

Analiza recesji wydatku źródeł pienińskich w świetle obserwacji limnimetrycznych

Analysis of spring discharge in the view of limnimetric monitoring

WŁODZIMIERZ HUMNICKI

*Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej
ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa, e-mail: w.humnicki@uw.edu.pl*

Abstract. The paper describes the results of 9-year stationary monitoring of three springs: Kirowy, Kotłowy and Pod Wysoki Dział, located in the Pieniny Mts. The monitoring of water levels with application of automatic limnimeters and periodically measured springs' discharges allowed to record detailed variation of discharges especially in the periods of spring's own regime, i.e. connected with draining of own groundwater reservoir and independent of temporary recharging events, like snowmelt or rain. Based on the analysis of springs' discharges and daily sum of precipitation, 20 to 50 several-day-long periods of discharge recession were selected for particular spring.

Key words: Pieniny Klippen Belt, springs, discharge curves, recession coefficient

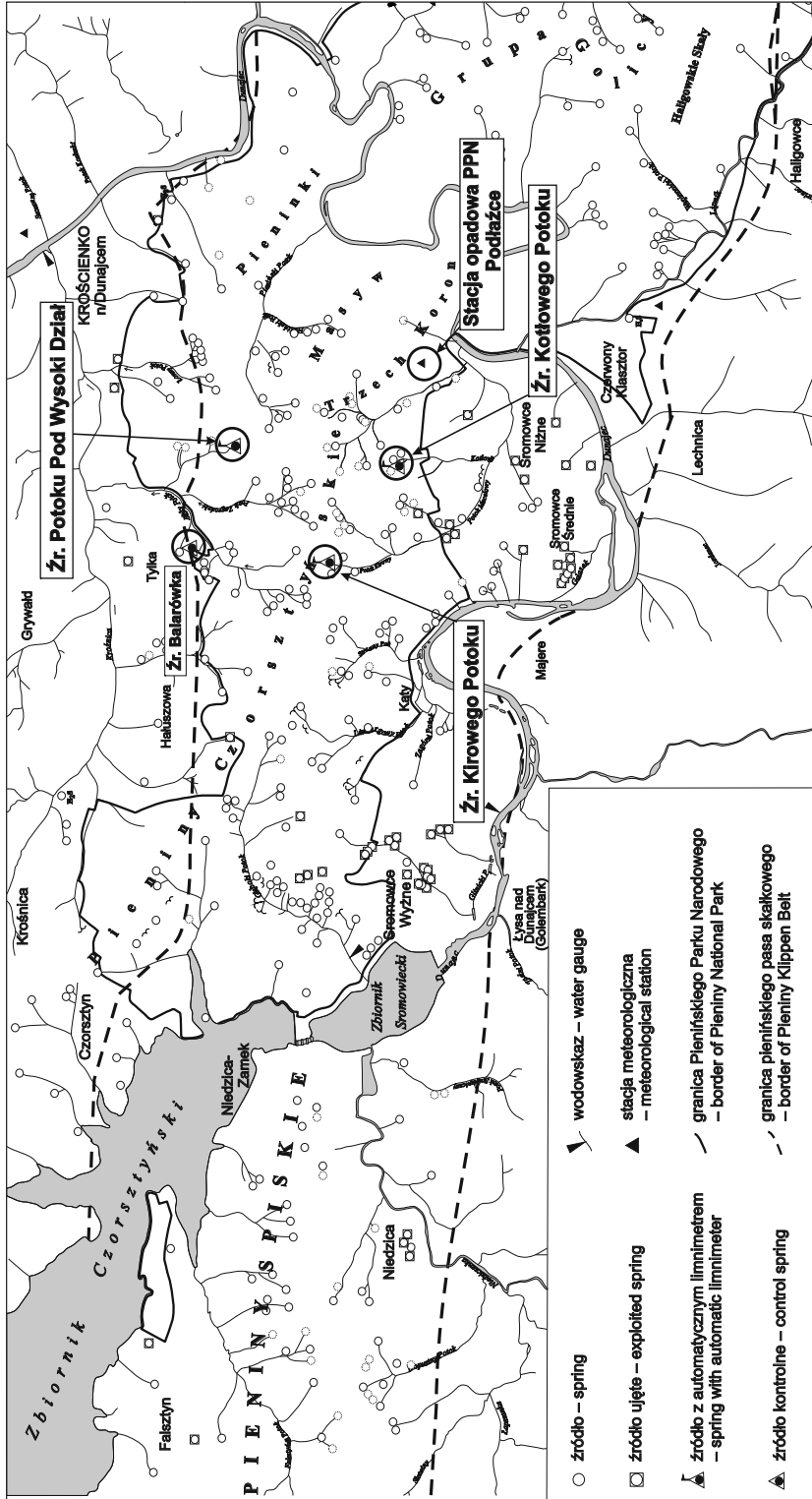
WSTĘP

Badania krenologiczne odgrywają niezwykle istotną rolę w rozpoznaniu regionalnych warunków hydrogeologicznych, zwłaszcza w górskich obszarach chronionych takich jak Pieniny, gdzie ze względu na ochronę przyrody nie wykonuje się wierceń umożliwiających rozpoznanie parametrów hydrogeologicznych masywu i warunków występowania wód podziemnych, a inne metody badawcze, jak choćby pomiary szczelinowatości, mogą być stosowane jedynie w bardzo ograniczonym zakresie. Źródła oraz inne naturalne, również nieskoncentrowane wpływy wód, traktujemy wtedy jako naturalne „odsłonięcia” wód podziemnych (Małecka 1997; Małecka, Humnicki 2001, 2002). Szczęólnego znaczenia nabierają obserwacje stacjonarne źródeł, które pozwalają prze-

śledzić zjawiska przyrodnicze w cyklu rocznym i wieloletnim (Humnicki 1989, 2007a; Małecka, Humnicki 1989; Barczyk i in. 2001).

W latach 2002–2003, dzięki środkom finansowym KBN, zainstalowano na obszarze Pienińskiego Parku Narodowego elektroniczne limnimetry z ciągłą rejestracją danych na trzech wytypowanych źródłach (Ryc. 1). Przyrządy te znacznie ułatwiły badania źródeł w trudno dostępnym terenie górskim bez konieczności bezpośrednich obserwacji podczas ciężkich warunków pogodowych i umożliwiły szczegółowe określenie wrażliwości wód podziemnych na opady atmosferyczne oraz topnienie śniegu.

W prezentowanym artykule skoncentrowano się na analizie zmian wydatków badanych źródeł w okresach, kiedy posiadały one reżim własny, niezależny od chwilowego zasilania opadami



Ryc. 1. Lokalizacja punktów badawczych w Pienińskim Parku Narodowym

Fig. 1. Location of the research points in the Pieniny National Park

atmosferycznymi lub topnieniem śniegu i drenowały wyłącznie wody zmagazynowane wcześniej w zbiorniku wód podziemnych, co przejawiało się każdorazowo w konsekwentnym spadku wydajności opisanym krzywą wysychania.

HYDROGEOLOGICZNE WARUNKI OBSZARU BADAŃ

Wybitny badacz pienińskiego pasa skałkowego Krzysztof Birkenmajer (1979) podkreśla, że pod względem stylu budowy i jej skomplikowania obszar ten nie znajduje odpowiednika w geologii regionalnej świata. Utwory, z których zbudowany jest pas skałkowy, są tak intensywnie sfałdowane i złuskowane, a miejscami zdruzgotane na soczewki i bloki metrowych rozmiarów, że określa się je często mianem „megabrekcji tektonicznej”. Mozaikowa budowa geologiczna pasa, przejawiająca się w sąsiedztwie niewielkich powierzchniowo, lecz odmiennych litologicznie utworów, w sposób oczywisty wpływać musi również na duże zróżnicowanie i komplikacje warunków hydrogeologicznych.

Uzyskany na podstawie przepływów niżówkowych potoków średni moduł odpływu podziemnego w wysokości 2,0 l/s*km² (Humnicki 2007b) świadczy o słabym zawodnieniu pienińskiego pasa skałkowego, lecz jednocześnie wskazuje, że obszar ten nie może być traktowany jako zupełnie bezwodny. Wody podziemne tworzą jeden nieciągły i zróżnicowany poziom wodonośny, występujący w obrębie mocno zwietrzałej i spękaną strefy przypowierzchniowej, złożonej z odmiennych litologicznie skał różnego wieku i o różnych parametrach hydrogeologicznych.

Dla wód szczelinowych środowiskiem geologicznym są mezozoiczne i paleogeńskie utwory węglanowe, węglanowo-ilaste oraz fliszowe. Dla wód porowych najważniejszą rolę odgrywają czwartorzędowe pokrywy zwietrzelinowo-rumoszowe oraz aluwia dolin rzecznych. Bez względu na sposób występowania, wody podziemne stanowią wspólny, pozostający w łączności hydraulicznej, poziom wodonośny na ogół o swobodnym charakterze i mogą przemieszczać się z jednego ośrodka skalnego do drugiego. Sprzyja temu duże zaangażowanie tektoniczne masywu, gęsta sieć

spękań i obecność licznych uskoków i dyslokacji ułatwiających filtrację i kontaktowanie się wód.

Z uwagi na rodzaj ośrodka hydrogeologicznego większość źródeł pienińskich należy do szczelinowych, przy czym znaczna ich część drenuje zarówno wody szczelinowe podłoża, jak i wody porowe zwietrzelin. Istotny jest udział źródeł dyslokacyjnych (Humnicki 2007b).

CHARAKTERYSTYKA PUNKTÓW BADAWCZYCH

Źródło Potoku Pod Wysoki Dział inicjuje prawostronny dopływ Białego Potoku, który jest z kolei prawostronnym dopływem Krośnicy. Usytuowane jest na wysokości 664 m n.p.m. na dnie wyraźnej depresji terenu, wcinającej się w zachodni stok Wysokiego Działu. Pod względem położenia morfologicznego jest to źródło zboczowe. Wyływ jest ekranowany zwietrzeliną. Bezpośrednio powyżej źródła odsłaniają się utwory fliszowe, natomiast poniżej odsłaniają się utwory należące do formacji wapienia pienińskiego jednostki braniskiej. Pod względem rodzaju przewodów hydraulicznych doprowadzających wodę, źródło zostało zaliczone, podobnie jak zdecydowana większość źródeł pienińskich, do szczelinowych (Humnicki 2007b), choć ze względu na znaczną wydajność (dochodzącą nawet do 5,5 l/s) istnieją spore przesłanki do zaliczenia go do szczelinowo-krasowych (Tab. I).

Przebieg średnich miesięcznych wydajności źródła (od 0,11 do 3,68 l/s) pozwala zaliczyć źródło do VI i V klasy Meinzera; jest to więc jedno z najbardziej wydajnych źródeł pienińskich o stałym charakterze wypływu.

Źródło Kotłowego Potoku (lewostronny dopływ Potoku Macelowego) położone jest na wysokości 639 m n.p.m. na bardzo stromym, południowym zboczu Nowej Góry, w lokalnej depresji terenu. Odsłaniają się tu przykryte zwietrzeliną piaskowce i łupki z wkładkami zlepieńców, należące do fliszu sromowieckiego oraz utwory formacji wapienia pienińskiego jednostki pienińskiej. Poniżej miejsca wypływu znajduje się strefa współcześnie tworzącej się martwicy wapiennej.

Źródło Kotłowego Potoku praktycznie należy zaliczyć do źródeł trwałych (nigdy nie jest całkowicie suche), choć wydajność wielokrotnie spada

Tabela I. Charakterystyczne wydajności badanych źródeł w Pienińskim Parku Narodowym**Table I.** Characteristic discharges of studied springs in the Pieniny National Park

Źródło Spring	Rok hydrolo- giczny Hydrologic year	Wydajność – Discharge					Wskaźnik zmienności Spring variability	Klasa Meinzera Meinzer class
		Q _{min}		Q _{sr} [l/s]	Q _{max}			
		l/s	Daty – Dates		l/s	Daty – Dates		
Potoku Pod Wysoki Dział	2003	0,09	22–24 X 2003	1,09	2,71	23 IV 2003	61	VI
	2004	0,11	4 IX 2004	0,99	3,97	12–13 VI 2004		
	2007	1,85	5 VI 2007	2,56	3,66	26 III 2007		
	2008	1,72	12 VII 2008	2,63	3,90	9 XII 2007		
	2009	1,57	15–16 XII 2008	2,29	4,42	18 VII 2009		
	2010	0,58	27 IX 2010	1,90	5,52	20 V 2010		
	2011	0,66	3–4 XI 2010	1,47	2,23	24–31 VII 2011		
Kotłowego Potoku	2003	0,01	31 X 2003	0,28	0,73	1–5 IV 2003	>2000	VII
	2004	0,00	XI, I, III	0,24	1,80	31 VII 2004		
	2005	0,00	XI, XII, I, II, III, VI, X	0,20	1,15	30–31 III 2005		
	2006	0,00	XI, XII	0,10	0,65	1–4 IV 2006		
	2007	0,02	28–31 V 2007	0,20	0,73	10–12 IX 2007		
	2008	0,00	VI, VII	0,17	0,55	29–30 XI 2007		
	2009	0,00	XII, I	0,45	1,36	1–3 IV 2009		
	2010	0,01	27 I 2010	0,52	2,31	4 VI 2010		
	2011	0,03	21 XI 2010	0,15	0,90	22–23 VII		
Kirowego Potoku	2003	0*	VI, VII, VIII, IX, X	0,05	0,53	22 V 2003	źródło okresowe – periodic spring	VII
	2004	0*	XI, XII, I	0,07	1,63	30 VII 2004		
	2005	0,01	5 VII 2005	0,14	1,39	10 VI 2005		
	2006	0*	I, III, VII	0,11	1,03	4 VI 2006		
	2007	0*	VII, VIII	0,22	0,78	7 XI 2007		
	2008	0*	V, VI, VII, VIII, IX	0,19	0,72	25 XI 2007		
	2009	0*	V, VI, VII, VIII, IX, X	0,17	0,74	23 VIII 2009		
	2010	0*	I, II, VII, VIII, X	0,19	1,47	4 VI 2010		
	2011	0*	XI, XII, II, III, IV, V, VI, 17 VIII – 31 X	0,06	0,91	15 I 2011		

0* – całkowity zanik wypływu (sucho)
– entire decline of discharge (dry)

do praktycznie niemierzalnych wartości rzędu 0,001 l/s. Średnie miesięczne wydajności tego źródła (od <0,01 do 1,1 l/s) pozwalają zaliczyć je głównie do VII i VIII klasy Meinzera, a tylko sporadycznie do klasy V.

W wyniku analizy reakcji wydajności na opady atmosferyczne stwierdzono złożony typ zasilania tego źródła, w którym udział biorą dwa systemy krążenia: głębszy, związany ze strefą dyslokacyjną, oraz płytszy, w którym duży udział ma odpływ podpowierzchniowy o charakterze krótkookresowym (Humnicki 2006).

Źródło Kirowego Potoku (jeden z głównych

potoków źródłiskowych Macelowego Potoku) jest zlokalizowane na wysokości 769 m n.p.m. w pobliżu głównego grzbietu Pienin na łagodnie nachylonym zboczu góry Łączana. Z morfologicznego punktu widzenia należy zaliczyć je do podgrzbietowych, a ze względu na charakter ośrodka do szczelinowych, ekranowanych zwietrzeliną. Wypływ następuje w strefie występowania piaskowców i łupków z wkładkami zlepieńców należących do fliszu sromowieckiego i ma charakter zdecydowanie okresowy. W okresie pracy limnimetru wielokrotnie, w różnych porach roku, rejestrowano całkowite zaniki wypływu (Tab. I).

Wyjątkowy pod tym względem był rok hydrologiczny 2011 r., kiedy źródło było suche aż przez 219 dni (60% roku); dla porównania w 2010 r. – tylko przez 65 dni (18% roku).

Na podstawie rozkładu średnich miesięcznych wydajności (od 0 do 0,38 l/s) źródło można zaliczyć do VI, VII i VIII klasy Meinzera. Ze wszystkich opisanych wypływów źródło to wykazuje najszybszą reakcję nie tylko na opad atmosferyczny, ale nawet na najmniejsze zmiany jego intensywności (Humnicki 2006), co świadczy o płytkości dróg krążenia wód podziemnych wypływających w źródle i bardzo krótkim czasie ich przebywania w środowisku skalnym.

METODYKA BADAŃ

Zainstalowane na źródłach pienińskich limnimetry rejestrują stany zwierciadła wody z dokładnością 1 milimetra, przy częstotliwości pomiarów co 60 minut (Humnicki 2006). W przypadku prezentowanej analizy całkowicie wystarczające są wartości dobowe, uzyskane każdorazowo z uśrednienia 24 pomiarów godzinowych.

Od momentu zainstalowania limnimetrów okresowo wykonywane są pomiary wydajności wszystkich obserwowanych źródeł (metodą bezpośrednią), co umożliwiła skonstruowanie odpowiednich krzywych konsumcyjnych i przeliczenie wszystkich rejestrowanych przez przyrządy stanów wód na odpowiadające im wydatki.

Uzyskane w ten sposób blisko dziewięcioletnie ciągi obserwacji dobowych zmian wydatków źródeł stały się podstawą szczegółowej analizy zmian wydajności źródeł na tle dobowych sum opadów atmosferycznych w PPN (za punkt odniesienia posłużyły dane ze stacji na polanie Podłazce w Sromowcach Niżnych) i wytypowania kilkudziesięciu okresów przejawiających się konsekwentnym spadkiem wydajności źródeł (Tab. II–IV).

Do opisanego krzywych recesji wykorzystano najprostsze i najczęściej stosowane w obliczeniach hydrogeologicznych równanie Mailleta (Wieczysty 1982; Jokiel, Maksymiuk 1995):

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

gdzie: Q_0 – wydajność źródła w chwili, gdy rozpoczyna się proces wysychania [l/s];

Q_t – wydajność źródła po czasie t [l/s];

t – czas zmniejszania się wydajności z Q_0 do Q_t [d];

α – współczynnik regresji źródła [d⁻¹].

CHARAKTERYSTYKA OKRESÓW RECESJI WYDATKU

Podobnie jak reakcja każdego z obserwowanych źródeł na opady atmosferyczne lub topnienie śniegu jest inna, uzależniona od sytuacji geologicznej i położenia morfologicznego źródła, tak i charakterystyki krzywych wysychania poszczególnych źródeł różnią się między sobą i jest regułą, że okresy recesji nie pokrywają się wzajemnie w czasie lub pokrywają się jedynie w stopniu bardzo niewielkim.

Dla źródła Potoku Pod Wysoki Dział szczegółowa analiza zmian wydatku na tle opadów atmosferycznych umożliwiła zidentyfikowanie 20 okresów recesji, w czasie których następował konsekwentny spadek jego wydajności (Tab. II).

Okresy recesji wydatku najczęściej pojawiają się w okresie letnio-jesiennym – od VII do X (12 okresów), nieco rzadziej wiosną – od IV do VI (5 okresów), a najrzadziej w okresie późnojesiennie-zimowym – od XI do III (zaledwie 3). Długość wyróżnionych okresów jest zróżnicowana i waha się od 7 do 64 dni (średnio 23 dni). Duże zróżnicowanie wykazują również wydajności początkowe Q_0 oraz wydajności końcowe Q_t . Sumy opadów w 14-dniowym okresie poprzedzającym początek recesji (od 2 do niemal 230 mm) świadczą o tym, iż wzrost wydajności źródła, po którym następuje jego recesja, niekoniecznie musi mieć związek z bieżącymi opadami atmosferycznymi. Źródło posiada własny reżim a jego reakcja na zasilanie i czynniki klimatyczne wykazuje wyraźne opóźnienie.

Dwa okresy recesji tego źródła są wyraźnie dwudzielne (Tab. II, nr 5 i 16) i dają się matematycznie opisać dwoma odcinkami krzywej wysychania o różnym współczynniku regresji α (Ryc. 2). Warto zauważyć, iż oba przypadki reprezentują okres wiosenny, kiedy źródło wykazuje najwyższą wydajność związaną z wcześniejszym zasilaniem systemu wodonośnego topniejącą pokrywą śnieżną.

Tabela II. Charakterystyki okresów recesji źródła Potoku Pod Wysoki Dział w Pienińskim Parku Narodowym**Table II.** The periods of recession of the spring Pod Wysoki Dział in the Pieniny National Park

Lp.	Okres recesji Recession period	Charakterystyka okresu recesji Characteristic of recession period					Parametry źródła Parameters of spring			
		Suma opadów Total precipitation		Maksymalny opad dobowy w czasie recesji Max daily pre- cipitation during the recession [mm]	Czas time [d]	Q ₀ [l/s]	Q _t [l/s]	Współ- czynnik regresji Recession coefficient α [d ⁻¹]	Poten- cjał zasob- ności Storage capacity W [m ³]	Czas przeby- wania wody Residence time of water T [d]
		przed recesją* before the recession* [mm]	w czasie recesji during the recession [mm]							
1.	27 VIII – 7 X 2002	64,5	90,1	21,3	41	1,753	0,761	0,0204	7 442	49
2.	17 XI 2002 – 20 I 2003	9,4	67,0	13,0	64	1,883	0,963	0,0105	15 527	95
3.	17 IX – 4 X 2003	31,6	45,1	24,5	17	0,265	0,093	0,0616	372	16
4.	8 VIII – 4 IX 2004	228,2	149,6	34,4	27	1,636	0,113	0,0990	1 428	10
5.	a) 10 IV – 4 V 2007	4,2	115,2	24,4	24	3,335	2,323	0,0151	19 124	66
	b) 4 V – 4 VI 2007				31	2,323	2,017	0,0046	44 053	219
6.	4 VII – 1 VIII 2007	85,5	77,6	32,5	28	2,568	2,053	0,0080	27 755	125
7.	14–23 I 2008	2,2	19,7	8,5	9	3,359	2,316	0,0413	7 025	24
8.	6–25 V 2008	29,4	35,3	13,9	19	2,913	1,963	0,0208	12 115	48
9.	15–22 VIII 2008	32,9	3,7	3,7	7	2,514	2,141	0,0229	9 467	44
10.	29 VIII – 12 IX 2008	35,5	28,9	23,1	14	2,281	2,042	0,0079	24 927	126
11.	28 IV – 22 V 2009	9,1	13,0	3,3	24	2,605	1,963	0,0118	19 090	85
12.	29 VII – 15 VIII 2009	85,6	63,3	43,9	17	3,920	2,609	0,0239	14 142	42
13.	2–17 IX 2009	98,2	71,8	23,1	15	2,731	2,273	0,0122	19 281	82
14.	2–26 XII 2009	8,6	35,0	8,7	24	2,718	2,053	0,0117	20 087	85
15.	13 IV – 9 V 2010	48,2	80,3	14,9	26	3,180	2,254	0,0133	20 756	75
16.	a) 11–20 VI 2010	170,4	67,5	14,1	9	4,025	2,269	0,0637	5 460	16
	b) 20 VI – 4 VII 2010				14	2,269	1,862	0,0141	13 883	71
17.	10–23 V 2011	38,6	62,4	24,0	13	1,883	1,540	0,0155	10 518	65
18.	9–24 VIII 2011	76,3	30,7	10,0	15	2,197	1,358	0,0321	5 918	31
19.	26 VIII – 12 IX 2011	35,4	12,4	6,0	17	1,452	0,893	0,0286	4 387	35
20.	3–11 X 2011	5,3	61,0	29,6	8	1,088	0,820	0,0353	2 659	28

* w 14-dniowym okresie poprzedzającym początek recesji
in 14-day period before the start of the recession

W przypadku źródła Kotłowego Potoku udało się wyróżnić 31 okresów recesji o długości od 8 do 92 dni, przy czym średnia długość okresu wyniosła 27 dni, a więc nieco dłuższa niż w źródle pod Wysokim Działem (Tab. III).

W źródle Kotłowego Potoku okresy recesji najczęściej pojawiają się wiosną od IV do VI

(14 przypadków) oraz latem i wczesną jesienią od VII do X (11 przypadków), najrzadziej zaś późną jesienią i zimą od XI do III (jedynie 6). W porównaniu z wcześniej opisanym źródłem pod Wysokim Działem, kulminacje inicjujące okresy recesji w źródle Kotłowego Potoku znacznie częściej związane są z zasilaniem bieżącymi opadami

→

Ryc. 2. Wybrane krzywe recesji w układzie półlogarytmicznym na tle dobowych sum opadów ze stacji Pienińskiego Parku Narodowego na polanie Podłażce

Fig. 2. Selected recession curves in semi-logarithmic scale and daily sums of precipitation from the station in the Pieniny National Park, Podłażce clearing

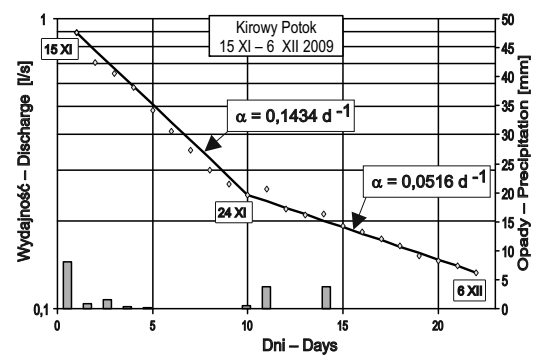
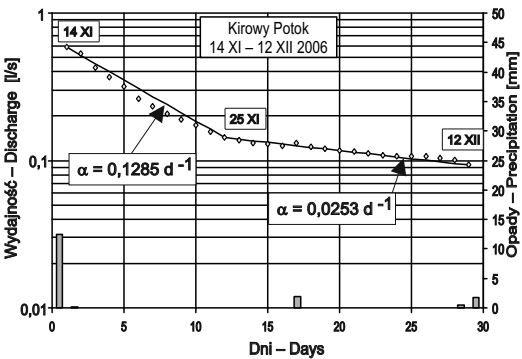
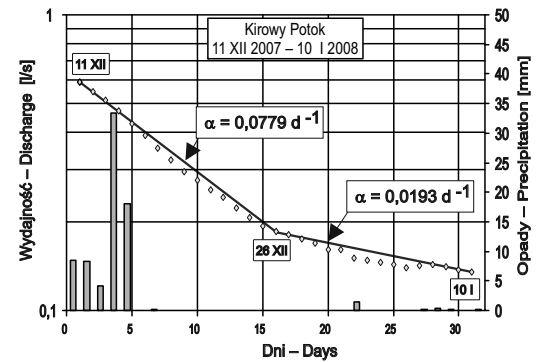
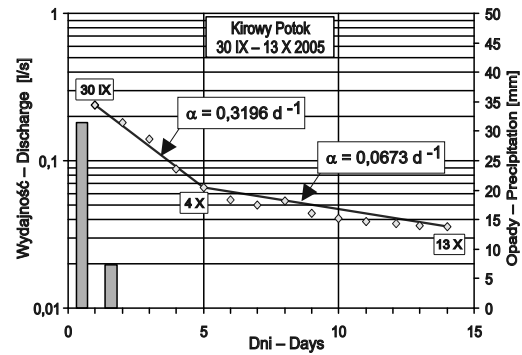
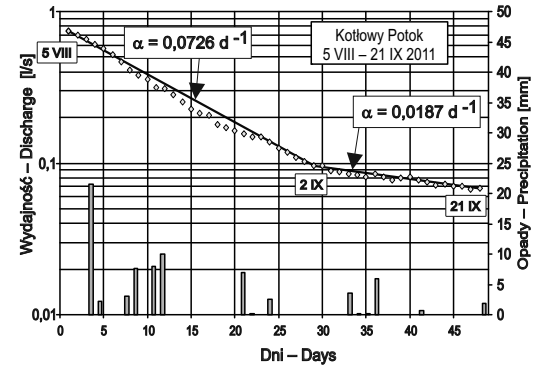
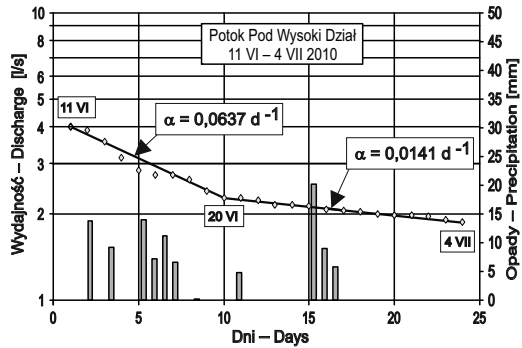
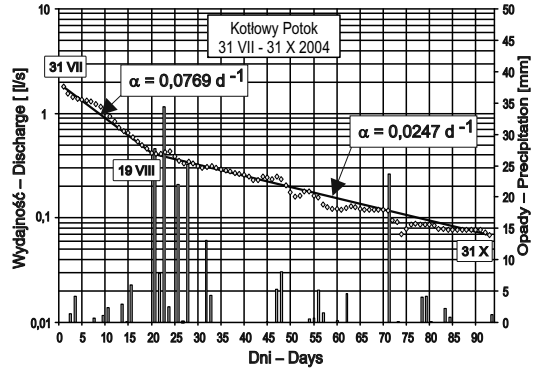
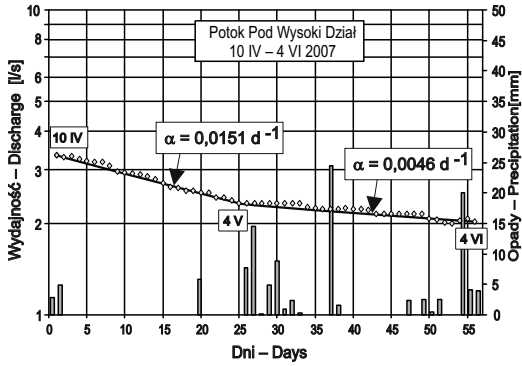


Tabela III. Charakterystyki okresów recesji źródła Kotłowego Potoku w Pienińskim Parku Narodowym**Table III.** The periods of recession of the Kotłowy Potok spring in the Pieniny National Park

Lp.	Okres recesji Recession period	Charakterystyka okresu recesji Characteristic of recession period					Parametry źródła Parameters of spring			
		Suma opadów Total precipitation		Maksymalny opad dobowy Max daily pre- cipitation during the recession [mm]	Czas Time [d]	Q_0 [l/s]	Q_t [l/s]	Współ- czynnik regresji Recession coefficient α [d ⁻¹]	Poten- cjał zasob- ności Storage capacity W [m ³]	Czas przeby- wania wody Residence time of water T [d]
		przed recesją* before the recession* [mm]	w czasie recesji during the recession [mm]							
1.	20 IV – 12 V 2003	25,6	42,1	10,9	22	0,727	0,394	0,0278	2 255	36
2.	a) 29 V – 8 VI 2003				10	0,700	0,479	0,0379	1 594	26
	b) 8–30 VI 2003	52,5	55,0	15,6	22	0,479	0,300	0,0213	1 946	47
3.	19–27 IX 2003	27,1	18,5	18,5	8	0,080	0,042	0,0805	86	12
4.	13 IV – 14 V 2004	39,2	77,5	17,7	31	0,763	0,133	0,0563	1 170	18
5.	21 VI – 16 VII 2004	32,3	50,5	15,3	25	0,520	0,116	0,0600	749	17
6.	a) 31 VII – 19 VIII 2004				19	1,805	0,419	0,0769	2 029	13
	b) 19 VIII – 31 X 2004	269,7	200,1	34,4	73	0,419	0,069	0,0247	1 465	40
7.	13 IV – 2 V 2005	20,6	36,6	11,8	19	0,940	0,194	0,0831	978	12
8.	17 VI – 2 VII 2005	242,5	22,1	13,0	15	0,839	0,205	0,0939	772	11
9.	12–21 VIII 2005	208,9	35,2	32,9	9	0,868	0,366	0,0959	782	10
10.	8–29 VI 2006	193,3	89,1	18,5	21	0,520	0,127	0,0671	669	15
11.	a) 29 III – 9 IV 2007				11	0,541	0,209	0,0865	541	12
	b) 9 IV – 13 V 2007	73,9	57,5	14,5	34	0,209	0,031	0,0561	322	18
12.	19–30 VI 2007	89,4	43,4	20,5	11	0,170	0,108	0,0412	356	24
13.	a) 13 IX – 3 X 2007				21	0,724	0,165	0,0704	888	14
	b) 3–20 X 2007	199,8	110,1	19,0	16	0,165	0,144	0,0085	1 676	117
14.	18 XII 07 – 11 I 2008	80,2	2,2	1,4	24	0,525	0,136	0,0563	806	18
15.	31 I – 1 III 2008	30	32,8	9,8	30	0,199	0,144	0,0108	1 595	93
16.	9–29 III 2008	64,2	42,5	10,0	20	0,457	0,172	0,0489	808	20
17.	31 VII – 18 IX 2008	164,2	157,1	31,8	49	0,374	0,029	0,0522	619	19
18.	26 X – 14 XI 2008	16,6	7,5	3,4	20	0,157	0,031	0,0811	167	12
19.	16 IV – 8 V 2009	28,4	13,8	7,8	22	1,212	0,437	0,0464	2 258	22
20.	10 V – 10 VI 2009	5,5	87,6	25,6	31	0,466	0,285	0,0159	2 538	63
21.	26 VII – 22 VIII 2009	82,1	68,1	43,9	27	0,688	0,412	0,0190	3 130	53
22.	30 VIII – 25 IX 2009	98,2	136,0	25,9	26	0,634	0,336	0,0244	2 243	41
23.	25 XI – 31 XII 2009	72,0	45,6	8,7	36	0,976	0,103	0,0625	1 350	16
24.	18 IV – 8 V 2010	72,9	37,7	14,9	20	0,837	0,466	0,0293	2 470	34
25.	22–31 V 2010	256,5	70,8	25,8	12	1,940	1,259	0,0360	4 652	28
26.	6 VI – 17 VII 2010	207,2	93,7	20,3	41	1,842	0,137	0,0634	2 511	16
27.	17–30 VIII 2010	165,5	23,7	11,8	13	1,101	0,296	0,1010	941	10
28.	14 IX – 15 X 2010	123,0	41,5	16,4	31	0,673	0,067	0,0744	781	13
29.	25 I – 9 II 2011	30,0	19,8	9,8	15	0,246	0,120	0,0479	444	21
30.	a) 5 VIII – 2 IX 2011				28	0,741	0,097	0,0726	882	14
	b) 2–21 IX 2011	85,9	74,0	21,5	19	0,097	0,068	0,0187	448	53
31.	10–31 X 2011	57,6	27,5	10,2	21	0,078	0,043	0,0284	238	35

* w 14-dniowym okresie poprzedzającym początek recesji
in 14-day period before the start of the recession

atmosferycznymi, a jedynie w kilku przypadkach z topnieniem śniegu.

W pięciu przypadkach koniecznym okazało się aproksymowanie krzywych wysychania odcinkami prostych reprezentatywnych (w układzie półlogarytmicznym) o różnym stopniu nachylenia. Dwa przykłady zostały zilustrowane (Ryc. 2). W obu przypadkach recesje dotyczą okresu letniego i nastąpiły po intensywnych opadach atmosferycznych (zwłaszcza w 2004 r.), kiedy w pierwszej fazie recesji dominującą rolę odgrywał dopływ wód podziemnych o charakterze krótkookresowym.

Najwięcej, bo aż 50 okresów recesji, udało się wyznaczyć dla źródła Kirowego Potoku. W porównaniu z wcześniej opisanymi źródłami okresy recesji występują tu znacznie częściej, ale są zdecydowanie krótsze (Tab. IV).

Średnia długość okresu recesji wynosi tylko 12 dni, a długość wyznaczonych okresów waha się od 5 do 30 dni. Charakterystyczne jest stosunkowo równomierne występowanie okresów

recesji w ciągu całego roku hydrologicznego, przy czym największą liczbę recesji wydatku (28) zidentyfikowano w okresie późnej jesieni i zimy (od XI do III), 13 – w okresie letnio-jesiennym (od VII do X) i zaledwie 9 w okresie wiosennym (IV–VI). Kulminacje wydatku, po których występują okresy recesji, wywołują w źródle Kirowego Potoku zarówno intensywne opady atmosferyczne, jak również mniej lub bardziej gwałtowne odwilże połączone z topnieniem śniegu w okresie zimowym.

W dziewięciu przypadkach krzywe recesji są wyraźnie dwudzielnie, co świadczy o tym, że drenaż macierzystego zbiornika odbywa się w dwóch etapach. Prawdopodobnie w pierwszej kolejności drenowane są wody podziemne zgromadzone w najbardziej przypowierzchniowej warstwie zwietrzliny, następnie zaś rozpoczyna się nieco wolniejszy drenaż z głębszej partii zwietrzliny oraz spękanego masywu. Cztery wybrane przypadki, reprezentujące okresy jesienne, zostały zilustrowane (Ryc. 2).

Tabela IV. Charakterystyki okresów recesji źródła Kirowego Potoku w Pienińskim Parku Narodowym

Table IV. The periods of recession of the Kirowy Potok spring in the Pieniny National Park

Lp.	Okres recesji Recession period	Charakterystyka okresu recesji Characteristic of recession period						Parametry źródła Parameters of spring		
		Suma opadów Total precipitation		Maksymalny opad dobowy w czasie recesji Max daily pre- cipitation during the recession [mm]	Czas Time [d]	Q ₀ [l/s]	Q _t [l/s]	Współ- czynnik regresji Recession coefficient α [d ⁻¹]	Poten- cjał zasob- ności Storage capacity W [m ³]	Czas przeby- wania wody Residence time of water T [d]
		przed recesją* before the recession* [mm]	w czasie recesji during the recession [mm]							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	17–30 IV 2003	35,6	10,5	6,1	12	0,228	0,101	0,0679	290	15
2.	22 V – 5 VI 2003	92,9	3,4	2,4	14	0,533	0,011	0,2772	166	4
3.	21–29 XII 2003	34,9	0,9	0,9	8	0,015	0,002	0,2519	5	4
4.	3–10 I 2004	4,1	4,0	3,2	7	0,021	0,001	0,4349	4	2
5.	6–22 II 2004	33,4	35,6	10,1	16	0,124	0,011	0,1514	71	7
6.	8–16 IV 2004	46,1	12,7	5,8	8	0,278	0,036	0,2555	94	4
7.	16–21 V 2004	55,5	14,9	10,5	5	0,193	0,047	0,2825	59	3
8.	a) 30 VII – 6 VIII 2004	270,5	18,8	6,0	6	0,891	0,116	0,3398	226	3
	b) 6 VIII – 19 VIII 2004				13	0,116	0,012	0,1745	57	6
9.	a) 1–4 IX 2004	132,8	4,4	4,3	3	0,180	0,055	0,3952	39	2
	b) 4–14 IX 2004				10	0,055	0,019	0,1063	45	9
10.	22–30 X 2004	34,5	0,9	0,9	8	0,039	0,027	0,0460	73	22
11.	3–12 XII 2004	53,0	1,5	1,5	9	0,358	0,070	0,1813	170	5

Tabela IV (Table IV). Kontynuacja – Continued

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12.	14–25 I 2005	45,3	29,0	10,2	11	0,259	0,069	0,1202	186	8
13.	10–20 IV 2005	0,0 (?)	38,0	16,4	10	0,379	0,091	0,1423	230	7
14.	11–19 VI 2005	157,6	106,5	91,0	8	0,880	0,082	0,2966	256	3
15.	19–30 VII 2005	117,7	10,6	6,7	11	0,151	0,014	0,2162	60	5
16.	25 VIII – 10 IX 2005	63,5	2,8	1,6	16	0,149	0,017	0,1357	95	7
17.	a) 30 IX – 4 X 2005	74,4	7,3	7,3	4	0,237	0,066	0,3196	64	3
	b) 4–13 X 2005				9	0,066	0,036	0,0673	85	15
18.	a) 3–11 I 2006	39,1	5,8	3,2	8	0,145	0,054	0,1235	101	8
	b) 11–20 I 2006				9	0,054	0,031	0,0617	76	16
19.	23 II – 3 III 2006	14,0	4,2	2,1	8	0,070	0,024	0,1338	45	7
20.	3–11 IV 2006	49,0	6,3	3,1	8	0,347	0,128	0,1247	240	8
21.	10–19 VI 2006	215,0	2,1	1,2	9	0,320	0,090	0,1409	196	7
22.	2–13 VII 2006	135,4	9,8	8,2	11	0,603	0,101	0,1624	321	6
23.	a) 14–25 XI 2006	127,1	16,6	12,4	11	0,588	0,143	0,1285	395	8
	b) 25 XI – 12 XII 2006				17	0,143	0,093	0,0253	488	40
24.	14–25 II 2007	70,9	23,2	7,7	11	0,449	0,189	0,0787	493	13
25.	24 III – 9 IV 2007	77,3	5,1	4,2	16	0,501	0,133	0,0829	522	12
26.	1–26 V 2007	5,9 (?)	25,9	24,4	10	0,273	0,014	0,2970	79	3
27.	18–31 VIII 2007	172,0	11,2	7,5	12	0,313	0,081	0,1126	240	9
28.	6–18 IX 2007	140,7	67,3	21,2	11	0,633	0,207	0,1016	538	10
29.	a) 11–26 XII 2007	44,7	74,6	33,4	15	0,592	0,184	0,0779	656	13
	b) 26 XII 07 – 10 I 2008				15	0,184	0,135	0,0194	821	52
30.	7–16 II 2008	16,6	16,4	4,1	9	0,295	0,136	0,0860	296	12
31.	a) 3–10 III 2008	57,5	47,8	7,8	7	0,575	0,231	0,1303	381	8
	b) 10–27 III 2008				17	0,231	0,142	0,0286	697	35
32.	24 VII – 3 VIII 2008	159,0	60,2	28,3	11	0,698	0,169	0,1418	425	7
33.	24 IX – 2 X 2008	97,5	14,4	9,6	8	0,309	0,106	0,1337	200	7
34.	a) 4–13 X 2008	79,0	66,1	34,3	9	0,669	0,172	0,1509	383	7
	b) 13–22 X 2008				9	0,172	0,100	0,0602	247	17
35.	2 –12 XI 2008	18,0	0,1	0,1	10	0,125	0,013	0,2263	48	4
36.	5–17 XII 2008	30,6	8,9	2,9	12	0,233	0,063	0,1090	185	9
37.	23 XII 08 – 12 I 2009	54,5	29,4	12,5	20	0,301	0,045	0,0950	274	11
38.	24 I – 2 II 2009	15,5	28,9	10,8	9	0,496	0,137	0,1429	300	7
39.	9–20 II 2009	30,2	26,8	8,9	11	0,343	0,171	0,0633	468	16
40.	6–14 III 2009	4,5	43,0	12,1	11	0,529	0,258	0,0897	509	11
41.	17–26 III 2009	53,8	79,5	28,0	9	0,263	0,179	0,0427	532	23
42.	11–22 IV 2009	47,5	2,3	1,3	11	0,498	0,129	0,1228	350	8
43.	3–13 VII 2009	263,6	36,6	13,8	10	0,682	0,131	0,1650	357	6
44.	24 X – 5 XI 2009	127,0	15,1	5,1	12	0,550	0,172	0,0969	491	10
45.	a) 15–24 XI 2009	103,5	19,1	8,1	9	0,898	0,247	0,1434	541	9
	b) 24 XI – 6 XII 2009				12	0,247	0,133	0,0516	414	19
46.	11–23 I 2010	19,2	2,4	1,8	12	0,329	0,049	0,1587	179	6
47.	27 III – 4 IV 2010	22,4	5,1	2,2	8	0,284	0,069	0,1768	139	6
48.	9–21 XII 2010	15,9	33,5	10,4	12	0,397	0,064	0,1521	226	7
49.	25 XII 10 – 4 I 2011	23,1	7,9	3,9	10	0,581	0,083	0,1951	257	5
50.	16–30 I 2011	33,2	8,3	4,0	13	0,498	0,062	0,1603	268	6

* w 14-dniowym okresie poprzedzającym początek recesji
in 14-day period before the start of the recession

WYNIKI BADAŃ

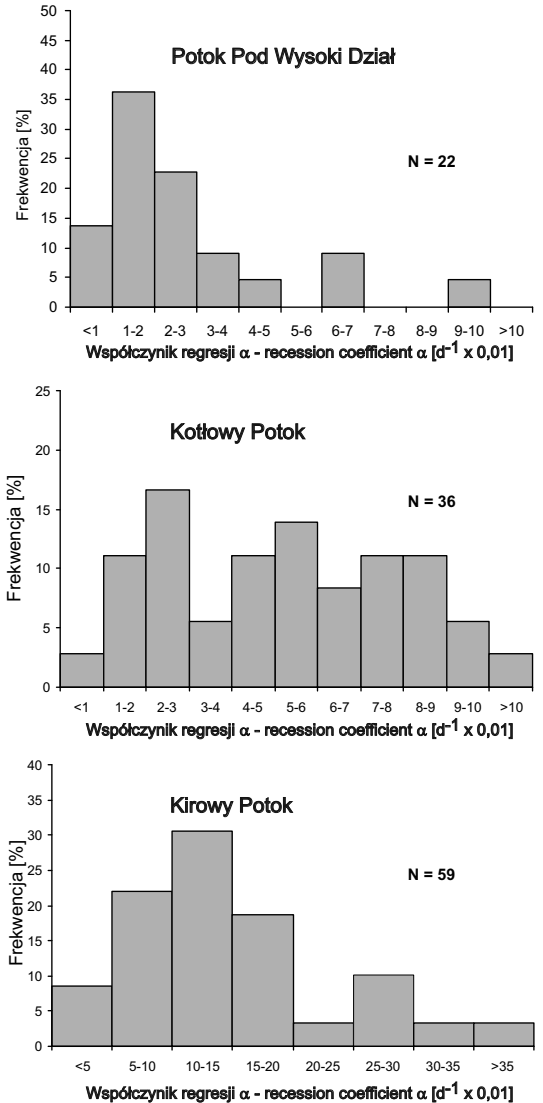
Wartości współczynników regresji

Wartość współczynnika regresji źródła α charakteryzuje prędkość szczyptywania się zasobów wód podziemnych zgromadzonych w drenowanym przez źródło zbiorniku. Z matematycznego punktu widzenia jest to współczynnik kierunkowy prostej opisanej przez równanie Mailleta, sporządzonej w układzie półlogarytmicznym. Wyższe wartości współczynnika oznaczają większe nachylenie prostej i zarazem szybsze szczyptywanie się zasobów wód podziemnych, natomiast niższe wartości oznaczają wolniejsze szczyptywanie się tych zasobów, które może być związane zarówno z większą objętością drenowanego zbiornika jak również z utrudnionym dopływem wód podziemnych do miejsca wypływu. Wydaje się, iż w źródłach pienińskich znaczną rolę odgrywa ten drugi czynnik.

Uzyskane wartości współczynników regresji α dla badanych źródeł pienińskich mieszczą się w zakresie $0,0046-0,4340 \text{ d}^{-1}$ i są nie tylko niższe od podawanego w literaturze podręcznikowej zakresu $0,04-0,7$ (Pazdro Kozerski, 1990), ale także niższe od średnich wartości charakterystycznych, np. dla wywierzysk tatrzańskich wynoszących $0,018-0,022 \text{ d}^{-1}$ (Barczyk 2008). Najprawdopodobniej świadczy to o roli, jaką na obszarze pienińskiego pasa skałkowego odgrywają słabo przepuszczalne zwietrzliny ilaste, pochodzące przede wszystkim z wietrzenia skał fliszowych osłony skałkowej, które utrudniają dopływ wód podziemnych w bezpośrednim sąsiedztwie źródeł.

Zakresy wartości współczynników α i ich rozkłady są dla poszczególnych źródeł zróżnicowane, przy czym największą odrębnością charakteryzuje się źródło Kirowego Potoku, gdzie zdecydowanie dominują wartości powyżej $0,1 \text{ d}^{-1}$, podczas gdy w pozostałych przypadkach wartość ta tylko jeden raz nieznacznie została przekroczona w źródle Kotłowego Potoku (Ryc. 3).

W źródle Potoku Pod Wysoki Dział wartości współczynników α skoncentrowane są w stosunkowo wąskim zakresie, w 86% przypadków nie przekraczają wartości $0,05 \text{ d}^{-1}$, przy zdecydowanej dominacji przedziału $0,01-0,02 \text{ d}^{-1}$. W przypadku



Ryc. 3. Rozkłady wartości współczynników regresji α źródeł potoków: Pod Wysoki Dział, Kotłowego i Kirowego w Pienińskim Parku Narodowym

Fig. 3. The distribution of the recession coefficient α values of the studied springs: Pod Wysoki Dział, Kotłowy and Kirowy in the Pieniny National Park

źródła Kotłowego Potoku wspomnianą wartość $0,05 \text{ d}^{-1}$ przekracza aż 54% populacji wyników, przy braku jednej wyraźnej dominanty. Najliczniej reprezentowane są trzy przedziały: $0,02-0,03$; $0,05-0,06$ oraz $0,07-0,09$. Przyczyny takiego w stanu rzeczy należy upatrywać w odmiennym sposobie zasilania obu źródeł.

W źródle Potoku Pod Wysoki Dział najprawdopodobniej następuje drenaż stosunkowo jednorodnego zbiornika wód podziemnych, który może być w różnym stopniu napełniony. Wysokie wartości współczynnika α pojawiają się raczej wyjątkowo i są związane z okresami maksymalnego napełnienia zbiornika, jak to miało miejsce np. w okresie od 11 do 20 VI 2010 r. po kilkunastu dniach olbrzymich opadów atmosferycznych (Ryc. 2 i Tab. II).

Źródło Kotłowego Potoku charakteryzuje się z kolei złożonym typem zasilania, w którym udział biorą dwa systemy krążenia: głębszy – związany ze strefą dyslokacyjną, dla którego charakterystyczne są raczej niższe współczynniki regresji oraz płytszy, w którym duży udział ma odpływ podpowierzchniowy o charakterze krótkookresowym i którego szczytowanie zasobów następuje znacznie szybciej, co przejawia się w wyższych wartościach α . Tak więc wniosek o złożonym typie zasilania źródła Kotłowego Potoku, wyciągnięty z analizy jego reakcji na opady atmosferyczne (Humnicki 2006), potwierdza również analiza sposobu jego wysychania.

W źródle Kirowego Potoku dominującym jest przedział $0,1-0,15 \text{ d}^{-1}$ przy dość znacznym (16%) udziale wartości $>0,25 \text{ d}^{-1}$. Warto zwrócić uwagę, iż wartości współczynników α są, w porównaniu do źródła Potoku Pod Wysoki Dział, wyższe praktycznie o cały rząd wielkości. Opróżnianie macierzystego zbiornika źródła Kirowego Potoku jest więc bardzo szybkie, co bez wątpienia ma związek z płytkością krążenia wód podziemnych i niewielką zasobnością zbiornika.

Dalszą analizę parametrów hydrogeologicznych źródeł, wynikających z krzywych wysychania, przeprowadzono w podziale wszystkich okresów recesji na dwie grupy. Pierwsza grupa reprezentuje recesje występujące w okresie jesienno-zimowym od IX do III, natomiast druga – recesje charakterystyczne dla okresu wiosenno-letniego od IV do VIII (Ryc. 4).

Czasy przebywania wody w systemie wodonośnym

Z prędkością szczytowania się zasobów wód podziemnych zbiorników drenowanych przez źródła funkcyjnie związany jest czas przebywania wody

w systemie wodonośnym ($T = \alpha^{-1}$, gdzie α oznacza współczynnik regresji źródła). W przypadku analizowanych źródeł nie przekracza on 220 dni, a więc nieco ponad 7 miesięcy. Często jednak pojawiają się wartości znacznie niższe, nawet rzędu kilku dni.

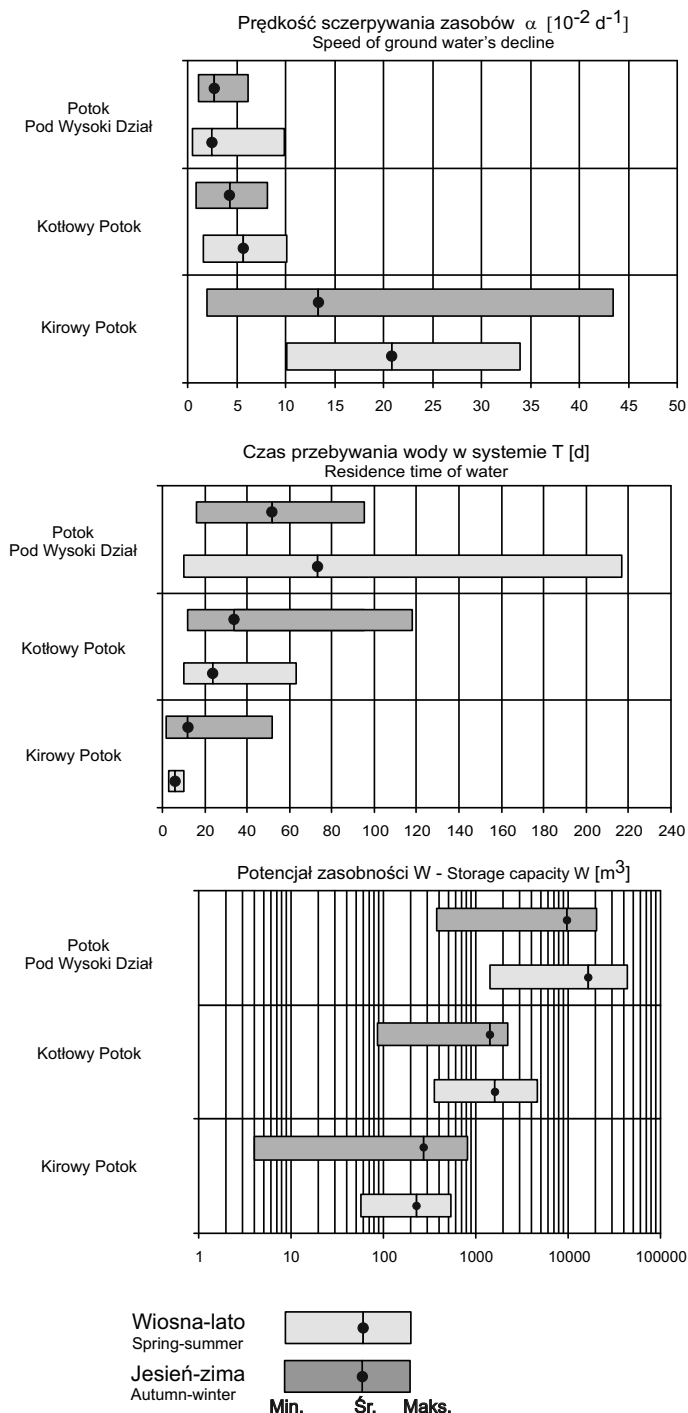
Dotyczy to przede wszystkim krzywych wysychania źródła Kirowego Potoku, charakterystycznych dla okresu wiosenno-letniego, gdzie średni czas przebywania wody w systemie wynosi jedynie 6 dni, przy wartościach maksymalnych nie przekraczających 10 dni. Dla okresu jesienno-zimowego średni czas wynosi już 12 dni, przy czym maksymalne wartości dochodzą do 52 dni. Nieco dłuższe czasy przebywania wody w systemie w okresie zimowym być może są związane z ujemnymi temperaturami, przemarzaniem gruntu (przypowierzchniowej warstwy zwietrzliny) i związanym z tym pogorszeniem się warunków dopływu wody do źródła.

W źródle Kotłowego Potoku średnie czasy przebywania wody są już nieco dłuższe i wynoszą odpowiednio 24 i 35 dni, przy czym występuje, podobne jak w źródle Kirowego Potoku, zróżnicowanie między okresem wiosno-letnim a jesienno-zimowym. W tym przypadku należy fakt ten interpretować jednak nieco inaczej. Wydaje się, iż w okresie jesienno-zimowym mniejszą rolę odgrywa dopływ o charakterze krótkookresowym, a większą wody nieco głębszego krążenia, pochodzące z zasilania wzdłuż wzmiankowanej wcześniej strefy dyslokacyjnej. Przykładem może być recesja z października 2007 r. (por. Tab. III), kiedy to stwierdzono najdłuższy czas 117 dni.

W źródle Potoku Pod Wysoki Dział średnie czasy przebywania wody w systemie wodonośnym są zdecydowanie najdłuższe i wynoszą dla okresu wiosenno-letniego 73 dni, a dla jesienno-zimowego 52 dni. Dłuższe czasy przebywania wody stwierdzane w okresie wiosenno-letnim (do 219 dni) wydają się mieć związek z zasilaniem tego źródła przede wszystkim w okresie zimowego i wczesnowiosennego topnienia pokrywy śnieżnej.

Potencjały zasobności

Zależności wyprowadzone na podstawie równania Mailleta ($W = 86\,400 Q_0/\alpha$) umożliwiają



Ryc. 4. Sezonowa zmienność parametrów reżimu źródeł potoków: Pod Wysoki Dział, Kotłowego i Kirowego w Pienińskim Parku Narodowym

Fig. 4. The seasonal variation of the parameters characterizing the regime of the studied springs: Pod Wysoki Dział, Kotłowy and Kirowy in the Pieniny National Park

wyznaczenie potencjału zasobności (W), wyrażonego w m^3 , który stanowi objętość wody podziemnej nagromadzonej w zbiorniku wód podziemnych w ciągu okresu wzbogacania i następnie odzyskanej wskutek drenażu przez źródło (Castany 1972).

Najwyższe potencjały zasobności (od 0,4 do 44 tys. m^3) obliczono dla źródła Potoku Pod Wysoki Dział, nieco niższe dla źródła Kotłowego Potoku (0,08–4,6 tys. m^3), a najniższe, nie przekraczające 0,8 tys. m^3 , dla źródła Kirowego Potoku. Można zaobserwować wyraźną tendencję, że nieco wyższe potencjały zasobności związane są z recesjami okresu wiosenno-letniego (Ryc. 4).

Maksymalny potencjał zasobności, stwierdzony dla źródła Potoku Pod Wysoki Dział w czasie recesji wiosennej 2007 r. wyniósł 44 tys. m^3 (por. Tab. II). Oznacza to, że nawet stosunkowo wydajne źródła pienińskie drenują bardzo niewielkie zbiorniki o charakterze lokalnym i bardzo ograniczonym obszarze zasilania. Dla porównania: średnie objętości wody w lokalnych zbiornikach systemów wywierzyisk tatrzańskich zawierają się w przedziale 400–2000 tys. m^3 , przy wartościach dochodzących do 20 000 tys. m^3 w zbiornikach regionalnych (Barczyk 2008).

Zależność między czasem przebywania wody w systemie wodonośnym a potencjałem zasobności

Interesująca okazała się analiza zależności pomiędzy wyznaczonymi dla poszczególnych recesji czasami przebywania wody w systemie wodonośnym (T) a odpowiadającymi im potencjałami zasobności (W) (Ryc. 5).

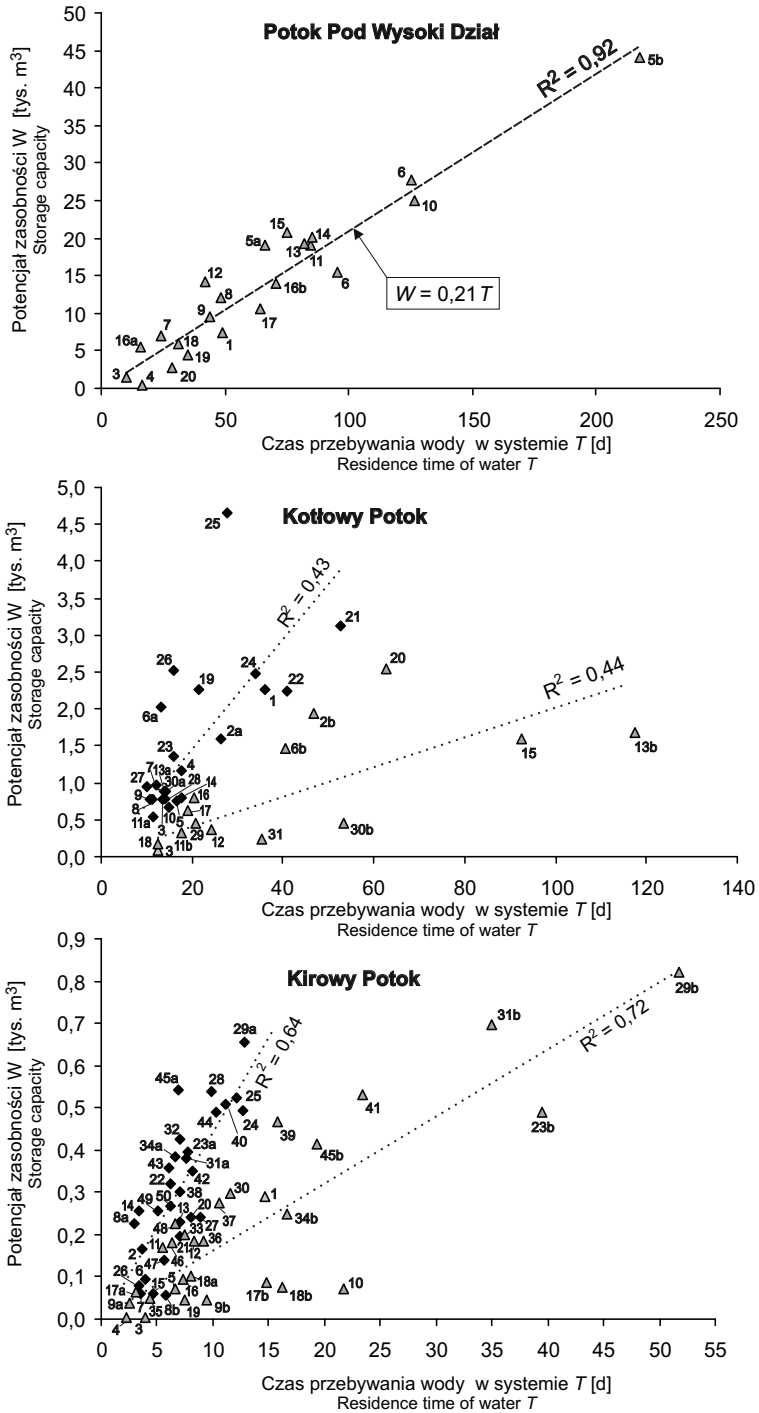
W źródłach Kirowego i Kotłowego Potoku układ punktów na wykresie pozwala wyróżnić dwie grupy punktów układających się wzdłuż dwóch niezależnych linii o różnych współczynnikach kierunkowych. Pozwoliło to wyróżnić dwa typy recesji.

W źródle Kirowego Potoku pierwszy typ recesji charakteryzują potencjały zasobności do 820 m^3 i czasy przebywania wody w systemie wodonośnym do 52 dni. Pomimo wyraźnej zarysowującej się liniowej zależności w ułożeniu punktów, ich rozproszenie wzdłuż teoretycznej

linii jest dość znaczne, co przekłada się na stosunkowo niską wartość współczynnika determinacji wynoszącego $R^2=0,72$. Ten typ recesji charakterystyczny jest wyłącznie dla okresu jesiennego-zimowego (od IX do IV włącznie). Jesienią recesje takie występują po kulminacjach wywołanych niezbyt intensywnymi opadami deszczu (w 14-dniowym okresie poprzedzającym początek recesji rzędu 30–60 mm), natomiast zimą – po zakończeniu łagodnych i rozłożonych w czasie odwilży.

Typ drugi charakteryzują nieco niższe potencjały zasobności – nie przekraczające 660 m^3 , i znacznie krótsze czasy przebywania wody w systemie wodonośnym, maksymalnie do 13 dni. Przejawia się to w ułożeniu punktów wzdłuż bardziej stromo nachylonej teoretycznej prostej o współczynniku determinacji $R^2=0,64$. Drugi typ recesji może występować praktycznie o każdej porze roku. W miesiącach wiosenno-letnich i jesiennych (od V do IX, a nawet w XI) są to recesje następujące po gwałtownych wzrostach wydajności wywołanych obfitymi i intensywnymi opadami deszczu, w dwutygodniowym okresie poprzedzającym ich początek rzędu 90–170 mm, a w kilku przypadkach nawet 200–270 mm. Następuje wtedy szybkie wyczerpywanie się zdolności infiltracyjnej gruntu, przeważa spływ powierzchniowy, a krążenie i drenaż wód podziemnych dotyczy warstwy przypowierzchniowej i ma charakter krótkookresowy. W okresie zimowym ten typ recesji pojawia się po nagłym zahamowaniu gwałtownych odwilży, często wspomaganym opadami deszczu rzędu 20–70 mm, co powoduje, że przy zamrożonym podłożu możliwości infiltracji wód i ich dłuższego przebywania w systemie są również bardzo ograniczone.

W źródle Kotłowego Potoku pierwszy typ recesji charakteryzują potencjały zasobności do 2,5 tys. m^3 i czasy przebywania wody w systemie do 118 dni. Punkty układają się wzdłuż bardzo niewyraźnej liniowej zależności o niskim współczynniku determinacji ($R^2=0,44$). Ten typ recesji, niemal w równym stopniu charakterystyczny dla okresu jesienno-zimowego jak i wiosenno-letniego, jest związany z okresami przewagi zasilania źródła Kotłowego Potoku z głębszego



Ryc. 5. Zależności między czasem przebywania wody w systemie wodonośnym (T) a potencjałem zasobności (W) źródeł potoków: Pod Wysoki Dział, Kotłowego i Kirowego w Pienińskim Parku Narodowym

Fig. 5. The relationships between the residence time of water in the aquifer T and the storage capacity W of the studied springs: Pod Wysoki Dział, Kotłowy and Kirowy in the Pieniny National Park

systemu krążenia związanego ze strefą dyslokacyjną.

Drugi typ recesji charakteryzują potencjały zasobności do 4,6 tys. m³ i analogicznie jak w źródle Kirowego Potoku, znacznie krótsze czasy przebywania wody w systemie, w tym przypadku do 53 dni. Przejawia się to w ułożeniu punktów wzdłuż bardziej stromo nachylonej teoretycznej prostej o równie niskim współczynniku determinacji ($R^2=0,43$). Ten typ recesji wiązać należy z okresami przewagi zasilania źródła dopływem wód podziemnych o charakterze krótkookresowym. Okresy takie, występują przede wszystkim wiosną i latem, kiedy związane są z intensywnymi opadami deszczu, rzadziej jesienią, a jedynie sporadycznie zimą, kiedy związane są z gwałtownymi odwilżami.

Zupełnie odmiennie prezentuje się zależność między czasem przebywania wody w systemie a potencjałem zasobności w źródle Potoku Pod Wysoki Dział. W tym przypadku wszystkie punkty układają się wzdłuż wyraźnie zarysowującej się jednej prostej o współczynniku determinacji $R^2 = 0,92$, co świadczy o względnej jednorodności systemu zasilania źródła. Jedynie w tym przypadku odpowiednio wysoka wartość współczynnika determinacji upoważnia do podania równania zależności obu zmiennych ($W=0,21T$).

Wskaźniki pojemności źródła

Znajomość sumarycznej rocznej wydajności źródła (Q_r) oraz objętości wody w zbiorniku wód podziemnych przez nie drenowanym, umożliwia wyznaczenie wskaźnika pojemności źródła (P) (Pazdro, Kozerski, 1990). Jako objętość wody przyjęto do obliczeń wyznaczony dla każdego źródła z krzywych recesji maksymalny potencjał zasobności (Tab. V).

Uzyskane zakresy wartości współczynników (dla źródła Potoku Pod Wysoki Dział $P=1,0-1,9$; dla źródła Kotłowego Potoku $P=0,7-3,5$; dla źródła Kirowego Potoku $P=1,9-8,5$) potwierdzają fakt, że zbiorniki wód podziemnych zasilające wszystkie badane źródła są bardzo małe, a wymiana wody wywołana drenażem jest szybka i odbywa się nawet kilkakrotnie w ciągu roku.

W przypadku źródła Potoku Pod Wysoki Dział czas wymiany wody trwa od 6 do 12 miesięcy, w źródle Kotłowego Potoku od 3,5 do 17 miesięcy, natomiast w źródle Kirowego Potoku od 1,5 do 6 miesięcy.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Obserwacje limnimetryczne trzech źródeł pienińskich umożliwiły zidentyfikowanie i analizę kilkudziesięciu okresów recesji ich wydatku. W szeregu przypadkach krzywe recesji, opisane równaniem Mailliet'a, są wyraźnie dwudzielnie, co przejawia się dwoma odcinkami prostych reprezentatywnych o różnym stopniu nachylenia. Świadczyć to może o tym, że drenaż macierzystych zbiorników odbywa się w dwóch etapach.

W źródle Kirowego Potoku prawdopodobnie w pierwszej kolejności drenowane są wody podziemne zgromadzone w najbardziej przypowierzchniowej warstwie zwierzeli, następnie zaś rozpoczyna się nieco wolniejszy drenaż z głębszej partii zwierzeli oraz spękanego masywu. W źródle Kotłowego Potoku udział biorą dwa systemy krążenia: głębszy, związany ze strefą dyslokacyjną, dla którego charakterystyczne są raczej niższe współczynniki regresji oraz płytszy, w którym duży udział ma odpływ podpowierzchniowy o charakterze krótkookresowym i którego szczytowanie zasobów następuje znacznie szybciej, co przejawia się w wyższych wartościach α . W źródle Potoku Pod Wysoki Dział bardziej stromo nachylone odcinki są raczej charakterystyczne dla okresów wiosennych, kiedy system wodonośny wykazuje najwyższy stopień napełnienia i najwyższą zasobność, ale jednocześnie najszybciej następuje szczytowanie się zasobów wód podziemnych.

Wartości współczynników regresji α mieszczą się w zakresie 0,0046–0,4340 d⁻¹ a ich rozkłady są dla poszczególnych źródeł zróżnicowane, przy czym największą odrębnością charakteryzuje się źródło Kirowego Potoku, gdzie zdecydowanie dominują wartości powyżej 0,1 d⁻¹, co ma to związek z płytkością krążenia wód podziemnych i niewielką zasobnością zbiornika zasilającego to źródło.

Tabela V. Wymiana wody w zbiornikach zasilających źródła w Pienińskim Parku Narodowym**Table V.** The exchange of water in springs' recharging reservoirs in the Pieniny National Park

Źródło Spring	Rok hydrologiczny Hydrologic year	Średnia wydajność Mean discharge [l/s]	Sumary- czna roczna wydajność Total annual discharge Q_r [m ³]	Objętość wody w zbiorniku drenowanym przez źródło Volume of water in the reservoir drained by spring V [m ³]	Wskaźnik pojemności źródła Spring capacity index $P = Q_r/V$
Potoku Pod Wysoki Dział	2003	1,09	34 400	44 000	0,8
	2004	0,99	31 200		0,7
	2007	2,56	80 700		1,8
	2008	2,63	83 000		1,9
	2009	2,29	72 200		1,6
	2010	1,90	59 900		1,4
	2011	1,47	46 400		1,0
Kotłowego Potoku	2003	0,28	8 830	4 650	1,9
	2004	0,245	7 730		1,7
	2005	0,20	6 310		1,4
	2006	0,10	3 150		0,7
	2007	0,20	6 310		1,4
	2008	0,17	5 360		1,2
	2009	0,45	14 190		3,0
	2010	0,52	16 400		3,5
Kirowego Potoku	2011	0,15	4730	1,0	
	2003	0,05	1 580	820	1,9
	2004	0,07	2 210		2,7
	2005	0,14	4 420		5,4
	2006	0,11	3 470		4,2
	2007	0,22	6 940		8,5
	2008	0,19	6 000		7,3
	2009	0,17	5 360		6,5
	2010	0,19	6 000		7,3
2011	0,06	1 900	2,3		

Maksymalny czas przebywania wody w systemach wodonośnych źródeł nie przekracza 220 dni, a więc nieco ponad 7 miesięcy. Często jednak pojawiają się wartości znacznie niższe, nawet rzędu kilku dni. Dotyczy to przede wszystkim krzywych wysychania źródła Kirowego Potoku.

W wyniku analizy zależności pomiędzy czasami przebywania wody w systemie wodonośnym (T) a odpowiadającymi im potencjałami zasobności (W), w źródłach Kirowego i Kotłowego Potoku wyróżniono dwa typy recesji, przejawia-

jące się w ułożeniu punktów wzdłuż dwóch prostych o różnych współczynnikach kierunkowych, natomiast w źródle Potoku Pod Wysoki Dział, wszystkie punkty układają się wzdłuż wyraźnie zarysowującej się jednej prostej, co potwierdza przypuszczenie o stosunkowo jednorodnym systemie zasilania tego źródła.

Wartości współczynników pojemności źródeł (P) potwierdzają fakt, że zasilające zbiorniki wód podziemnych są bardzo małe, a wymiana wody wywołana drenażem jest szybka i odbywa się nawet kilkakrotnie w ciągu roku.

PIŚMIENICTWO

- Barczyk G. 2008. Tatrzańskie wywierzyska. Krasowe systemy wywierzyskowe Tatr polskich. — Tatrzański Park Narodowy, Zakopane.
- Barczyk G., Humnicki W., Żurawska G. 2001. Obserwacje limnimetryczne wywierzysk tatrzańskich. — *Współczesne Problemy Hydrogeologii*, 10(2): 11–20.
- Birkenmajer K. 1979. Przewodnik geologiczny po pienińskim pasie skałkowym. — *Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa*.
- Castany G. 1972. Poszukiwanie i eksploatacja wód podziemnych. — *Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa*.
- Humnicki W. 1989. Znaczenie badań stacjonarnych w rozpoznaniu związków hydraulicznych wód powierzchniowych i podziemnych zlewni Białki w Tatrach. [W:] *Materiały Sympozjum „Hydrogeologiczne problemy pd.-zach. Polski”, Szklarska Poręba, 18–20.09.1989 r.* — *Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław*, ss. 215–220.
- Humnicki W. 2006. Reżim źródeł pienińskich w świetle obserwacji limnimetrycznych. — *Pieniny Przyroda i Człowiek*, 9: 29–39.
- Humnicki W. 2007a. Reżim hydrogeologiczny źródeł pienińskich na przykładzie źródła Balarówka w Tylce. [W:] P. Jokić i in. (red.), *Źródła Polski. Wybrane problemy krenologiczne.* — *Wydział Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź*, ss. 85–97.
- Humnicki W. 2007b. *Hydrogeologia Pienin.* — *Dissertationes 476, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa*.
- Jokić P., Maksymiuk Z. 1995. Zastosowanie analizy wydajności źródeł do oceny niektórych charakterystyk zbiorników wód podziemnych. — *Przegląd Geologiczny*, 5: 388–392.
- Małecka D. 1997. Źródła masywu tatrzańskiego. — *Acta Geographica Lodziensia, Folia Geographica Physica*, 2: 9–26.
- Małecka D., Humnicki W. 1989. Rola warunków hydrodynamicznych w kształtowaniu reżimu Wywierzyska Olczyńskiego. — *Przegląd Geologiczny*, 2: 78–84.
- Małecka D., Humnicki W. 2001. Stan rozpoznania hydrogeologicznego Pienińskiego Parku Narodowego. — *Współczesne Problemy Hydrogeologii, Wrocław*, 10(1): 45–54.
- Małecka D., Humnicki W. 2002. Problemy hydrogeologii i ochrony wód Pienińskiego Parku Narodowego. — *Pieniny Przyroda i Człowiek*, 7: 49–70.
- Pazdro Z., Kozerski B. 1990. *Hydrogeologia ogólna.* — *Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa*.
- Wieczysty A. 1982. *Hydrogeologia inżynierska.* — *Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa*.

SUMMARY

The stationary monitoring (i.e. limnimeters with automatic data logging) installed in the area of the Pieniny National Park for three selected springs (Fig. 1) and periodic measurements of spring discharges allowed to record detailed variation of spring discharge in the periods of their own regime, i.e. connected with draining of own groundwater reservoir and independent of temporary recharging events, like snowmelt or rain.

The location of the studied springs is special due to extremely complex geological and hydrogeological settings. The Pieniny Klippen Belt from a geological point of view belong to the most complex systems in Europe. The whole area is highly faulted, folded and thrust. Mosaic-type geological structure complicate considerably hydrogeological conditions in the studied area.

The majority of springs in the studied area belong to fissure ones due to the structure of the hydrogeological system. However, many springs drain both fissure waters of the main aquifer and porous waters in weathered cover. The highest spring discharges are found during spring snow melting or directly after this period. Taking into account the mean annual values of discharge the studied springs can be qualified to VI and VII Meinzer class. According to spring variability index they belong to variable or periodic springs (Table I).

Based on the detailed analysis of the springs' discharge and daily sum of atmospheric precipitation, several dozen periods of the recession of the springs' discharge were selected (Table II–IV). In several cases the recession curves mathematically described by the Maillet equation are dual, and can be approximated by two separate representative straight lines of different slopes, i.e. different recession coefficients (Fig. 2). The values of the recession coefficient are between 0.0046 and 0.4340 d^{-1} , and their distribution for particular springs are variable (Fig. 3).

The residence time of water in the hydrogeological system (T) is connected with the rate by which water exits the groundwater reservoir. In the case of the studied springs this factor T is less than 220 days, and sometimes is equal only for

a few days (Fig. 4). The largest storage capacities W (from 0.4 to 44 000 m³) were calculated for the spring Pod Wysoki Dział, whereas the lowest ones – for the spring Kirowy Potok (800 m³). Clear relationship exists between the larger storage capacities and the discharge recessions in winter-summer periods.

The relationship between the residence times of water (T) in hydrogeological system and the

respective storage capacities (W) suggest quite homogeneous recharge system in the spring Pod Wysoki Dział (Fig. 5).

The values of the storage coefficients (<50 000 m³) strongly suggest that studied springs in the Pieniny Mts drain rather small, local groundwater reservoirs where the water exchange induced by spring discharge is quite fast, and may take place even a few times per year (Table V).