

Dariusz KARCZMARZ, Przemysław MĄDRZYCKI  
*Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)*

## IDENTIFICATION OF GEOLOGICAL AND ENGINEERING CONDITIONS FOR FORGING THE BED OF A LARGE LOWLAND RIVER, BASED ON LOW-CEILING *AD HOC* AERIAL PHOTOGRAPHS

### Identyfikacja geologiczno-inżynierskich warunków forsowania koryta dużej rzeki nizinnej w oparciu o zdjęcia lotnicze wykonywane *ad hoc* z niskiego pułapu

**Abstract:** *The article outlines the possibilities for assessing geological conditions related to fording the beds of large lowland rivers, based on low-ceiling ad hoc aerial photos, and the current state of the art on the utilization of remote-sensing methods in geological and engineering studies. The conducted research provided a confirmation that a set of remote-sensing sensors installed onboard an aerial vehicle enables recording images, the analysis of which allows determining the geological and engineering conditions of lowland riverbed zones, to the extent adequate to make decisions on crossing them.*

**Keywords:** geological and engineering conditions, photogrammetry, sensors, remote sensing

**Streszczenie:** *W artykule przedstawiono zarys możliwości oceny geologicznych warunków forsowania koryt dużych rzek nizinnych w oparciu o zdjęcia lotnicze wykonywane ad hoc z niskiego pułapu oraz aktualnego stanu wiedzy dotyczącego wykorzystania metod teledetekcyjnych w badaniach geologiczno-inżynierskich. W zrealizowanych badaniach uzyskano potwierdzenie, że zestaw sensorów teledetekcyjnych, zainstalowany na pokładzie platformy powietrznej, umożliwia rejestrację obrazów, których analiza pozwala na określenie warunków geologiczno-inżynierskich stref korytowych rzek nizinnych, w zakresie odpowiednim do podejmowania decyzji o ich forsowaniu.*

**Słowa kluczowe:** warunki geologiczno-inżynierskie, fotogrametria, sensory, teledetekcja

## **1. Introduction**

Most bed sections of large rivers within Poland, especially in the Polish Lowlands, (such as the Vistula, Bug, Narew) are characterized by having relatively wide beds and depths rarely exceeding 2.5 m under conditions of medium and low water levels. This is, in many cases, the permissible fording depth for most modern structures [1, 15]. However, many sections of river bed bottoms under medium and low water level conditions (which are dominant throughout an average hydrological year) are made of soils with insufficient resistance, especially to dynamic loads. These include easily liquefiable (thixotropy) loose sands or other weak soils, such as organic soils [5, 6]. Therefore, it seems that ensuring full mobility of military vehicles requires equipping mechanized infantry sub-units with devices and procedures enabling fast identification and reconnaissance of zones/location convenient for river bed fording [4, 22].

A crucial element that allows quickly obtaining remote-sensing data documenting the current state of the riverbed zone is the air segment. Important criteria in terms of selecting such a system include high time resolution, mobility, low sensitivity to adverse weather conditions and low imaging cost. Such requirements are currently met by both ultralight aircraft and many Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Both solutions, if equipped with appropriate image sensors, enable taking low-ceiling aerial photos of a quality sufficient to implement the assumed objectives.

Based on low-ceiling images in natural colours (RGB), taken by aerial systems with image recognition sensors, it was possible to identify elements/features of the Vistula and Buk riverbeds, which are important in terms of assessing geological and engineering conditions associated with their potential fording. Four basic groups of elements impacting bed bottom stability, bank stability, bed morphology and river bed process dynamics have been identified.

## **2. Research genesis**

The experience acquired based on analysing the source literature, which addresses preparation, reconnaissance and fording of water obstacles, shows that this process is time-consuming and requires the involvement of specialists (sappers, divers) [1, 7].

The scope of identifying geological and engineering conditions is also set by the technical parameters of vehicles that currently are or will be in the nearest future owned by the Polish Armed Forces.

Fording is one of the most difficult combat tasks and requires special efforts by all troop types [4]. According to Malinowski P. and Golczak Z. [4], the presence of additional factors complicating the course of action should be expected when fording water obstacles of medium width (up to 150 m), depth up to 3 m and mid stream speed to 1 m/s, which are

typical for Poland. Besides reasons associated with their character of subunit specificity, these factors may also result from the geological structure of river valleys [10].

Most large river sections within Poland, especially in the Polish Lowlands (such as the Vistula, Bug and Narew) are characterized by relatively wide beds, with a depth rarely exceeding 2.5 m under conditions of medium and low water levels [1]. This is, in many cases, the permissible fording depth for most modern structures [7, 13]. The option to quickly identify such zones within a riverbed can also be useful for many services responsible for crisis management, flood protection or border protection within sections made up of rivers [15].

Despite the large morphology variability over time, Polish Lowland riverbeds also contains stable zones. Bottom relief changes within them are minor and the bed is not deepened below a specified level. The alluvial bedrock of such zones contains soils with high washout resistance - hard-scoured formation, often in the form of thresholds. Fords often functioned in such areas in the past [12]. Simultaneously to the stable zones, which in the morphology of a river valley are often distinguished by a significant narrowing of the floodplain area [8, 9], the Polish Lowland river valleys contain zones where the bed is formed in low-strength formations – e.g., poorly compressed organic formations [10]. Minor riverbed depth in such places does not guarantee effective crossing.

The diversification of the geological structure of such river valleys and beds within the Polish Lowlands results from the lack of geomorphological formation maturity, which is the consequence of the region's genesis [2, 11, 20] and valley polygenesis, therefore, the share of other morphogenic factors in their formation, other than riverine. In most cases, the Polish Lowlands rivers were unable to remove all traces of their primary genesis through erosion and accumulation [11]. This fact promotes identification of zones with stable (and unstable) bed based on valley floor relief. Remote sensing methods are particularly effective in this regard [3, 17, 18].

### **3. Remote sensing methods applied in geological and engineering studies**

Remote sensing techniques have been used in the geological/geological-engineering surveys since the 1930s. Mainly monochromatic air photography was used in the early days of remote sensing. Phototonal diversity of their image (shades of grey) rather accurately reflects the diversity of surface formation moisture. This feature was used to determine the outcrop boundaries of individual lithological types of rocks/soils.

The development of photogrammetric techniques broadened the possibilities of geological cartography with recording land relief features. This enables precise identification of such geological environment elements that proved the specific morphodynamics of an analysed surface [3]. Similar possibilities in terms of identifying Earth's surface relief were created by the dissemination of radar images (obtained from SAR).

Another impetus behind geological remote sensing development was the emergence of satellite images. Herein, photographs were taken over various spectral ranges, and the common analysis of their images, also computer-aided, enabled identifying outcrop boundaries or tectonic structures that are hidden under several dozen meters of eluvia or other contemporary sediments.

The next stage in geological remote sensing development is associated with a significant improvement in the spatial resolution of satellite images. The availability of digital VHR (Very High Resolution) satellite images to civilian users is growing. They provided interpretative capabilities comparable to classic aerial photos, but are not burdened with many of their disadvantages. An increase in spatial resolution entails a development in the technology associated with simultaneous recording images on very many (often several hundred) spectral channels/ranges. The emergence of multi-spectral or high-resolution photographs, also multi-spectral or hyper-spectral images, not only contributed to increase precision in the identification of the Earth's surface lithology, but, moreover, created the possibility to conduct geochemical remote sensing.

An excellent identification tool, often used for identifying very subtle features of Earth's surface relief turned out to be aerial laser scanning (ALS) [3, 18, 23].

All of the aforementioned remote sensing methods enable recording a static image of the Earth's surface. This results from their low temporal resolution and the high costs of acquiring remote sensing data. Such a situation significantly limits the possible documenting of geological and engineering conditions in zones with greater dynamics of morpho- and lithoforming processes. These drawbacks are not exhibited by terrain fact recording methods based on ultralight aerial vehicles (UAV) and unmanned aerial vehicles (ULAV). They allow conducting a comprehensive observation series using various types of sensors – among others, digital cameras continuously recording within the visible light and IR spectra. The application of such remote sensing methodologies is particularly suitable for the observation of bed zones in lowland river valleys. The specificity of the Polish Lowlands river bed zone environment is the large variability of their morphology, and the bed bottom relief, which results from the river hydrological regime, shaped as a result of climate changes and economic human activity [11].

## **4. Research subject**

The research subject matter was a river understood as a natural watercourse, with a shaped bed and flowing under the action of gravity in the bed and valley, gouged due to erosive forces [16, 19].

The study covered selected valley fragments of two large lowland rivers – the central Vistula and the lower Bug.

In the case of the central Vistula, the authors decided to select two sections of a different nature that exhibit diverse dynamics of contemporary bed processes resulting from the difference in their geological structure. This was a section of gorge nature – a fragment

of the Małopolska river gorge near Solec nad Wisłą (SOLEC section) and a Vistula section of a lowland river nature near Gołąb and Dębina (GOŁĄB section). The 16 km long GOŁĄB section covered a Vistula valley fragment from km 379 (near Gołąb) to km 395 in the Dębina area. The 15 km long SOLEC section covered a Vistula valley fragment from km 326 (near Piotrawin) to km 341 in the Iłżanka estuary area [11].

In the case of the lower Bug, the study covered the easternmost fragment of the Lower Bug Valley [48] that is approx. 20 km long (km 80 - 100). Within this section, the Bug is of a lowland river nature with a meandering bed development type and a course close to latitudinal. Within the analysed valley fragment, detailed research covered two selection sections – MAŁKINIA and BROK. The first – a 4.5 km long MAŁKINIA section (km 94.5–99) is located in the eastern part of the study area. It covers a fragment of the bed zone from the road bridge in Małkinia to Podgórze, where an approx. 900 m Bug segment undercuts the upland edge. A railway bridge is located more or less in the middle of the MAŁKINIA section. In addition, there is an IMGW-PIB (Institute of Meteorology and Water Management - National Research Institute) water gauge post. The data from this post allowed to precisely determine water levels in the bed and flow rates during field research. The latter section – BROK, which is approx. 3.5 km long (km 83.5 - 87) is located in the western parts of the research area. It covers the part of the Bug riverbed zone from the estuary of the Brok river, to the railway bridge in Brok [21].

The sections selected for the research represent primary geological structures and morphodynamic types for riverine valleys of fluvial origin (erosive and accumulative).

## **5. Remote sensing work methodology**

The research included three stages. The first stage involved selecting test sites. Location-related decisions were based on the methodology of identifying the stability of Polish Lowlands rivers formulated in the work by T. Falkowski, which concerns natural riverbed stability [9]. The identification of zones that are potentially suitable for fording rivers was based on analysing the flood plain surface relief. The authors were particularly looking for locations where contemporary freshet erosions traces were concentrated on the surface of the flood plain. Such formations indicate the lack of any possibility to expand the bed cross section within a given fragment through lowering the bottom level and frequent damming of water when a freshet wave is passing or due to the formation of an ice jam [16, 21, 47]. Such a relief of a flood plain belt (so-called proximal flood plain; [24]) adjacent to the riverbed may suggest morphological bed stability, which means the presence of hard-to-wash-out alluvia substrate surface in the culmination bed [9, 10, 20].

The study involved taking photos/images using an ultralight aircraft and an unmanned aerial vehicle. One of the most important aspects of the in-house studies was to prepare for analysis, the remote sensing materials acquired by a Flying Laboratory of the Air Force Institute of Technology (Fig. 1) [15, 23].

Source data comprised of video footage in natural colours, recorded by a digital HD camera. The first stage of the work was to review the video material and select frames where the Vistula riverbed zone image within field test covered areas was recorded. In the case of particularly interesting sections, the authors decided to develop photo-sketches made up of several (from 4 to 12) image frames. For this purpose, individual frames were combined and then subjected to tessellated and saved as .TIF files. The files were then uploaded to the GIS database and calibrated based on permanent elements found in the Vistula riverbed zone. A digital surface model (DSM) was used for calibration due to the fact that Lidar measurements (ALS) were taken for both analysed sections at a very low water level. Elements of the riverbed hydrotechnical structures (heads and groins), as well as (to a smaller degree) anthropogenic elements in its direct vicinity (buildings, power lines or ferry crossings) recorded on both types of remote sensing materials turned out particularly suitable for calibrating aerial materials. A spatial resolution of 0.15 m was obtained for the recorded materials [57].



**Fig. 1.** Flying Laboratory of the Air Force Institute of Technology [23]

In addition, the remote sensing work included analysing thermal images of the riverbed zone acquired during research flights of the AFIT Flying Laboratory.

After analysing both types of remote sensing materials – a video footage in natural colours and a video taken with an IR camera – it was concluded that thermal imaging was characterized by a significantly lower spatial resolution than an HD video in colour, which results from the form of recording (lossy compression) data acquired by this remote sensing detector type. This is why, to identify the geological and engineering conditions in the riverbeds of the Vistula and Bug, the authors decided to mainly use HD materials in natural colours [3, 18].

The basic material for remote sensing of the riverbed zone consisted of photo-sketches based on videos taken in natural colours by the AFIT “Flying Laboratory”. Due to the nature of conducted work - the need to identify bed formations of complex morphology, as well as the nature of land relief formations located at various depths under water - it was decided to implement a manual classification method, which is deemed the most accurate, despite being very time-consuming.

The remote sensing work mainly appertained to identifying emerged and submerged riverbed formation, elements of riverbed hydrotechnical structures or their remains, course of the mainstream line, as well as elements that could indicate the stability of these facilities over time, e.g., vegetation therein. The authors also documented riverbed processes

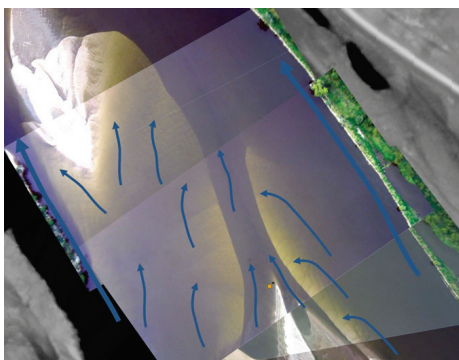
impacting geological and engineering conditions, as well as features directly indicating their course of occurrence. In case of doubts, auxiliary material (additional information source) was based on LIDAR data (NMPT), topographic maps and orthoimages from a national geoportal ([www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)). However, the latter exhibited limited suitability due to the fact that they were obtained at high water levels in the riverbed [15].

The remote sensing study also involved an attempt to assess the geological and engineering conditions significant from the perspective of river fording. The most important included the type and degree of compaction in the sediments making up the riverbed bottom and depth. This interpretation was verified based on the results of bathymetric measurements, geological soundings and field charting conducted at the same time [14].

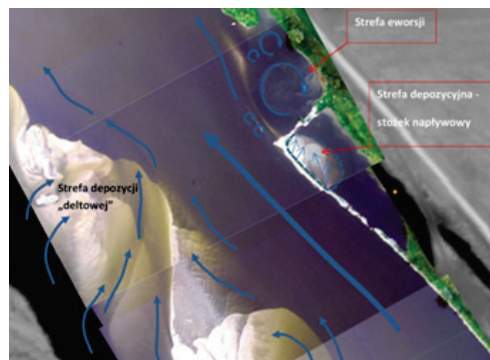
## 6. Research results

Low-ceiling photographs of the Vistula and Bug riverbed taken in natural colours (RGB) and IR) enabled identifying the following elements of the riverbed geological environment (geological and engineering conditions), important in terms of evaluating their potential fording (geological and engineering forecast):

- Bathymetry and bed dynamics:
  - Midstream line layout (Fig. 2);
  - Whirl occurrence zones (evorsion – Fig. 3);
  - Zones of water speed deceleration and stagnation (associated with the presence of weak soils);
- Diversification of alluvial soil load strength:
  - Weak soil occurrence zones;
  - Zones of non-cohesive compacted and moderately compacted soils;
- Zones on soils susceptible to thixotropic liquefaction within riverbanks - zones of intensive groundwater inflow to the riverbed.



**Fig. 2.** Midstream line layout [15]

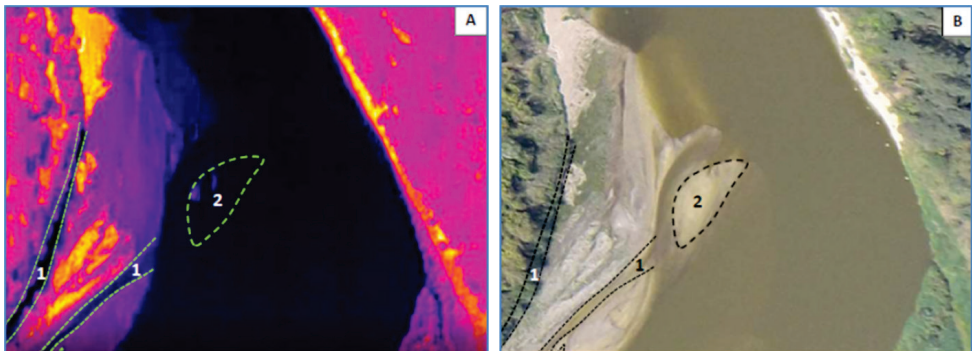


**Fig. 3.** Whirl occurrence zones [15]

The mainstream zone exhibits the darkest photons in the images. High flow velocities cause specific deposition in this zone. The photographs contain identifiable streaks of sandy sedimentation in the form of elongated, minor-height outwash or sandy streaks. The outwash is shown against a background of dark, sometimes grainy phototone that can be interpreted as bed pavement outcrops (Fig. 2).

The eversion background area is usually surrounded by a narrow, circular sandy deposition zone. Clear sandy streaks can also be identified near clusters of small whirls arranged into lines (Fig. 3).

Thermal images of the bed zone using the AFIT Flying Laboratory were acquired simultaneously to the natural colour images. The data in the form of video footage with a 320x240 resolution in a colourful, unnatural colour scale (“iron” palette) was recorded using a thermal imaging camera. Despite the use of a relatively simple detector with non-cooled, low spatial resolution sensors, the obtained images show they have the potential to be used as input data. The analysed thermal images can be an important supplement to the obtained natural-colour data, since they enable identifying bed zone features invisible within the visible light band.



**Fig. 4.** Bug river bed zone recorded with an IR camera (A) and a visible light band (B) [15]

Figure 4 shows a fragment of the Bug riverbed zone recorded with an IR camera (A) and a natural colour camera (B). The thermal image clearly shows inactive overflow beds (1), poorly visible under natural colours and a sandy outwash (2), which is visible on the natural colour image, while being practically invisible in the IR image.

Simultaneous acquisition of both types of images is advisable. They should be recorded in the form of single frames of a remote sensing image (photos) by sensors of possibly similar technical parameter of the lens (the observation angle and focal length, in particular), which will enable their even faster and more precise comparison.



## **7. Conclusions and summary**

In the low-ceiling, natural-colour (RGB) and IR images of the Vistula and Bug beds, the authors identified elements of the riverbed geological and engineering conditions significant in the perspective of assessing its fording possibilities, such as bathymetry, riverbed dynamics (midstream line layout, evorsion zones, water stagnation zones), variable load strength of alluvial soils (delta depositions zones, outwash, stabilized islands) and areas of weak soil occurrence (including zones of intensive groundwater inflow to the riverbed and the inflow of groundwater indicating their possible liquefaction impacted by dynamic stress).

The conducted research enabled developing initial assumptions for the methodology of an aerial system for identifying geological and engineering conditions in lowland riverbeds, and assumptions for constructing a photointerpretation key for riverbed zone features indicating the presence of geological and engineering conditions that favour fording locations.

The option to record riverbed conditions with a high frequency (temporal resolution) will enable identifying the dynamics of fluvial processes and forecasting river behaviour under various hydrological conditions. That information may be useful for assessing the safety of flood protection structures and other elements of the riverbed hydrotechnical development. The developed method also has the potential to be applied in crisis management.

Identification of geological and engineering conditions of fording water obstacles should be based on a quick and relatively simple data acquisition method. Such information should be of indicative nature. The catalogue of features identifying the geological and engineering conditions can be relatively easily transformed into an interpretative key that can be used even by people without thorough geological knowledge.

## **8. References**

1. Bębenek B., Kawka W., Wysocki K.: Taktyczno-inżynieryjne wymagania forsowania przeszkody wodnej - stan aktualny i perspektywy. AON, Warszawa 2015.
2. Bujakowski F., Falkowski T.: Hydrogeological Analysis Supported by Remote Sensing Methods as A Tool for Assessing the Safety of Embankments (Case Study from Vistula River Valley, Poland). *Water* 11(2), 266, 2019.
3. Ciołkosz A., Miszalski J., Olędzki J. R.: Interpretacja zdjęć lotniczych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1987.
4. Działania taktyczne wojsk lądowych, Podręcznik akademicki pod redakcją płk prof. dr. hab. Ścibiorka Z., podrozdział 4.7. Forsowanie przeszkód wodnych - płk dr Płonka I., AON, Warszawa 1995.

5. Falkowska E., Falkowski T., Tatur A., Kałmykow-Piwińska A.: Floodplain morphodynamics and distribution of trace elements in over bank deposits, Vistula River Valley Gorge near Solec nad Wisłą, Poland. *Acta Geologica Polonica* 3, 541-559, 2016.
6. Falkowski E.: Historia i prognoza rozwoju układu koryta wybranych odcinków rzek nizinnych Polski. *Biuletyn Geologiczny*, tom 12, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, 5-121, 1971.
7. Falkowski M., Mondel A.: Pokonywanie przeszkód wodnych w działaniach taktycznych. *Zeszyty Naukowe WSOWL Nr 1 (147) 2008 ISSN 1731-8157*.
8. Falkowski T.: Influence of the morphogenetic diversity of the Nida-Wkra river valley stretches on the conditions of underground flow. *Annals of WAU, Land Reclamation* 34, s. 51-64, 2003.
9. Falkowski T.: Naturalne czynniki stabilizujące wybrane odcinki strefy korytovej Wisły środkowej. Wydawnictwo SGGW w serii *Rozprawy Naukowe i Monografie*, s. 128, 2006.
10. Falkowski T.: The Application of geomorphological analysis of The Vistula River, Poland in evaluating the safety of regulation structures. *Acta Geologica Polonica* 57, 3, 377-390, 2007.
11. Falkowski T.: Różnicowanie warunków przepływu wód współczesnych równi zalewowych na Niżu Polskim na przykładzie doliny środkowej Wisły. *Przegląd Geologiczny* 63, 10/2, 710-714, 2015.
12. Falkowski T., Ostrowski P., Siwicki P., Brach M.: Channel morphology changes and their relationship to valley bottom geology and human interventions; a case study from the Vistula Valley in Warsaw, Poland. *Geomorphology* 297, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.011>.
13. Golan M.: Ocena zdolności wojsk inżynierskich w zakresie inżynierskiego pokonywania średnich przeszkód wodnych, *Monografia Taktyczno-inżynierskie wymagania forsowania przeszkody wodnej: stan aktualny i perspektywy*. s. 66-111, AON, Warszawa 2015.
14. Kaczyński R.R.: Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze Polski. *PIG-PIB*, Warszawa 2017.
15. Karczmarz D.: Dobór sensorów rozpoznania obrazowego dla oceny możliwości forsowania koryt przez pojazdy wojskowe, referat – materiały z III Konferencji Naukowej Geomorfologia stosowana – Procesy naturalne i aktywowane, 5-7 czerwca 2019 roku, Europejskie Centrum Edukacji Geologicznej, Chęciny, 2019.
16. Kowalski W.C.: *Geologia inżynierska*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1988.
17. Mądrzycki P.: Potrzeby rozpoznania warunków forsowania koryt rzecznych Niżu Polskiego przez pojazdy wojskowe w świetle normatywów NATO, referat – materiały z III Konferencji Naukowej Geomorfologia stosowana – Procesy naturalne i aktywowane, 5-7 czerwca 2019 roku, Europejskie Centrum Edukacji Geologicznej, Chęciny, 2019.

18. Ostrowski P.: Wykorzystanie wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych do identyfikacji form rzeźby wybranego fragmentu doliny Bugu. Manuskrypt pracy doktorskiej, Biblioteka Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW, Warszawa 2011.
19. Ostrowski P., Falkowski T.: Application of Remote Sensing Methods to Study the Relief of Lowland River Valleys with a Complex Geological Structure - A Case Study of the Bug River. *Water*, 12, 487, 2020, <https://doi.org/10.3390/w12020487>.
20. Ostrowski P., Falkowski T., Utratna-Żukowska M.: The Effect of Geological Channel Structures on Floodplain Morphodynamics of Lowland Rivers: A Case Study from the Bug River, Poland. *CATENA*, 202, 105209, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105209>.
21. Ostrowski, P., Utratna, M.: The hydrological conditions of the morphogenesis in relation to the selected erosional landforms on the floodplain of the Bug river valley. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* nr 27 (1), 2018.
22. Ratajczak T., Kośnik S.: Terenowy system meldunkowy z rozpoznania inżynierskiego. *Journal of KONBiN*, Iss. 2, 2011.
23. Szkudlarz H.: Latające Laboratorium na bazie lekkiego samolotu - wnioski z badań systemu do oceny możliwości forsowania koryta dużych rzek z powietrza, referat – materiały z III Konferencji Naukowej Geomorfologia stosowana – Procesy naturalne i aktywowane, 5-7 czerwca 2019 roku, Europejskie Centrum Edukacji Geologicznej, Chęciny, 2019.
24. Wierzbicki G., Ostrowski P., Falkowski T., Mazgajski M.: Geological setting control of flood dynamics in lowland rivers (Poland). *Science of the Total Environment (STOTEN)* 636, 2018, [doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.250](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.250).

# **IDENTYFIKACJA GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKICH WARUNKÓW FORSOWANIA KORYTA DUŻEJ RZEKI NIZINNEJ W OPARCIU O ZDJĘCIA LOTNICZE WYKONYWANE AD HOC Z NISKIEGO PUŁAPU**

## **1. Wprowadzenie**

Na obszarze naszego kraju, a szczególnie na Niżu Polskim, większość odcinków koryt dużych rzek (takich jak Wisła, Bug, Narew) charakteryzuje się stosunkowo szerokimi korytami o głębokości rzadko przekraczającej 2,5 m w warunkach średnich i niskich stanów wody. Jest to, w wielu przypadkach, dopuszczalna głębokość brodzenia większości nowoczesnych konstrukcji [1, 15]. Jednak na wielu odcinkach dna koryt rzecznych w warunkach średnich i niskich stanów wody (jakie dominują w przeciętnym roku hydrologicznym) zbudowane są z gruntów o niewystarczającej wytrzymałości szczególnie na obciążenia dynamiczne. Są to piaski w stanie luźnym, łatwo podlegające upłynięciu (tikotropii), albo inne słabe grunty, takie jak grunty organiczne [5, 6]. Wydaje się zatem, że dla zapewnienia pełnej mobilności pojazdów wojskowych powinno być wyposażenie pododdziałów wojsk zmechanizowanych w sprzęt i procedury, które umożliwią szybkie odnajdywanie i rozpoznanie stref/miejsc dogodnych do forsowania koryt [4, 22].

Kluczowym elementem, pozwalającym na szybkie pozyskanie danych teledetekcyjnych dokumentujących aktualny stan strefy korytowej, jest segment lotniczy. Ważnymi kryteriami w przypadku wyboru systemu powinna być jego duża rozdzielczość czasowa, mobilność, mała wrażliwość na niekorzystne warunki meteorologiczne oraz niski koszt wykonania obrazowań. Warunki takie spełniają obecnie zarówno lekkie samoloty (*ultralight aircrafts*), jak i duża część bezzałogowych systemów powietrznych (BSP). Oba rozwiązania w przypadku zastosowania odpowiednich sensorów obrazowych pozwalają na wykonanie zdjęć lotniczych z niskiego pułapu o jakości odpowiedniej do realizacji założonych celów.

Na podstawie obrazowań w barwach naturalnych (RGB), wykonanych z niskiego pułapu przez platformy powietrzne z sensorami rozpoznania obrazowego, możliwe było rozpoznanie elementów/cech koryta Wisły i Bugu istotnych do oceny warunków geologiczno-inżynierskich powiązanych z możliwością ich forsowania. Zidentyfikowano cztery podstawowe grupy elementów wpływających na: stabilność dna koryta, stabilność brzegów, morfologię koryta oraz dynamikę procesów korytowych.

## **2. Geneza badań**

Z doświadczeń zebranych na podstawie analizy literatury, obejmującej przygotowanie, rozpoznanie i forsowanie przeszkód wodnych, wynika, że proces ten jest czasochłonny i wymaga zaangażowania specjalistów (saperów, pletwonurków) [1, 7].

Zakres rozpoznania warunków geologiczno-inżynierskich wyznaczają także parametry techniczne pojazdów, które są obecnie lub w najbliższej przyszłości znajdą się w wyposażeniu Sił Zbrojnych RP.

Forsowanie jest jednym z najtrudniejszych działań bojowych i wymaga szczególnego wysiłku wszystkich rodzajów wojsk [4]. Według P. Malinowskiego i Z. Golczaka [4] w trakcie forsowania przeszkód wodnych o średniej szerokości (do 150 m) i głębokości do 3 m oraz prędkości nurtu do 1 m/s, które uznaje się za typowe dla obszaru Polski, należy przewidywać występowanie dodatkowych czynników komplikujących przebieg działań. Czynniki te, poza przyczynami związanymi z ich charakterem czy specyfiką pododdziałów, wynikać mogą także z budowy geologicznej dolin rzecznych [10].

Na obszarze naszego kraju, a szczególnie na Niziu Polskim większość odcinków dużych rzek (jak Wisła, Bug, Narew) charakteryzuje się stosunkowo szerokimi korytami o głębokości w warunkach średnich i niskich stanów wody rzadko przekraczającej 2,5 m [1]. Jest to, w wielu przypadkach, dopuszczalna głębokość brodzenia większości nowoczesnych pojazdów [7, 13]. Możliwość szybkiej identyfikacji takich stref w korycie rzeki może być także przydatna dla wielu służb odpowiedzialnych za zarządzanie kryzysowe, ochronę przeciwpowodziową czy też ochronę granic na odcinkach, gdzie stanowią je rzeki [15].

Mimo dużej zmienności morfologii w czasie, w korytach rzek na Niziu Polskim występują także strefy stabilne. W ich obrębie zmiany rzeźby dna są niewielkie, a koryto nie jest pogłębiane poniżej określonego poziomu. W strefach takich, w podłożu aluwii, występują grunty o dużej odporności na rozmywanie – utwory trudno rozmywalne, mające często charakter progów [10]. W przeszłości w miejscach takich bardzo często funkcjonowały brody [12]. Jednocześnie ze strefami stabilnymi, które w morfologii doliny rzecznej zaznaczają się często wyraźnym zwężeniem obszaru równi zalewowej [8, 9], w dolinach rzek na Niziu Polskim występują także strefy, gdzie koryto uformowane jest w utworach słabonośnych – np. słabo skompresowanych utworach organicznych [10]. Niewielka głębokość koryta w takich miejscach nie gwarantuje skutecznej przeprawy.

Zróznicowanie budowy geologicznej odcinków dolin i koryt rzecznych na obszarze Niziu Polskiego jest efektem braku dojrzałości geomorfologicznej form wynikającej z glacialnej genezy obszaru [2, 11, 20] oraz z poligenezy dolin, a więc udziału w ich kształtowaniu innych poza rzecznych czynników morfotwórczych. Rzeki na Niziu Polskim nie zdołały w ogromnej liczbie przypadków w drodze erozji i akumulacji usunąć wszystkich śladów ich pierwotnej genezy [11]. Fakt ten sprzyja identyfikacji stref występowania stabilnych (i niestabilnych) odcinków koryta poprzez cechy rzeźby dna doliny. Szczególnie efektywne są w tym zakresie metody teledetekcyjne [3, 17, 18].

### **3. Techniki teledetekcyjne stosowane w badaniach geologiczno-inżynierskich**

Techniki teledetekcyjne stosowane są w badaniach geologicznych/geologiczno-inżynierskich od lat 30. ubiegłego wieku. W początkach teledetekcji geologicznej wykorzystywane były głównie monochromatyczne zdjęcia lotnicze. Zróżnicowanie fototonalne ich obrazu (odcienie szarości) dość precyzyjnie odzwierciedla zróżnicowanie uwilgotnienia utworów powierzchniowych. Cecha ta była wykorzystywana do wyznaczania granic wychodni poszczególnych typów litologicznych skał/gruntów.

Rozwój technik fotogrametrycznych wzbogacił możliwości kartografii geologicznej o rejestrację cech rzeźby terenu. Dzięki temu możliwa stała się precyzyjna identyfikacja tych elementów środowiska geologicznego, które świadczą o określonej morfodynamice analizowanej powierzchni [3]. Podobne możliwości identyfikacji reliefu powierzchni Ziemi stworzyło upowszechnienie się zdjęć radarowych (uzyskanych z SAR).

Kolejnym impulsem w rozwoju teledetekcji geologicznej było pojawienie się zdjęć satelitarnych. Wykonywano zdjęcia w różnych przedziałach widma, a wspólna analiza ich obrazu, prowadzona także z wykorzystaniem komputerów, pozwoliła na identyfikację granic wychodni czy struktur tektonicznych, które ukryte były pod kilkudziesięciometrową warstwą zwietrzelin i innych współczesnych osadów.

Następny krok w rozwoju teledetekcji geologicznej związany jest ze znaczącą poprawą rozdzielczości przestrzennej zobrazowań satelitarnych. Coraz szerzej dostępne są także dla użytkowników cywilnych cyfrowe zdjęcia satelitarne VHR (Very High Resolution), dające zdolności interpretacyjne porównywalne do klasycznych zdjęć lotniczych, ale wolne od wielu ich wad. Wraz ze wzrostem rozdzielczości przestrzennej obserwuje się rozwój technologii związanej z rejestracją obrazów na bardzo wielu (często kilkuset) kanałach/przedziałach widma jednocześnie. Pojawienie się wielospektralnych, wysokorozdzielczych zdjęć, a także zobrazowań multispektralnych czy hiperspektralnych wpłynęło nie tylko na zwiększenie precyzji rozpoznawania litologii powierzchni Ziemi, ale także stworzyło możliwości prowadzenia teledetekcji geochemicznej.

Doskonałym narzędziem do identyfikacji, często bardzo subtelnych cech reliefu powierzchni Ziemi, okazał się wprowadzony do użytku lotniczy skaning laserowy (ALS) [3, 18, 23].

Wszystkie wymienione powyżej metody teledetekcyjne pozwalają na rejestrację statycznego obrazu powierzchni Ziemi, co wynika z ich niskiej rozdzielczości czasowej oraz wysokich kosztów pozyskania danych teledetekcyjnych. Znacznie ogranicza to możliwości dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich w strefach o większej dynamice procesów morfo- i litotwórczych. Mankamentów tych nie mają metody rejestracji faktów terenowych oparte na wykorzystaniu ultralekkich statków powietrznych (USP) oraz bezałogowych statków powietrznych (BSP). Pozwalają one bowiem na wykonywanie całych serii obserwacji z wykorzystywaniem różnych typów sensorów – także kamer cyfrowych rejestrujących w sposób ciągły w paśmie widzialnym i w podczerwieni. Zastosowanie tego typu metodyki badań teledetekcyjnych jest szczególnie odpowiednie do

obserwacji stref korytowych w dolinach rzek nizinnych. Specyfiką środowiska stref korytowych na obszarze Niżu Polskiego jest duża zmienność ich morfologii, a także ukształtowania powierzchni dna koryta, będąca wynikiem specyfiki reżimu hydrologicznego rzek, ukształtowanego w wyniku zmian klimatycznych i gospodarczej działalności człowieka [11].

## **4. Obiekt badań**

Obiektem badań była rzeka rozumiana jako ciek naturalny, mający ukształtowane koryto i płynący pod działaniem siły ciężkości w łożysku i dolinie, wyżłobionych w wyniku działania sił erozyjnych [16, 19].

Badaniami objęto wybrane fragmenty dolin dwóch dużych rzek nizinnych – Wisły środkowej i dolnego Bugu.

W przypadku Wisły środkowej zdecydowano się na wybór dwóch odcinków o odmiennym charakterze i dynamice współczesnych procesów korytowych wynikającej z różnic w ich budowie geologicznej. Był to odcinek o charakterze przełomowym – fragment małopolskiego przełomu rzeki w okolicach Solca nad Wisłą (odcinek SOLEC) oraz odcinek Wisły o charakterze rzeki nizinnej w okolicach Gołębia i Dębłina (odcinek GOŁĄB). Odcinek GOŁĄB, o długości 16 km, obejmował fragment doliny Wisły od km 379 (w rejonie miejscowości Gołąb) do km 395 w rejonie Dębłina. Odcinek SOLEC, o długości 15 km, obejmował fragment doliny Wisły od km 326 (w rejonie miejscowości Piotrawin) do km 341 w rejonie ujścia Iłżanki [11].

W przypadku dolnego Bugu badaniami objęto najbardziej wysunięty na wschód fragment Doliny Dolnego Bugu [48] o długości ok. 20 km (km 80–100). Bug na tym odcinku ma charakter rzeki nizinnej o meandrującym typie rozwinięcia koryta i przebiegu zbliżonym do równoleżnikowego. W analizowanym fragmencie doliny do szczegółowych badań wytypowano dwa odcinki – MAŁKINIA i BROK. Pierwszy z nich – odcinek MAŁKINIA, o długości ok. 4,5 km (km 94,5–99), znajduje się we wschodniej części terenu badań. Obejmuje on fragment strefy korytovej od mostu drogowego w Małkini do miejscowości Podgórze, gdzie Bug na długości ok. 900 m podcina krawędź wysoczyzny. Mniej więcej w połowie odcinka MAŁKINIA zlokalizowany jest modernizowany obecnie most kolejowy. W sąsiedztwie mostu drogowego w Małkini znajduje się posterunek wodowskazowy IMGW-PIB. Dane z tego posterunku pozwoliły na precyzyjne określenie stanów wody w korycie i przepływów podczas prowadzenia badań terenowych. Drugi odcinek – BROK, o długości ok. 3,5 km (km 83,5–87), położony jest w zachodniej części terenu badań. Obejmuje on fragment strefy korytovej Bugu od ujścia rzeki Brok do mostu kolejowego w Broku [21].

Wybrane do badań odcinki reprezentują główne typy budowy geologicznej i morfodynamiki dolin rzecznych o genezie fluwialnej (erozyjno-akumulacyjnych).

## 5. Metodyka prac teledetekcyjnych

Badania były realizowane w trzech etapach. W pierwszym przeprowadzono wybór poligonów badawczych. Decyzje lokalizacyjne oparto na metodyce rozpoznania stabilności koryt rzek Niziny Polskiej, sformułowanej w pracy T. Falkowskiego, dotyczącej naturalnej stabilizacji koryt [9]. Identyfikacja stref potencjalnie dogodnych do prowadzenia przepraw opierała się na analizie rzeźby powierzchni równi zalewowej. W szczególności poszukiwano miejsc, gdzie na powierzchni równi zalewowej znajduje się zagęszczenie śladów współczesnej erozji wezbraniowej. Formy takie wskazują na brak możliwości powiększenia na danym odcinku przekroju koryta poprzez obniżenie poziomu dna i częste piętrzenie wód w czasie przechodzenia fali wezbraniowej albo w efekcie utworzenia się zatoru lodowego [16, 21,47]. Taka rzeźba przyległego do koryta pasa powierzchni równi zalewowej (tzw. proksymalnej równi zalewowej; [24]) sugerować może morfologiczną stabilność dna, czyli obecność w korycie kulminacji powierzchni trudno rozmywalnego podłoża aluwiiów [9, 10, 20].

Badania obejmowały wykonywanie zdjęć/zobrazowań z wykorzystaniem lekkiego samolotu oraz bezzałogowego statku powietrznego. Jednym z najważniejszych elementów prac kameralnych było przygotowanie do analizy materiałów teledetekcyjnych pozyskanych przez Latające Laboratorium Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych (rys. 1) [15, 23].



**Rys. 1.** Latające Laboratorium Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych [23]

Dane źródłowe stanowił kolorowy materiał filmowy w barwach naturalnych zarejestrowany cyfrową kamerą HD. Pierwszym etapem prac był przegląd materiału filmowego i wybór klatek, na których zarejestrowano obraz strefy korytowej Wisły na odcinkach objętych badaniami terenowymi. Dla szczególnie interesujących odcinków zdecydowano się wykonać fotoszkiełce złożone z kilku (od 4 do 12) klatek obrazu. W tym celu poszczególne klatki zostały połączone, a następnie poddane procesowi mozaikowania i zapisane w postaci plików TIF. Pliki te zostały umieszczone w bazie danych GIS i poddane kalibracji w oparciu o trwałe elementy występujące w strefie korytowej Wisły. Do kalibracji wykorzystano Numeryczny Model Pokrycia Terenu ze względu na fakt, że dla obu analizowanych odcinków pomiary lidarowe (ALS) wykonano przy niskim stanie wody. Do kalibracji materiałów lotniczych szczególnie przydatne okazały się zarejestrowane na obu typach materiałów teledetekcyjnych elementy zabudowy hydrotechnicznej koryta (główki i tamy poprzeczne) oraz (w mniejszym stopniu) elementy antropogeniczne w bezpośrednim



jego sąsiedztwie (budynki, linie energetyczne czy przeprawy promowe). W przypadku zarejestrowanych materiałów uzyskano rozdzielczość przestrzenną 0,15 m [57].

W ramach prac teledetekcyjnych analizowano także zobrażenia termalne strefy korytowej pozyskane podczas lotów badawczych przez Latające Laboratorium ITWL.

Po analizie porównawczej obu typów materiałów teledetekcyjnych – kolorowego filmu w barwach naturalnych oraz filmu wykonanego kamerą IR – stwierdzono, że zobrażenia termalne charakteryzują się znacznie mniejszą rozdzielczością przestrzenną niż kolorowy film HD, co wynika z formy zapisu (kompresja stratna) danych pozyskiwanych przez ten typ sensora teledetekcyjnego. Dlatego też do identyfikacji warunków geologiczno-inżynierskich w korytach Wisły i Bugu zdecydowano się wykorzystać głównie materiały HD w barwach naturalnych [3, 18].

Podstawowy materiał do teledetekcji strefy korytowej stanowiły fotoszkiecy na podstawie filmów wykonanych w barwach naturalnych przez Latające Laboratorium ITWL. Ze względu na charakter prowadzonych prac, to znaczy konieczność identyfikacji form korytowych o złożonej morfologii, a także form rzeźby znajdujących się na różnych głębokościach pod powierzchnią wody, zdecydowano się na metodę klasyfikacji manualnej, która mimo dużej czasochłonności jest uznawana za najdokładniejszą.

Podczas prac teledetekcyjnych identyfikowano głównie wynurzone i zanurzone formy korytowe, elementy zabudowy hydrotechnicznej koryta lub ich pozostałości, przebieg linii głównego nurtu, a także elementy mogące wskazywać na stabilność tych obiektów w czasie, np. występującą w ich obrębie szatę roślinną. Dokumentowano także wpływające na warunki geologiczno-inżynierskie procesy korytowe oraz cechy wskazujące pośrednio na ich przebieg lub występowanie. W przypadkach wątpliwych materiał pomocniczy (dodatkowe źródło informacji) stanowiły dane LIDAR (NMPT), mapy topograficzne i ortofotomapy z geoportalu narodowego ([www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)). Te ostatnie miały jednak ograniczoną przydatność ze względu na fakt, że zostały wykonane przy wysokich stanach wody w korycie [15].

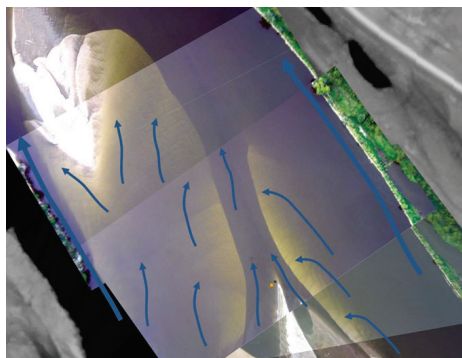
W ramach prac teledetekcyjnych podjęto próbę oceny warunków geologiczno-inżynierskich istotnych z punktu widzenia forsowania rzeki. Do najważniejszych należały rodzaj i stopień zagęszczenia osadów budujących dno koryta oraz głębokość. Interpretacja ta została zweryfikowana na podstawie wyników przeprowadzonych w tym samym czasie pomiarów batymetrycznych, sondowań geologicznych i kartowania terenowego [14].

## **6. Wyniki badań**

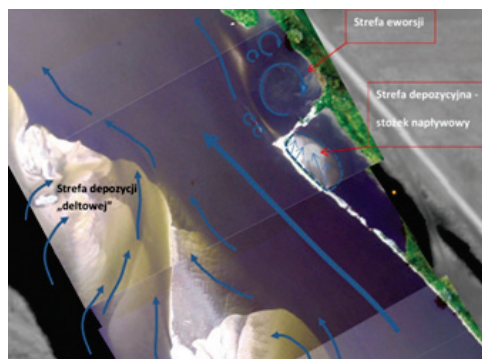
Zdjęcia koryta Wisły i Bugu wykonane z niskiego pułapu, w barwach naturalnych (RGB) i IR, umożliwiły rozpoznanie następujących elementów środowiska geologicznego (warunków geologiczno-inżynierskich) koryta, istotnych dla oceny możliwości ich forsowania (prognozy geologiczno-inżynierskiej):

- Batymetria i dynamika koryta:
  - układ linii nurtu (rys. 2),

- strefy występowania zawirowań (eworsji – rys. 3),
  - strefy zwolnienia prędkości i stagnacji wód (związane z występowaniem gruntów słabych).
- Zróżnicowanie wytrzymałości gruntów aluwialnych na obciążenie:
- strefy występowania gruntów słabych,
  - strefy występowania gruntów niespoistych zagęszczonych i średnio zagęszczonych.
- Strefy występowania w brzegach koryta gruntów podatnych na tiksotropowe upłynnienie – strefy intensywnego dopływu wód gruntowych do koryta.



**Rys. 2.** Układ linii nurtu [15]

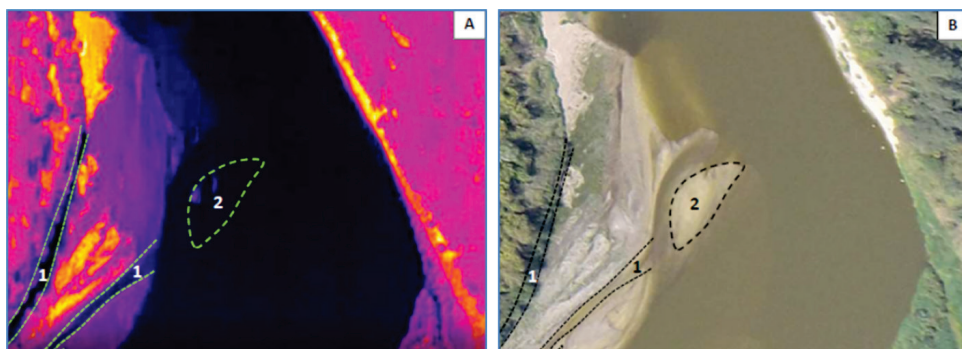


**Rys. 3.** Strefy występowania zawirowań [15]

Strefę głównego nurtu na zdjęciach wskazują najciemniejsze fototony. Duże prędkości przepływu są przyczyną specyficznej depozycji w tej strefie. Na zdjęciach rozpoznawalne są smugi osadu piaszczystego w postaci wydłużonych, niewielkiej wysokości odsypów bądź piaszczystych smug. Tło dla tych odsypów stanowi ciemny, niekiedy ziarnisty fototon, który można interpretować jako wychodnie bruku korytowego (rys. 2).

Obszar kotła eworsyjnego jest przeważnie otoczony wąską, kolistą strefą depozycji piaszczystej. Wyraźne smugi piaszczyste rozpoznawalne są także w sąsiedztwie ułożonych w ciągi zespołów małych zawirowań (rys. 3).

Jednocześnie ze zdjęciami w barwach naturalnych z wykorzystaniem Latającego Laboratorium ITWL pozyskano zobrazowania termalne strefy korytowej. Dane w postaci zapisu wideo o rozdzielczości 320×240 pikseli w kolorowej, nienaturalnej skali barwnej (paleta barw „iron”) zarejestrowano kamerą termalną. Mimo zastosowania stosunkowo prostego czujnika z sensorem niechłodzonym o niskiej rozdzielczości przestrzennej uzyskane zobrazowania wskazują na potencjalną ich użyteczność jako danych wejściowych. Analizowane zobrazowania termalne mogą być ważnym uzupełnieniem danych pozyskiwanych w barwach naturalnych, gdyż pozwalają na identyfikację cech strefy korytowej niewidocznych w paśmie widzialnym.



Rys. 4. Strefa korytowa Bugu zarejestrowana kamerą IR (A) i pasma widzialnego (B) [15]

Rysunek 4 przedstawia fragment strefy korytowej Bugu zarejestrowany kamerą termalną (A) oraz w barwach naturalnych (B). Na zdjęciu termalnym dobrze zaznaczone są nieaktywne koryta przelewowe (1), słabo widoczne w barwach naturalnych, oraz piaszczysty odsyp (2), który jest widoczny na zobrazowaniu w barwach naturalnych, natomiast jest praktycznie niewidoczny na zobrazowaniu termalnym.

Celowe jest jednoczesne pozyskiwanie obu typów zobrazowań. Powinny być one rejestrowane w formie pojedynczych klatek obrazu teledetekcyjnego (zdjęć) przez sensory o możliwie zbliżonych parametrach technicznych obiektywu (zwłaszcza kąta obserwacji i ogniskowej), co pozwoli na ich szybsze i bardziej precyzyjne porównanie.

## 7. Wnioski i podsumowanie

Na zdjęciach koryta Wisły i Bugu wykonanych z niskiego pułapu w barwach naturalnych (RGB) i IR zidentyfikowano elementy warunków geologiczno-inżynierskich koryta istotnych dla oceny możliwości jego forsowania jak: batymetrię, dynamikę koryta (układ linii nurtu, strefy eworsji, strefy stagnacji wód), zróżnicowanie wytrzymałości gruntów aluwialnych na obciążenia (strefy depozycji deltowej, odsypy, ustabilizowane wyspy) oraz strefy występowania gruntów słabych (w tym strefy intensywnego dopływu wód gruntowych do koryta i dopływ wód gruntowych, wskazujących na możliwość ich upłynięcia pod wpływem naprężeń dynamicznych).

Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie wstępnych założeń metodyki systemu identyfikacji warunków geologiczno-inżynierskich w korytach rzek nizinnych z powietrza oraz założeń konstrukcji klucza fotointerpretacyjnego cech strefy korytowej wskazujących na występowanie warunków geologiczno-inżynierskich dogodnych do lokalizacji przepraw.

Możliwość rejestracji stanu koryta z dużą częstotliwością (rozdzielczością czasową) pozwoli na identyfikację dynamiki procesów fluwialnych i przewidywanie zachowania się rzeki w różnych warunkach hydrologicznych. Informacje te mogą być przydatne w ocenie

bezpieczeństwa budowli ochrony przeciwpowodziowej i innych elementów zabudowy hydrotechnicznej koryta. Opracowana metoda ma także potencjał do zastosowania w zarządzaniu kryzysowym.

Rozpoznanie warunków geologiczno-inżynierskich przepraw przez przeszkody wodne powinno opierać się na szybkim i stosunkowo prostym do wykonania sposobie pozyskiwania informacji. Informacje te powinny mieć charakter wskaźnikowy, indykacyjny. Katalog cech identyfikujących określone warunki geologiczno-inżynierskie stosunkowo łatwo można przekształcić w klucz interpretacyjny możliwy do zastosowania nawet przez osoby niemające gruntownej wiedzy geologicznej.

## **8. Literatura**

1. Bębenek B., Kawka W., Wysocki K.: Taktyczno-inżynierskie wymagania forsowania przeszkody wodnej - stan aktualny i perspektywy. AON, Warszawa 2015.
2. Bujakowski F., Falkowski T.: Hydrogeological Analysis Supported by Remote Sensing Methods as A Tool for Assessing the Safety of Embankments (Case Study from Vistula River Valley, Poland). *Water* 11(2), 266, 2019.
3. Ciołkosz A., Miszalski J., Olędzki J. R.: Interpretacja zdjęć lotniczych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1987.
4. Działania taktyczne wojsk lądowych, Podręcznik akademicki pod redakcją płk prof. dr. hab. Ścibiora Z., podrozdział 4.7. Forsowanie przeszkód wodnych - płk dr Płonka I., AON, Warszawa 1995.
5. Falkowska E., Falkowski T., Tatur A., Kałmykow-Piwińska A.: Floodplain morphodynamics and distribution of trace elements in over bank deposits, Vistula River Valley Gorge near Solec nad Wisłą, Poland. *Acta Geologica Polonica* 3, 541-559, 2016.
6. Falkowski E.: Historia i prognoza rozwoju układu koryta wybranych odcinków rzek nizinnych Polski. *Biuletyn Geologiczny*, tom 12, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, 5-121, 1971.
7. Falkowski M., Mondel A.: Pokonywanie przeszkód wodnych w działaniach taktycznych. *Zeszyty Naukowe WSOWL Nr 1 (147) 2008 ISSN 1731-8157*.
8. Falkowski T.: Influence of the morphogenetic diversity of the Nida-Wkra river valley stretches on the conditions of underground flow. *Annals of WAU, Land Reclamation* 34, s. 51-64, 2003.
9. Falkowski T.: Naturalne czynniki stabilizujące wybrane odcinki strefy korytowej Wisły środkowej. Wydawnictwo SGGW w serii *Rozprawy Naukowe i Monografie*, s. 128, 2006.
10. Falkowski T.: The Application of geomorphological analysis of The Vistula River, Poland in evaluating the safety of regulation structures. *Acta Geologica Polonica* 57, 3, 377-390, 2007.

11. Falkowski T.: Różnicowanie warunków przepływu wód współczesnych równi zalewowych na Niżu Polskim na przykładzie doliny środkowej Wisły. *Przegląd Geologiczny* 63, 10/2, 710-714, 2015.
12. Falkowski T., Ostrowski P., Siwicki P., Brach M.: Channel morphology changes and their relationship to valley bottom geology and human interventions; a case study from the Vistula Valley in Warsaw, Poland. *Geomorphology* 297, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.011>.
13. Golan M.: Ocena zdolności wojsk inżynierskich w zakresie inżynierskiego pokonywania średnich przeszkód wodnych, Monografia Taktyczno-inżynierskie wymagania forsowania przeszkody wodnej: stan aktualny i perspektywy. s. 66-111, AON, Warszawa 2015.
14. Kaczyński R.R.: Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze Polski. PIG-PIB, Warszawa 2017.
15. Karczmarz D.: Dobór sensorów rozpoznania obrazowego dla oceny możliwości forsowania koryt przez pojazdy wojskowe, referat – materiały z III Konferencji Naukowej Geomorfologia stosowana – Procesy naturalne i aktywowane, 5-7 czerwca 2019 roku, Europejskie Centrum Edukacji Geologicznej, Chęciny, 2019.
16. Kowalski W.C.: Geologia inżynierska. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1988.
17. Mądrzycki P.: Potrzeby rozpoznania warunków forsowania koryt rzecznych Niżu Polskiego przez pojazdy wojskowe w świetle normatywów NATO, referat – materiały z III Konferencji Naukowej Geomorfologia stosowana – Procesy naturalne i aktywowane, 5-7 czerwca 2019 roku, Europejskie Centrum Edukacji Geologicznej, Chęciny, 2019.
18. Ostrowski P.: Wykorzystanie wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych do identyfikacji form rzeźby wybranego fragmentu doliny Bugu. Manuskrypt pracy doktorskiej, Biblioteka Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW, Warszawa 2011.
19. Ostrowski P., Falkowski T.: Application of Remote Sensing Methods to Study the Relief of Lowland River Valleys with a Complex Geological Structure - A Case Study of the Bug River. *Water*, 12, 487, 2020, <https://doi.org/10.3390/w12020487>.
20. Ostrowski P., Falkowski T., Utratna-Żukowska M.: The Effect of Geological Channel Structures on Floodplain Morphodynamics of Lowland Rivers: A Case Study from the Bug River, Poland. *CATENA*, 202, 105209, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105209>.
21. Ostrowski, P., Utratna, M.: The hydrological conditions of the morphogenesis in relation to the selected erosional landforms on the floodplain of the Bug river valley. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* nr 27 (1), 2018.
22. Ratajczak T., Kośnik S.: Terenowy system meldunkowy z rozpoznania inżynierskiego. *Journal of KONBiN*, Iss. 2, 2011.

23. Szkudlarz H.: Latające Laboratorium na bazie lekkiego samolotu - wnioski z badań systemu do oceny możliwości forsowania koryta dużych rzek z powietrza, referat – materiały z III Konferencji Naukowej Geomorfologia stosowana – Procesy naturalne i aktywowane, 5-7 czerwca 2019 roku, Europejskie Centrum Edukacji Geologicznej, Chęciny, 2019.
24. Wierzbicki G., Ostrowski P., Falkowski T., Mazgajski M.: Geological setting control of flood dynamics in lowland rivers (Poland). *Science of the Total Environment (STOTEN)* 636, 2018, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.250.