29	0,032	0,033	33,84
	0,08	25	0,032	0,031	41,22
	0,11	19	0,032	0,028	51,28
5	0,02	28	0,047	0,060	20,16
	0,04	38	0,034	0,035	23,29
	0,06	24	0,034	0,030	30,75
	0,08	10	0,034	0,028	37,46

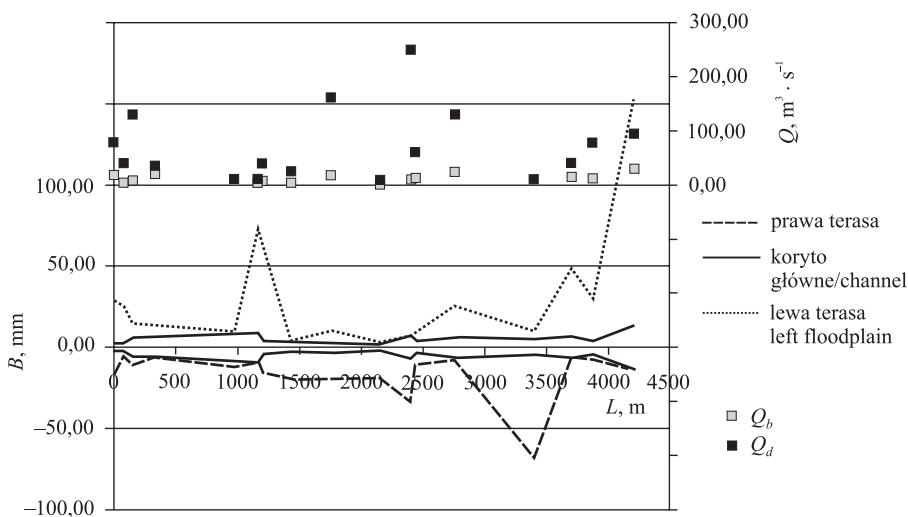
Obliczenia hydraulicznych warunków ruchu wody przeprowadzono dla ruchu ustalonego dla 37 wartości przepływów w zakresie od  $Q_{\min} = 0,55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  do  $Q_{\max} = 300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . przy przepływie  $Q_{1\%} = 77 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  [Baścik i Partyka 2011]. Celem modelowania było określenie wartości przepływu mieszczącego się w korycie głównym cieku ( $Q_b$ ) oraz przepływu wypełniającego dolinę cieku ( $Q_d$ ), a ponadto wzajemnych proporcji pomiędzy nimi. Naturalne poszerzenia i zawężenia doliny Prądnika, znaczna zmienność przewyższenia terasy dolinowej nad dnem koryta powoduje dynamikę w obrębie prezentowanych wartości przepływów (tab. 2) ujawniając tym samym rozbudowaną morfologię doliny.

Tabela 2. Parametry przepływów brzegowego  $Q_b$  i dolinowego  $Q_d$   
 Table 2. Flow parameters calculated for cross-sections of the valley  $Q_d$  and the stream  $Q_b$

$L, m$	$Q_b, m^3 \cdot s^{-1}$	$Q_d, m^3 \cdot s^{-1}$	$B, m$				$v, m \cdot s^{-1}$				$\tau_0, \frac{Q_d}{N} \cdot m^{-2}$		$\tau_0, \frac{Q_b}{N} \cdot m^{-2}$	
			lewa terasa left floodplain	prawa terasa right floodplain	prawa terasa right floodplain	koryto główne channel	lewa terasa left floodplain	prawa terasa right floodplain	koryto główne channel	lewa terasa left floodplain	prawa terasa right floodplain	koryto główne channel	lewa terasa left floodplain	koryto główne channel
0	18,00	78,00	26,68	4,74	14,46	2,53	2,99	1,27	18,94	55,39	15,34	76,10		
76	4,00	40,00	23,67	4,77	3,01	0,50	5,21	2,75	56,92	186,63	82,55	19,15		
154	9,00	130,00	9,74	11,30	4,80	0,47	4,48	2,34	39,13	113,12	53,93	43,38		
334	20,00	35,00	7,36	11,79	0,00	0,63	3,33	0,00	12,55	85,16	0,00	62,53		
977	9,00	10,99	1,33	17,98	3,27	0,39	0,75	0,75	0,78	4,40	4,38	24,93		
1165	4,20	11,00	63,40	17,91	0,00	0,23	0,37	0,00	0,75	1,11	0,00	7,05		
1201	7,90	40,00	56,60	9,40	10,70	0,66	1,82	0,75	5,23	21,97	5,81	10,25		
1435	3,98	25,00	0,00	5,89	16,47	0,00	2,52	1,98	0,00	45,02	28,76	22,20		
1757	16,80	160,00	6,98	6,86	16,17	1,52	4,66	2,54	39,07	96,03	30,89	60,92		
2155	0,55	7,00	1,57	4,05	17,29	0,35	0,83	0,40	1,44	4,08	1,14	0,39		
2403	10,00	250,00	0,00	14,05	25,74	0,00	4,94	2,50	0,00	113,07	38,39	38,21		
2444	12,00	60,00	4,92	8,50	6,47	0,63	2,00	1,14	7,67	18,25	9,84	398,63		
2762	25,00	130,00	19,20	12,20	2,06	0,85	4,12	0,91	13,71	89,23	9,22	79,73		
3402	6,50	11,00	5,61	9,20	63,87	0,05	1,07	0,12	0,55	7,42	1,68	6,72		
3704	15,00	40,00	41,84	12,57	0,00	0,30	2,70	0,00	15,53	44,01	0,00	50,38		
3876	12,00	77,99	25,63	9,00	3,47	3,08	9,00	3,62	158,65	576,84	151,51	281,23		
4214	30,00	95,00	140,93	26,61	0,60	0,23	2,10	0,56	7,57	27,92	3,85	19,84		

Podobnie jak przepływy również szerokości poszczególnych części przekrojów poprzecznych dla przepływu dolinowego charakteryzują się dużą zmiennością. Szerokości koryta zmieniają się od 4 m do 26 m, terasy zalewowe mogą nie występować, tam gdzie koryto ciekę oparło się bezpośrednio o stok dolinowy lub osiągnąć wielkości 63 m w przypadku prawej i 140 m w przypadku lewej.

Na wykresie sumowych szerokości (ryc. 4), można zaobserwować zmienność całkowitej szerokości doliny, która na badanym odcinku uzyskuje wartość od 20 m do 170 m.



Ryc. 4. Szerokości koryta i przepustowości przekrojów brzegowego i dolinowego ( $Q_b$ ,  $Q_d$ )  
Fig. 4. Width and water flow capacities of the cross-section and valley ( $Q_b$ ,  $Q_d$ )

Zarówno szerokości jak i głębokości w przekrojach poprzecznych odzwierciedlają kształty, pozwalające na różne warunki ruchu wody wyrażane obliczeniowymi prędkościami w korycie i na terasach. Można tutaj zauważyć (tab. 2. parametr  $v$  i ryc. 4) tak duże zróżnicowanie doliny Prądnika, że w ciągu danych, jakie występują w kolejno następujących po sobie przekrojach poprzecznych, trudno znaleźć jakieś uporządkowanie pozwalające zaobserwować przejścia, np. pomiędzy przekrojami szerszymi a zwartymi czy głębszymi i płytszymi. Jedynie na dłuższych odcinkach można odnaleźć tendencje wynikające z poszerzenia doliny czy jej zwężenia wpływające na warunki ruchu wody.

Nałożenie na siebie zmienności przepływu dolinowego  $Q_d$  i brzegowego  $Q_b$  odzwierciedla również efekt oddziaływania spadku dna na całkowity wydatek przepływu w poszczególnych częściach przekrojów obliczeniowych.

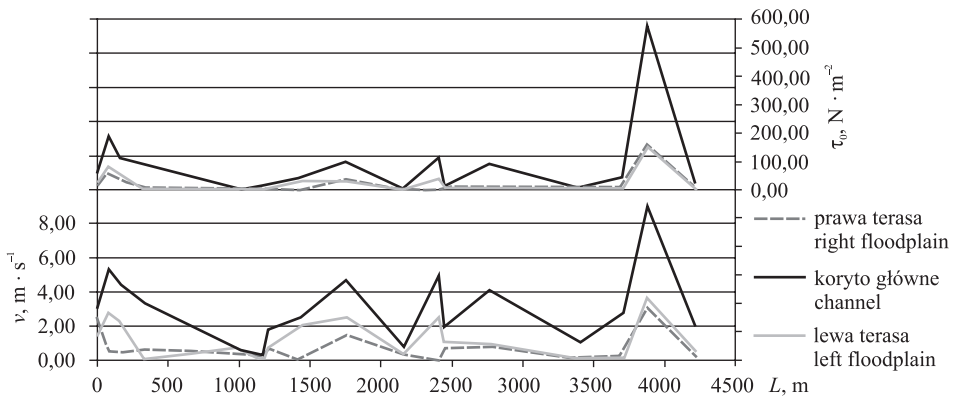
W przypadku Prądnika koryto ciekę stanowić może znaczącą część szerokości doliny, szczególnie w jej zwężeniach. Na odcinku o długości ok. 700 m koryto ciekę jest szersze od obu teras zalewowych.

Wielkości naprężeń stycznych w zestawieniu z pozostałymi wartościami pozwalają określić zasięg przestrzenny odcinków ciekę o dużej i małej zdolności do przeprowa-

dzania wezbrań, wielkości sił w nim występujących i stopnia przekroczenia naprężeń granicznych początku ruchu ale, co ciekawe również i tutaj nie ma bezpośredniej zależności pomiędzy występowaniem przepływów i naprężeń maksymalnych.

Wielkości naprężeń ścinających dla przepływów brzegowych są co prawda w korycie wystarczające dla masowego ruchu rumowiska wleczonego ( $\sim 100 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ) jednak, w większości przypadków na terasie zalewowej są zbyt małe. Dzieje się tak ponieważ w większości przekrojów przepływ brzegowy jest bardzo niski i w praktyce każde wezbranie wykracza tam z koryta.

Jak widać na podstawie zaprezentowanych wielkości naprężeń ścinających (ryc. 5) w budowie części korytowej przekrojów poprzecznych i w budowie samej doliny nie ma żadnej regularności. Maksymalne wielkości sił granicznych nie narastają ani nie maleją wraz z biegiem odcinka analizowanego w obliczeniach modelowych. Prądnik jest ciekim, którego charakterystyka pionowa (ryc. 6) pozwala wyodrębnić trzy zasadnicze fragmenty: początkowy, na którym wcięcie dolinowe zaczyna się zaznaczać i stopniowo narasta, centralny, gdzie wcięcie przekracza 100 m, oraz końcowy, w którym ciek wchodzi stopniowo w dolinę Wisły, traci wcięcie a dolina się poszerza.

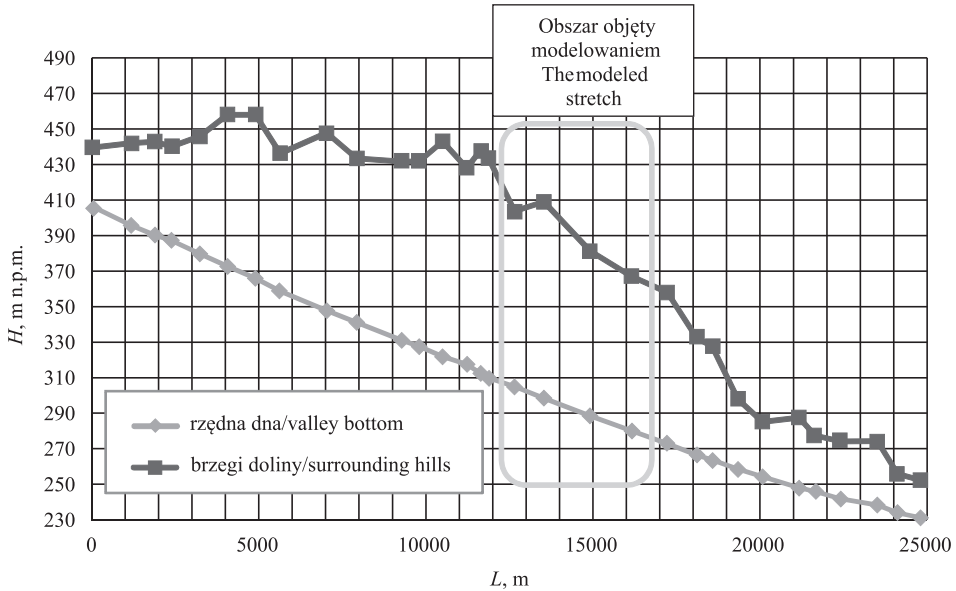


Ryc. 5. Naprężenia ścinające i prędkości ruchu wody w poszczególnych częściach przekrojów poprzecznych i przepływach ( $Q_b$ ,  $Q_d$ )

Fig. 5. Shear stresses and water flow velocities in parts of cross-sections and for the discharges ( $Q_b$ ,  $Q_d$ )

Obszar objęty obliczeniami modelowymi znajduje się w strefie gdzie spadek dna doliny maleje, a spadek brzegów doliny (wierzchowin) narasta (tab. 3). Jednocześnie na odcinku tym zanikają zupełnie zwężenia dna doliny (powyżej 18 km odcinka stałe ponad 200 m).

Różnice w wysokości położenia terenu bezpośrednio przyległego do doliny cieków wyrażają potencjalną dynamikę zjawisk jakie znajdują swoje odzwierciedlenie w korycie. W przypadku Prądnika brzegi doliny są strome, nierównomierne, spadek średni terenu podwyższają dodatkowo, również wcięte, mniejsze dopływy nasilając procesy erozji.



Ryc. 6. Profil podłużny Prądnika z uwzględnieniem położenia dna, brzegów doliny i obszaru objętego obliczeniami modelowymi

Fig. 6. Longitudinal profile of Prądnik's valley bottom and surrounding hills. The modeled stretch is depicted in blue

Tabela 3. Zmienność spadku dna doliny oraz poziomu okalających ją wzgórz na długości Prądnika  
Table 3. Changes in the fall of the valley bottom and surrounding hills calculated along the Prądnik

Położenie na długości przekroju Position along the length of the section	Spadek dna doliny Slope of the valley bottom ‰	Spadek brzegów doliny Slope of surrounding hills ‰
0 – 5000 m	8,5	1,4
5000 – 20 000 m	7,2	10,4
20 000 – 25 000 m	4,9	7,0

## PODSUMOWANIE

W przypadku płaskiej i rozległej terasy zalewowej, będącej jednocześnie urodzajnym, dostępnym i użytecznym terenem, zaznacza się silny wpływ antropopresji, która z upływem czasu doprowadza do tego, że zabudowa zbliża się coraz bardziej do koryta ciek. W przypadku Prądnika małej szerokości płaska, głęboko wcięta dolina tworzy warunki, w których okresowe wezbrania ciek wywołują dominującą presję, przeciwdziałając wpływowi antropopresji. W efekcie zabudowa doliny w jej centralnej części ogranicza się do pojedynczych gospodarstw położonych na naturalnych podwyższeniach terenu.

W sytuacji, w której mamy do czynienia z odcinkiem rzeki o określonej charakterystyce dotyczącej np. spadku, szerokości koryta czy doliny możemy liczyć się z tym, że będzie ona dominować na pewnej długości cieką, zmieniając się przy tym stopniowo. Na Prądniku sytuacja jest odmienna, nawet na krótkim stosunkowo dystansie objętym modelem występują kilkukrotne zmiany tendencji zarówno w odniesieniu do szerokości koryta i teras zalewowych, głębokości, wielkości przepływów korytowych, dolinowych, prędkości w poszczególnych częściach koryta wielkiej wody, jak i lokalizacji miejsc zagrożonych erozją czy też tych o potencjale do akumulacji.

Obecność na znacznej długości Prądnika odcinków o bardzo małej przepustowości korytowej, w których przepływ dolinowy jest niewielki, powoduje, że praktycznie każde wezbranie na znacznej części długości cieką ma zdolność uruchamiania materiału dennego nie tylko w korycie, ale również w dolinie. Tylko w siedmiu spośród wszystkich przekrojów poprzecznych wielkość przepływu dolinowego była większa od  $Q_{1\%}$ , co oznacza, że w dominującej części doliny Prądnika przepływy znacznie mniejsze niż wielka woda są w stanie całkowicie wypełnić wąską, wciętą dolinę.

Podczas gdy na płaskich i rozległych terasach zalewowych rzek po przekroczeniu stanu brzegowego następuje gwałtowny spadek sił oddziaływania wody na podłoże, w Prądniku proces ten nie ustaje po przekroczeniu przepływu korytowego i w rezultacie podczas wezbrań siły oddziaływania na terasie są duże, sprzyjając erozji.

Szczególne warunki budowy morfologicznej doliny Prądnika w rejonie pomiędzy Prądnikiem Korzkiewskim a Ojcowem tworzą dolinę i koryto cieką, w których zjawiska kształtujące występują ze zwiększoną częstotliwością, przyspieszając w czasie zmiany w ich budowie. Każde oddziaływanie antropogeniczne jest, w tej sytuacji silną ingerencją na warunki przepływu wód wezbraniowych, a każde wezbranie stanowi zagrożenie dla infrastruktury antropogenicznej niezależnie od jej lokalizacji na dnie doliny. Wobec możliwych perspektyw nasilenia zjawisk powodziowych jakie obserwowane są aktualnie w Polsce warto śledzić zdarzenia hydrologiczne w tej dolinie i potencjalne efekty ich oddziaływania na jej budowę.

## PIŚMIENNICTWO

- Bartnik, W., Florek, J. (2000). Ocena warunków równowagi hydrodynamicznej potoku górskiego na podstawie analizy hydraulicznych parametrów przepływu. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Inżynieria Środowiska*, 20, 163–175.
- Bartnik, W. (1992). Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym, początek ruchu rumowiska wleczonego. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Rozprawa habilitacyjna*, 171.
- Baścik, M., Partyka, J. (2011). Wody na Wyżynach Olkuskiej i Miechowskiej. Zlewnie Prądnika, Dłubni i Szreniawy. IGI GP UJ, OPN, Kraków.
- Bojarski, A., Jeleński, J., Jelonek, M., Litewka, T., Wyźga, B., Zalewski, J. (2005). *Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich*. Praca koordynowana przez Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- Czarnecka, H. (2005). *Atlas podziału hydrograficznego Polski*, Komitet Redakcyjny IMGW. Warszawa 2005.
- Gessler, J. (1971). Beginning and ceasing sediment motion. [W:] *River Mechanics*. Red. H.W. Shen. Rozdz. 7.
- Graf, W.H. (1971). *Hydraulics of sediment transport*. McGraw-Hill Book, London.

- Kijowski, A., Rączkowski, W. (2007). Przekształcenia sieci osadniczej dolin rzecznych w Wielkopolsce i ich rola w planowaniu przestrzennym. *Doliny rzeczne: Przyroda – Krajobraz – Człowiek. Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego*, 7, 301–311.
- Książek, L., 2000. Proces deformacji dna koryta potoku górskiego i jego związek z siłą wleczenia pojedynczych ziaren rumowiska. Rozprawa Doktorska. Wydział Inżynierii Środowiska. Akademia Rolnicza w Krakowie.
- Mizerski, W., 2006. *Geologia dynamiczna*. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa, 368 pp. OGC Web Map Service: <http://tile.opencyclemap.org/landscape> <http://www.geoportal.gov.pl/>. OPN: <http://www.ojcowskiiparknarodowy.pl>.
- Radecki-Pawlik, A. (2011). Hydromorfologia rzek i potoków górskich. Działy wybrane. Podręcznik Akademicki. Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, ss. 280.
- Radice, A., Longoni, L., Papini, M., Brambilla, D., Ivanov V.I. (2016). Generation of a Design Flood-Event Scenario for a Mountain River with Intense Sediment Transport. *Water*, 8(12), 597.
- Strużyński, A., Bartnik, W., Kulesza, K., Czoch, K. (2013). Równowaga hydrodynamiczna ważnym parametrem kształtującym stan ekologiczny cieków karpacckich. *Rocz. Ochr. Środ.*, 15, 2591–2610
- Twardy, J. (2013). Pradziejowa kolonizacja małych dolin rzecznych środkowej Polski i jej konsekwencje dla rozwoju rzeźby. *Landform Analysis*, 24, 97–106.

## **MORPHOLOGY OF THE PRĄDNIK STREAM AND IT'S INFLUENCE ON THE HIGH WATER STAGES BETWEEN SĄSPÓWKA AND KORZKIEWKA**

**Abstract:** Prądnik is a stream characterized by a deep cut, narrow valley, poorly developed as an effect of permanent danger coming from a flood. Longitudinal profile of the valley shows gradually decreased bottom fall and in the mean time much slower diminishing height of the surrounding hills which leads to the particular situation of floods heaving good access to the bottom of the valley. Huge irregularities in the both stream and valley directions as well as in the cross-sections water flow capacities are caused by the difference in the amount of material delivered from slopes and tributaries combined with changing valley bed composition. Dynamic changes in the Prądnik structure are shown by the hydraulical modeling results composed from values of critical and calculated shear stresses, floods capacities calculated for cross-sections of the valley and the stream, water level width, water velocities and valley slopes. Prądnik might be considered as a testing ground for learning the impact of processes capable of making great morphological changes in the structure of the valley and doing it in the short time. Particularly in front of possible intensification of flood events observed currently in Poland it might be useful to track the development of hydrological events of this valley and their impact on the Prądnik's morphological structure.

**Key words:** river morphology, river bed stability, velocity profile

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.12.2017*

Do cytowań – For citation: Florek, J., Wyrębek, M. (2017). Budowa morfologiczna i jej wpływ na warunki przejścia wód wezbraniowych Prądnika na odcinku Sąspówka–Korzkieвка. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 16(4), 35–49.