

Professional Paper
Received: 20-09-2007
Accepted: 18-05-2009

Applications of Seafloor Mapping Using Precise Sonars

Jerneja Fridl¹, Nataša Kolega², Aljoša Žerjal³

¹Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU, Ljubljana, Slovenia

^{2,3}Harpha sea d.o.o. Koper, Koper, Slovenia

e-mail: ¹jerneja@zrc-sazu.si, ²natasa@harphasea.si, ³cale@harphasea.si

14

Abstract: *Seafloor measurements using single-beam, multi-beam, sub-bottom, and side-scan sonars which enable detailed mapping of solid objects in sediments, seafloor structure and depth can provide useful information for marine traffic as well as scientific studies. The measurements obtained using these technologies, which provide a large number of points, make possible the preparation of an accurate digital bathymetric model. The most widely used application of these kinds of measurements is undoubtedly to determine depths of marinas, berths and shipping channels, especially around large commercial ports. However, their importance in the discovery and investigation of undersea archaeological sites such as shipwrecks, ancient piers, and amphorae is not to be ignored. The data are also useful for geologists, since they can provide clues as to the type of seafloor and the composition of rocks underneath the sediments. They can also be helpful to nature conservationists in locating and studying undersea springs and grassy areas of the seafloor which provide habitat for marine fauna. In order to facilitate access to data by users, we are developing an "undersea information system" containing different layers of data in various forms and with different types of content. Findings from the latest research can be added to the system. A system set up in this way would allow for faster production of three-dimensional seafloor models, more detailed charts and a variety of thematic maps.*

Key words: *Geography, GIS, hydrological survey, single-beam sonar, multi-beam sonar, digital bathymetric model, seafloor*

1 Introduction

In spite of the fact that different measurements of sea depth were made by Slovenian hydrographers, divers, geodesists, and geographers during various time periods in the past; charts of the Gulf of Trieste from different periods show different values. The variability is mainly due to the measurement method and the accuracy of the instruments used. Improvements in technology have brought changes. Scientists can now measure sea depth fairly rapidly and precisely using modern sonars, but these types of measurements are also among the most challenging if we wish to achieve a high level of accuracy. Modern measurements are a good basis for more complete charts and digital bathymetric models as well as an important source of information for archaeological, geological and nature conservation studies.

Generally speaking, there is very little in the Slovenian professional literature about the morphology of the underwater topography of the Gulf of Trieste, of which the sea along the Slovenian coast is a part. Geographer Orožen Adamič (1981, 2002) has done the most work on the subject. He found that the Gulf of Trieste, which is the name of the northernmost part of the Adriatic Sea, is relatively shallow, with an average depth of only 16.4 m. The deepest point in Slovenian waters lies near the coast of Cape Madona, in the immediate vicinity of Piran, and measures 38 m (Klanjšček, 2005).

2 Modern Sea-Floor Mapping

Sea-floor mapping using modern ultrasonic apparatus makes it possible to determine depth with accuracy

Stručni rad
 Primljeno: 20-09-2007.
 Prihvaćeno: 18-05-2009.

Primjene kartiranja morskoga dna preciznim dubinomjerima

Jerneja Fridl¹, Nataša Kolega², Aljoša Žerjal³

¹Geografski institut Antona Melika ZRC SAZU, Ljubljana, Slovenija

^{2,3}Harpha sea d.o.o. Kopar, Kopar, Slovenija

e-mail: ¹jerneja@zrc-sazu.si, ²natasa@harphasea.si, ³cale@harphasea.si

15

Sažetak: Mjerenja morskoga dna jednosnopnim, višesnopnim, geološkim i panoramskim dubinomjerima, koji omogućuju precizno određivanje dubina, strukture dna i tvrdih objekata u sedimentima, mogu biti koristan izvor informacija za pomorski promet i za brojna istraživanja. Ta mjerenja, s rezultatom koji je oblak točaka, omogućuju izradu točnog digitalnog batimetrijskog modela. Nesumnjivo najveća primjena tih mjerenja je određivanje dubina u marinama, pristaništima i plovnim kanalima, naročito na području većih trgovačkih pristaništa. Nije zanemariva ni upotreba mjerenja pri otkrivanju i proučavanju pod-morskih arheoloških ostataka, kao što su brodovi, antički molovi ili ostaci amfora. Podaci su korisni i geolozima jer je na osnovi njih moguće odrediti tip morskoga dna, debljinu sedimenta i strukturu stijena ispod sedimenta. S gledišta zaštite okoliša moguće je odrediti i proučavati morska vrela i travnate predjele morskoga dna, koji pružaju utočište životinjskim vrstama. Da bi korisnici imali što lakši pristup podacima, uspostavljamo "podmorski informacijski sustav" s različitim razinama podataka, kako bismo udružili postojeće podatke različitih oblika i sadržaja te ih dopunjavali rezultatima novih istraživanja. Tako uspostavljene baze podataka omogućit će bržu izradu trodimenzionalnih modela morskoga dna, nautičkih karata i raznih drugih tematskih karata.

Ključne riječi: geografija, hidrografska izmjera, jednosnopni dubinomjer, višesnopni dubinomjer, digitalni batimetrijski model, morsko dno

1. Uvod

Iako su slovenski hidrografi, ronioci, geodeti i geografi u proteklim vremenima izvodili različita mjerenja dubina mora, na nautičkim kartama Tršćanskoga zaljeva u različitim su razdobljima navođene različite vrijednosti. One su ovisile prije svega o načinu mjerenja i točnosti instrumenata s kojima su ta mjerenja izvođena. Napredak u tehnološkom razvoju donio je promjene i na tom području. Suvremenim dubinomjerima moguće je izmjeriti dubine morskoga dna brzo i precizno, istodobno su ta mjerenja jedna od najzahtjevnijih, ako želimo postići odgovarajuću preciznost. Suvremena mjerenja su dobra osnova za izradu potpunijih nautičkih karata i digitalnoga batimetrijskog modela, a istodobno su i važan izvor informacija za arheološka, geološka i ekološka istraživanja.

Općenito je o obliku podmorskoga reljefa u Tršćanskom zaljevu i moru uz slovensku obalu u slovenskoj stručnoj literaturi napisano vrlo malo. Tom se tematikom najviše bavio geograf Orožen Adamič (1981, 2002). On je utvrdio da je Tršćanski zaljev, kako nazivamo krajnji sjeverni dio Jadranskoga mora, razmjerno plitak jer njegova prosječna dubina iznosi samo 16,4 m. Najdublja točka u slovenskom moru nalazi se blizu obale ispred rta Madona, u neposrednoj blizini Pirana i iznosi 38 m (Klanjšček, 2005).

2. Suvremena mjerenja morskoga dna

Mjerenje dubine morskoga dna suvremenim ultrazvučnim instrumentima omogućuje mjerenje dubina uz

to within a few centimetres. In this article, we are going to focus on two instrument types:

- **single-beam or multi-beam sonars**, designed to measure sea depth, and
- **sub-bottom sonars**, the sound waves of which also penetrate into the interior of various materials and are thus useful for analyzing the geological composition of the seafloor.

The description of devices is going to be based primarily on measuring instruments used for mapping by the Harpha sea company in Koper. In general, similar devices do not differ significantly from those described. Very generally speaking, these are devices which measure the time an ultrasound signal is required to travel through sea from a transmitter located on the surface to the seafloor and back (Kolenc, 2005).

2.1 Vessels used for mapping

Harpha sea has two vessels available for mapping. The appropriate choice of vessel to use depends entirely on the depth of the sea. The larger vessel is 12 meters long and is intended for mapping in deeper waters. It is equipped with a multi-beam sonar system, systems to detect boat rocking, an accurate RTK GPS receiver (type of correction: RTK – Real Time Kinematic), a system to charge the apparatus and computers to capture and record data. The GPS navigational system allows the skipper to follow pre-planned routes. The same vessel is also used for work with the sub-bottom sonar to record sediment profiles.

In very shallow areas, with depths of less than 1.5 meters, where it is not possible to use the larger vessel, a rubber boat 3 meters long and with a very shallow keel is used. It is mounted with a single-beam sonar, a GPS antenna, and a computer for recording data. The skipper of this boat, just as with the larger vessel, can travel along pre-planned routes using appropriate GPS navigation.

2.2 Measuring instruments

2.2.1 Multi-beam sonar with a built-in "side-scan" sonar – Reson SeaBat 8125

With multi-beam sonar, narrow beams of sound are transmitted toward the seafloor at different angles. Slanting distances, which are determined according to the time travelled and the intensity of returning signals of the scattered beams, are then transformed into vertical distances, or depths, based on the known angles of transmitted impulses. The multi-beam sonar with the built-in "side-scan" sonar¹ consists of a probe with 240 beams of impulses which encompass an area at the angle of 120°.

3D models produced from measurements using multi-beam sonar with a built-in "side-scan" system are extremely realistic since they are made from a very high number of measured points.

2.2.2 Single-beam sonar – Elac HydroStar 4300

As indicated by its name, this sonar is composed of a single-beam probe which simultaneously transmits only one beam of ultrasonic impulses vertically toward the seafloor; depth is determined on the basis of time required for the sound to travel from the transmitter to the bottom and back to the surface.

The Elac HydroStar 4300 sonar can operate on two frequencies, 50 and 200 kHz. Higher frequencies have shorter wavelengths, which means they provide more accurate measurements, while lower frequencies allow the sonic impulse to penetrate deeper. The instrument is especially suited for smaller vessels, since it is portable, economical in energy use, and easy to use and maintain.

2.2.3 Sub-bottom sonar – Innomar SES 2000 light

The sub-bottom sonar penetrates seafloor sediments. It is used for mapping locations where harder objects such as rocks, shipwrecks, piers and the like are expected to be found in silt. For exploring beneath the seafloor, the Sub-Bottom Profiler Innomar SES 2000 light is used. Mapping can only be done by large vessels. This sonar's basic operating frequency is 200 kHz, while frequencies between 6 and 20 kHz are used for depth penetration. A higher frequency bounces off the upper layer the sound signal reaches, whereas a lower frequency penetrates much deeper, all the way to the rock. Sediment thickness is determined using the difference between the two frequencies (Pribičević et al., 2007).

2.3 Planning measurements

Precise seafloor mapping can only be reliably carried out if it is carefully planned in advance. A range of preparatory tasks is necessary, among them test measurements of the area to indicate where measurements with a larger vessel are not possible due to shallow water, and where a rubber boat will be needed. At the same time, accuracy of the instruments can be ascertained and correctional factors for their calibration determined.

Before taking measurements, devices must be calibrated – that is, their settings must be checked. Calibration is carried out by entering parameters of the speed of

¹ The independent "side-scan" sonar provides a detailed acoustic image of the seafloor called a sonogram. Metric photographs are unable to provide the absolute height of objects, only relative heights and relative differences on the seafloor (Kolenc 2005, 24). The vessel pulls it from behind just above the seafloor, but the ultrasonic impulses are transmitted sideways and not vertically, thus the image of objects and seabed topography is considerably more accurate. The "side-scan" sonar built into the multibeam sonar moves along with it approximately 0.5 m below the surface, thus its "view" of the bottom is much more vertical. Nevertheless, it is a good supplement to the measured depths provided by multibeam sonar.

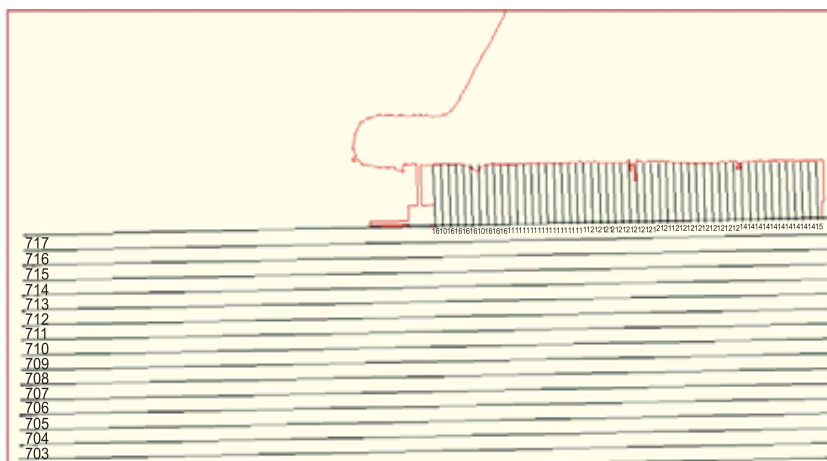


Fig. 1. Plan of routes for larger and smaller boats

Slika 1. Plan ruta većeg i manjeg plovila

preciznost do nekoliko centimetara. U članku ćemo posebno istaknuti dva tipa instrumenata:

- ❑ **jednosnopne i višesnopne dubinomjere** (eng. *single-beam, multi-beam sonars*), namijenjene mjerenju dubine mora
- ❑ **geološke dubinomjere** (eng. *sub-bottom sonars*), čiji zvučni valovi prodiru u unutrašnjost različitih materijala i koji su zato upotrebljivi za proučavanje stjenovite strukture morskoga dna.

Opis instrumenata temelji se prije svega na mjernim instrumentima, koje za mjerenje dubine mora upotrebljava poduzeće *Harpha sea* iz Kopra. Općenito se srodni instrumenti ne razlikuju značajno od opisanih. Općenito govoreći, radi se o instrumentima s kojima se mjeri vrijeme potrebno da ultrazvučni signal kroz more prijeđe put od odašiljača na površini do morskog dna i nazad (Kolenc, 2005).

2.1. Plovila za izvođenje mjerenja

Harpha sea ima za izvođenje mjerenja na raspolaganju dva plovila. Izbor plovila koje će više odgovarati ovisi isključivo o dubini mora. Veće plovilo dužine 12 m namijenjeno je mjerenjima u dubljoj vodi, a opremljeno je višesnopnim dubinomjerom, sustavima za detekciju nagiba plovila, preciznim RTK GPS prijamnikom (vrsta korekcije: RTK – Real Time Kinematic), sustavom za napajanje uređaja i računalom za spremanje podataka. GPS za navigaciju omogućuje voditelju plovila plovību po unaprijed zacrtanoj ruti. Isto plovilo upotrebljava se i za rad s geološkim dubinomjerom za mjerenje profila sedimenata.

U vrlo plitkim područjima, s dubinama manjim od 1,5 m, gdje nije moguće upotrijebiti prije navedeno veće plovilo, upotrebljava se gumeni čamac dužine 3 m, s vrlo malim gazom. Na njemu je smješten jednosnopni dubinomjer, antena za GPS i računalno za spremanje podataka. Upravitelj plovila može, isto tako kao i kod većeg plovila, odgovarajućom GPS navigacijom ploviti po unaprijed predviđenoj ruti.

2.2. Mjerni instrumenti

2.2.1. Višesnopni dubinomjer s ugrađenim bočnim (side-scan) uređajem – Reson SeaBat 8125

Kod višesnopnog dubinomjera mjerni sustav pod različitim kutovima šalje uske snopove zvuka prema morskome dnu. Kose udaljenosti koje se određuju prema vremenu putovanja i jačini povratnih signala raspršenih snopova potom se, uzimajući u obzir poznate kutove poslanih impulsa, preračunaju u vertikalne udaljenosti, odnosno dubine. Višesnopni dubinomjer s ugrađenim *side-scan* dubinomjerom¹ čini sonda s 240 snopova zvučnih impulsa, koji zajedno pokrivaju područje pod kutom od 120°.

3D modeli izrađeni na osnovi mjerenja višesnopnim dubinomjerom s ugrađenim *side-scan* sustavom, izuzetno su realistični jer su napravljeni iz vrlo velikog broja izmjerenih točaka.

2.2.2. Jednosnopni dubinomjer – Elac HydroStar 4300

Kako već samo ime kaže, jednosnopni dubinomjer čini sonda koja istodobno šalje samo jedan snop ultrazvučnih impulsa okomito prema morskome dnu, a dubina se određuje na osnovi vremena koje je potrebno da zvuk prijeđe put od odašiljača do dna i nazad.

Instrument Elac HydroStar 4300 može djelovati na dvije frekvencije, 50 i 200 kHz. Više frekvencije imaju

¹ Samostalni *side-scan* dubinomjer daje detaljnu akustičku sliku morskoga dna, koja se naziva sonogram. Mjerne fotografije ne omogućuju dobivanje apsolutnih visina objekata već relativnih visina i visinskih razlika na morskome dnu (Kolenc 2005, 24). Plovilo ga vuče za sobom tik iznad morskoga dna, dok ultrazvučne impulse odašilja sa strane, a ne okomito, i zato je slika objekata ili razvedenost morskog dna mnogo preciznija. *Side-scan* dubinomjer, koji je ugrađen u višesnopni dubinomjer, pokreće se za jedno s njim približno 0,5 m ispod vodene površine, i zato je njegov "pogled" na dno mnogo bliži smjeru vertikale. Usprkos tome dobra je dopuna dubinama izmjerenim višesnopnim dubinomjerom.

sound through seawater (the speed of sound, or salinity and temperature are measured) and performing test measurements using the Secchi disk. The sonar is calibrated well and ready for use if the difference between the depth measured with the sonar and the Secchi depth is less than 10 m. The depth measured this way must also be adjusted for the value of the submerged sonar probe. The accuracy of measurement results are also influenced by the vessel's bobbing and irregular linear movement, which is why it is important the measurements be performed in a calm sea, or else a compensator must be used to correct the values of the depths measured (Solaric, 2007).

With the help of existing maps and test measurements, a precise and detailed itinerary is prepared as a starting point for the vessel's navigation during mapping. The vessel must be navigated along routes at equal distances that allow a minimum of 15% overlap between passes when using a multi-beam sonar (Hidrografske ..., 2006). A special plan must be prepared for carrying out measurements; during the time of actual mapping, this primarily serves as a starting point for organizing the work of the boat's crew and skipper.

2.4 Execution of sea-floor mapping

The boat skipper follows a marked-out route using GPS navigation. At a depth of 20 meters, the multi-beam sonar records data 8 times per second for the travel time of 240 sonar impulses. As mentioned, measurements using multi-beam sonar are carried out in swaths, between which it is necessary to ensure an overlap of at least 15%. The width of a swath in one route which the multi-beam sonar maps simultaneously is about 3.5 times greater than the depth of the sea below the vessel (half of the swath / depth below the boat = $2 \cdot \tan 60^\circ$). For an average depth of 20 m, this width is approximately 70 m. Thus for mapping along the Slovenian coastline, neighbouring routes are usually 60 meters apart. In shallower and less accessible areas, a rubber boat is used. Measurements are conducted during high tide, since it is the only way to map the shallowest areas (up to 0.5 m depth). If a rubber boat with a single-beam sonar is used, the routes must be considerably closer together (Fig. 1). For the most challenging mapping, they are only 1 meter apart; in most cases they are from 5 to 10 meters apart.

The position and depths can be determined simultaneously using a combination of GPS and sonar. Both systems are connected through a control software package that synchronizes the data. They are connected in such a way that for each point for which depth is measured, its position, obtained using satellite positioning (or RTK GPS), is also recorded. This means that three-dimensional coordinates are determined in real time for each point measured (Medak, Pribičević, 2004).

Depths are calculated based on the amount of time required for the sonic impulse to travel from the probe to the sea floor. The sonar records data every tenth of a second, which means that at an average speed of 2 knots (1 m/s), the points measured are about 0.1 meter apart

from each other. In calculating depths, parameters affecting the speed of the ultrasound through water are also taken into account. Among them, sea temperature and salinity are the most important. The speed of sound is measured using an SVP probe, usually at half-meter intervals. In unfavourable conditions, when the water temperature changes considerably with depth, more frequent readings are necessary.

The geodetic datum is not the best starting point for determining the hydrographic depths used in charts because the data about the lowest depths are extremely important for safe navigation. It is thus more appropriate to measure depths from the sea level at the lowest tide (i.e., the chart datum). In the Slovenian sea, the chart datum is 0.63 m below the mean sea level and 0.48 m below the geodetic datum (Hidrografske ..., 2006). Thus in measuring depths, the water levels obtained using the RTK are checked against tidal data. In order to convert the depths measured into a chart datum, sea level is also recorded every 20 minutes at mareographs distributed along the Slovenian coast (at Debeli Rtič, the Koper Marina, Izola, and the Portorož Marina).

3 Analysis of the Data Obtained

All the data obtained are analyzed using special computer programs in such a way as to eliminate discrepancies and incorrect values, take into account the speed of sound in sea water, the level of the sea surface, rocking of the boat, etc. This is followed by a time-intensive "clean-up" of the data, in which a digital bathymetric model is carefully examined and major discrepancies identified. These can occur due to mistakenly perceived echoes, multiple echoes, or echoes from objects such as trash or even large fish.

The result of the analysis of data gathered is a collection of points with calculated geographical coordinates in the WGS-84 system and corresponding depths. Only data prepared in this way enables their conversion into another coordinate system, the Gauss-Krüger coordinate system being one of them.

4 Digital Bathymetric Models

Ultrasonic sonars for mapping the seafloor and advanced GIS computer technology allow us to produce profiles or digital bathymetric models with accuracy to within a centimetre. Such a model provides a three-dimensional view of seafloor topography which is extremely useful for a diverse range of research and analyses. In the text to follow, we highlight some of the more important applications.

4.1 Monitoring of the depth of shipping channels

The northern portion of the Adriatic Sea is relatively shallow: the water in the Gulf of Trieste is scarcely deeper than 25 m, and a fifth of the gulf is shallower than 10

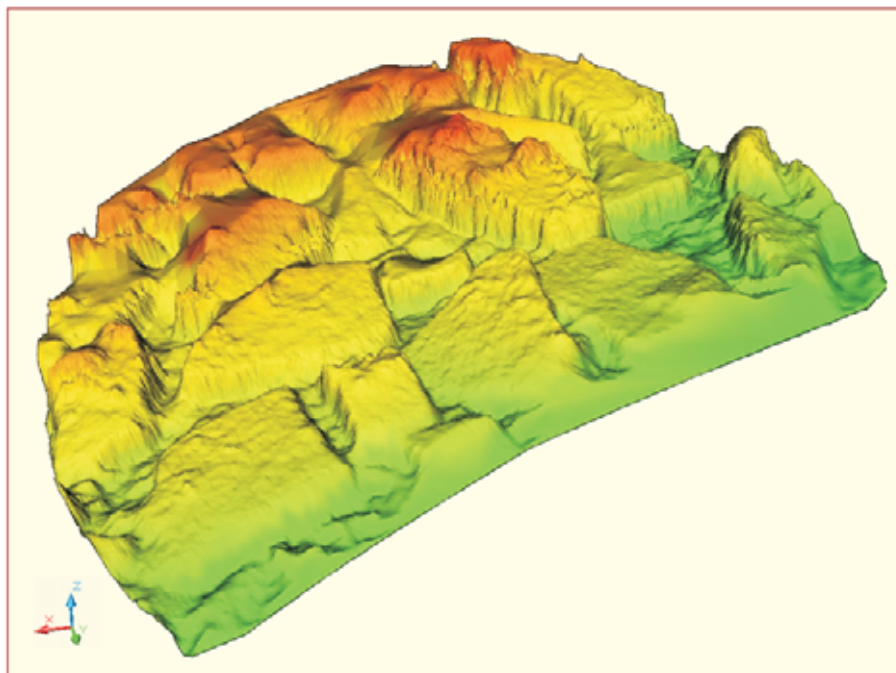


Fig. 2. Detail of the stone remains of the pier in Simon's Bay
Slika 2. Detalj kamenih ostataka pristaništa u Simonovom zaljevu

manju valnu dužinu, što znači da daju preciznija mjerenja, dok niže frekvencije omogućuju dublje prodiranje zvučnog impulsa. Instrument je naročito pogodan za manja plovila jer je prijenosan, energijski štedljiv i jednostavan za upotrebu i održavanje.

2.2.3. Geološki dubinomjer – Innomar SES 2000 light

Geološki dubinomjer prodire u sedimente morskoga dna. S njim se izvode mjerenja na lokacijama na kojima očekujemo da su u mulju i ostalim nanosima tvrđi objekti kao što su stijene, potopljeni brodovi ili molovi i slično. Za sondiranje stanja pod morskim dnom upotrebljava se geološki dubinomjer Innomar SES 2000 light. Mjerenja se izvode isključivo većim plovilom. Osnovna frekvencija djelovanja toga dubinomjera je 200 kHz, dok pri prodiranju u dubinu upotrebljava frekvencije između 6 i 20 kHz. Visoka frekvencija reflektira se od gornjega sloja na kojeg naiđe odaslani zvučni val, dok niska frekvencija prodire mnogo dublje, do stijene. Na osnovi razlike te dvije frekvencije određuje se debljina sedimenata (Pribičević i dr., 2007).

2.3. Planiranje mjerenja morskoga dna

Precizna mjerenja morskoga dna bit će izvedena po uzdano samo u slučaju ako su prethodno dobro planirana. Potreban je niz pripremnih radnji, između ostalih i testna mjerenja područja, koja će pokazati gdje, zbog manjih dubina, mjerenja većim plovilom nisu izvediva, te je potrebno upotrijebiti gumeni čamac. Istodobno utvrđuje se preciznost instrumenata i određuju korekcijski faktori za njihovo kalibraciju.

Prije mjerenja potrebno je dubinomjer kalibrirati, tj. provjeriti ispravnost uređaja. Kalibracija se izvodi unošenjem parametara za prostiranje brzine zvuka kroz morsku vodu (mjeri se brzina zvuka ili slanost i temperatura) i testnim mjerenjima pomoću Secchi ploče. Smatra se da je dubinomjer dobro baždaren i spreman za rad ako je razlika između dubina dobivenih mjerenjem dubinomjerom i dubine Secchi ploče unutar 10 cm. Tako izmjerenu dubinu treba popraviti i za veličinu uronjenosti sonde dubinomjera (predajnika) u more. Na točnost rezultata mjerenja ima utjecaj i nepravilnijsko kretanje broda, pa se batimetrijska mjerenja moraju izvoditi po mirnome moru ili je za korekciju mjerenih dubina potrebno uključiti kompenzator za nepravilno gibanje broda (Solarić, 2007).

Uz pomoć postojećih karata i testnih mjerenja pripremi se precizni itinerar koji je polazište za navigaciju plovila za vrijeme mjerenja. Plovidba se mora odvijati po jednako udaljenim rutama koje pri upotrebi višesnopnog dubinomjera omogućuju barem 15 % poprečno preklapanje između pojaseva (Hidrografske..., 2006). Pripremljen mora biti poseban plan izvođenja mjerenja koji je za vrijeme stvarnog sondiranja prvenstveno polazište za organiziranje rada posade i voditelja plovila.

2.4. Izvođenje mjerenja morskog dna

Voditelj plovila slijedi planiranu trasu uz pomoć GPS navigacije. Pri dubini od 20 m višesnopni dubinomjer 8 puta u sekundi zabilježi podatke o vremenu putovanja 240 zvučnih impulsa. Kao što je već spomenuto, mjerenja višesnopnim dubinomjerom izvode se u pojasevima između kojih je potrebno osigurati najmanje 15 % poprečnog

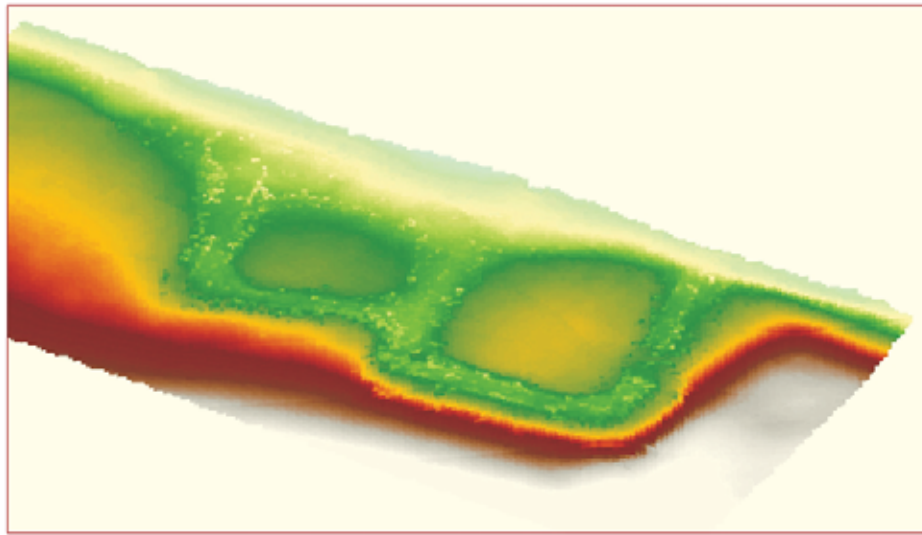


Fig. 3. Results of sonar measurements of the Fizine archaeological site near Portorož

Slika 3. Rezultat sonarnih mjerjenja na nalazištu Fizine kod Portoroža

20

m. Of course, depths along the coast are even shallower, which creates problems for both of the northern Adriatic ports, Trieste and Koper. The keel of modern cargo and passenger ships which sail into the Port of Koper can be as deep as 17 to 18 m. For this reason, the Port of Koper, which is experiencing a steady increase in shipping traffic, had to drill a channel enabling larger cargo ships to access the three shipping berths. Due to the accumulation of sediments deposited by currents, tides, and of course mass marine traffic, the depth of the shipping channels must be continuously monitored so that it does not fill up with excessive silt and sand. Even a small change in depth can represent a hazard to large ships as well as to tourist maritime traffic entering the harbours. For this reason, cyclical measurements of the seafloor on a quarterly or annual basis, or every few years, provide a clear picture of the changes it undergoes, thereby preventing the possibility of major accidents.

4.2 Discovery of archaeological sites on the seafloor

A digital bathymetric model is a good starting point for searching for archaeological sites, especially since it enables not only the identification of individual locations or artefacts (for example, classical excavation of amphorae, tools and other valuable items), but also the discovery of archaeological objects over a much greater area which may be covered by silt or mud, consistent with the fact that human impacts on space frequently leave marks over large areas (Fridl et al., 2008).

The greater the accuracy of the digital bathymetric model, the greater the likelihood that we are going to discover outlines of smaller objects buried in the seafloor. Seafloor mapping as carried out for a number of years by

Harpha sea has been useful in the investigation of some archaeological sites along the Slovenian coastline.

Stone remains of a pier from Roman times can be found in Simon's Bay (Fig. 2). In addition to the pier, there are also remains of buildings, now underwater, which were most likely economic buildings, plumbing installations and other architecture associated with a large seaside villa. From the undersea ruins of the pier and the jetty, we can conclude that large ships docked in this harbour. The settlement complex and the harbour played a leading role in the economic development of the surrounding area from the 1st century B.C. to the beginning of the 1st century A.D. The estate lost its primary function at the end of the 4th century (Arheološka najdišča Slovenije, 1975).

Somewhat to the south of Piran, at the edge of Portorož, outlines of another archaeological site from roughly the same period can be seen in shallow water. It is called Fizine. One of the results of more detailed investigations of divers from the Sergej Mašera Maritime Museum in Piran is a more accurate digital model of the study area. The model pointed out the area was divided into two parts by an intervening wall (Fig. 3). The hypothesis that this used to be a port was later rejected by archaeologists based on findings provided from more detailed measurements using sonar and undersea explorations. According to the latest theories, it was a fish farm with a port for smaller boats, such as those used by the Romans from the 1st to the 5th century (URL 1).

Let us look at one more, historically less distant event, which also left traces on the seafloor, just off the coast between Koper and Izola. In a digital bathymetric model, the site where the boat Rex sunk is clearly visible (Fig.

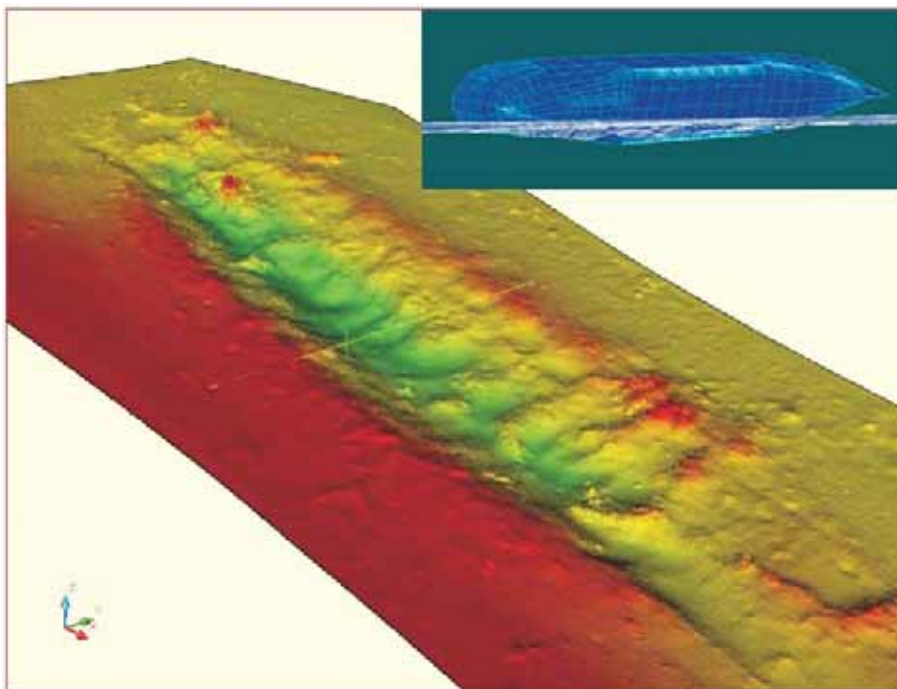


Fig. 4. A three-dimensional model of the area where the *Rex* ran aground and was bombed (cell size 20 x 20 cm) and a reticular model of the ship's trunk

Slika 4. Trodimenzionalni model područja na kojem se brod *Rex* nasukao i bio bombardiran (veličina mreže 20 x 20 cm) i mrežni model trupa broda

preklapanja. Širina pojasa koju na jednoj ruti izmjeri višesnopni dubinomjer približno je 3,5 puta veća od dubine mora ispod plovila (polovina pojasa / dubina ispod plovila = $2 \cdot \text{tg } 60^\circ$). Pri prosječnoj dubini od 20 m ta širina iznosi približno 70 m. Stoga su za mjerenja uz slovensku obalu najčešće određeni 60-metarski razmaci između susjednih ruta. Na plićim i teže dostupnim područjima kao plovilo upotrebljava se gumeni čamac. Mjerenja se izvode za vrijeme visokih plima, jer je samo tako moguće izmjeriti i najplića područja (do 0,5 m dubine). Kod gumenog čamca, koji mjerenja obavlja jednosnopnim dubinomjerom moraju biti rute planiranoga puta postavljene gušće (slika 1). Pri najzahtjevnijim mjerenjima čamci su između sebe udaljeni samo 1 m, a u većini slučajeva od 5 do 10 m.

Kombinacijom GPS-a sa sustavom ultrazvučnog dubinomjera omogućava se istodobno određivanje položaja i dubina. Oba su sustava povezana kontrolnim programskim paketom koji sinkronizira podatke. Sustavi se povezuju tako da se svakoj točki kojoj je izmjerena dubina doda pozicija dobivena satelitskom metodom određivanja položaja (GPS-RTK metoda), te su na taj način za svaku izmjerenu točku određene trodimenzionalne koordinate u realnom vremenu (Medak i Pribičević, 2004).

Dubine su izračunane s obzirom na vrijeme koje je potrebno zvučnom impulsu poslanom iz sonde prema morskome dnu. Dubinomjer bilježi podatke na desetinku sekunde, što znači da pri prosječnoj brzini vožnje od 2 čvora (1 m/s) dobijemo izmjerene vrijednosti za točke koje su između sebe udaljene približno 0,1 m. Kod

izračunavanja dubina potrebno je uzimati u obzir i parametre koji utječu na brzinu širenja ultrazvuka kroz morsku vodu. Među njima najvažniji su temperatura i slanost mora. Brzinu zvuka mjerimo SVP sondom (*sound velocity profiler*), najčešće na svakih pola metra dubine. U nepogodnim okolnostima, kad se temperatura vode s dubinom bitno mijenja, potrebno je češće očitavanje.

Za utvrđivanje hidrografskih dubina koje se upotrebljavaju na pomorskim kartama geodetska nula nije najbolje ishodište jer su za sigurnu plovidbu od izuzetnog značaja podaci o najnižim dubinama. Zato je dubine pravilnije mjeriti od razine mora kod najnižih voda (hidrografska nula). Hidrografska nula se na području slovenskoga mora nalazi 0,63 m pod srednjom razinom mora i 0,48 m pod geodetskom nulom (Hidrografske....., 2006). Zato se pri mjerenju dubina visine morske razine dobivene RTK-mjerenjem periodično kontroliraju i uspoređuju s podacima o plimi i oseki. Za preračunavanje dobivenih dubina na hidrografsku nulu dok traje sondiranje svakih 20 minuta očitava se i stanje morske razine na mareografskim mjernim mjestima koja su postavljena uzduž slovenske obale (Debeli Rtič, Marina Kopar, Izola, Marina Portorož).

3. Obrada izmjerenih podataka

Svi izmjereni podaci se pomoću posebnih računalnih programa obrade tako da se eliminiraju odstupanja i nekorektne vrijednosti, uzme se u obzir određena brzina širenja zvuka u morskoj vodi, stanje razine morske površine,

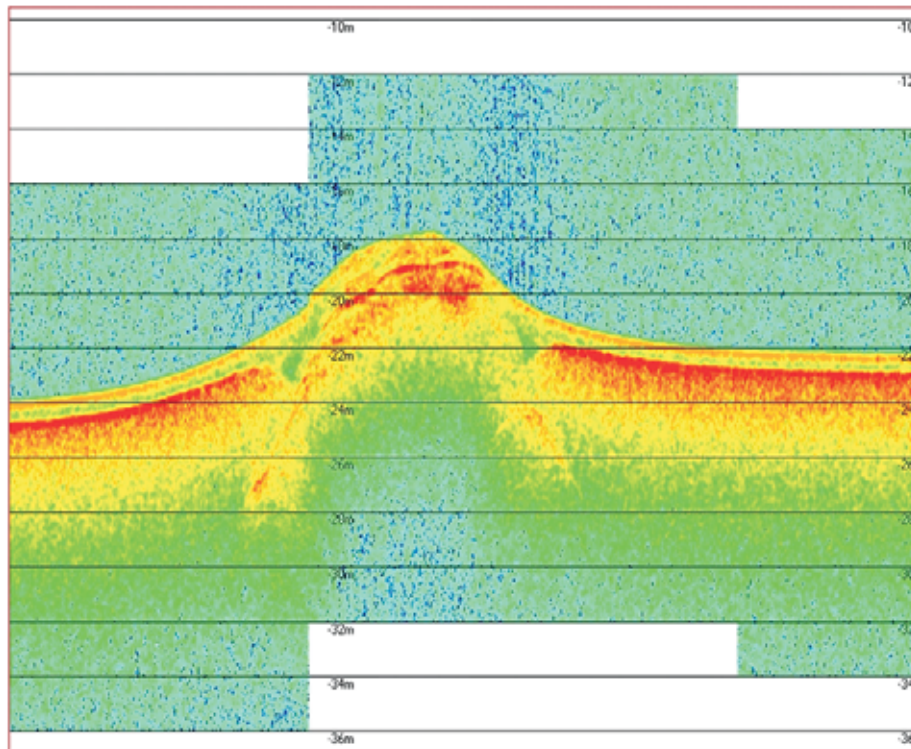


Fig. 5. Profiles show where there were changes in the structure of the ground beneath the seafloor, which we also call anomalies

Slika 5. Presjek pokazuje mjesta pod morskim dnom na kojima je došlo do promjena u strukturi tla, koje nazivamo anomalijama

4). Similar 3D-models make it possible to determine how the ship sunk and the reasons for the wreckage.

Undersea investigations of archaeological sites using accurate seafloor mapping methods have another advantage. The interpretation of the foundations of sites which stand out in seafloor images make it possible to study them without resorting to classical archaeological excavations, which often have the effect of ultimately destroying such a site (Stančič and Gaffney, 1993).

4.3 Determining seafloor structure

Exploring seafloor using sub-bottom sonars, which also penetrate various materials with ultrasound, makes possible the study of the structure of surfaces covered with a thick layer of sand and silt. The data acquired in this way are useful in particular for the analyzing the geomorphology beneath the sea: layering, thickness and structure of sediments, and identifying locations of fissures and vents. Simultaneously, sonars reveal solid objects in the sediments (Fridl et al., 2008).

The depth of penetration by ultrasonic waves is dependent on the type of material through which the waves travel, as well as the choice of instrument. Porosity, granularity, mineral composition and other features all have an influence (Verbič and Gabrovec, 2002).

In an analysis of the ground structure in this area, where the new Koper marina is currently under construction, the echoes at a depth of 0.5 m to 2.0 m and along a length of approximately 150 m and a width of 20 m were very strong (Fig. 5). The changes in the profile may be a consequence of rocks among the silt or human activity, for example the remains of a sunken pier or ship, though the latter is less likely due to the dimensions and locations of the anomalies.

4.4 Ecological and nature conservation studies

Using undersea pictures showing the location of sewage pipes on the seafloor (Fig. 6), we can find the ecologically most vulnerable places along their discharge points. Due to the direction of currents, water shallowness and the presence of densely settled areas along the coastal zone of the whole of the Gulf of Trieste, the Slovenian sea is environmentally very vulnerable. Industrial and household waste water and heavy maritime traffic just make the situation worse. Fresh water flowing into the sea is also frequently polluted. Data about objects on the seafloor are thus useful for all kinds of ecological research aimed at protecting certain undersea areas.

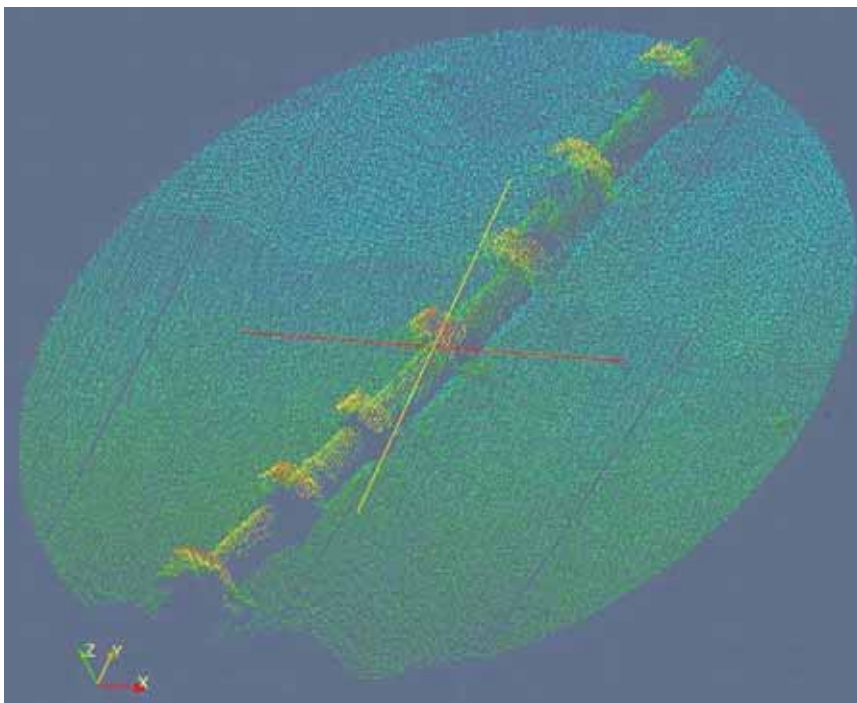


Fig. 6. Sewage pipe along the seafloor
 Slika 6. Kanalizacijska cijev na morskome dnu

nagibanja plovila i slično. Nakon toga dolazi zahtjevno "čišćenje" podataka, pri čemu se pri pregledu digitalnoga batimetrijskog modela utvrdi koja su još veća odstupanja. Ta mogu nastati i zbog pogrešno registriranih odbijanja, višekratnih odbijanja ili odbijanja od predmeta kao što su nečistoće ili veće ribe.

Rezultat obrade izmjerenih podataka je skup točaka s izračunanim geografskim koordinatama u sustavu WGS-84 i s odgovarajućim dubinama. Tek tako pripremljeni podaci omogućuju njihovu pretvorbu u druge koordinatne sustave, između ostalih i u Gauss-Krügerov koordinatni sustav.

4. Digitalni batimetrijski modeli

Ultrazvučni dubinomjeri za mjerenje morskoga dna i dobro razvijena GIS računalna tehnologija nam danas omogućuju izradu profila ili digitalnog batimetrijskog modela s centimetarskom točnošću. Takav model nudi i trodimenzionalne prikaze razvedenosti morskoga dna, koji su vrlo upotrebljivi za različita istraživanja i analize. U nastavku ćemo istaknuti samo neke najvažnije.

4.1. Nadzor dubina plovnih kanala

Sjeverni dio Jadranskoga mora je razmjerno plitak jer je more u Tršćanskom zaljevu rijetko gdje dublje od 25 m, a čak petina zaljeva je plića od 10 m. Uz obalu su dubine naravno još manje, što je problem za sjeverno-jadranska pristaništa Trst i Kopar. Gaz suvremenih teretnih i putničkih brodova koji plove u luku Kopar dostiže

vrijednosti od čak 17 ili 18 m. Zato je za Luku Kopar, u kojoj se brodski promet stalno povećava, bilo potrebno do pristaništa iskopati kanale koji omogućuju većim teretnim brodovima pristup do tri pristanišna bazena. Zbog akumulacije nanosa manjih vodenih tokova, plime i oseke kao i masovnoga pomorskog prometa, potrebno je dubine plovnih kanala neprekidno nadgledati da se ne bi prekomjerno napunili muljem i pijeskom. Već manja promjena dubine morskoga dna mogla bi značiti opasnost za promet, kako za velike brodove tako i za turistički promet pri ulazu u marine. Zato tromjesečna, godišnja ili višegodišnja ciklična mjerenja morskoga dna daju jasnu sliku o promjenama koje se na njemu događaju i tako sprječavaju mogućnost većih nesreća.

4.2. Otkrivanje arheoloških nalazišta na morskome dnu

Digitalni batimetrijski model je dobro polazište za traženje arheoloških nalazišta, pogotovu jer ne omogućuje samo utvrđivanje pojedinih lokacija ili artefakata (npr. klasično otkopavanje amfora, oružja i drugih dragocjenosti), već i prepoznavanje arheoloških objekata na mnogo širem području koji su pokriveni muljem i blatom. To je u skladu i s činjenicom da je čovjek svojim zahvatima u prostoru najčešće ostavio tragove na većim površinama (Fridl i dr., 2008).

Što je veća preciznost digitalnoga batimetrijskog modela veća je i vjerojatnost da ćemo pomoću njega otkriti i obrise manjih objekata koji su zakopani u morskome dnu. Mjerenja morskoga dna koja već više godina obavlja

With the help of three-dimensional models and seafloor profiles, we can also determine the suitability of particular areas as habitats for certain creatures. Special attractions in the Slovenian sea are the funnel-shaped basins of Izola, which were only discovered by sonar. It was confirmed they were not just ordinary karst under-sea springs, but thermal geysers. The sulphurous water has a temperature of about 29 C and provides a habitat for the sea squirt *Phallusia mamillata*, various species of sponges, brittle-stars, sea cucumbers, tunicates, and mosses. All these and many more organisms live in the craters or their immediate vicinity (Mlinar, 2003). The springs discovered are also of economic significance, since they could enable the development of health tourism in Izola.

5 Conclusion

This article presents the entire process, from making preparations for performing seafloor depth measurements, performing them and processing data, to using a digital bathymetric model. The range of studies and research based on images or profiles of the seafloor and its three-dimensional modelling is much broader. The establishment of an "undersea information system" could enable the daily use of seafloor mapping data by various planners, researchers, local agencies, and cartographers and make available the latest information about their condition. Such a system requires that the data be updated regularly and new data layers be added. This would yield a rich collection of data, used mainly for the rapid production of three-dimensional seafloor models, detailed nautical charts, and various thematic maps.

References / Literatura

- Arheološka najdišča Slovenije (1975): Slovenska akademija znanosti in umetnosti - Inštitut za arheologijo, DZS, Ljubljana, 1-415.
- Fridl, J. (2008): Pomen digitalnega batimetričnega modela za trajnostni razvoj morja / The significance of digital bathymetric model for sustainable development of the sea, *Geodetski vestnik*, 52/4, Zveza geodetov Slovenije, Ljubljana, 854-866.
- Hidrografske meritve slovenskega morja na območju Kopskega zaliva (2006), Poročilo o opravljenem delu na projektu, Koper: Harpha sea, d.o.o.
- Jovanović, B. (1978): Izučavanje metoda mjerenja dubina mora, unapređenje obrade dubina i definiranja obalne linije sa hidrografskog, geodetskog i pomorskog gledišta, doktorska disertacija, Geodetski fakultet sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Klanjšček, M. (ur.) (2005): *Navtični vodnik slovenskega morja in obale*, Ministrstvo za promet Republike Slovenije, Ljubljana.
- Kolenc, R. (2005): Hidrografske meritve, *Geodetski vestnik*, 49/1, Zveza geodetov Slovenije, Ljubljana, 18-28.
- Medak, D., Pribičević, B. (2004): Research on the International Geodynamic Test-Area Plitvice Lakes within CERGOP-2 Project // Reports on geodesy /Sledzinski, Janusz (ed.). Warsaw : Warsaw University of Technology, 81-88.
- Mlinar, C. (2003). Topli izviri na dnu morja. Reportaža. Mladina.
- Orožen Adamič, M. (1981): Prispevek k poznavanju izoblikovanosti podvodnega reliefa slovenske obale, *Geografski vestnik*, 53, Geografsko društvo Slovenije, Ljubljana, 39-46.
- Orožen Adamič, M. (2002): Geomorfološke značilnosti Tržaškega zaliva in obrobja, *Dela*, 18, Oddelek za geografijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani, Ljubljana, 143-155.
- Pribičević, B. et al. (2007): Priprava i izvođenje batimetrijskih mjerenja na Plitvičkim jezerima, *Zbornik radova, Simpozij o inženjerskoj geodeziji, Hrvatsko geodetsko društvo*. Beli Manastir, 16.-19. svibnja 2007, 185-193.
- Solarić, R. (2007): Hidrografska izmjera i pomorska kartografija u teoriji i praksi, *Zbornik radova, Simpozij o inženjerskoj geodeziji, Hrvatsko geodetsko društvo*. Beli Manastir, 16.-19. svibnja 2007, 217-226.
- Stančič, Z., Gaffney, V. (1993): Arheologija pokrajine in geografski informacijski sistemi. *Geografski obzornik*, 3, Zveza geografskih društev Slovenije, Ljubljana, 31-34.
- Verbič, T., Gabrovec, M. (2002): Georadarske meritve na Triglavskem ledeniku, *Geografski vestnik*, 74/1, Zveza Geografskih društev Slovenije, Ljubljana, 25-42.

URL 1: Fizine,

<http://www.underwater-to-public.org/NewFiles/fizine1.html> (22.05.2007)

poduzeće *Harpha sea* bila su korisna pri proučavanju nekih arheoloških nalazišta uz slovenski obalni pojas.

U Simonovom zaljevu su pod vodenom površinom vidljivi kameni ostaci pristaništa iz rimskoga doba (slika 2). Pored pristaništa kompleks čine i ostaci potopljenih građevina, koje su bile najvjerojatnije gospodarske, vodovodna infrastruktura i arhitekturni ostaci vile na kopnu. Iz podmorskih ostataka pristaništa i lukobrana moguće je utvrditi da su tu pristajali i veliki brodovi. Sklop naselja s pristaništem je od 1. st. pr. Kr. do početka 1. st. imao jednu od središnjih uloga u ekonomskom razvoju širega zaleđa. Svoju primarnu funkciju posjed je izgubio koncem 4. stoljeća (Arheološka najdišća Slovenije, 1975).

Nešto južnije od mjesta Piran, na početku Portoroža, moguće je u pličini primijetiti obrise drugog arheološkog nalazišta iz istoga doba. Nazvano je Fizine. Jedan od rezultata temeljitijih istraživanja ronioca Pomorskoga muzeja "Sergej Mašera" iz Pirana je i točniji digitalni model istraženoga područja. Model je pokazao da je objekt bio unutarnjim zidom razdijeljen na dva dijela (slika 3). Pretpostavke da se radi o dva pristaništa arheolozi su opovrgnuli nakon detaljnijih mjerenja dubinomjerom i podmorskim istraživanjima. Po najnovim teorijama to bi moglo biti uzgajalište riba s lukom za manje brodove kakve su vjerojatno Rimljani upotrebljavali od 1. pa sve do 5. stoljeća (URL 1).

Istaknimo još jedan, povijesno nešto manje udaljen događaj, koji je isto tako ostavio tragove na morskome dnu u neposrednoj blizini obale između Kopra i Izole. Na digitalnom batimetrijskom modelu jasno se vidi na kojem je mjestu bio potopljen brod Rex (slika 4). Slični 3D-modeli omogućuju utvrđivanje načina potapljanja brodova i razloge koji su doveli do nesreće.

Istraživanje podmorskih arheoloških nalazišta pomoću točnih mjerenja morskoga dna ima još jednu prednost. Interpretacija tlocrta nalazišta, koji se pojavljuju u slici morskog dna, omogućuje njihova istraživanja bez klasičnih arheoloških iskopavanja koja najčešće takvo nalazište unište (Stančić i Gaffney, 1993).

4.3. Utvrđivanje strukture morskoga dna

Istraživanje morskoga dna geološkim dubinomjerima, koji pomoću ultrazvuka prodiru u različite materijale, omogućuje proučavanje strukture dna koje je prekriveno debelim slojem pijeska i mulja. Takvi su podaci upotrebljivi prije svega za analizu morfologije pod morem: slojevitosti, debljine i strukture sedimenta kao i utvrđivanje prijeloma i pukotina. Istodobno omogućavaju otkrivanje tvrdih objekata sakrivenih u sedimentima (Fridl et al., 2008).

Dubina dosega ultrazvučnih valova je, pored toga što je ovisna o izboru instrumenta, ovisna i o vrsti materijala kroz kojeg valovi prodiru. Na nju utječu poroznost, zrnatost, mineralni sastav i slično (Verbič i Gabrovec, 2002).

Pri analizi strukture tla na području gdje se trenutno izvodi gradnja nove marine Kopar odbijanja na dubini 0,5 do 2,0 m te na dužini približno 150 m i širini 20 m su bila vrlo jaka (slika 5). Spomenute promjene u presjeku mogu biti uzrokovane stijenama u mulju ili aktivnostima čovjeka, primjerice, ostacima potopljenoga mola ili plovila, što je zbog dimenzija i mjesta anomalija manje vjerojatno.

4.4. Ekološke i druge studije zaštite okoliša

Na osnovi podmorskih slika koje pokazuju trasu kanalizacijskih cijevi na morskome dnu (slika 6) možemo utvrditi koja su ekološki najranjivija mjesta uz odvođe. Slovensko more je zbog smjera strujanja, plitkosti i guste naseljenosti uz obalni pojas cijeloga Tršćanskog zaljeva, ekološki vrlo ranjivo. Industrijski i kućanski kanalizacijski otpaci te gust promet stanje još više pogoršavaju. I slatka voda koja utiče u more je ponekad zagađena. Podaci o objektima na morskome dnu su mogu se iskoristiti za najrazličitija ekološka istraživanja koja imaju za cilj očuvanje nekih podmorskih područja.

Pomoću trodimenzionalnoga modela i profila morskoga dna možemo utvrditi i prikladnost pojedinih područja za život određenih živih bića. Posebnu zanimljivost u slovenskom moru predstavljaju lijevku slična korita pred Izolom, koja su otkrili tek dubinomjeri. Utvrđeno je da se ne radi samo o običnim kraškim podmorskim izvorima ili vruljama već da su to termalni izvori. Sumorna voda, temperature približno 29°C, nudi životni prostor mješavici (*Phallusia mammilata*), narančastim prstastim spužvama, raznim trpovima (*Stichopus regalis*), morskim krastavcima, plaštenjacima (*Tunicata*) i mahovnjacima (*Stelmatopoda*). Svi ti organizmi i još mnogo drugih žive u kraterima ili u njihovoj neposrednoj blizini (Mlinar, 2003). Otkriveni termalni izvori su zanimljivi i s gospodarskoga stanovišta jer bi mogli omogućiti razvoj zdravstvenog turizma u Izoli.

5. Zaključak

U radu je prikazan cjelokupan proces od pripreme mjerenja dubina morskoga dna, preko izvođenja mjerenja i obrade podataka, do primjena digitalnoga batimetrijskog modela. Paleta studija i istraživanja koja se mogu osloniti na slike profila morskoga dna i njegove trodimenzionalne prikaze, daleko je opsežnija. Da bi razni planeri, istraživači, lokalne službe i kartografi mogli svakodnevno upotrebljavati podatke mjerenja dubina i imati na raspolaganju najnovije stanje, korisno je uspostaviti "podmorski informacijski sustav". Takav sustav zahtijeva stalno ažuriranje podataka i njegovu nadogradnju novim razinama podataka. Na taj način dobit će se bogata zbirka podataka, upotrebljiva prije svega za brzu izradu trodimenzionalnoga modela morskoga dna, preciznih naučičkih karata i raznih tematskih karata.