

Natężenie przepływu w rzece mierzone jest na posterunkach sieci hydrologicznej sporadycznie; pomiary są pracochłonne i czasochłonne. Natomiast wielkością obserwowaną systematycznie – częstokroć w sposób ciągły – są stany wody (patrz rozdz. 2.1). Wiele zagadnień hydrologicznych wymaga znajomości przede wszystkim przepływu. Z tego względu, do określenia przepływów stosuje się metodę polegającą na określeniu związku między natężeniem przepływu i stanem wody po to, aby móc szybko i łatwo określić przepływ w danym dniu:

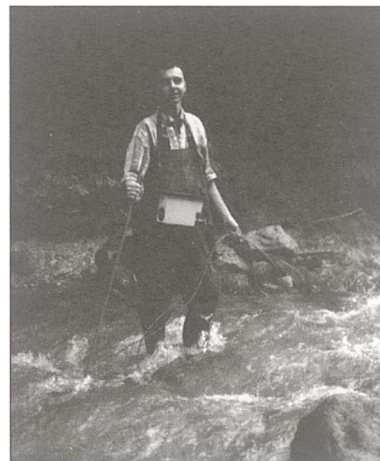
$$Q = f(H) \quad (4.2.1)$$

gdzie:

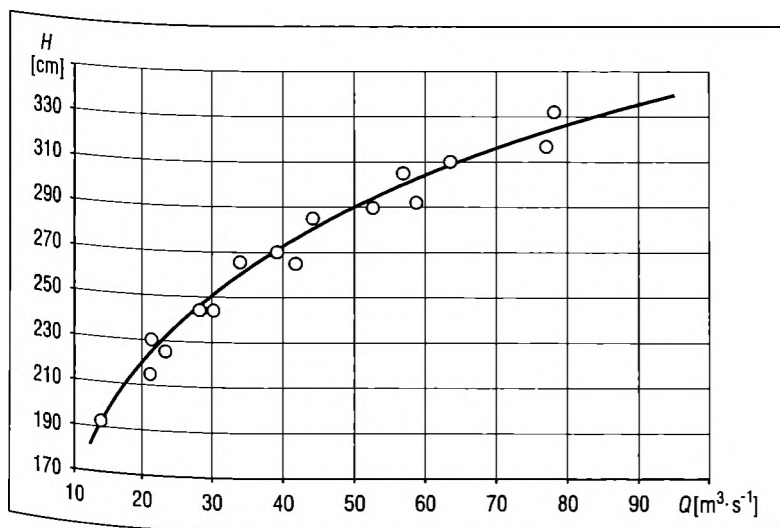
Q – natężenie przepływu [$m \cdot s^{-1}$],

H – stan wody [cm].

Graficznie, współzależność stanów wody i przepływów wyraża **krzywa przepływu**, zwana także **krzywą natężenia przepływu** (lub krzywą konsumpcyjną). Podstawą wykreślenia krzywej są wyniki pomiarów natężenia przepływu wykonanych w profilu wodowskazowym przy różnych stanach wody. Oś odciętych reprezentuje natężenie przepływu, zaś oś rzędnych – stan wody. Najczęściej krzywa przepływu ma postać paraboli wyższego rzędu (ryc. 4.2.1). Kształt krzywej zależy od wielu czynników, z których najważniejszymi są przekrój poprzeczny koryta oraz spadek zwierciadła wody. Jeśli koryto ma kształt nieregularny (skarpy, załamania itp.), na krzywej występują punkty załomu (ryc. 4.2.2).

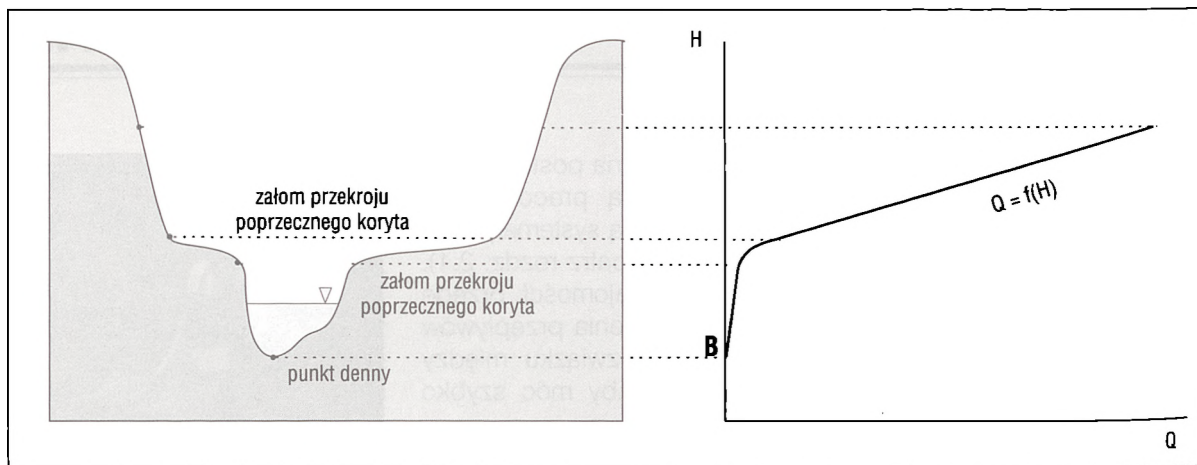


Pomiar prędkości przepływu wody młynkiem elektromagnetycznym



krzywa konsumpcyjna (łac. *consummare* – zrachować, wypełnić, ukończyć) – nazwa używana dawniej przez austriacką służbę hydrologiczną; obecnie stosowane jest pojęcie „krzywa przepływu”

Ryc. 4.2.1. Krzywa przepływu Nidy (Wiślica)



Ryc. 4.2.2. Związek kształtu krzywej przepływu z przekrojem poprzecznym koryta

Do wyznaczania krzywej wyrównującej punkty pomiarowe służą metody analityczne, polegające na opisie krzywej równaniem. Stosuje się równania o następującej postaci:

$$Q = a (H - B)^n \quad (4.2.2)$$

$$Q = a + b (H + c)^n \quad (4.2.3)$$

$$Q = a + bH + cH^2 \quad (4.2.4)$$

gdzie:

Q – natężenie przepływu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

H – stan wody [cm],

B – stała wodowskazu określająca stan wody, przy którym przepływ $Q = 0$,

a, b, c, n – empirycznie dobrane parametry równania.

Najczęściej wykorzystywane jest równanie Harlachera (4.2.2), bowiem krzywa potęgowa n -tego stopnia najlepiej oddaje kształt krzywej przepływu. Wierzchołek krzywej pokrywa się z punktem dennym krzywej znajdującym się w początku układu współrzędnych. **Punkt denny** krzywej wyznacza stan wody, przy którym natężenie przepływu jest równe zero. Stan ten nosi nazwę stałej B . Wartość **stałej B** można określić następującymi sposobami:

– bezpośrednio w terenie, na podstawie przekroju poprzecznego koryta, znając głębokość maksymalną:

$$B = H - G_{\max} \quad (4.2.5)$$

gdzie:

B – punkt denny [cm],

H – stan wody na wodowskazu [cm],

G_{\max} – głębokość maksymalna [cm];

- na podstawie analizy profilu podłużnego koryta w linii nurtu, czyli najczęściej tam, gdzie występują największe głębokości. Wartość stałej B wyznacza się z wykresu profilu podłużnego, rzutując największą głębokość na podziałkę wodowskazu, lub analitycznie według wzoru:

$$B = H - \min G_{\max} - Li \quad (4.2.6)$$

gdzie:

- H – stan wody na wodowskazu [m],
- $\min G_{\max}$ – najmniejsza z głębokości maksymalnych [m],
- L – odległość od wodowskazu punktu, w którym zmierzono najmniejszą wartość G_{\max} [m],
- i – spadek zwierciadła wody na odcinku L [m·km⁻¹];

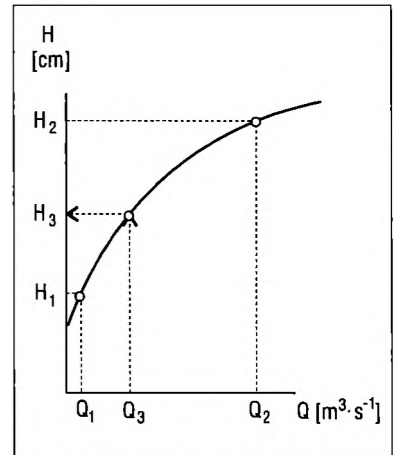
- jeśli brak jest danych odnoszących się do przekroju poprzecznego koryta lub profilu podłużnego, można zastosować metodę **graficzno-analityczną** (zwaną metodą Głuszkowa). Na odręcznie wyrównanej krzywej przepływu obiera się dwa punkty leżące w pobliżu skrajnych punktów pomiarowych o współrzędnych H_1, Q_1 i H_2, Q_2 , a następnie oblicza się średnią geometryczną Q_3 dwóch przepływów równą: $Q_3 = \sqrt{Q_1 \cdot Q_2}$ (ryc. 4.2.3). Na podstawie krzywej określa się odpowiadający jej stan wody H_3 , otrzymując w ten sposób trzeci punkt o współrzędnych H_3, Q_3 . Wartość stałej B oblicza się według wzoru:

$$B = \frac{H_3^2 - H_1 H_2}{2H_3 - H_2 - H_1} \quad (4.2.7)$$

Metoda graficzno-analityczna daje dobre wyniki pod warunkiem właściwego odręcznego wyrównania punktów pomiarowych, prawidłowego doboru punktów skrajnych oraz regularnego koryta (bez załamań).

Punkty pochodzące z pomiarów natężenia przepływów przy określonych stanach wody można także wyrównać **metodami graficznymi**. Dają one dobre rezultaty, jeśli punkty pomiarowe są rozłożone równomiernie w różnych strefach stanów wody i rozrzut punktów na wykresie jest niewielki. Najprostszą metodą graficzną jest odręczne wyrównanie punktów w układzie współrzędnych linią krzywą. Należy sobie jednak zdawać sprawę z subiektywności wykreślonej „krzywizny”, dlatego też lepiej stosować skalę logarytmiczną, dzięki czemu krzywa przybiera kształt prostoliniowy. Początek układu współrzędnych powinien pokrywać się z punktem dennym.

Z krzywej przepływu można odczytać natężenie przepływu przy dowolnym stanie wody poprzez rzutowanie z rzędnej stanów



Ryc. 4.2.3. Schemat wyznaczenia wartości koniecznych do obliczenia stałej B metodą Głuszkowa



Związek stan wody – przepływ może zostać zakłócony zmianą kształtu koryta wskutek erozji bocznej (Wisłoka)

wody H na krzywą, i kolejno z krzywej – na odciętą przepływów Q . W celu określenia przepływów w czasie, gdy stany wody wykraczają poza zakres, w którym wykonano pomiary hydrometryczne, dokonuje się graficznej ekstrapolacji krzywej. Część krzywej pochodząca z ekstrapolacji nie powinna stanowić więcej niż 20% zakresu stanów objętych pomiarami, tak by spełniona była zależność:

$$\frac{\Delta H_k - H_p}{\Delta H_p} < 0,2 \quad (4.2.8)$$

gdzie:

ΔH_k – zakres stanów wody dla wyznaczonej krzywej przepływu [cm],

ΔH_p – zakres stanów wody, przy których wykonano pomiary natężenia przepływu [cm].

Powinno się jednak zmierzać do tego, aby krzywa uwzględniała wszystkie strefy stanów wody.

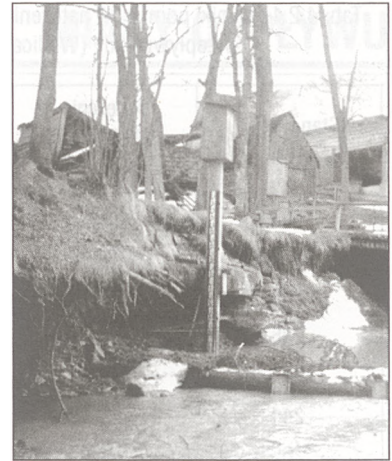
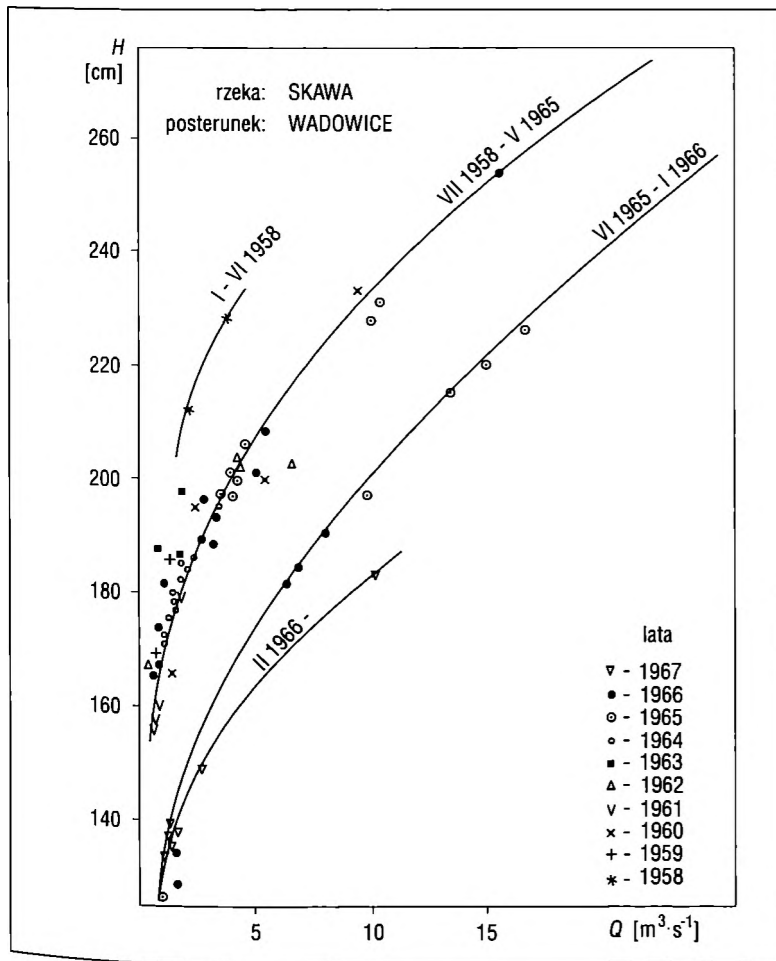
Związek stan wody – przepływ nie ma cech związku stacjonarnego. Wyznaczone dla danego wodowskazu relacje ulegają zmianom o charakterze sezonowym lub trwałym. Składają się na to zarówno błędy przypadkowe pomiarów, jak i czynniki o charakterze naturalnym i antropogenicznym, takie jak:

- zarastanie koryt w okresie rozwoju roślinności wodnej,
- zjawiska lodowe lub spiętrzenia wód,
- zmiany kształtu koryta spowodowane erozją lub akumulacją (ryc. 4.2.4),
- narastanie i opadanie fali wezbraniowej,
- regulacja koryta.

Czynniki te powodują konieczność korygowania odczytów z krzywej lub korzystania z krzywej sporządzonej specjalnie dla danego sezonu. Powstaje bowiem nowa zależność między stanem a przepływem, która będzie istnieć dopóty, dopóki nie wystąpią przyczyny powodujące kolejne zmiany związku. W praktyce nie określa się oddzielnych krzywych przepływu dla okresów występowania zjawisk sezonowych, lecz uwzględnia się odpowiednie sposoby przeliczania w okresach ich występowania. Na przykład, w okresie zjawisk lodowych w korycie rzeczonym, natężenie przepływu odczytane z krzywej należy pomnożyć przez odpowiedni współczynnik redukcyjny k :

- $k = 0,50$ – przy stałej pokrywie lodowej,
- $k = 0,75$ – podczas występowania śryżu i częściowego zlodzenia,
- $k = 0,85$ – podczas występowania kry.

Z krzywej przepływu odczytuje się natężenia przepływu odpowiadające codziennym stanom wody mierzonym na posterunkach wodowskazowych i przyjmuje się, iż wartość ta jest średnim przepływem dobowym. Jest to znaczne uproszczenie, zwłaszcza w zlewniach małych. Przyjęcie bowiem takiego założenia powoduje, iż pomija się wysokie przepływy w czasie wezbrań, trwających krócej niż dobę.



Rzeki górskie odznaczają się znaczną dynamiką koryt; intensywna erozja boczna i denna powoduje zakłócenie związku stan wody – przepływ (Potok Bystry, Pogórze Gubałowskie)

Ryc. 4.2.4. Wiązka krzywych przepływu Skawy (Wadowice) – każda niżej leżąca krzywa odnosi się do późniejszego okresu, co świadczy o postępującej erozji dennej koryta w okolicy profilu wodowskazowego

Przykład 1

Sporządź krzywą przepływu Nidy (Wiślica) na podstawie danych zawartych w tab. 4.2.1.

Rozwiązanie

1. Wyznaczenie zakresu wartości na osi rzędnych i odciętych

Zakres wartości na osi rzędnych wykresu krzywej wyznacza się na podstawie ekstremalnych stanów wody w analizowanym okresie, czyli od 1 VI do 31 VIII 1980 r. Ponieważ stan maksymalny wynosił 338 cm, zaś minimalny 180 cm, zakres na osi rzędnych może wynosić od 170 do 350 cm (ryc. 4.2.1).

Ze względu na ekstrapolację krzywej, zakres wartości na osi odciętych powinien być większy niż zakres przepływów, jakie wystąpiły w czasie pomiarów (tab. 4.2.1), np. od 10 do 100 m³·s⁻¹.

2. Wykreślenie krzywej

Na układ współrzędnych należy nanieść punkty o współrzędnych odpowiadających wynikom pomiarów przepływu rzeki (tab. 4.2.1). Krzywą przepływu należy wyznaczyć w taki sposób, aby liczba punktów i ich odległości od krzywej były jednakowe (ryc. 4.2.1).

Tab. 4.2.1. Wyniki pomiarów natężenia przepływu Nidy (Wiślica)

Zadanie

Sprawdź możliwość ekstrapolacji krzywej przepływu Nidy (Wiślica) stosując wzór (4.2.8).

Stan wody [cm]	Natężenie przepływu [m ³ ·s ⁻¹]
192,5	14,0
214,8	21,2
230,2	21,4
225,3	23,4
244,1	28,3
244,0	30,2
265,5	34,0
270,1	39,2
265,0	41,8
285,0	44,2
289,7	52,6
305,0	56,9
292,1	58,7
310,1	63,5
316,8	77,0
332,1	78,1