

## Ćwiczenie 9

### ODPŁYW ZE ZLEWNI

- CEL:**
- Poznanie wybranych metod oceny odpływu podziemnego oraz charakterystyk liczbowych odpływu
  - Kształcenie umiejętności korzystania z Rocznika Hydrologicznego Wód Powierzchniowych i na jego podstawie wyznaczanie odpływu ze zlewni na przykładzie zlewni Białej Łądeckiej
- METODA:** Praca z Rocznikiem Hydrologicznym Wód Powierzchniowych
- MATERIAŁY:** Rocznik Hydrologiczny Wód Powierzchniowych - rzeka Odra dla roku od 1976 do 1980, tabela "Charakterystyka ogólna odpływu podziemnego", kalkulator
- LITERATURA:**
1. Bajkiewicz-Grabowska E., Mikulski Z.: 1984 - *Hydrogram wezbrania, jego rozdział genetyczny i podstawowe pojęcia*. Przegląd Geofizyczny, z. 3. s. 333-343.
  2. Gutry-Korycka M., 1978 - *Zasilanie podziemne rzek polskich*. Przegląd Geofizyczny, r. XXIII (XXXI) z. 2, s. 79-98, Warszawa.
  3. Kiciński T.: 1960 - *Odptyw gruntowy w rzekach oraz jego określanie*. Gospodarka Wodna, z. 10. s. 439-441.
  4. Report No. 15: 1971 - *Some recommendations for the operation of representative and experimental basins and the analysis of data*. Rep. WMO/IHD, Geneve.
  5. Sokolow B. L., Sarkisjan W. O.: 1981 - *Podziemnoje pitanje gornych riek*. Gidrometeoizdat, Leningrad.

### WPROWADZENIE

Odpływ obliczany jest dla posterunku wodowskazowego, zamykającego zlewnię w określonym punkcie biegu rzeki. Znając codzienne przepływy można obliczyć, ile wody odpłynęło w dowolnym okresie czasu. Uzyskuje się w ten sposób objętość wody, która odpłynęła w okresie bilansowym. Elementy bilansu wodnego są podawane w mm. Wobec tego również objętość wody, która odpłynęła w jednostce czasu należy przeliczyć na wskaźnik odpływu.

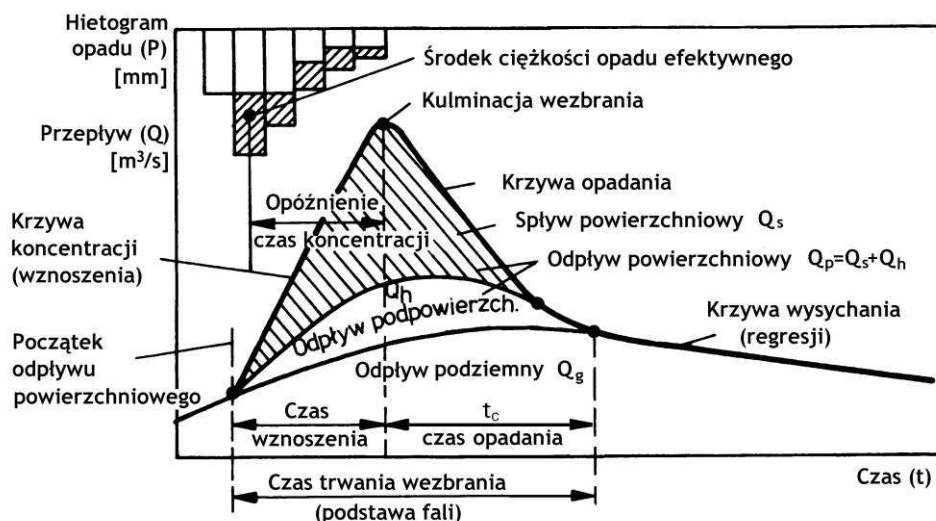
$$H = \frac{V}{A} \quad \text{lub} \quad H = \frac{Q_{sr} \cdot t}{A} \quad (9.1)$$

gdzie:  $V$  - całkowita objętość wody jaka odpłynęła w okresie bilansowym [ $L^3$ ],  $A$  - powierzchnia zlewni [ $L^2$ ],  $Q_{sr}$  - średni odpływ w okresie bilansowym [ $L^3/T$ ],  $t$  - okres bilansowy [ $T$ ].

Odpływ jest tym elementem bilansu wodnego, który ustala się stosunkowo najdokładniej. Analiza cyklu hydrologicznego zlewni podczas przejścia jednego opadu nawalnego pozwala na wyodrębnienie czterech podstawowych dróg zasilania koryta cieku (ryc. 9.1):

- spływ powierzchniowy
- odpływ podpowierzchniowy (hypodermiczny)
- odpływ podziemny
- opad zasilający bezpośrednio system sieci rzecznej i zbiorniki wód otwartych.

Całkowity odpływ rzeczny jest więc sumą wymienionych wyżej składowych. Znaczenie ostatniego elementu jest niewielkie (za wyjątkiem zlewni zawierających duże zbiorniki wodne) i jest on wliczany do spływu powierzchniowego. Trudny do wyznaczenia jest odpływ podpowierzchniowy, stąd najczęściej łączony jest razem ze spływem powierzchniowym i określany łącznie jako odpływ powierzchniowy.



RYCINA 9.1. Charakterystyka typowego hydrogramu (na podstawie Soczyńska 1993).

Istotnym zagadnieniem hydrologicznym jest ocena wielkości podziemnego zasilania rzek. Metody ilościowej oceny odpływu podziemnego można podzielić biorąc pod uwagę charakter zebranych informacji i sposób ich wykorzystania na trzy klasy:

- metody hydrologiczne
- metody hydrologiczno-hydrogeologiczne
- metody hydrogeologiczne

Najbardziej popularne są metody hydrologiczne, które opierają się na interpretacji przepływu w rzece lub uzależniają przepływ podziemny od innych charakterystyk hydrologicznych. Wśród tych metod można wyróżnić między innymi metody oparte na minimalnych lub charakterystycznych przepływach oraz na genetycznym podziale hydrogramu.

### **METODA GENETYCZNEGO PODZIAŁU HYDROGRAMU (ŚCIĘCIA FALI WEZBRANIOWEJ)**

Metoda genetycznego podziału hydrogramu polega na wykreśleniu linii podziału oddzielającego odpływ pochodzenia podziemnego od odpływu powierzchniowego. Wydzielenie to prowadzi się na wykresie codzienny przepływów w oparciu o szereg przesłanek i wskaźników. W okresach niżówkowych linia podziału pokrywa się z przepływami całkowitymi (całkowity przepływ pochodzi z drenowania wód podziemnych). Główne trudności sprawiają okresy wezbraniowe. Podział hydrogramu w okresie wezbrania sprowadza się do wyznaczenia trzech punktów charakterystycznych (Jokiel 1994):

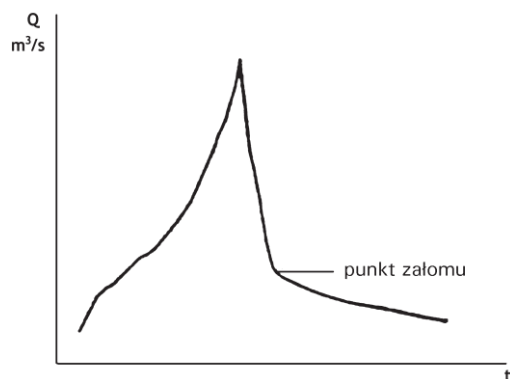
- punktu rozpoczęcia odpływu powierzchniowego
- punktu maksymalnego (niekiedy minimalnego) zasilania podziemnego
- punktu zakończenia odpływu powierzchniowego

Różne są kryteria lokalizacji punktów charakterystycznych i to one w zasadzie decydują o charakterze stosowanej metody. Jako początek odpływu powierzchniowego przyjmuje się zazwyczaj punkt gwałtownego wzrostu odpływu całkowitego. Punkt zakończenia odpływu powierzchniowego również wyznacza się na podstawie analizy wykresu codzienny przepływów. Krzywa ta w okresie zmniejszania się przepływów jest często załamana, to znaczy w górnej części jest bardziej a w dolnej

mniej stroma. Ten punkt załomu (ryc. 9.2) wskazuje, że w dalszym ciągu odpływają już tylko wody pochodzenia podziemnego. Przybliżoną jego odległość od szczytu fali wezbraniowej (ryc. 9.1) można oszacować ze wzoru (Linsley et al. 1982):

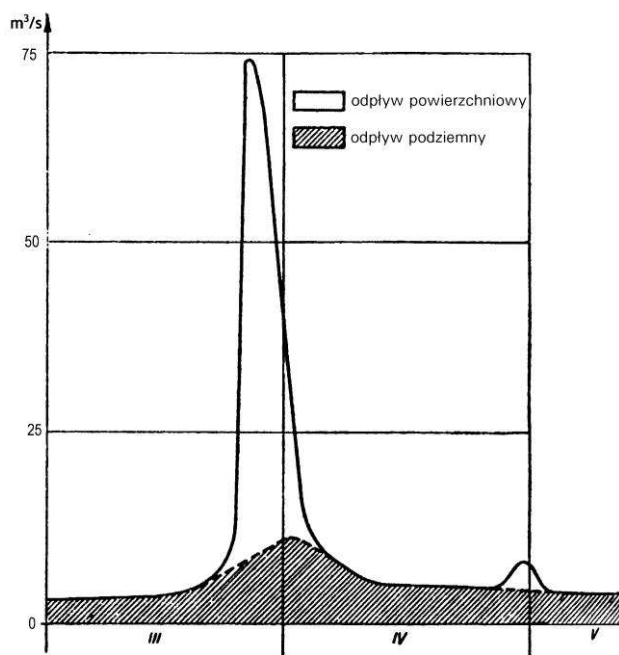
$$t_c = 0,827 A^{0,2} \quad (9.2)$$

gdzie  $t_c$  czas w dniach a  $A$  powierzchnia zlewni w  $\text{km}^2$



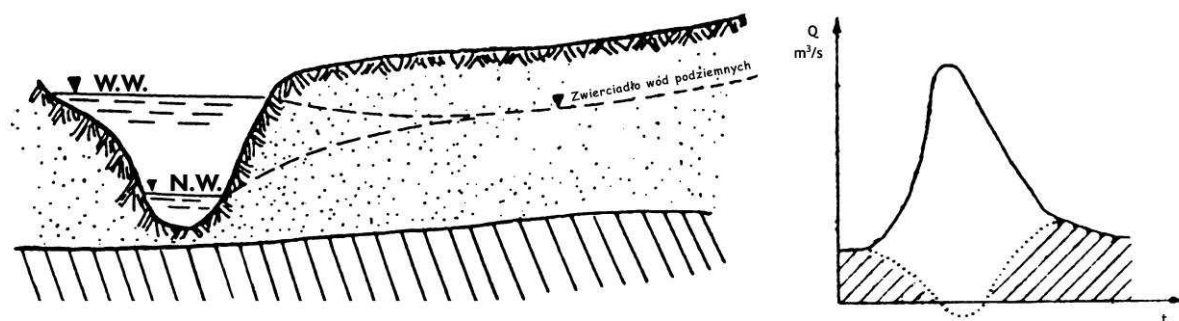
RYCINA 9.2. Punkt załomu.

Punkt maksymalnego zasilania wyznaczyć można przez przedłużenie odcinków krzywej przepływów z przed jak i po zakończeniu wezbrania z uwzględnienie przesunięcia maksimum odpływu podziemnego w stosunku do maksimum odpływu całkowitego. Kiciński (1960) podaje za Mavisem, że dla małych rzek wartość ta wynosi 2-4 dni (tab. 1), przy czym dla zlewni górskich czas ten powinien być nieznacznie zmniejszony. Przy wyznaczaniu tego punktu oprócz się można również na jednej z licznych konstrukcji graficznych (Bajkiewicz-Grabowska, Mikulski 1984, Dynowska 1974, Jankowski 1995, Natermann 1958). W celu dokonania rozdziału odpływu na spływ powierzchniowy i odpływ podziemny w okresach wezbraniowych prowadzi się linie krzywe o krzywiźnie narzuconej przez okres przed i powezbraniowy uwzględniając okres przesunięcia między szczytem fali wezbraniowej i maksymalnym odpływem podziemnym (ryc. 9.3).



RYCINA 9.3. Wydzielenie odpływu podziemnego z odpływu całkowitego (Kiciński 1960).

Analizując jednak odpływ podziemny w okresie wezbrania należy uwzględnić również charakter więzi hydraulicznej pomiędzy rzeką a warstwą wodonośną oraz ukształtowanie doliny rzecznej. W literaturze spotyka się stwierdzenia, że w przypadku szerokich i płaskich dolin rzecznych w czasie wezbrania odpływ stopniowo maleje i w okresie kulminacji osiąga wartość zerową lub nawet ujemną, gdyż w tym czasie następuje wsiąkanie wód rzecznych w aluwia (ryc. 9.4). Należy jednak mieć na uwadze fakt, że już w odpływie fazy wezbraniowej, a w każdym razie w fazie opadania, niesione są ogromne ilości wód podziemnych, drenowanych i wyniesionych do głównych koryt rzecznych przez rozliczną sieć bocznych dopływów, które nawet w czasie wezbrania mają charakter drenujący (Jokiel 1994). Stąd dla większości rzek w Polsce w czasie wezbrania obserwuje się wzrost odpływu podziemnego.



RYCINA 9.4. Przykład zmniejszenia się odpływu podziemnego podczas wezbrania rzek o szerokich i płaskich dolinach.

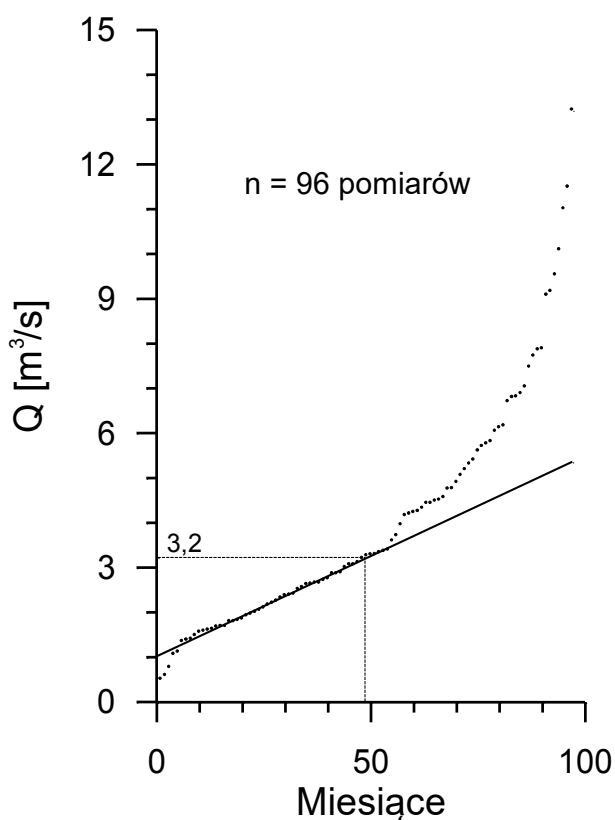
Obecnie coraz częściej do przeprowadzenia rozdziału odpływu całkowitego na odpływ powierzchniowy i podziemny wykorzystuje się techniki komputerowe (np. program HYSEP (Sloto R., Crouse M. 1996) opracowany i rozpowszechniany przez USGS). Do obliczeń stosuje się szereg schematów, których omówienie znaleźć można w pracach: Nathan, McMahon (1990), Shirmohammadi et al. (1984), Sloto (1991).

### **METODY OPARTE NA MINIMALNYCH PRZEPŁYWACH RZECZNYCH**

Metody tej grupy zakładają, że wartość jednego z charakterystycznych przepływów jest równa wartości odpływu podziemnego. Szerzej rozpowszechnione są dwie metody: metoda Wundta i metoda Killego. W metodzie Wundta (Wundt 1953, Chełmicki, Wolski 1978) średni wieloletni odpływ podziemny rzek europejskich strefy umiarkowanej jest bliski wartości średniej z minimów miesięcznych przepływu. Natomiast średnia z minimów rocznych informuje o przeciętnym zasilaniu długookresowym (drenaż głębokich i stabilnych poziomów wodonośnych). Metoda Killego (Kille 1970, Dynowska 1984) polega na rysowaniu uporządkowanych rosnąco minimalnych przepływów miesięcznych w układ współrzędnych (ryc. 9.5). Przepływ odpowiadający połowie obserwacji odniesiony do prostej wyrównującej środkową część wykresu jest średnim odpływem podziemnym dla analizowanego wielolecia. Konstrukcja ta ma na celu wyeliminowanie części dopływu do rzeki pochodzącego ze strefy przypowierzchniowej, zawierającego się w minimach miesięcznych z okresów o podwyższonych opadach, czy też w miesiącach roztopowych. Jednak jak dotąd brak jest podstaw do interpretacji różnic w wynikach oceny odpływu podziemnego objema omówionymi metodami

Uzyskane metodą Killego wyniki są niższe od wyników otrzymanych metodą genetycznego podziału hydrogramu i metodą Wundta. Jeżeli uznać metodę genetycznego podziału hydrogramu za metodą "normatywną", to metoda Wundta dla 85 przeanalizowanych zlewni (Jokiel, 1994) dała wyniki o 3% niższe, a metoda Killego o 14% niższe. Z tego względu wyniki otrzymane metodą genetycznego podziału i metodą Wundta mogą być ze sobą porównywane.

Zarówno metoda Wundta jak i metoda Killego pozwalają na wyznaczenie średniego rocznego odpływu podziemnego z wielolecia bez możliwości uwzględnienia jego zmienności w ciągu roku jak i w wieloleciu.



RYCINA 9.4. Wyznaczenie odpływu podziemnego metodą Killego

#### **METODA ŹRÓDEŁ REPREZENTATYWNYCH**

Założenia tej metody przedstawił już w 1947 roku F.A. Makarenko (Sokołow, Sarkisian, 1981). W literaturze polskiej wspomniana metoda została szerzej omówiona w pracach Kicińskiego (1966) i Pawlika-Dobrowolskiego (1976 a). Opiera się ona na porównaniu przepływów w cieku z obserwowanymi w tym czasie wydajnościami badanych źródeł w okresie braku zasilania opadowego. Na podstawie tych informacji ustala się związek funkcyjny pomiędzy przepływem podziemnym w cieku a wielkością drenażu poprzez źródła. Wykorzystując go można wyznaczyć wartość zasilania podziemnego rzek w momentach, dla których istnieją dane o wydajnościach obserwowanych źródeł. Aby dokładnie podzielić hydrogram na transzę powierzchniową i odpływ podziemny należy dysponować stałymi obserwacjami zespołu źródeł reprezentatywnych. W praktyce nie zawsze dysponuje się codziennymi wydajnościami zespołu źródeł reprezentatywnych. Przeprowadzone prace (Tarka 1995) wykazały, że nawet pomiary źródeł w odstępnie 4 tygodni pozwalają na stosunkowo dokładną ocenę średniego rocznego odpływu podziemnego (różnica w stosunku do metody genetycznego podziału hydrogramu nie przekracza 10%). W tym przypadku okresowe pomiary wydajności źródeł przelicza się ustalonym wzorem na odpływ podziemny. Otrzymane punkty łączy się odcinkami prostymi, traktując otrzymaną krzywą jako graniczną linię podziału na odpływ powierzchniowy i podziemny. Wprowadzie wyznaczony w ten sposób odpływ podziemny niejednokrotnie przewyższa odpływ całkowity, jednak nie ma to większego znaczenia, gdyż poszukiwana jest wartość średnia z dłuższego okresu czasu. Metoda ta jest szczególnie praktyczna, gdy chce się ocenić odpływ podziemny ze zlewni, w przypadku braku stałych pomiarów przepływu całkowitego.

## CHARAKTERYSTYKI LICZBOWE ODPLYWU

Na wielkość i zmienność odpływu całkowitego i podziemnego rzek wpływają warunki klimatyczne, hydrologiczne oraz morfologiczne i hydrogeologiczne. Liczbowo odpływ całkowity i podziemny można scharakteryzować za pomocą szeregu wskaźników.

- współczynnik odpływu całkowitego - równy jest ilorazowi odpływu całkowitego i opadu, wyrażony jest w %:

$$C = \frac{H}{P} 100\% \quad (9.3)$$

- współczynnik odpływu podziemnego - równy jest ilorazowi odpływu podziemnego i opadu, wyrażony jest w %:

$$C_g = \frac{H_g}{P} 100\% \quad (9.4)$$

- współczynnik zasilania podziemnego - jest to iloraz odpływu podziemnego i całkowitego, wyrażony w %:

$$\alpha = \frac{H_g}{H} 100\% = \frac{Q_g}{Q} 100\% \quad (9.5)$$

- moduł odpływu całkowitego - jest to iloraz średniego odpływu całkowitego i powierzchni zlewni:

$$M = \frac{Q}{A}, \quad [l/s/km^2] \quad (9.6)$$

- moduł odpływu podziemnego - jest to iloraz średniego odpływu podziemnego i powierzchni zlewni:

$$M_g = \frac{Q_g}{A}, \quad [l/s/km^2] \quad (9.7)$$

- współczynnik zdolności retencyjnej zlewni:

$$m = \frac{q_{\max}}{q_{\min}} \quad (9.8)$$

gdzie:  $q_{\max}$  - maksymalna średnia roczna wartość z najniższych przepływów miesięcznych,  $q_{\min}$  - minimalna średnia roczna wartość z najniższych przepływów miesięcznych.

- współczynnik zmienności odpływu:

$$C_v = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q} \quad (9.9)$$

gdzie  $q$  jest średnią z minimalnych przepływów miesięcznych.

Charakterystyki liczbowe odpływu podziemnego posłużyły do wyróżnienia dziewięciu typów zlewni (Gutry-Korycka 1978) o zróżnicowanej budowie geologicznej, przepuszczalności, zdolności retencyjnej i sposobie zasilania (tab. 9.1).

TABELA 9.1. Charakterystyka ogólna odpływu podziemnego w wydzielonych typach zlewni. (Pleczyński 1981)

Nr	Typ zlewni	$m$	$M$	$C_v$	$\alpha$	$C$	Autor
I	Zlewnie obszaru nieciągłych struktur fałdowych	1,78-1,14	4,74	0,560-0,130	40	18,4	M. Gutry-Korycka
		1,69-1,22	3,6-7,5		40	17,0	J. Orsztynowicz i B. Wierzbicka
			2,7-3,6			9,3-22,5	J. Sawicki
II	Zlewnie obszaru fliszu karpackiego	3,60-1,63	4,69	1,365-0,404	33	15,0	M. Gutry-Korycka
		3,85-1,72	2,5-8,8		23-43	11,0-28,0	T. Kiciński R. Poźniak
III	Zlewnie obszarów skał osadowych przedczwartorzędowych i obszarów skrasowiałych	1,78-1,18	4,75	0,613-0,160	57	20,6	M. Gutry-Korycka
		1,92-1,15	4,6				J. Sawicki
			4,95-5,52			17,6-33,7	J. Orsztynowicz
IV	Zlewnie obszarów skał osadowych przedczwartorzędowych z pokrywą morenową	1,84-1,31	2,54	0,658-0,273	46	12,0	M. Gutry-Korycka
		2,06-1,33	2,4				T. Kiciński R. Poźniak
V	Zlewnie obszarów pokrytych lessem i utworami lessopodobnymi	2,26-1,25	2,21	0,854-0,216	43	10,7	M. Gutry-Korycka
		2,43-1,35	2,1				T. Kiciński R. Poźniak
			1,56-2,24			5,8-15,7	J. Sawicki
VI	Zlewnie obszarów morenowych starszych zlodowaceń	3,05-1,33	1,82	1,036-0,283	50	11,0	M. Gutry-Korycka
			0,8-2,2		40-72	5-14	J. Orsztynowicz i B. Wierzbicka
		3,50-1,36	1,8				T. Kiciński R. Poźniak
VII	Zlewnie obszarów pradolin i dolin	2,21-1,20	2,77	0,742-0,196	56	15,0	M. Gutry-Korycka
			1,13-4,4		38-79	6,0-19,0	J. Orsztynowicz i B. Wierzbicka
			2,3-3,3				Z. Paślawski
VIII	Zlewnie obszarów młodoglacjalnych	2,15-1,12	4,94	0,775-0,126	67	24,0	M. Gutry-Korycka
		1,40-1,20	3,9-8,0		67-81	19,0-37,0	J. Orsztynowicz i B. Wierzbicka
		2,66-1,21	3,5				T. Kiciński R. Poźniak
IX	Zlewnie utworów piaszczystych i piaszczysto-żwirowych	2,32-1,12	3,53	0,901-0,169	54	17,0	M. Gutry-Korycka
			2,86-4,53		55-80	13,0-25,0	J. Orsztynowicz i B. Wierzbicka
		2,68-1,11	3,4				T. Kiciński R. Poźniak

## ZADANIE

1. Na podstawie średnich rocznych przepływów rzeki Białej Łądeckiej w Łądku Zdroju z lat 1976-80 publikowanych w Rocznikach Hydrologicznych Wód Powierzchniowych obliczyć średni przepływ w tym okresie i na jego podstawie średni roczny wskaźnik odpływu w analizowanym pięcioleciu oraz w roku 1976.
2. Z Roczników Hydrologicznych Wód Powierzchniowych wynotować dane o najniższych miesięcznych przepływach Białej Łądeckiej w Łądku Zdroju z lat 1976-80. Na ich podstawie wyznaczyć średni roczny odpływ podziemny metodą Wundta i metodą Killego.
3. Na podstawie codziennych przepływów Białej Łądeckiej w Łądku Zdroju w roku 1976 wyznaczyć odpływ podziemny metodą genetycznego podziału hydrogramu.
4. Przeliczyć wartości odpływu podziemnego na wskaźniki odpływu podziemnego.
5. Porównać wyniki analizując procentowy udział odpływu podziemnego w całkowitym, w wieloleciu 1976-80 i w roku 1976.
6. Obliczyć charakterystyki liczbowe odpływu na podstawie danych z pięciolecia 1976-80 i porównać je z typowymi wartościami podanymi w tabeli 9.1

## SPRAWOZDANIE Z ĆWICZENIA

- Obliczenie średniego rocznego wskaźnika odpływu

Rok	1976	1977	1978	1979	1980	1976-80
Średni przepływ [m <sup>3</sup> /s]	3,23	4,54	2,23	2,69	4,40	3,42

- » średni roczny wskaźnik odpływu dla lat 1976-80

$$H = \frac{3,42 \cdot 86400 \cdot 365}{166 \cdot 10^6} = 0,650 \text{ m} = 650 \text{ mm}$$

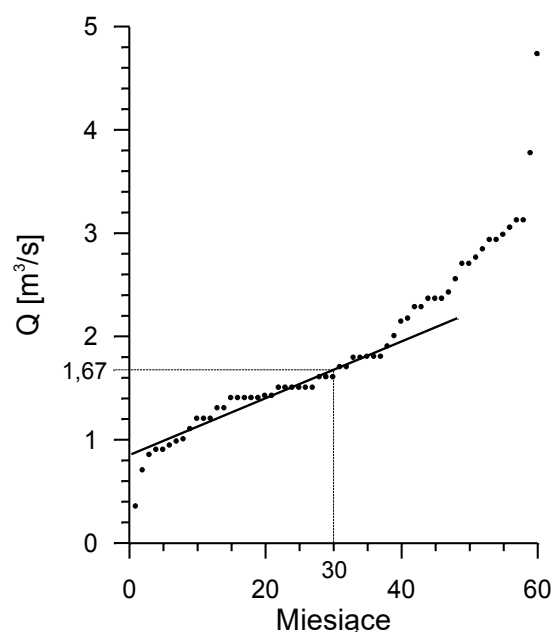
- » wskaźnik odpływu dla roku 1976

$$H = \frac{3,23 \cdot 86400 \cdot 366}{166 \cdot 10^6} = 0,614 \text{ m} = 614 \text{ mm}$$

- Wyznaczenie średniego rocznego odpływu podziemnego metodą Wundta i metodą Killego

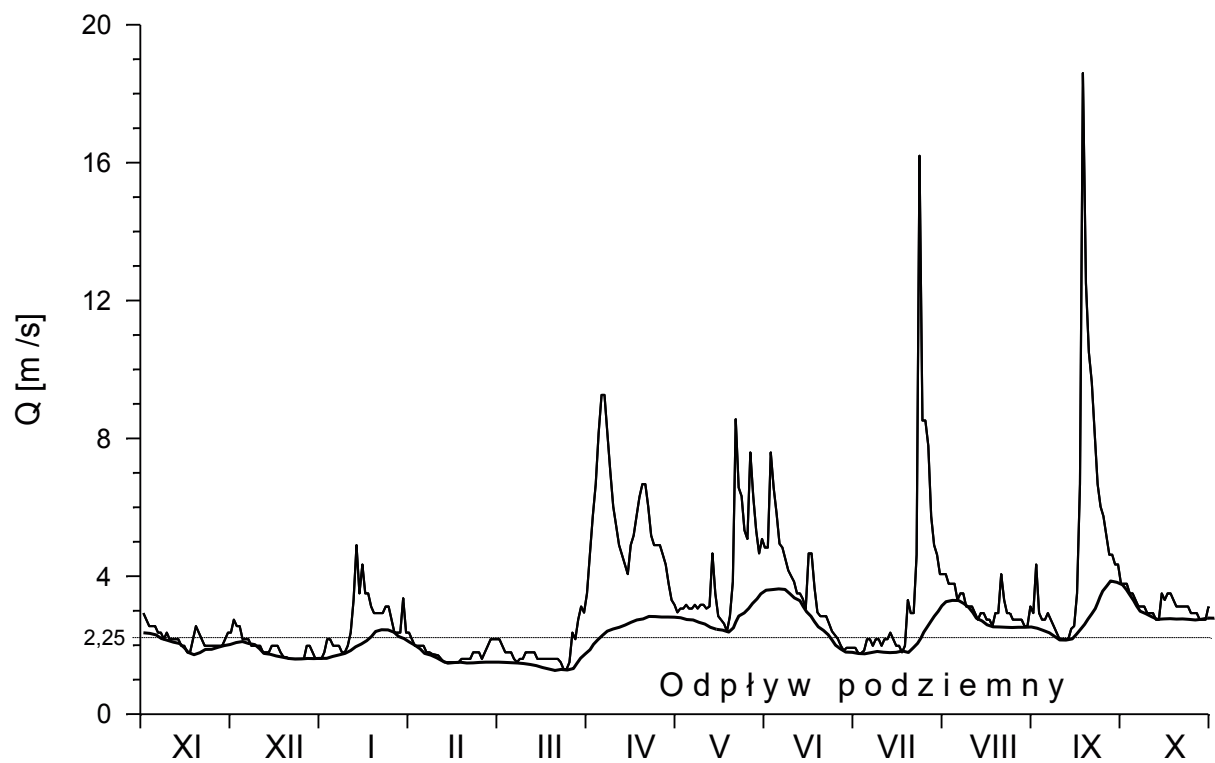
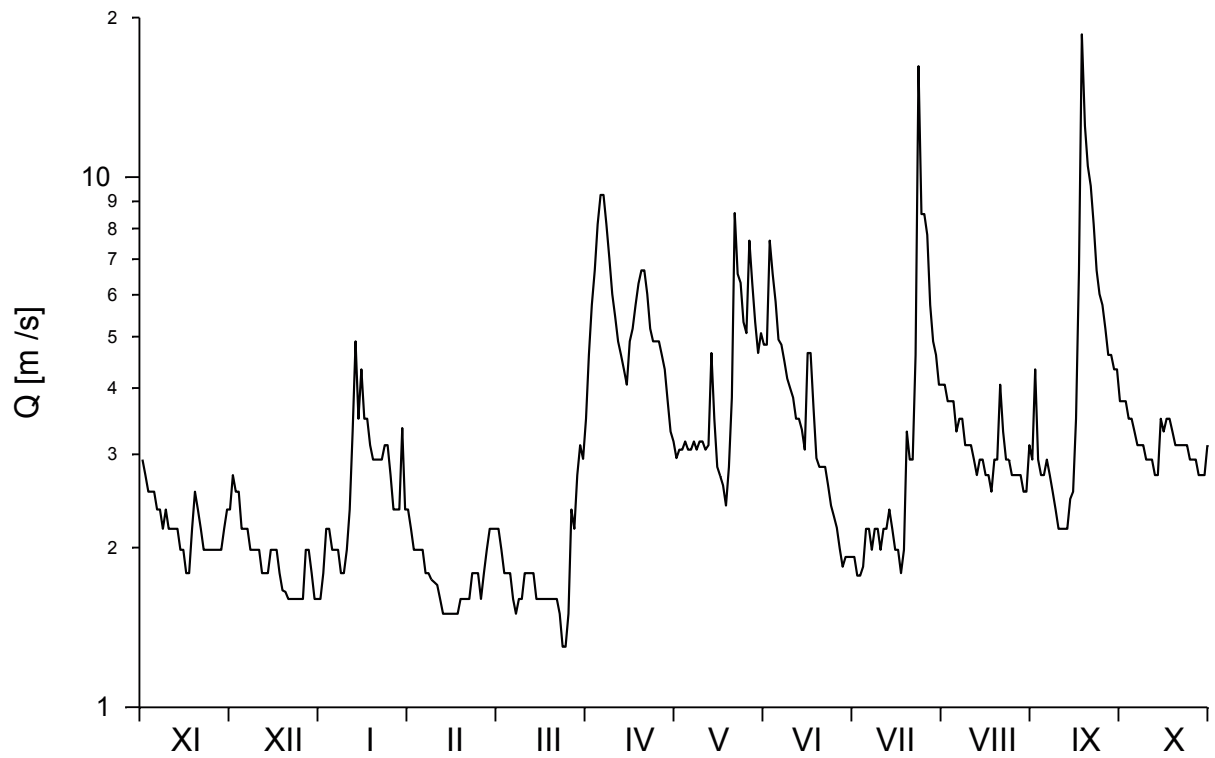
Najniższe miesięczne przepływy [m<sup>3</sup>/s]  
rzeka: Biała Łądecka, profil: Łądek Zdrój

Miesiąc	Rok				
	1976	1977	1978	1979	1980
XI	1,79	2,55	1,40	1,40	1,80
XII	1,50	1,79	0,98	0,85	3,12
I	1,50	0,90	1,42	1,42	1,50
II	1,30	1,40	0,90	0,94	1,60
III	1,00	3,77	2,00	1,20	1,20
IV	2,93	3,05	2,70	3,12	2,70
V	2,93	2,76	2,98	2,28	4,73
VI	2,36	2,28	1,60	1,70	2,42
VI	1,50	1,80	1,40	1,90	2,84
VIII	2,36	1,40	1,10	1,50	2,14
IX	2,17	0,70	1,30	1,20	1,70
X	2,36	0,35	1,80	1,60	1,50
Średni	1,98	1,90	1,63	1,59	2,27









Wydzielenie odpływu podziemnego metodą genetycznego podziału hydrogramu dla rzeki Białej Łądeckiej po profil w Łądku Zdroju dla roku 1976.

$$C_g = \frac{356}{1135} 100\% = 31,4\%$$

$$M = \frac{3,42 \cdot 1000}{166} = 20,6 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$$

$$M_g = \frac{1,87 \cdot 1000}{166} = 11,3 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$$

$$m = \frac{2,27}{1,59} = 1,428$$

$$C_v = \frac{2,27 - 1,59}{1,87} = 0,364$$

Porównać otrzymane wyniki z tabelą 9.1 wiedząc, że zlewnia Białej Łądeckiej należy do typu zlewni nieciągłych struktur fałdowych (nr I).