

PRZEMYSŁAW KLIMCZYK
przevek1023@o2.pl
KAROL KRAWCZYK
krawczyk_karol@op.pl
JUSTYNA PTAK
jptak92@gmail.com
KAROLINA SAWADRO
karolinasawadro@wp.pl
Kielce University of Technology

ALEKSANDRA SIAREK
ola_2604@o2.pl
ALEKSANDRA STĘPIEŃ
aleksandra_s1992@o.pl
JACEK SZEWCZYK
jszewczy@gmail.com
KATARZYNA WALKIEWICZ
katarzyna.walkiewicz92@gmail.com
Kielce University of Technology

DETERMINING THE SHAPE AND VOLUME OF THE POST-MINING BASIN IN KADZIELNIA AREA, KIELCE

Abstract

Long-term exploitation of limestone in Kadzielnia in the centre of Kielce created the post-mining basin of considerable size. For some time it was filled with water, forming the lake Szmaragdowe (Emerald Lake), which dried out 30 years ago. Because of the restoration projects of the lake it became necessary to determine its volume; the data on the size of the basin have not so far been presented in publications. This volume was determined using modern measurement technologies: in the part filled with water – bathymetric measurement, in the dry part – scanning tacheometry. As a result of measurements and calculations, volumes of the part filled with water (23.000 m³) and of the dry part (277.000 m³) were determined. The spatial model of the basin and topographic maps were also created

Keywords: determining volume with geodesic methods, bathymetry, scanning tacheometry

1. Introduction

Located within the administrative boundaries of Kielce, the Kadzielnia inanimate nature reserve is a remnant of the period of about 200 years of mining activity. Since the 1770's limestone had been mined here; the excavation ended in 1962. As a result of intensive excavation of the hill, only its eastern slope survived, the remnants of the south-western slope with the adjacent waste dump (now called Wzgórze Harcerskie, Scouts Hill) and Skalka Geologów (Geologists Rock), separated by a deep excavation.

As a result of mining and extraction of limestone in the eighteenth century, in the northern part deep excavations were created, which were flooded in their lowest levels with groundwater. They formed the lake Szmaragdowe (Emerald Lake), whose name comes from its unique colour. In the 1980s, due to the lowering of groundwater level, most of the lake dried out, and its current depth does not exceed 4 m. For some time the projects for restoration of its original form have been developed, consisting in filling the

basin with water. In order to determine the feasibility of this project, determining the volume of the basin is necessary. Official scientific publications lack the data defining this parameter, which is of relevance for this project. Therefore, the study had an innovative character.

Measurements of the shape and volume of the basin presented in the article were made within the statutory research, the activities of Geomatica Student Academic Circle and engineering theses defended in 2015 at the Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering [1-3], in parallel with other measurements for the inventory of Kadzielnia area [4, 5]. Due to the fact that the basin consists of the part filled with water and of the dry part (not filled with water) and the ensuing need to use different observation methods the way of measuring the volume of those two parts was different. Bathymetric method was used for measuring the part filled with water; whereas tacheometry method was applied in relation to the part without water (using scanning

tacheometry), combined with RTK GPS satellite technology to determine the coordinates of geodetic control points.

2. Bathymetric measurement of the part filled with water

In order to determine the shape and volume of the part filled with water (remains of the Emerald Lake) bathymetric method, based on the use of echo sounder, was applied.

Echo sounder is a device designed to measure the level of liquids in open or closed reservoirs. During the measurement, the echo sounder has no direct contact with the measured medium. Measurement of the level using this echo sounder is done by measuring the time between emitting a pulse and receiving an echo. This time is converted by the electronics of the echo sounder into the output signal. Due to their short length, the waves can be focused and shaped into beams [6, 7].

The basic element of the echo sounder is an indicator which indicates the measured depth. It consists of a transmitter and a receiver. Transmitting channel consists of a pulse generator and a sound transmitter and receiving channel consists of a receiving transducer and an amplifier of received pulses.

A pulse from the indicator is sent to the transmitter, where the time of output signal is indicated, marked in Figure 1 as t_w . The pulse is converted into ultrasonic energy which, in the form of acoustic signal, is radiated towards the bottom. When a pulse meets the surface, part of the energy reflects from the bottom and returns as an echo to the receiver submerged in water, which converts it back to an electrical pulse. After being amplified in the indicator, the pulse is transferred to the logger, where it acts as a marker of return time – t_p – of the acoustic signal, which is registered. The device records the time between sending and receiving a pulse, proportional to the measured distance.

- R - registration unit
- G - generator
- W - amplifier
- N - transmitter/processor
- O - receiver/processor
- k - submersion of the system
- b - distance N-O

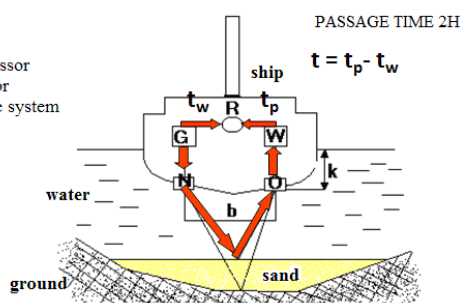


Fig. 1. Principle of operation of an echo sounder [2]

A modern echo sounder (Fig. 2), which uses very little power, was used for the measurement. It consists of: one or two transducers, a GPT (General Purpose Transceiver), as well as a standard laptop. The frequency of the transducers ranges from 38 to 710 kHz [8]. It is possible to use double transducers for parallel operation of two frequencies. GPT unit includes electronic systems of a transmitter and a receiver which are formatted for single or dual channel operation. The initial capacity of each of them is 300 W. Each sound is measured and then displayed. In order to demonstrate the echograms, a laptop is used, which connects to the GPT using a twisted pair. This enables a long distance between them, up to 100 m [9]. The echo sounder is equipped with a GPS satellite receiver.



Fig. 2. Echo sounder (source: [8])

The measurement using the echo sounder was supplemented with conventional surveying observations of all measured points, signalled simultaneously by a rod with a mirror signal (Fig. 3). Due to the intense vegetation in the lake, measurements made with an acoustic echo sounder were not entirely reliable; therefore calculations and analyses took into account results of measurements with a rod. In total, 147 probing points were designated, including 86 points with an acoustic echo sounder.



Fig. 3. Bathymetric measurement of the lake

The results of the measurement show that the maximum depth of the lake is 3.2 m. In the greater part of the lake this depth varies in the range of approx. 1.5 m to 2.5 m.

3. Tacheometric measurement of the part not filled with water

The basin, created as a result of mining activity, has a highly diversified shape. To implement this project, it was necessary to supplement the existing permanent geodetic control network (established earlier with reference to the state system) with additional posts (Fig. 4). As a result, control point was made up of 8 points, set up on the top and on the bottom of the basin, whose coordinates were determined by the GPS RTK method and by combined indentation.

All pickets in the part not filled with water were measured with tacheometric method. Tacheometry was used because of the terrain shape – GNSS measurement was impossible (no satellite signal due to the extensive cover of the area). The measurement was conducted with mirror and mirrorless methods, which was caused by the fact that not all places were available for measurement. Location of points was determined with the polar method, and height – based on trigonometric levelling.

Measurements were performed with the use of an electronic total station TOPCON QS1A, operating in automatic and manual reflectorless mode. Using the appliance was possible thanks to the purchase within the project "Retrofitting laboratories assisting the teaching process in the course of study at Environmental Engineering and Geodesy and Cartography Faculties

at Kielce University of Technology", the project co-financed by the European Union under the European Regional Development Fund Operational Programme Świętokrzyskie Voivodship for the years 2007-2013.

Tacheometry included measurement of all specific details of the basin terrain, that is all creases, concavities and convexities of land or sudden lowering of the ridges. Efforts were also made to consider the existing diversification of the ridge the basin shoreline during measurement. Pickets were evenly distributed throughout the area, averagely at a distance of 10.00 meters. In the areas where the terrain was more diversified, they were concentrated in order to accurately reproduce the shape of the measured area.



Fig. 4. Location of control points (map according to [10])
Red colour – existing control point, blue colour – set control point

Overall, in the part not filled with water, 414 points were designated, distributed evenly throughout the excavation area. A list of land survey and height coordinates was created with WinKalk. Arrangement of pickets is shown in Figure 5.

In order to check the accuracy of total station measurements and to determine their accuracy, two points from each station were selected and measured also from the adjacent station. They pointed at a stuck measuring shield, a pole with a mirror or in a specific characteristic place.



Fig. 5. Sketch of arrangement of the pickets and the control points [1]

4. Determining the volume of the basin

The main principle in calculating the volume of the basin in the Kadzielnia Reserve was presenting it in the form of an irregular block, and then dividing it into elementary geometric solids. This activity is carried out in order to achieve high accuracy of determining the volume.

The volume of irregular solids can be calculated using engineering software, such as WinKalk, Surfer, C-Geo and AutoCAD. In this study Surfer and C-Geo were used. Each of these programs calculates the volume with a different method, which involves different ways of carrying out calculations (based on the grid of squares and triangles). The results were presented in the form of spatial models of the basin, a model of a depression based on interpolation of contour lines and a map showing the shape of the bottom of the lake using an isoline (Fig. 6-9). Obtained values are reliable and they can serve as a basis for further implementing activities.

Calculation of the volume of the basin was done separately for the whole basin and for parts filled with water and not filled with water.

Obtained results of the volume of the part filled with water [1-3]:

- C-GEO – 23.006.71 m³,
- Surfer – 22.569.58 m³,
- Difference in volume – 437.13 m³,
- Percentage difference – 1.94%.

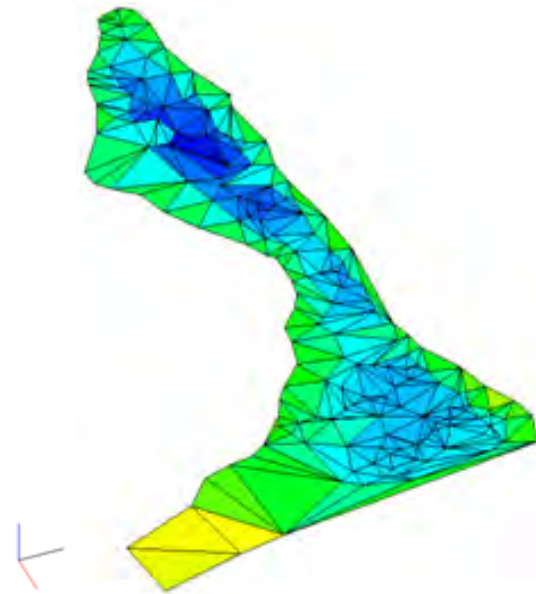


Fig. 6. Model of the part filled with water [1, 2]

The volume of the part not filled with water [1-3]:

- C-GEO – 286.059.40 m³,
- Surfer – 276.861.36 m³,
- Difference in volume – 9.198.04 m³,
- Percentage difference – 3.32%.

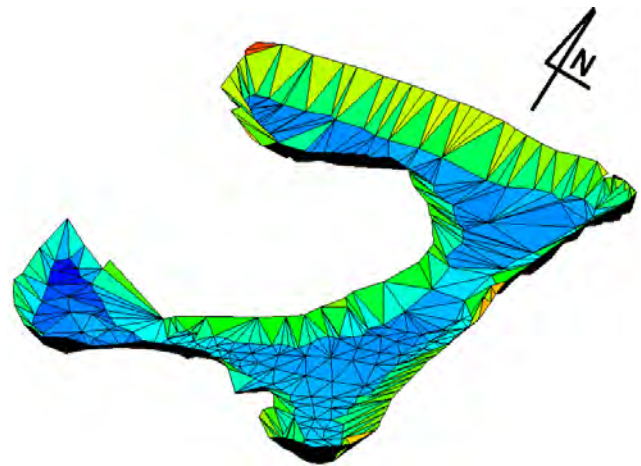


Fig. 7. Model of the part not filled with water [1, 2]

Total volume of the basin [1-3]:

- C-GEO – 309 066.11 m³,
- Surfer – 299 430.94 m³,
- Difference in volume – 9 635.17 m³,
- Percentage difference – 3.22%.

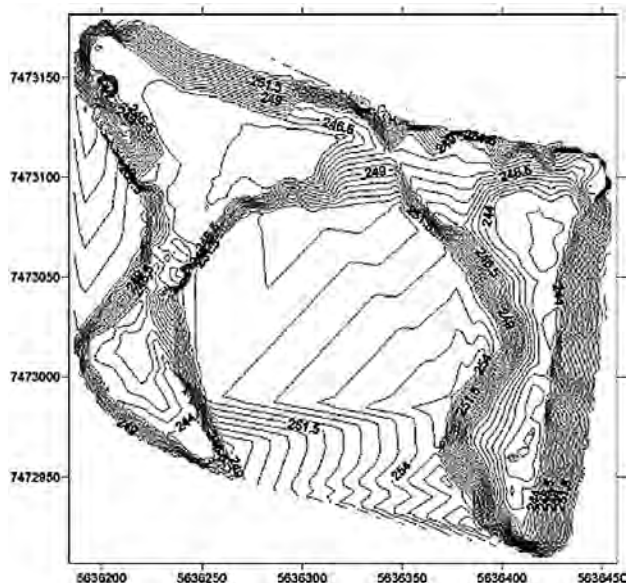


Fig. 8. Model of the basin based on the interpolation of contour lines made in Surfer [2]

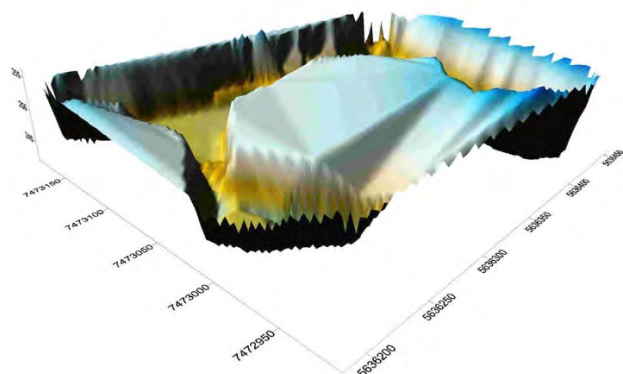


Fig. 9. Spatial model of the basin made in Surfer [2]

Error of measuring the volume was determined based on errors in the position of pickets (calculated from the differences of coordinates of control points) and formulas used by Surfer and C-Geo. The mean error of determining the volume of the part filled with water was (rounded) $\pm 400 \text{ m}^3$, and for the part not filled with water $\pm 2000 \text{ m}^3$. Total error of determining the entire volume of the basin is approximately $\pm 2040 \text{ m}^3$.

It should be noted that the above error is only internal, within the limits determined by the measured pickets. This does not include a far greater error of defining the boundaries of the basin, incorporating an error resulting from subjective interpretation of the area. This error can be estimated as at least $10,000 \text{ m}^3$; which corresponds to approximately the difference obtained in the calculation of the volume of the basin by means of two programs

(Surfer and C-GEO). This difference is caused by a difference in algorithms used for calculation and, above all, the way of modelling the area.

5. Conclusions

Calculation of the volume of the basin related to its part which was filled with water and to the part which was not filled with water. To determine the volume, bathymetric measurement was used for the part filled with water, supplemented by the appointment of probing sites using tacheometry and tacheometric measurement of the part not filled with water, completed by observations in the GNSS satellite technology.

1. Due to the large accumulation of slime/silt, as well as underwater vegetation, rush and reed, bathymetric measurement method with an echo sounder proved to be ineffective. The basis for further works were the results of the tacheometric observations of probing sites.
2. Determination of the volume of the basin was based on the measured coordinates of 561 pickets, including 147 probing sites in the part filled with water. Error of determining the coordinates of the pickets was assessed based on the differences between the coordinates of the control points, whose position was determined independently from two different positions. The mean square errors were respectively: along the x and y axes: $m_x = 0.023 \text{ m}$, $m_y = 0.026 \text{ m}$; the mean error of position $m_y = 0.030 \text{ m}$; the mean error of measuring height $m_H = 0.022 \text{ m}$; the mean error of the spatial position $m_{prz} = 0.037 \text{ m}$.
3. The measurement results of both parts of the basin were developed in two programs: Surfer and C-GEO. The volume of the part filled with water (rounded) is 23.000 m^3 . The maximum depth of the lake reaches 3.2 m and it is located in its southern part. The volume of the part not filled with water is (rounded) 277.000 m^3 . The results of calculations using two programs differ by about 3.3%; it is the result of different calculation algorithms and methodological assumptions when calculating the volume. The total volume of the basin can be estimated at about 300.000 m^3 .
4. Based on the values of the mean errors of determining the coordinates of the points, error of determining the volume of the basin was initially estimated, which is: for the part filled with water $m_v = \pm 400 \text{ m}^3$, for the part not filled with water $m_v = 2.000 \text{ m}^3$. These errors do not include inaccuracies resulting from the subjective determination of the part of the basin not filled with water.

5. The final results of the study are: calculated volume, designated errors, calculated coordinates, spatial models of the basin, model of a depression based on the interpolation of contour lines and an indicative map, showing isobathic lines of the relief of the bottom of the lake.

References

- [1] Klimczyk P., Ptak J.: *Określenie objętości częściowo zawodnionej niecki na terenie Kadzielni wraz z pomiarem batymetrycznym*, Engineer's thesis (under supervision of J. Szewczyk), Kielce University of Technology, Kielce 2015.
- [2] Sawadro K., Stępień A.: *Pomiar kształtu i objętości niecki na terenie Kadzielni z wykorzystaniem metod geodezyjnych i batymetrycznych*, Engineer's thesis (under supervision of J. Szewczyk), Kielce University of Technology, Kielce 2015.
- [3] Siarek A., Walkiewicz K.: *Wykonanie pomiaru objętości niecki na terenie Kadzielni z zastosowaniem metod geodezyjnych i batymetrycznych*, Engineer's thesis (under supervision of J. Szewczyk), Kielce University of Technology, Kielce 2015.
- [4] Duma P. et al.: *Study of the condition of the selected landslides in the area of Kadzielnia*, Structure and Environment, Kielce University of Technology (in print).
- [5] Kowalczyk L. et al.: *Study of the condition of the selected underground caves in Kadzielnia area*, Kielce, Structure and Environment, Kielce University of Technology, 1 (2016), pp. 64-73.
- [6] Szewczyk J.: *Sondy ultradźwiękowe w geodezji*, not published, no released year.
- [7] Pielok J.: *Geodezja górnicza*, AGH, Kraków 2011.
- [8] <www.ris-project.info/pl/show/content/id/72>
- [9] <www.gospodarkamorska.pl/artykuly/przeglad-metod-pomiarow-batymetrycznych-na-plytkich-wodach.html>
- [10] <www.geoportal.gov.pl>

Acknowledgements

Research for the article was funded by statutory research of the Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering of Kielce University of Technology, No. 05.0.09.00/2.01.01.01.0022 MNSP.IKGO.15.006

Przemysław Klimczyk
Karol Krawczyk
Justyna Ptak
Karolina Sawadro
Aleksandra Siarek
Aleksandra Stępień
Jacek Szewczyk
Katarzyna Walkiewicz

Wyznaczenie kształtu i objętości niecki poeksploatacyjnej na terenie Kadzielni w Kielcach

1. Wstęp

Znajdujący się w granicach administracyjnych Kielc rezerwat przyrody nieożywionej Kadzielnia jest pozostałością po trwającej około 200 lat działalności górniczej. Od lat 70. XVIII wieku wydobywano tu wapień; eksploatację zakończono w 1962 r. W wyniku intensywnego wydobycia ze wzgórza pozostało tylko jego wschodnie zbocze, resztki zbocza południowo-zachodniego z przylegającą hałdą (zwaną obecnie Wzgórzem Harcerskim) oraz oddzielona głębokim wyrobiskiem Skalka Geologów.

Wskutek eksploatacji górniczej i wydobywania skał wapiennych w jej północnej części powstały głębokie wyrobiska, które zalewane były w najniższym ich poziomie wodami podziemnymi. Utworzyły one Jezioro Szmaragdowe, którego nazwa pochodzi od jego niepowtarzalnej barwy. W latach 80. w wyniku obniżenia się poziomu wód gruntowych jezioro w znacznej części wyschło, a obecnie jego głębokość nie przekracza 4 m. Od pewnego czasu powstają projekty odtworzenia jego pierwotnej formy, polegające na wypełnieniu niecki wodą. Dla określenia realno-

ści tego przedsięwzięcia niezbędne jest wyznaczenie objętości niecki. Brak jest bowiem w oficjalnych naukowych opracowaniach danych, określających ten najistotniejszy z punktu widzenia wspomnianych projektów parametr. Przeprowadzone badania miały zatem charakter innowacyjny.

Pomiary kształtu i objętości niecki, przedstawione w artykule, wykonane zostały w ramach badań statutowych działalności Studenckiego Koła Naukowego Geomatica oraz prac dyplomowych inżynierskich, obronionych w 2015 r. na Wydziale Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki [1-3], w powiązaniu z innymi pracami prowadzonymi w celu inwentaryzacji obszaru Kadzielni [4, 5]. Ze względu na istnienie w niecce części zawodnionej oraz suchej (niezawodnionej) i związanej z tym konieczność stosowania odmiennych metod obserwacji wyodrębniono wyznaczenie objętości dla obu wymienionych części. Do pomiaru części zawodnionej wykorzystano metodę batymetryczną; w stosunku do części niezawodnionej zastosowano metodę tachimetryczną (za pomocą tachimetru skanującego), łącząc ją z technologią satelitarną RTK GPS dla wyznaczenia współrzędnych punktów osnowy geodezyjnej.

2. Pomiar batymetryczny części zawodnionej

W celu wyznaczenia kształtu i objętości części zawodnionej (pozostałości Jeziora Szmaragdowego) użyto metody batymetrycznej, opartej na zastosowaniu echosondy.

Sonda akustyczna to urządzenie przeznaczone do pomiaru poziomu cieczy w zbiornikach otwartych bądź zamkniętych. Podczas pomiaru sonda nie ma bezpośredniego kontaktu z mierzonym medium. Pomiar poziomu za pomocą tej sondy odbywa się na zasadzie pomiaru czasu pomiędzy wysłaniem impulsu pomiarowego a odebraniem echa. Czas ten jest przetwarzany przez elektronikę sondy na sygnał wyjściowy. W związku z małą długością fal można je ogniskować i kształtować w wiązki [6, 7].

Podstawowym elementem sondy jest indyktor, który wskazuje mierzoną głębokość. Składa się na niego system nadawczy i odbiorczy. Kanał nadawczy składa się z impulsatora i przetwornika nadawczego dźwięków, zaś kanał odbiorczy składa się z przetwornika odbiorczego oraz wzmacniacza impulsów odbieranych.

Impuls z indykatora zostaje wysłany do nadajnika, gdzie zaznaczony jest czas wyjścia sygnału oznaczony na rysunku 1 jako t_w . Impuls zostaje zamieniony na energię ultradźwiękową, która w postaci sygnału akustycz-

nego zostaje wypromieniowana w stronę dna. Napotkanie przez impuls powierzchni powoduje, że część energii odbija się od dna i powraca jako echo do zanurzonego w wodzie odbiornika, w którym zostaje z powrotem zamieniony na impuls elektryczny. Po wzmocnieniu w indykatorze impuls zostaje przekazany do rejestratora, gdzie spełnia rolę znacznika czasu t_p – powrotu sygnału akustycznego, który zostaje zarejestrowany. Aparatura notuje czas między wysłaniem a przyjęciem impulsu, proporcjonalny do mierzonej odległości.

Do pomiaru wykorzystano nowoczesną echosondę akustyczną (rys. 2), pobierającą bardzo mało mocy. W jej skład wchodzi: jeden lub dwa przetworniki, zespół nadawczo-odbiorczy GPT (General Purpose Transceiver), a także standardowy komputer przenośny. Częstotliwość dla przetworników sięga przedziału 38-710 kHz [6]. Istnieje możliwość wykorzystania podwójnych przetworników w celu równoległego działania na dwóch częstotliwościach. Zespół GPT obejmuje układy elektroniki nadajnika i odbiornika, które są formatowane do pracy jedno- lub dwukanałowej. Początkowa moc każdego z nich wynosi 300 W. Każdy odgłos jest zmierzony, a następnie wyświetlony. W celu przedstawienia echogramów korzysta się z przenośnego komputera, który łączy się z GPT za pomocą skrętek. Pozwala to na dużą odległość pomiędzy nimi, nawet do 100 m [8]. Sonda jest wyposażona w odbiornik satelitarny GPS.

Pomiar za pomocą sondy uzupełniano klasycznymi obserwacjami tachimetrycznymi wszystkich mierzonych punktów, sygnalizowanych równocześnie za pomocą tyczki z sygnałem lustrowym (rys. 3). Ze względu na intensywną roślinność w jeziorze pomiary wykonywane sondą akustyczną nie były całkowicie wiarygodne; w obliczeniach i analizach uwzględniono zatem wyniki pomiarów za pomocą tyczki. Ogółem wyznaczono położenie 147 miejsc sondowania, w tym 86 punktów za pomocą sondy akustycznej.

Z rezultatów pomiaru wynika, że maksymalna głębokość jeziora osiąga 3,2 m. Na większej części jeziora głębokość ta waha się w granicach od ok. 1,5 m do 2,5 m.

3. Pomiar tachimetryczny części niezawodnionej

Powstała w wyniku działalności górniczej niecka ma bardzo zróżnicowany kształt. Do realizacji tego przedsięwzięcia konieczne było uzupełnienie istniejącej trwałej osnowy geodezyjnej (założonej wcześniej z nawiązaniem do układu państwowego) o dodatkowe stanowiska (rys. 4). W rezultacie osnowę stanowiło 8 punktów, założonych na górze oraz na

dole niecki, których współrzędne wyznaczono metodą RTK GPS oraz metodą wcięcia kombinowanego.

Wszystkie pikiety w części niezawodnionej pomierzono metodą tachimetryczną. Tachimetrią posłużono się ze względu na ukształtowanie terenu – niemożliwy był pomiar GNSS (brak sygnału satelitarnego spowodowany dużymi przesłonięciami terenu). Pomiar odbywał się metodą lustrową i bezlustrową, na co wpływ miał fakt, że nie wszystkie miejsca były dostępne do pomiaru. Położenie sytuacyjne punktów wyznaczono metodą biegunową, a wysokości – w oparciu o niwelację trygonometryczną.

Tachimetr użyty do pomiaru został zakupiony w ramach projektu „Doposażenie laboratoriów wspomagających proces dydaktyczny kierunku inżynierii środowiska oraz geodezji i kartografii w Politechnice Świętokrzyskiej”, współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Świętokrzyskiego na lata 2007-2013.

Tachimetria obejmowała pomiar wszystkich charakterystycznych szczegółów terenowych niecki, jakimi były wszelkie załamania, wklęsłości oraz wypukłości terenu lub nagłe obniżenia krawędzi. Starano się również uwzględnić przy pomiarze występujące zróżnicowanie krawędzi linii brzegowej zbiornika wodnego. Pikiety na całym obszarze były rozmieszczone równomiernie, w odległości wynoszącej średnio 10,00 m. W miejscach, gdzie rzeźba terenu była bardziej zróżnicowana, zagęszczano je, aby wiernie odwzorować kształt mierzonego obszaru.

Ogółem w części niezawodnionej wyznaczono położenie 414 punktów, rozmieszczonych regularnie na terenie całego wyrobiska. Wykaz współrzędnych sytuacyjno-wysokościowych otrzymano, korzystając z programu WinKalk. Rozmieszczenie pikiet pokazano na rysunku 5.

W celu skontrolowania prawidłowości pomiarów tachimetrycznych oraz wyznaczenia ich dokładności wybrano po dwa punkty z każdego stanowiska i pomierzono je również z sąsiedniego stanowiska. Celowano w przyklejoną tarczę dalmierczą, tyczkę z lustrem lub konkretne charakterystyczne miejsce.

4. Wyznaczenie objętości niecki

Główną zasadą przy obliczaniu objętości niecki na terenie rezerwatu Kadzielnia było przedstawienie jej w postaci bryły nieregularnej, a następnie podzielenie na elementarne bryły geometryczne. Wykonanie takiej czynności dokonuje się w celu osiągnięcia wysokiej dokładności wyznaczenia objętości.

Obliczenie objętości bryły nieregularnej można wykonać za pomocą programów inżynierskich, takich jak WinKalk, Surfer, C-Geo i AutoCAD. W opracowaniu wykorzystano ostatecznie Surfer i C-Geo. Każdy z nich pozwala na obliczenie objętości inną metodą, co wiąże się z różnym przeprowadzeniem obliczeń (na podstawie siatki kwadratów i trójkątów). Uzyskane wyniki przedstawiono w formie modeli przestrzennych niecki, modelu zagłębienia oparte o interpolacje warstwic oraz mapy przedstawiającej ukształtowanie dna jeziora za pomocą izolinii (rys. 6-9). Otrzymane wartości są wiarygodne i mogą stanowić podstawę do dalszych działań realizacyjnych.

Obliczenie objętości niecki zostało wykonane dla całości niecki oraz oddzielnie dla części zawodnionej i niezawodnionej.

Uzyskane wyniki objętości części zawodnionej [1-3]:

- program C-GEO – 23 006,71 m³,
- program Surfer – 22 569,58 m³,
- różnica objętości – 437,13 m³,
- różnica procentowa – 1,94%.

Objętość części niezawodnionej [1-3]:

- program C-GEO – 286 059,40 m³,
- program Surfer – 276 861,36 m³,
- różnica objętości – 9 198,04 m³,
- różnica procentowa – 3,32%.

Całkowita objętość niecki [1-3]:

- program C-GEO – 309 066,11 m³,
- program Surfer – 299 430,94 m³,
- różnica objętości – 9 635,17 m³,
- różnica procentowa – 3,22%.

Błąd wyznaczenia objętości określono na podstawie błędów położenia pikiet (obliczonych z różnic współrzędnych dla punktów kontrolnych) oraz wzorów, którymi posługują się zastosowane programy Surfer i C-Geo. Otrzymano średni błąd wyznaczenia objętości części zawodnionej (w zaokrągleniu) ± 400 m³, dla części niezawodnionej ± 2000 m³. Sumaryczny błąd wyznaczenia objętości całej niecki wynosi około ± 2040 m³.

Należy zauważyć, że powyższy błąd jest jedynie błędem wewnętrznym, w granicach określonych pomierzonymi pikietami. Nie jest tu uwzględniony daleko większy błąd wyznaczenia granic niecki, zawierający w sobie błąd wynikający z subiektywnej interpretacji terenu. Błąd ten można oszacować na co najmniej 10 000 m³; odpowiada to w przybliżeniu różnicy otrzymanej podczas obliczenia objętości niecki za pomocą dwóch programów (Surfer i C-GEO). Różnicę tę spowodowała odmienność

algorytmów zastosowanych do obliczeń, a przede wszystkim sposób modelowania obszaru.

5. Wnioski

1. Obliczenie objętości niecki dotyczyło jej zawodnionej oraz niezawodnionej części. Dla wyznaczenia objętości zastosowano pomiar batymetryczny części zawodnionej, wraz z wyznaczeniem miejsc sondowania za pomocą tachimetrii, oraz pomiar tachymetryczny części niezawodnionej, uzupełniony obserwacjami w technologii satelitarnej GNSS.
2. Ze względu na duże nagromadzenie mułu, a także podwodnej roślinności, sitowia i szuwar metoda pomiaru batymetrycznego sondą akustyczną okazała się mało skuteczna. Podstawę do dalszych prac stanowiły rezultaty tachymetrycznej obserwacji miejsc sondowania.
3. Wyznaczenie objętości niecki oparto na pomierzonych współrzędnych 561 pikiet, w tym 147 miejsc sondowania części zawodnionej. Błąd wyznaczenia współrzędnych pikiet oceniono na podstawie różnic między współrzędnymi punktów kontrolnych, których położenie wyznaczano niezależnie z dwóch różnych stanowisk. Odpowiednie wielkości błędów średnich wynosiły: wzdłuż osi x i y: $m_x = 0,023$ m, $m_y = 0,026$ m; średni błąd położenia sytuacyjnego $m_p = 0,030$ m; średni błąd wyznaczenia wysokości $m_H = 0,022$ m; średni błąd położenia przestrzennego $m_{prz} = 0,037$ m.
4. Wyniki pomiarów obu części niecki opracowano w dwóch programach: Surfer oraz C-GEO. Objętość części zawodnionej wynosi (w zaokrągleniu) 23 000 m³. Największa głębokość jeziora dochodzi do 3,2 m i znajduje się w jego południowej części. Wielkość objętości części niezawodnionej wynosi (w zaokrągleniu) 277 000 m³. Wyniki obliczeń za pomocą dwóch programów różnią się o około 3,3%; jest to skutek odmiennych algorytmów obliczeniowych i założeń metodycznych przy obliczaniu objętości. Sumaryczną objętość niecki można ocenić na około 300 000 m³.
5. Na podstawie wartości błędów średnich wyznaczenia współrzędnych punktów oszacowano wstępnie błąd określenia objętości niecki, wynoszący: dla części zawodnionej $m_v = \pm 400$ m³, dla części niezawodnionej $m_v = 2000$ m³. Błędy te nie uwzględniają niedokładności, wynikających z subiektywnego wyznaczenia granic niecki w części niezawodnionej.
6. Wynikiem ostatecznym pracy są: obliczona objętość, wyznaczone błędy, wyliczone współrzędne, modele przestrzenne niecki, model zagłębienia oparty o interpolacje warstwicz oraz mapa pogładowa, przedstawiająca izoboty rzeźby dna jeziora.