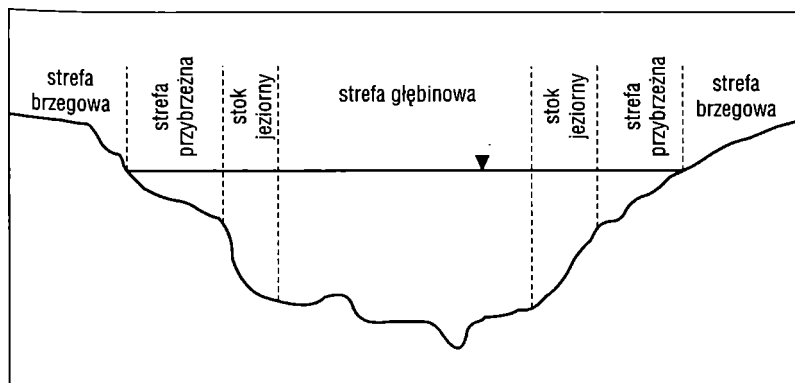


## 1.3. ZLEWNIE JEZIORNE

Jeziora odgrywają istotną rolę w obiegu wody, poprzez wpływ zarówno na wielkość elementów bilansu wodnego, jak również ich dynamikę. Stanowią czynnik zwiększający retencję wody w zlewni. Obecność jezior na obszarze zlewni powoduje zwiększone parowanie oraz zmianę reżimu przepływów rzek wypływających i przepływających przez jeziora: w okresie suchym jeziora podwyższają stany wody w rzekach, natomiast w okresie wilgotnym – obniżają.

Wielkość jezior zależy przede wszystkim od ich genezy, współczesnych procesów modelujących misę jeziorną oraz od wielkości zasilania. W obrębie misy jeziornej wyróżnia się cztery podstawowe strefy: brzegową (epilitoral), przybrzeżną (litoral), stok jeziorny (sublitoral) oraz strefę głębinową (profunda) (ryc. 1.3.1). Ich wielkość i zasięg są zróżnicowane. Znajomość morfometrii jeziora jest pomocna m.in. w ocenie wielkości zasobów wodnych i ich zmian, poznaniu ewolucji misy jeziornej, określeniu bilansu wodnego jeziora i jego zlewni, rozpoznaniu układu termicznego, gęstościowego i dynamicznego wód. Wskaźniki morfometryczne odnoszące się do powierzchni jeziora można ustalić na podstawie map topograficznych, natomiast wskaźniki dotyczące jego kształtu, pojemności i głębokości wyznacza się na podstawie planu batymetrycznego jeziora.



Ryc. 1.3.1. Strefy w jeziorze

### 1.3.1. Powierzchnia jeziora

Powierzchnia jeziora  $A$  odpowiada powierzchni ograniczonej jego linią brzegową; wyraża ją zazwyczaj w ha lub  $\text{km}^2$ . Do podstawowych charakterystyk powierzchni jeziora należą: długość



Ryc. 1.3.2. Wybrane wskaźniki morfometryczne jeziora

oraz szerokości średnia i maksymalna, wskaźnik wydłużenia, długość i wskaźnik rozwinięcia linii brzegowej oraz uwyspienie.

**Długość** jeziora  $L$  [m, km] jest to najkrótsza odległość między najbardziej odległymi punktami linii brzegowej mierzona wzdłuż linii niewychodzącej poza obręb jeziora (ryc. 1.3.2).

**Szerokość średnia** jeziora  $B_{sr}$  jest to stosunek powierzchni jeziora do jego długości:

$$B_{sr} = \frac{A_j}{L} \quad (1.3.1)$$

gdzie:

$B_{sr}$  – szerokość średnia jeziora [m, km],

$A_j$  – powierzchnia jeziora [m<sup>2</sup>, km<sup>2</sup>],

$L$  – długość jeziora [m, km].

**Szerokość maksymalna** jeziora  $B_{max}$  [m, km] jest to największa odległość między przeciwległymi brzegami mierzona wzdłuż linii prostopadłej do linii długości jeziora (ryc. 1.3.2).

**Wskaźnik wydłużenia**  $\lambda$  jest to wielkość niemianowana równa ilorazowi długości i szerokości maksymalnej jeziora:

$$\lambda = \frac{L}{B_{max}} \quad (1.3.2)$$

gdzie:

$\lambda$  – wskaźnik wydłużenia,

$L$  – długość jeziora [km],

$B_{max}$  – szerokość maksymalna jeziora [km].

**Długość linii brzegowej** jeziora  $l$  [m, km] jest to długość odpowiadająca długości izobaty 0 m (ryc. 1.3.2).

**Wskaźnik rozwinięcia linii brzegowej**  $K$  jest to stosunek długości linii brzegowej do obwodu koła o powierzchni równej powierzchni jeziora:

$$K = \frac{l}{2\sqrt{\pi A_j}} \quad (1.3.3)$$

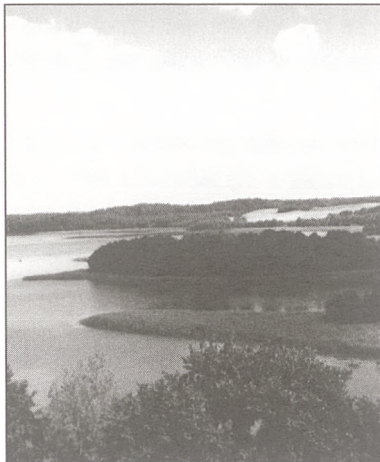
gdzie:

$K$  – wskaźnik rozwinięcia linii brzegowej,

$l$  – długość linii brzegowej jeziora [km],

$A_j$  – powierzchnia jeziora [km<sup>2</sup>].

Jeziora o najsłabiej rozwiniętej linii brzegowej, tj. takie, których kształt jest zbliżony do koła, mają wskaźnik rozwinięcia  $K \approx 1$ . Należą do nich głównie jeziora kraterowe, krasowe, oczka wytopiskowe. Im bardziej linia brzegowa jest rozwinięta, tym wartość wskaźnika jest wyższa.



Jednym z jezior posiadających najbardziej rozwiniętą linię brzegową ( $K = 4,43$ ) jest jez. Wigry na Pojezierzu Suwalskim

**Uwyspienie**  $\Omega$  jest to udział powierzchni wysp na jeziorze w powierzchni całkowitej jeziora:

$$\Omega = \frac{A_w}{A_j} \cdot 100 \quad (1.3.4)$$

gdzie:

- $\Omega$  – uwyspienie [%],
- $A_w$  – powierzchnia wysp na jeziorze [km<sup>2</sup>],
- $A_j$  – powierzchnia jeziora [km<sup>2</sup>].

Uwyspienie można także określić liczbą wysp przypadających na powierzchnię jeziora.

Wpływ jezior na obieg wody zależy m.in. od powierzchni, jaką zajmują jeziora na obszarze zlewni. Relację tę wyrażają trzy parametry: wskaźnik jeziorności, wskaźnik rozwinięcia jeziorności oraz wskaźnik powierzchni zlewni jeziora.

**Wskaźnik jeziorności**  $W_j$  jest to stosunek powierzchni jeziora (lub jezior) do powierzchni całej zlewni:

$$W_j = \frac{S}{A} \cdot 100 \quad (1.3.5)$$

gdzie:

- $W_j$  – wskaźnik jeziorności [%],
- $S$  – suma łącznej powierzchni jezior [km<sup>2</sup>],
- $A$  – powierzchnia zlewni [km<sup>2</sup>].

**Wskaźnik rozwinięcia jeziorności**  $J_r$  stanowi iloraz powierzchni zlewni jeziora (lub jezior) i powierzchni całkowitej zlewni:

$$J_r = \frac{A_{zj}}{A} \cdot 100 \quad (1.3.6)$$

gdzie:

- $J_r$  – wskaźnik rozwinięcia jeziorności [%],
- $A_{zj}$  – powierzchnia zlewni jeziora [km<sup>2</sup>],
- $A$  – powierzchnia całkowita zlewni [km<sup>2</sup>].

**Wskaźnik powierzchni zlewni jeziora**  $W_p$  jest to iloraz pola powierzchni jeziora i pola powierzchni jego zlewni:

$$W_p = \frac{A_j}{A_{zj}} \cdot 100 \quad (1.3.7)$$

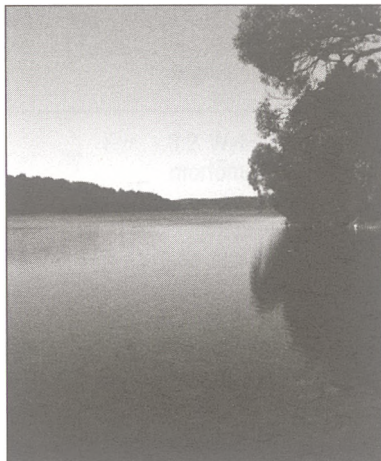
gdzie:

- $W_p$  – wskaźnik powierzchni zlewni jeziora [%],
- $A_j$  – powierzchnia jeziora [km<sup>2</sup>],
- $A_{zj}$  – powierzchnia zlewni jeziora [km<sup>2</sup>].



Powierzchnia jezior zmniejsza się wskutek zarastania

## 1.3.2. Misa jeziorna



Jez. Hańcza jest jednym z najgłębszych ( $h_{max} = 108,5$  m) jezior polskich (Pojezierze Mazurskie)

Charakterystykami misy jeziornej są głębokości: maksymalna, średnia i względna, wskaźnik głębokościowy, pojemność jeziora, wskaźnik zwartości misy jeziornej oraz nachylenie dna.

**Głębokość maksymalna**  $h_{max}$  [m] jest możliwa do określenia na podstawie dokładnego planu batymetrycznego jeziora lub dzięki pomiarom batymetrycznym. Jej wyznaczenie przysparza niekiedy sporo trudności, zwłaszcza jeśli najgłębsze partie misy jeziornej wyścielane są półpłynnymi osadami dennymi.

**Głębokość średnią**  $h_{sr}$  [m] można wyznaczyć kilkoma sposobami. Najprostszą metodą jest obliczenie średniej arytmetycznej ze wszystkich pomiarów głębokości. Jest to metoda prosta, szybka, lecz nie zawsze dokładna. Średnią głębokość można także obliczyć na podstawie krzywej batygraficznej lub dzieląc pojemność jeziora przez jego powierzchnię.

**Głębokość względna**  $h_w$  pozwala określić, jakie są wzajemne relacje między wymiarami pionowymi a poziomymi danego jeziora. Można ją obliczyć kilkoma sposobami:

– według wzoru Halbfassa:

$$h_w = \frac{h_{max}}{\sqrt{A_j}} \quad (1.3.8)$$

– według wzoru Iwanowa:

$$h_w = \frac{h_{sr}}{\sqrt[3]{A_j}} \quad (1.3.9)$$

– według wzoru Hutchinsona:

$$h_w = \frac{50h_{max}}{\sqrt{\pi A_j^{-1}}} \quad (1.3.10)$$

gdzie:

$h_w$  – głębokość względna [m],

$h_{max}$  – głębokość maksymalna [m],

$A_j$  – powierzchnia jeziora [m<sup>2</sup>].

**Wskaźnik głębokościowy** jeziora  $W_g$  określa kształt dna zbiornika; oblicza się go według wzoru:

$$W_g = \frac{h_{sr}}{h_{max}} \quad (1.3.11)$$

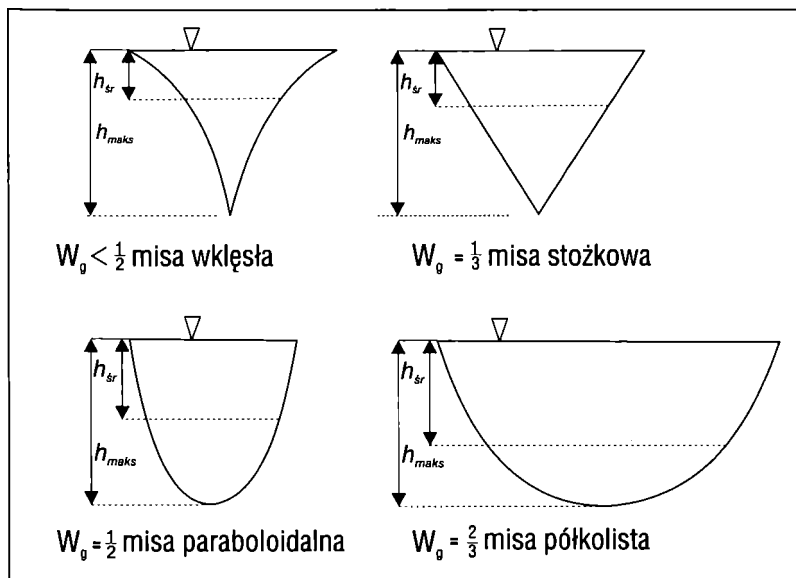
gdzie:

$W_g$  – wskaźnik głębokościowy jeziora,

$h_{sr}$  – głębokość średnia jeziora [m],

$h_{max}$  – głębokość maksymalna jeziora [m].

Jeziora, których wskaźnik  $W_g < \frac{1}{3}$ , posiadają misę o wklęsłym kształcie, jeżeli  $W_g = \frac{1}{3}$ , wówczas misa posiada kształt stożka, natomiast, jeśli  $W_g > \frac{1}{3}$ , misa jest wypukła (ryc. 1.3.3).



Ryc. 1.3.3. Kształty mis jeziornych i odpowiadające im wskaźniki głębokościowe (Choiński, 1995)

**Pojemność** jeziora  $V$ , czyli objętość wód jeziora jest wskaźnikiem, który można określić graficznie na podstawie krzywej batygraficznej lub analitycznie – stosując metodę Pencka albo metodę sumowania objętości cząstkowych. Na wykresie krzywej batygraficznej, pojemność jeziora odpowiada polu zawartemu między krzywą i układem współrzędnych (ryc. 1.3.6).

W metodzie Pencka przyjmuje się, że całkowita pojemność jeziora stanowi sumę pojemności poszczególnych warstw jeziora, zawartych między kolejnymi izobatami, przy czym pojemności tych warstw oblicza się według wzoru na objętość stożka ściętego. Wyjątek stanowi najgłębsza część misy, którą przyrównuje się ze stożkiem. Wzór Pencka ma postać:

$$V = \frac{h}{2} (A_0 + 2A_1 + 2A_2 + \dots + 2A_{n-1} + A_n) + \frac{1}{3} A_n h' \quad (1.3.12)$$

gdzie:

$V$  – pojemność jeziora [ $m^3$ ],

$h$  – odległość między kolejnymi izobatami [m],

$A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A_{n-1}, A_n$  – powierzchnie między kolejnymi izobatami [m<sup>2</sup>],  
 $h'$  – różnica głębokości między głębokością maksymalną a ostatnią izobata [m].

Według metody sumowania objętości cząstkowych, pojemność jeziora jest sumą iloczynów pól zawartych między kolejnymi izobatami i głębokości równych średnim arytmetycznym tych izobat:

$$V = A_0 \frac{h_0 + h_1}{2} + A_1 \frac{h_1 + h_2}{2} + A_2 \frac{h_2 + h_3}{2} + \dots \\ \dots + A_{n-1} \frac{h_{n-1} + h_n}{2} + A_n \frac{h_n + h_{max}}{2} \quad (1.3.13)$$

gdzie:

$V$  – pojemność jeziora [m<sup>3</sup>],

$A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A_{n-1}, A_n$  – powierzchnie między kolejnymi izobatami [m<sup>2</sup>],

$h_0, h_1, h_2, h_3, \dots, h_{n-1}, h_n$  – wartości kolejnych izobat [m],

$h_{max}$  – głębokość maksymalna jeziora [m].

W przypadku jezior płytkich, do obliczenia pojemności jeziora stosuje się wzór Simpsona zakładający paraboloidalny kształt misy jeziornej:

$$V = \frac{h}{3} (A_0 + 4A_1) + 2A_2 + 4A_3 + 2A_4 + \dots + A_n \quad (1.3.14)$$

gdzie:

$h$  – odległość między kolejnymi izobatami [m],

$A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A_{n-1}, A_n$  – powierzchnie między kolejnymi izobatami [m<sup>2</sup>].

**Wskaźnik zwartości misy jeziornej**  $W_z$  jest stosunkiem jej pojemności do powierzchni:

$$W_z = \frac{V}{A_j} \quad (1.3.15)$$

gdzie:

$W_z$  – wskaźnik zwartości misy jeziornej,

$V$  – pojemność jeziora [m<sup>3</sup>],

$A_j$  – powierzchnia jeziora [m<sup>2</sup>].

**Nachylenie dna**  $\alpha$  misy jeziora można wyznaczyć według wzoru:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (1.3.16)$$

gdzie:

$\alpha$  – nachylenie dna [°],

$\Delta h$  – różnica głębokości w dwóch punktach sondowania [m],

$\Delta x$  – odległość między tymi punktami [m].



Misy jezior tatrzańskich powstały wskutek erozji lodowcowej (Zadni Staw i Długi Staw, Tatry)

Aby obliczyć średnie nachylenie stoków na całej powierzchni dna, można wykorzystać wzór:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h \sum_{i=1}^n l}{A_j} \quad (1.3.17)$$

gdzie:

$\alpha$  – nachylenie dna [°],

$h$  – cięcie izobat [m],

$\sum l$  – suma długości izobat [m],

$A_j$  – powierzchnia jeziora [m<sup>2</sup>].

### Przykład 1

Oblicz objętość misy Czarnego Stawu pod Rysami metodą sumowania objętości cząstkowych. Powierzchnia jeziora wynosi 161,8 ha. Wyniki sondowania dna przedstawione są na ryc. 1.3.4. Oblicz średnią głębokość jeziora na podstawie krzywej batygraficznej.

### Rozwiązanie

#### 1. Wykreślenie izobat

Stosując metodę interpolacji liniowej, należy wykreślić izobaty co 10 m (ryc. 1.3.5).

#### 2. Obliczenie powierzchni zawartych między izobatami

Wielkość powierzchni między kolejnymi izobatami wygodnie jest zestawiać w tabeli (tab. 1.3.1, kol. 3). Należy pamiętać o skali planu jeziora i obliczeniu wielkości rzeczywistych (tab. 1.3.1, kol. 4).

#### 3. Obliczenie objętości cząstkowych

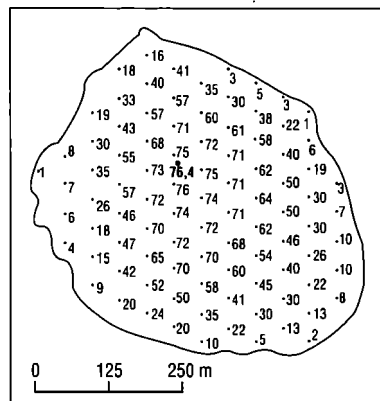
Wielkość objętości cząstkowych (tab. 1.3.1, kol. 6) uzyskuje się mnożąc pole powierzchni między dwiema kolejnymi izobatami (tab. 1.3.1, kol. 4) przez średnią głębokość między nimi (tab. 1.3.1, kol. 2).

#### 4. Obliczenie całkowitej objętości misy jeziornej

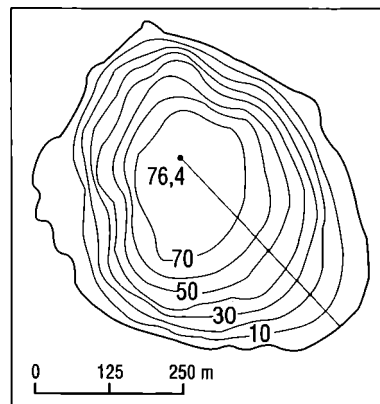
Całkowita objętość jeziora jest sumą objętości cząstkowych, czyli wartości zestawionych w kol. 6 (tab. 1.3.1). Wynosi ona około  $7,8 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>.

#### 5. Wykreślenie krzywej batygraficznej w celu wyznaczenia średniej głębokości jeziora

Aby wykreślić krzywą batygraficzną, na osi rzędnych zaznacza się wartości izobat wraz z głębokością maksymalną, zaś na osi odciętych – powierzchnie skumulowane (tab. 1.3.1, kol. 5). W taki układ współ-



Ryc. 1.3.4. Wyniki sondowania dna Czarnego Stawu (Tatry Wysokie)



Ryc. 1.3.5. Izobaty w Czarnym Stawie

Tab. 1.3.1. Zestawienie danych do obliczenia pojemności i średniej głębokości Czarnego Stawu

| Głębokość<br>[m] | Średnia<br>głębokość<br>[m] | Powierzchnia między<br>izobatami na planie<br>[cm <sup>2</sup> ] | Powierzchnia<br>rzeczywista<br>między izobatami<br>[m <sup>2</sup> ] | Powierzchnia<br>skumulowana<br>[m <sup>2</sup> ] | Pojemność<br>[m <sup>3</sup> ] |
|------------------|-----------------------------|--|--|--|--------------------------------|
| 1                | 2                           | 3  | 4  | 5  | 6                              |
| 70–76,4          | 73,2                        | 15,8   | 32 570   | 32 570   | 2 384 124                      |
| 60–70            | 65                          | 10,3   | 21 090   | 53 660   | 1 370 850                      |
| 50–60            | 55                          | 9,8  | 20 065   | 73 725   | 1 103 575                      |
| 40–50            | 45                          | 11,9   | 24 370   | 98 095   | 1 096 650                      |
| 30–40            | 35                          | 9,4  | 19 245   | 111 340  | 673 575                        |
| 20–30            | 25                          | 10,3   | 21 090   | 138 430  | 572 250                        |
| 10–20            | 15                          | 11,9   | 24 370   | 162 800  | 365 550                        |
| 0–10             | 5                           | 20,6   | 42 200   | 205 000  | 211 000                        |
|                  |                             | Suma   | 205 000  |  | 7 777 574                      |

rzędnych należy wnieść wartości z kolumn 1 i 5 (tab. 1.3.1) i otrzymane punkty połączyć ze sobą (ryc. 1.3.6).

6. Obliczenie średniej głębokości jeziora  
Aby obliczyć średnią głębokość jeziora, należy zmierzyć pole  $A$  zawarte między krzywą batygraficzną a układem współrzędnych ( $38,2 \text{ cm}^2$ ) i następnie podzielić je przez długość podstawy wykresu (10 cm):

$$38,2 : 10 = 3,82 \text{ [cm]}$$

Ponieważ na wykresie krzywej batygraficznej 1 cm na osi głębokości odpowiada 10 m, otrzymaną wartość należy pomnożyć przez 10:

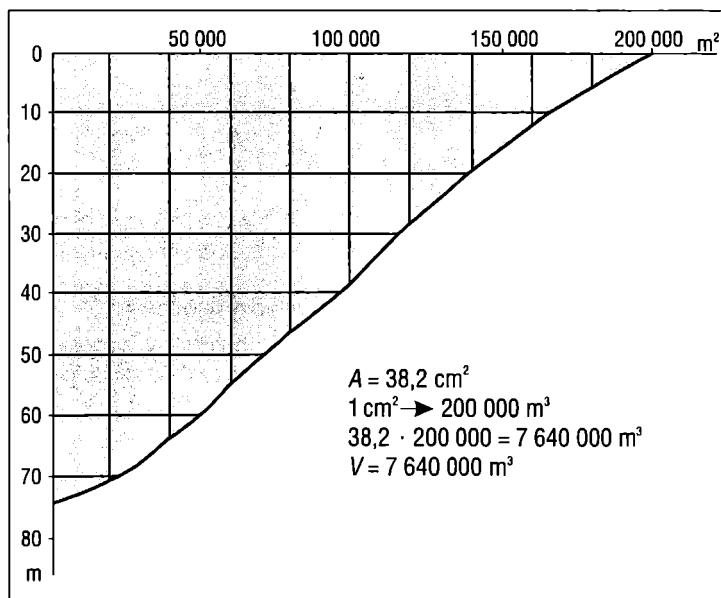
$$h_{sr} = 3,82 \cdot 10 = 38,2 \text{ [m]}$$

### Odpowiedź

Objętość misy jeziornej Czarnego Stawu wynosi około  $7,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , natomiast średnia głębokość 38,2 m.

### Przykład 2

O ile podniesie się stan wody w Zbiorniku Żywieckim (kaskada Soły) w wyniku przyjęcia fali wezbraniowej o objętości  $714 \cdot 10^3 \text{ m}^3$  i trwającej 7,5 godz. przy założeniu, że w czasie wezbrania ze zbiornika wypuszcza się  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  wody, a parowanie wynosi zero. Powierzchnia Zbiornika Żywieckiego przed przyjęciem fali wynosi  $11,2 \text{ km}^2$ .



Ryc. 1.3.6. Krzywa batygraficzna Czarnego Stawu



## Rozwiązanie

1. Obliczenie wielkości odpływu wody ze zbiornika podczas trwania fali wezbraniowej

W czasie wezbrania woda zarówno dopływa do zbiornika, jak i odpływa z niego. Aby obliczyć objętość odpływu ze zbiornika  $V_o$  podczas trwania fali wezbraniowej, należy pomnożyć wypływ ze zbiornika ( $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) przez czas trwania fali wyrażony w sekundach ( $7,5 \cdot 3\,600 = 27\,000 \text{ [s]}$ ):

$$V_o = 2 \cdot 27\,000 = 54 \cdot 10^3 \text{ [m}^3\text{]}$$

Podczas trwania fali wezbraniowej, w ciągu 7,5 godz., ze zbiornika wypłynie  $54 \cdot 10^3 \text{ m}^3$  wody. Jeśli zatem fala wezbraniowa „przyniesie”  $714 \cdot 10^3 \text{ m}^3$  wody, to w zbiorniku pozostanie  $V_r = 660 \cdot 10^3 \text{ m}^3$  wody.

2. Obliczenie warstwy wody, o jaką podniesie się stan wody w zbiorniku

Warstwa wody jest równa ilorazowi objętości wody  $V_1$  i powierzchni zbiornika:

$$660\,000 : 11\,200\,000 = 0,06 \text{ [m]}$$

$$0,06 \text{ m} = 6 \text{ cm}$$

## Odpowiedź

Po przejściu fali wezbraniowej, stan wody w Zbiorniku Żywieckim podniesie się o 6 cm (nie uwzględniono nachylenia stoków misy jeziornej).

## Zadanie

Oblicz objętość misy Czarnego Stawu metodą krzywej batygraficznej korzystając z danych zawartych w przykładzie 1.

