

A c t a  
Universitatis  
Lodzianensis

FOLIA GEOGRAPHICA PHYSICA

21  
2022



WYDAWNICTWO  
UNIWERSYTETU  
ŁÓDZKIEGO

# A c t a Universitatis Lodziensis

FOLIA GEOGRAPHICA PHYSICA

21  
2022

pod redakcją  
Zbigniewa Rdzanego



 WYDAWNICTWO  
UNIwersYTETU  
ŁÓDZKIEGO

ŁÓDŹ 2022

C O P E  
Member since 2021  
JM15101

## REDAKCJA

ACTA UNIVERSITATIS LODZIENSIS. FOLIA GEOGRAPHICA PHYSICA

*Zbigniew Rdzany* (redaktor naczelny), *Jan Degirmendzić* (redaktor statystyczny)  
*Jolanta Fiszbak* (redaktor językowy), *Anna Majchrowska* (redaktor tematyczny – geografia fizyczna, geoekologia)  
*Aleksander Szmidt* (redaktor tematyczny – GIS, kartografia cyfrowa), *Małgorzata Frydrych* (sekretarz redakcji)

## RADA REDAKCYJNA

*Paweł Jokiel* (Uniwersytet Łódzki), *Tomasz Kalicki* (Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Kielce)  
*Polina Lemenkova* (Université Libre de Bruxelles, École polytechnique de Bruxelles)  
*Adam Łajczak* (Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie), *Ján Novotný* (Słowacka Akademia Nauk, Bratysława)  
*Eva Pauditšová* (Uniwersytet Komeńskiego w Bratysławie), *Mariusz Szubert* (Uniwersytet Pedagogiczny im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie)

## RECENZENCI

*Tadeusz Ciupa* (Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach)  
*Tomasz Kalicki* (Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach)  
*Elżbieta Kobjek* (Uniwersytet Łódzki), *Stanisław Krysiak* (Uniwersytet Łódzki)  
*Daniel Okupny* (Uniwersytet Szczeciński), *Wojciech Tołoczko* (Uniwersytet Łódzki)

## REDAKTOR INICJUJĄCY

*Sylwia Mosińska*

## KOREKTA I SKŁAD KOMPUTEROWY

*Aleksandra Retkiewicz*

## KOREKTA TECHNICZNA

*Elżbieta Rzymkowska*

## PROJEKT OKŁADKI

*Agencja Reklamowa efectoro.pl*

Opublikowano gotowe materiały dostarczone do Wydawnictwa UŁ  
przez Wydział Nauk Geograficznych

ISSN 1427-9711

e-ISSN 2353-6063

© Copyright by Authors, Łódź 2022

© Copyright for this edition by Uniwersytet Łódzki, Łódź 2022

Redakcja Acta Universitatis Lodziensis. Folia Geographica Physica  
90-139 Łódź, ul. Narutowicza 88  
tel. (+48 42) 665 59 35  
<http://foliagp.geo.uni.lodz.pl/>  
e-mail: [geogrfiz@geo.uni.lodz.pl](mailto:geogrfiz@geo.uni.lodz.pl)

Wydane przez Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego  
Wydanie I.W.10710.22.0.Z

Ark. druk. 6,0

Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego  
90-237 Łódź, ul. Jana Matejki 34A  
[www.wydawnictwo.uni.lodz.pl](http://www.wydawnictwo.uni.lodz.pl)  
e-mail: [ksiegarnia@uni.lodz.pl](mailto:ksiegarnia@uni.lodz.pl)  
tel. 42 635 55 77

**ARTYKUŁY**

**ARTICLES**



Rafał Grulke<sup>1</sup> • Maciej Ziulkiewicz<sup>2</sup> <sup>(1)</sup> Student geografii, Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych<sup>(2)</sup> Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Geologii i GeomorfologiiE-mail: [rafal.grulke@edu.uni.lodz.pl](mailto:rafal.grulke@edu.uni.lodz.pl); [maciej.ziulkiewicz@geo.uni.lodz.pl](mailto:maciej.ziulkiewicz@geo.uni.lodz.pl)

## Warunki tlenowe wód powierzchniowych w odcinku źródłiskowym Dzierżąznej (Maliny)

### Oxygen conditions of surface waters in the spring section of Dzierżązna (Malina)

#### Zarys treści

Zlewnia Dzierżąznej położona jest w zachodniej części strefy krawędziowej Wzniesień Łódzkich. W pracy skupiono się na jej źródłiskowej części położonej na terenie miasta Zgierz, od jej źródeł położonych na Rudunkach po zamykający zlewnię cząstkową zbiornik Malinka. Badania dotyczyły trzech podstawowych parametrów: temperatury wody [°C], nasycenia wody tlenem [%] oraz stężenia tlenu rozpuszczonego w wodzie [mg/dm<sup>3</sup>]. Na terenie badań wyznaczono 15 punktów pomiarowych w różnych rodzajach obiektów hydrograficznych (wypływy wód podziemnych, wody płynące i wody stojące). Pomiary zrealizowano w dwóch sezonach: zimowym i wczesnowiosennym w okresie 5.12.2018–7.04.2019 r. Wyniki badań ukazują znaczące zróżnicowanie warunków tlenowych w poszczególnych typach obiektów: w źródłach, kontinuum rzecznych i zbiornikach retencyjnych różnej wielkości. Warunki termiczne oraz charakter ruchu wody w badanych obiektach wskazują, że w porze zimowej zasadniczym procesem dostawy tlenu do wód jest dyfuzja gazu z atmosfery. Wiosną, gdy rośnie temperatura wody, co utrudnia efektywną rozpuszczalność tlenu atmosferycznego, na znaczeniu zyskuje fotosynteza roślinności wodnej ze wskazaniem na fitoplankton zawieszony i denny. Badane wody płynące i zretencjonowane reprezentują zasadniczo dobrą jakość, choć problemem dla zwierząt wodnych mogą być wiosenne stany wysokiego przesylenia toni wodnej tlenem.

#### Słowa kluczowe

Natlenienie wód powierzchniowych, Dzierżązna (Malina), Wzniesienia Łódzkie.

#### Abstract

The catchment of Dzierżązna river is located in the western part of the Łódź Hills edge zone. The work focuses on its spring section located in the city of Zgierz, between springs in the Rudunki and the Malinka reservoir. The research concerned three basic parameters: water temperature [°C], water oxygen saturation [%] and concentration of dissolved oxygen in water [mg/dm<sup>3</sup>]. In the study area, 15 measurement points were established in various types of hydrographic objects (groundwater outflow, flowing water and stagnant water). Measurements were carried out in two seasons: winter and early spring, between 5<sup>th</sup> of December 2018 and 7<sup>th</sup> of April 2019. The results of the research show a significant diversification of oxygen conditions in individual types of objects. The thermal conditions and the kind of water movement in the studied objects indicate that in winter the basic process of water oxygen supply is gas diffusion from the atmosphere. In spring, when the water temperature rises, which impedes the effective solubility of atmospheric oxygen, photosynthesis of aquatic vegetation becomes more important, with an indication of suspended and bottom phytoplankton. The tested waters are generally of good quality, although the high oxygen saturation in early spring may be a problem for aquatic animals.

#### Keywords

Oxygene conditions of waters, Dzierżązna (Malina) river, Łódź Hills.

## 1. Wprowadzenie

Tlen rozpuszczony w wodzie pełni bardzo ważną funkcję zapobiegając transportowi zanieczyszczeń na duże odległości. Przy obecnie utrzymującej się wysokiej presji antropogenicznej na środowisko wodne, dopływ zanieczyszczeń organicznych sprzyja wyczerpywaniu zasobu tlenu, który wykorzystywany jest do jej biochemicznej mineralizacji. Naturalne mechanizmy wprowadzające tlen do wody, jak fotosynteza czy aeracja, nie są w stanie zrównoważyć zwiększonego zapotrzebowania bakterii tlenowych wywołanego rosnącą masą materii organicznej, co prowadzi do istotnego pogorszenia dostępności tlenu dla zwierząt wodnych.

Szczególnie ważny jest stan natlenienia wód powierzchniowych na odcinkach źródłiskowych, gdzie z jednej strony mają swój początek cieki, a z drugiej z wodami podziemnymi poprzez źródła i strefę hyporeiczną wypływają zanieczyszczenia. Jest ich tym więcej, im płytszy i słabiej osłonięty przed dopływem nieczystości z powierzchni terenu jest zasilający źródła i rzekę wodonosiec. Na terenach silnie uźródłowionych, a jednocześnie intensywnie zagospodarowanych, zagrożenie uznaje się za bardzo realne. Wśród wielu takich stref, które zapewne można by wskazać, jest obszar Wzniesień Łódzkich, szczególnie te jego części, które znajdują się w zasięgu aglomeracji łódzkiej. Postępująca od ćwierćwiecza urbanizacja terenów wiejskich przyniosła skutek w degradacji jakości wód

źródłanych (m.in. Burchard, Mela 1995; Hereźniak-Cioto-wa, Ziulkiewicz 1997; Ziulkiewicz 2006; Żelazna-Wieczo-rek i in. 2010; Ziulkiewicz 2016). W ślad za tym także i cieki rozpoczynające tutaj swój bieg uległy zanieczyszczeniu. Wzniesienia Łódzkie to strefa wododziału głównego, więc drobnych cieków i zasilających je źródeł jest bardzo wiele (Maksymiuk 1979; Maksymiuk, Mela 1995).

W badaniach, których plon stanowi niniejsza praca, szczególną uwagę skupiono na Dzierżąznej (Malinie), należącej do dorzecza Bzury i odwadniającej północną część Zgierza. W jej głęboko wciętej dolinie, zwłaszcza na odcinku inicjalnym, występuje duża różnorodność obiektów hydrograficznych, stanowiących atrakcyjny przedmiot badań. Zlewnia Dzierżąznej to obszar silnej i szybko przebiegającej urbanizacji terenu podmiejskiego (Bojanowska 2006), przez co nakładają się tutaj na siebie naturalne i antropogeniczne procesy kształtowania oblicza fizykochemicznego wód podziemnych i powierzchniowych (Burchard i in. 2006; Ziulkiewicz i in. 2006; Ziulkiewicz i in. 2021).

W nowoczesnej ekologii wód, rzeki traktowane są jako zintegrowana funkcjonalnie całość, której właściwości określane są czasoprzestrzennym kontinuum, wzdłuż którego gradientowym zmianom ulegają warunki fizyczne i chemiczne (Starmach 2000). Budowa skądinąd potrzebnych zbiorników retencyjnych przerywa ten ciąg i sprawia, że w zależności od splotu okoliczności, wody rzeczne zyskują lub tracą walory jakościowe pokonując takie bariery. Na cechy fizykochemiczne zretencjonowanych wód szczególnie silnie wpływa głębokość i asymetria dna zbiornika, wzajemny stosunek wód głębinowych, pelagicznych i przybrzeżnych. Warunki fizykochemiczne, obok formy misy zbiornika, uzależnione są jeszcze od akumulacji substancji odżywczych dopływających z rzeką ze zlewni (Starmach 2000).

Na wybranym do badań odcinku Dzierżąznej (Maliny) ciągłość rzeki uległa wielokrotnemu przerwaniu poprzez budowę pięciu zbiorników małej retencji, co poza funkcjonowaniem tam naturalnych wypływów wód podziemnych, wprowadza dodatkowy czynnik determinujący zmiany jakości wód rzecznych. Przyjęto założenie, że tlen rozpuszczony w wodzie będzie dobrym tego odzwierciedleniem. Celem pracy jest wykazanie stanu natlenienia wód różnych typów obiektów hydrograficznych w górnej części zlewni Dzierżąznej, w porze zimowej i wczesnowiosennej – w warunkach intensywnej zabudowy hydrotechnicznej. Do badań wytypowano źródła, rzekę, zbiorniki retencyjne oraz torfowisko niskie. Wskazany odcinek cieku jest jednocześnie fragmentem Dzierżąznej, na którym w trakcie pierwszych badań hydrochemicznych stwierdzono największe jej obciążenie zanieczyszczeniami i największą dynamikę zmian parametrów jakości wód w stosunku do dalszego odcinka tej rzeki aż po ujście Ciosenki (Burchard i in. 2006). Należy przyjąć, że w takich okolicznościach warunki tlenowe, przy stałym dopływie zanieczyszczeń, mogą się wyraźnie pogarszać.

## 2. Obszar badań

Obszar badań obejmuje górny fragment zlewni Dzierżąznej o powierzchni 2,65 km<sup>2</sup>, zamknięty jazem piętrzącym ostatniego z kompleksu zbiorników retencyjnych „Malinka”. Zlewnia Dzierżąznej położona jest w zachodniej części strefy krawędziowej Wzniesień Łódzkich, obejmując teren bezpośrednio przylegający od północy do Zgierza wraz z jego niewielkimi fragmentami zabudowy (rys. 1C).

Dzierżązna (Malina)<sup>1</sup> należy do cieków V rzędu, uchodzi do Czarniawki, lewobrzeżnego dopływu Moszczenicy, a ta z kolei do Bzury (Bartnik, Tomaszewski 2000; Jokieli, Maksymiuk 2000). Średni przepływ w górnej części badanego odcinka Dzierżąznej wynosi 7,3 l/s (Moniewski 2004), a powyżej pierwszego z kaskady zbiorników retencyjnych „Malinka” kształtuje się on w granicach 5,4–10,5 l/s (Ziulkiewicz i in. 2021).

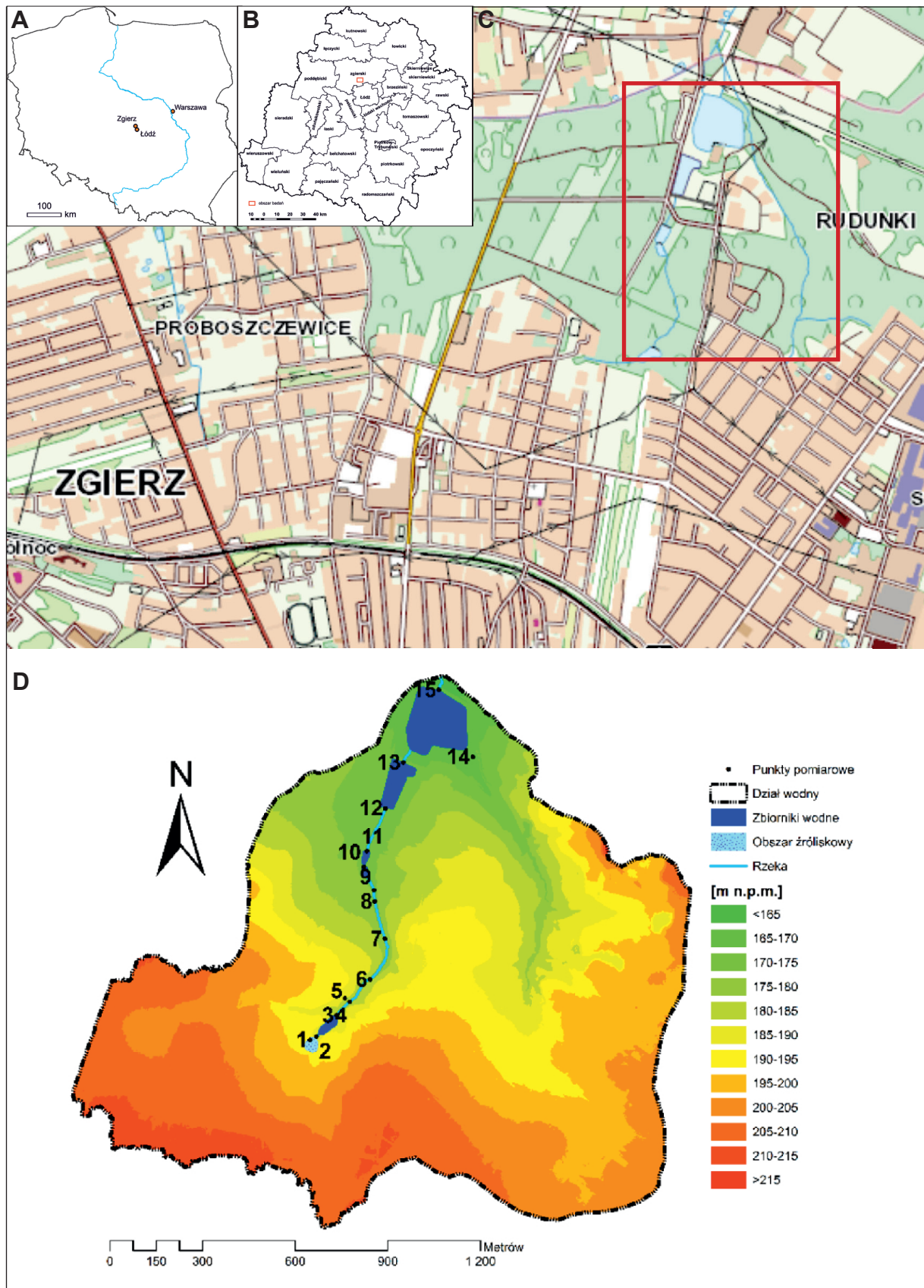
Rzecz dają początek najdalej na zachód położone źródła, które należą do jednej z najbardziej uźródłowionych stref centralnej Polski, tzw. obszaru krawędziowego Wzniesień Łódzkich (Maksymiuk, Mela 1995; Jokieli, Maksymiuk 2000). Źródło Rudunki I (184,4 m n.p.m.), dające początek Dzierżąznej, jest młaką (rys. 2), której wydajność określono na 2,5–6,3 l/s (Ziulkiewicz i in. 2021). Jej dno jest w najniższych partiach wypełnione materią organiczną do głębokości 75 cm. Nieco niżej na biegu cieku położone jest źródło Rudunki II (181,6 m n.p.m.). Jego nisza wykształciła się u podnóża zbocza doliny, które jednocześnie podcina. W dnieniu niszy, pokrytym detrytusem, biją drobne wypływy ascensyjne. W miejscach wypływów czytelny jest również rdzawy nalot związków żelaza (fot. 1). Wydajność tego zespołu wypływów można oszacować na 1,5 l/s.

W dolnej części badanego odcinka doliny, u zbiegu z dolinką prawobrzeżnego dopływu, znajduje się niewielkie torfowisko niskie z małym zbiornikiem wodnym (torfianką). Z tego obiektu okresowo odpływają niewielkie ilości wody, kierując się przekopanym rowkiem ku Dzierżąznej. Wykonane sondowania wskazują, że aktualna miąższość osadów organicznych nie przekracza tam 50 cm, natomiast dopływ wód podziemnych zachodzi z utworów piaszczystych, z głębokości około 1,5 m.

Na badanym odcinku biegu Dzierżąznej znajduje się pięć zbiorników retencyjnych (rys. 1D). Jeden bezpośrednio poniżej źródła inicjalnego (A = ok. 2400 m<sup>2</sup>) i cztery w dolnej części odcinka doliny, gdzie tworzą kompleks rekreacyjny „Malinka” (ΣA = ok. 40000 m<sup>2</sup>) (<https://sk.gis.gov.pl/index.php/kapielisko/316>). Dostępna w materiałach źródłowych charakterystykę budowli piętrzących przedstawiono w tab. 1. Zbiornik nr 4 – kąpielisko (tzw. staw górny) jest wydzielonym obiektem o umocnionym dnie i skarpach, o powierzchni około 6000 m<sup>2</sup> i średniej głębokości 1,0 m. Poziom wody w kąpielisku utrzymywany jest na poziomie 170.10 m n.p.m. za pomocą żelbetonowej zastawki (<https://sk.gis.gov.pl/index.php/kapielisko/316>). Wszystkie zbiorniki są płytkie, głębokość wody przy jazach w czasie pomiarów nie przekroczyła 3,5 m, należy więc przyjąć, że potencjalnie całe ich dno może znajdować się w zasięgu światła słonecznego.

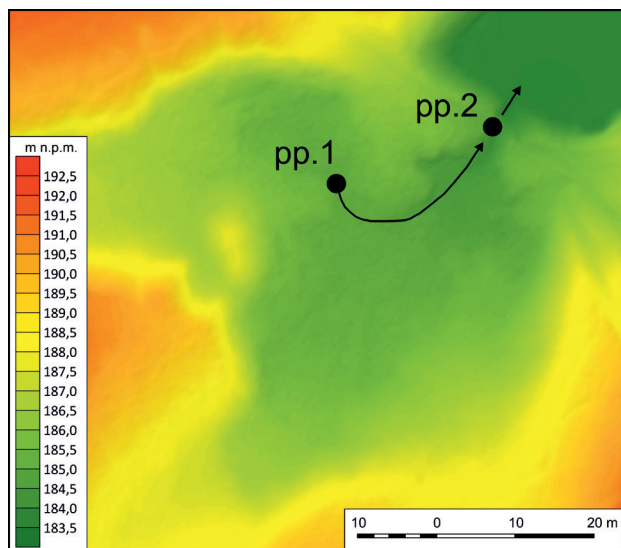
<sup>1</sup> Według Hydroportalu ([https://wody.isok.gov.pl/imap\\_kzgw/?gpmmap=gpSIGW](https://wody.isok.gov.pl/imap_kzgw/?gpmmap=gpSIGW)) górny odcinek Dzierżąznej nosi nazwę Maliny.





**Rys. 1.** Położenie obszaru badań na tle mapy Polski (A) i woj. łódzkiego (B); C – położenie fragmentu doliny objętej badaniami (mapa w skali 1:25 000 zaczerpnięta z Geoportalu); D – położenie punktów pomiarowych w górnej części zlewni Dzierżąnej (Maliny) na tle mapy hipsometrycznej

**Fig. 1.** Location of study area on the background of the map of Poland (A) and the Łódź voivodeship (B); C – location of the part of the valley covered by the research (map in the scale 1:25 000 taken from Geoportal); D – location of the measurement points in the upper part of the Dzierżąna (Malina) catchment area against the background of the hypsometric map



**Rys. 2.** Numeryczny Model Terenu niszy źródłiskowej Rudunki I dla rzędnej 183,48 m n.p.m. Punktami oznaczono miejsca wykonywania pomiarów i wskazano kierunek spływu wód

**Fig. 2.** The Digital Elevation Model of spring niche Rudunki I, elevation 183,48 m a.s.l. Points marked the places where measurements were done and the direction of water outflow was indicated



**Fot. 1.** Nisza źródłiskowa Rudunki II z zaznaczonymi punktami opróbowania wód: wypływu spod ziemi i odpływu z niszy. W dnie widoczne są wytrącenia wodorotlenku żelaza świadczące o zużyciu rozpuszczonego w wodzie tlenu do przejścia rozpuszczalnych form żelaza [ $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{FeSO}_4$ ] w formę trudno rozpuszczalną [ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ] (fot. R. Grulke)

**Photo 1.** The spring niche of Rudunki II with marked measuring points: water outflow from the ground and outflow from the niche. In the bottom precipitated iron hydroxide is visible, attesting to the consumption of oxygen dissolved in water to transform the soluble forms of iron [ $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{FeSO}_4$ ] into the sparingly soluble form [ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ] (photo: R. Grulke)

**Tabela. 1.** Charakterystyka budowli piętrzących na badanym odcinku Dzierżąnej (Maliny) (Wojewódzki program..., 2005)

**Table 1.** Characteristics of the dams in the studied section of Dzierżąna (Malina)

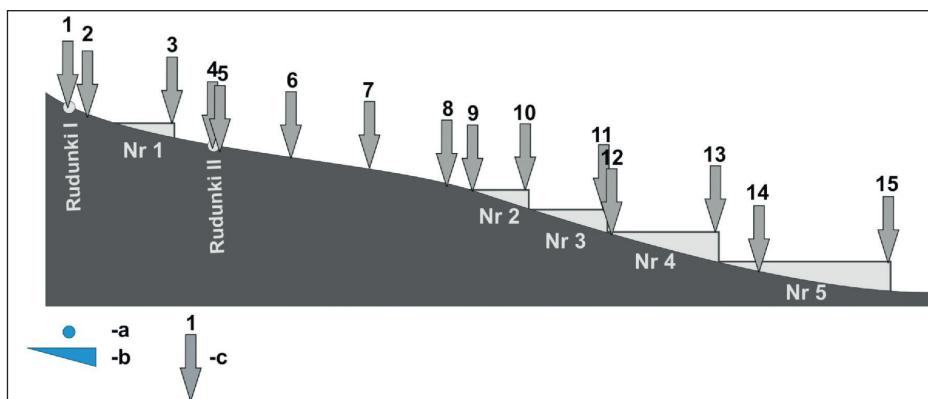
Nr badanego zbiornika	Rodzaj budowli	Położenie budowli [km]	Administrator budowli	Parametry budowli			Uwagi
				szerokość [m]	wysokość piętrzenia [m]	wysokość stopnia [m]	
1	stopień	0 ÷ 100	WZMiUW w Łodzi	–	–	0,5	–
4	most z zastawką	3 ÷ 250	UG Zgierz	1,6 ÷ 0,8 ÷ 0,8 ÷ 1,6	0,9	–	z piętrzeniem, tzw. górny staw – kąpielisko

Obszar badań znajduje się w obrębie regionalnej jednostki hydrogeologicznej, która charakteryzuje się występowaniem pierwszego poziomu wodonośnego w miąższych pokrywach piasków różnoziarnistych. Jego zwierciadło stabilizuje się w obrębie wysoczyzny na rzędnych 185–190 m n.p.m. Poziom ten zasadniczo nie jest izolowany od powierzchni, a zwierciadło swobodne występuje w przedziale głębokości 10–20 m p.p.t. (Pęczkowska, Figiel 2006). Moniewski (2004) wskazuje, że źródła Dzierżąnej zasilane są z fluwioglacjalnych utworów piaszczysto-żwirowych podścielonych glinami morenowymi zlodowacenia warty.

Układ warstw skalnych jest na tym obszarze jednak silnie przekształcony na skutek występowania zaburzeń głazitektonicznych osadów kenozoicznych (Klatkova 1996).

### 3. Metodyka badań

Na obszarze badań wyznaczono 15 punktów pomiarowych (rys. 1D i rys. 3). Objęły one dwa źródła, gdzie badano miejsce wypływu wód podziemnych na powierzchnię oraz odpływ wody z niszy źródłiskowej (rys. 2, fot. 1). Poza tym: jedno torfowisko, wody płynące w korycie Dzierżąnej (pięć punktów) oraz wody retencjonowane w zbiornikach (cztery punkty) – tab. 2.



**Rys. 3.** Schematyczny profil badanego odcinka Dzierżaznej (Maliny) z lokalizacją punktów pomiarowych (pp.).

Objaśnienia znaków: a – źródło, b – zbiornik retencyjny, c – pp. z numeracją

**Fig. 3.** Schematic profile of the studied section of Dzierżazna (Malina) with the location of the measuring points (mp).

Explanations of signs: a – the spring, b – retention reservoir, c – mp. with the number

**Tabela 2.** Charakterystyka punktów pomiarowych

**Table 2.** Characteristics of measuring points

Punkt pomiarowy	Nazwa punktu pomiarowego	Typ wód	Szerokość geograficzna	Długość geograficzna
1	Źródliko Rudunki I	wyptywy wód podziemnych	51°52'30"	19°25'14"
2	Odpływ ze źródlika Rudunki I	odpływ ze źródlika	51°52'30"	19°25'15"
3	Wyptyw ze zbiornika nr 1	wody stojące	51°52'31"	19°25'18"
4	Odpływ ze źródlika Rudunki II	odpływ ze źródlika	51°52'34"	19°25'20"
5	Źródliko Rudunki II	wyptywy wód podziemnych	51°52'33"	19°25'21"
6	Naturalne Podpiętrzenie – Dzierżazna (Malina)	wody płynące	51°52'35"	19°25'23"
7	Meander – Dzierżazna (Malina)	wody płynące	51°52'38"	19°25'22"
8	Koniec naturalnego koryta – Dzierżazna (Malina)	wody płynące	51°52'42"	19°25'21"
9	Wptyw do zbiornika nr 2	wody płynące	51°52'43"	19°25'20"
10	Wyptyw ze zbiornika nr 2	wody stojące	51°52'45"	19°25'19"
11	Wyptyw ze zbiornika nr 3	wody stojące	51°52'47"	19°25'20"
12	Wptyw do zbiornika nr 4	wody płynące	51°52'51"	19°25'22"
13	Wyptyw ze zbiornika nr 4	wody stojące	51°52'55"	19°25'26"
14	Torfowisko	wody stojące	51°52'56"	19°25'35"
15	Wyptyw ze zbiornika nr 5	wody stojące	51°53'03"	19°25'32"

W wyznaczonych punktach pomiarowych dokonywano pomiarów temperatury wody i powietrza oraz stężeń tlenu rozpuszczonego i stopnia nasycenia toni wodnej tlenem. Obserwacje realizowano w okresie 5.12.2018 – 7.04.2019 r. w odstępach tygodniowych. Pomiarów podzielono na dwie serie:

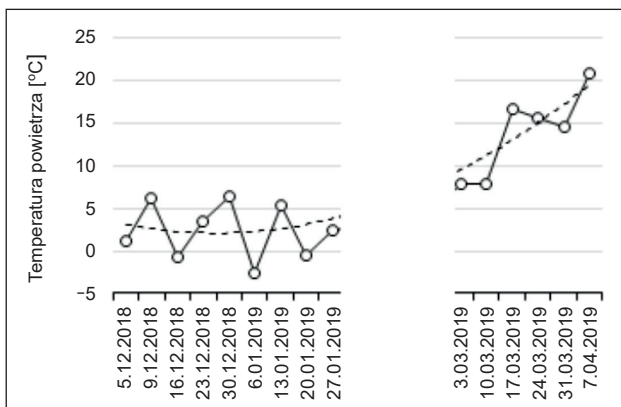
- zimową od 5.12.2018 r. do 27.01.2019 r. (9 terminów pomiarów),
- wiosenną od 3.03 do 7.04.2019 r. (6 terminów pomiarów).

W serii wiosennej przeprowadzono dodatkowo pomiar stężenia tlenu rozpuszczonego w warstwie naddennej we wszystkich pięciu zbiornikach retencyjnych. Pomiarów dokonywano z jazu piętrzącego przy upuście wody.

Pomiary wykonywano mikrokomputerowym tlenomierzem Elmetron CO-315. Poza czujnikiem temperatury ośrodka, stosowano dwie elektrony tlenowe: CTN-980R i CTN-920S podłączoną do kabla o długości 6 m. Tlenomierz każdorazowo przed pomiarami był kalibrowany w roztworach 0% i 100% nasycenia tlenem z uwzględnieniem poprawki na aktualne ciśnienie atmosferyczne.

#### 4. Wyniki badań

Warunki termiczne powietrza atmosferycznego, w jakich prowadzono pomiary przedstawia rys. 4. Okres zimowy to czas stabilizacji temperatury wokół wartości przeciętnej i naprzemianległych wzrostów i spadków z kilkoma przypadkami temperatur poniżej zera, generalnie w zakresie  $-3^{\circ}\text{C}$  do  $6^{\circ}\text{C}$ . Okres wiosenny to z kolei czas szybkiego wzrostu temperatur, aż o  $14^{\circ}\text{C}$ , z  $8^{\circ}\text{C}$  do  $21^{\circ}\text{C}$ . Generalnie, zakres zmian temperatury powietrza jaki nastąpił między początkiem grudnia a początkiem kwietnia, wyniósł blisko  $25^{\circ}\text{C}$ .



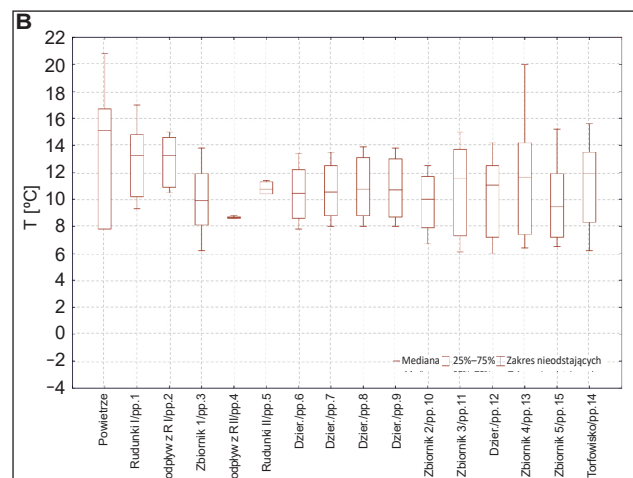
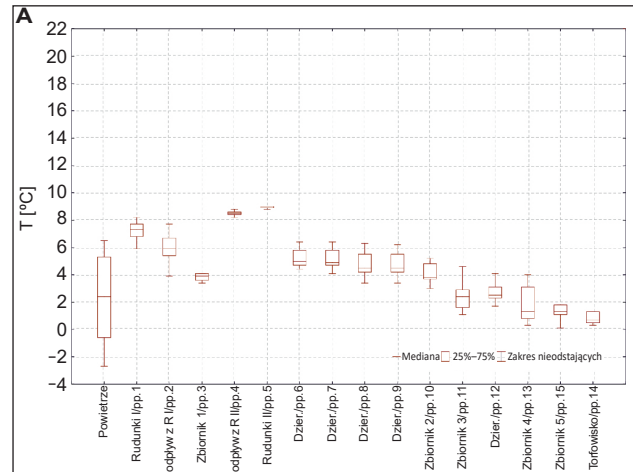
Rys. 4. Temperatura powietrza w obu seriach pomiarowych

Fig. 4. Air temperature in both measuring series

W porze zimowej najcieplejsze wody wypływały ze źródła Rudunki II, chłodniejsze wody zarejestrowano w niszy Rudunki I (rys. 5a). Zmiany temperatury wody na biegu Dzierżanej, od źródeł po ostatni badany zbiornik retencyjny (nr 5), dokumentują postępujące wychłodzenie, które następuje już w zbiorniku nr 1. Jednak z racji, że odpływ wody odbywa się z jego warstwy przypowierzchniowej, nie jest to pełna informacja o warunkach termicznych panujących w tym obiekcie. Zbiorniki nr 2 i nr 3 obniżają temperaturę wód rzecznych w największym stopniu. Woda odpływająca z torfowiska jest najchłodniejszą z badanych, o czym decyduje zapewne długi czas retencji wód podziemnych w jego obrębie.

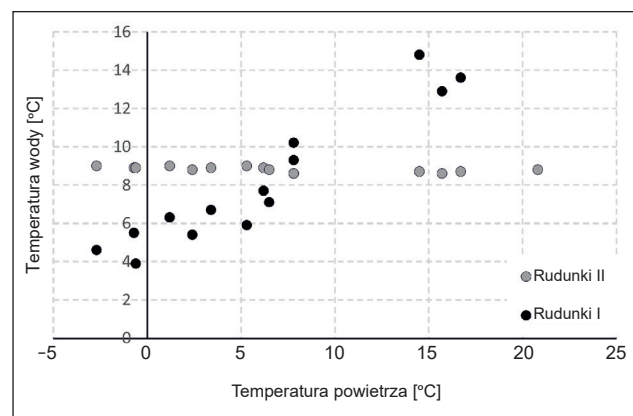
Wiosną, kiedy przeciętna temperatura powietrza podniosła się o  $11^{\circ}\text{C}$ , opisane powyżej zróżnicowanie zupełnie się zatarto (rys. 5b). Wody, poza źródłem Rudunki II, termicznie się zunifikowały. Najcieplejsze były wody z niszy Rudunki I. Wody w zbiornikach były chłodniejsze od wód rzecznych, maksimum temperatury wody wystąpiło w zbiorniku nr 4 – kąpielisku. Głębsze zbiorniki nr 1, nr 2 i nr 5 okazały się odporne na szybkie ogrzanie się wody. Najcieplejsze wody, pod względem przeciętnej wielkości temperatury wody, odpływały z torfowiska.

Relacja temperatury powietrza i temperatury wody wypływającej na powierzchnię w obu badanych źródłach daje wskazanie, jak forma wypływu może warunkować termikę wód od samego początku funkcjonowania cieku powierzchniowego – rys. 6.



Rys. 5. Zakres zmian temperatury powietrza i wody w punktach pomiarowych: A – w porze zimowej, B – w porze wiosennej

Fig. 5. The air and water temperature range of changes at measuring points: A – in winter, B – in spring

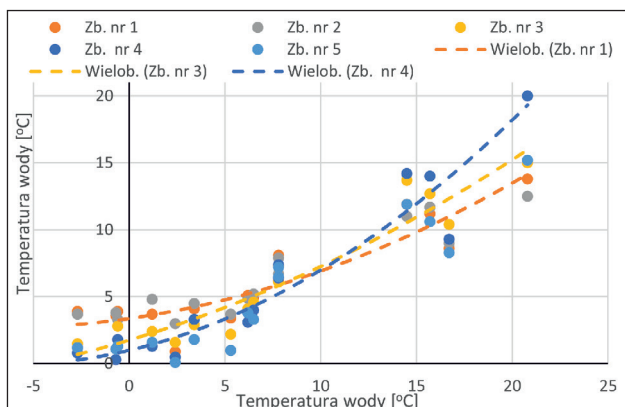


Rys. 6. Relacja temperatury powietrza i wody w źródłach inicjalnych Dzierżanej

Fig. 6. Changeability between air and water temperature in springs of Dzierżanej river

Relacja temperatury powietrza i temperatury wody wypływającej z poszczególnych zbiorników na biegu Dzierżanej pozwala wskazać interesujące różnice – rys. 7. Im niżej w dolinie położony jest zbiornik, tym silniej reaguje na

wiosenne ocieplenie, a są to zbiorniki różniące się istotnie powierzchnią i objętością. Najszybciej na wzrost temperatury powietrza reaguje zbiornik pełniący funkcję kąpieliska (nr 4), stosunkowo płytki, o dużej i nie zacienionej powierzchni lustra wody, pierwszy z kaskady kompleksu Malinka, zbiornik nr 2.



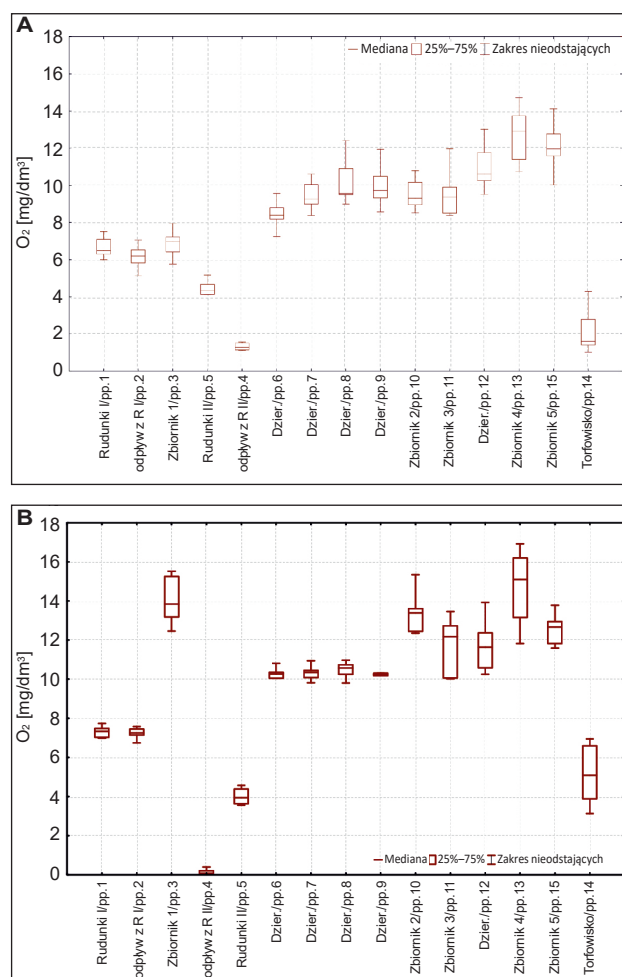
Rys. 7. Relacja temperatury powietrza i wody w zbiornikach położonych w górnej części doliny Dzierżanej

Fig. 7. Relationship between air and water temperature in reservoirs of upper section of Dzierżana

Zimą najniższe stężenia tlenu rozpuszczonego w wodzie stwierdzono w wypływie wody podziemnej w źródle Rudunki II i czterokrotnie wyższe w odpływie z tego źródła (rys. 8a). Podobne przeciętne stężenie tlenu, choć przy wyraźnie wyższym zakresie zmienności, zarejestrowano w torfowisku. Nieco wyższe stężenie, ale przy niskim zakresie zmienności stwierdzono w źródle Rudunki I. Uzyskany obraz zmienności stężeń tlenu w obrębie tej niszy jest bardzo podobny dla obu punktów pomiarowych, wypływu spod ziemi i odpływu z niszy. Wody powierzchniowe wyróżniają się *in plus* od obiektów zasilanych wodami podziemnymi. Stężenia tlenu sukcesywnie rosną w trakcie spływu wody korytem rzeczny, na co bardzo wyraźnie wskazują wartości przeciętne. W zbiorniku nr 2 i nr 3 stężenie tlenu nieco maleje, a dalej już rośnie, osiągając najwyższe stężenia w kąpielisku – zbiorniku nr 4. Pokonanie przez wody rzeczne zbiorników retencyjnych powoduje wzrost stężenia tlenu, w przypadku zbiornika nr 1 o 2 mg/dm<sup>3</sup>, a zbiorników nr 2 i nr 3 o 0,9 mg/dm<sup>3</sup>. Generalnie w porze zimowej udokumentowano postępujący proces natleniania wód, od źródła inicjalnego po ostatni zbiornik retencyjny „Malinki”.

W porze wiosennej stężenia tlenu rozpuszczonego bardzo wyraźnie różnicowały wody inicjalnego fragmentu doliny Dzierżanej (rys. 8b). Najniższe stężenia tlenu, bliskie zeru, zarejestrowano w źródle Rudunki II, a w odpływie z tej niszy, ok. 1,5 m dalej (fot. 1), stężenia tlenu kształtowały się na przeciętnym poziomie 4 mg/dm<sup>3</sup>. Niewiele wyższe stężenia rejestrowano w dopływie z torfowiska, których górny zakres odpowiadał zawartości tlenu rozpuszczonego w wodach źródła Rudunki I. Drugą grupę obiektów, o wyraźnie wyższych stężeniach tlenu, stanowią

wody powierzchniowe. W Dzierżanej przeciętne stężenia tlenu rozpuszczonego były niższe od jego zawartości w wodach zbiorników retencyjnych. Pod względem zakresu zmian oba typy akwenów również od siebie odbiegają, przy czym wyraźnie wyższe zmiany wystąpiły w zbiornikach retencyjnych. Wiosną stężenia tlenu rozpuszczonego w wodach sąsiadujących zbiorników zmieniały się *in plus* (zbiornik nr 3 i nr 4) i *in minus* (zbiornik nr 2 i nr 3 oraz nr 4 i nr 5). To samo zjawisko zaobserwowano zimą (rys. 8a), jednak w porze wiosennej wyraźnie przybrało ono na sile. Pomimo takich zmian, czytelne jest zjawisko natleniania wody rzecznej w zbiornikach retencyjnych. W przypadku wody odpływającej z niszy Rudunki I do zbiornika nr 1 jest to przeciętnie wzrost o 85% (z 7,3 mg/dm<sup>3</sup> do 13,8 mg/dm<sup>3</sup>), a między pp. 9 i zbiornikiem nr 2 o 30%, podobnie, jak między pp. 12 i zbiornikiem nr 4. Po przepłynięciu Dzierżanej przez zbiornik nr 1 stężenie tlenu rozpuszczonego w rzeźce wzrasta przeciętnie o 3 mg/dm<sup>3</sup>, a zbiorników nr 2 i nr 3 o 1,5 mg/dm<sup>3</sup>, choć pomiędzy wartościami maksymalnymi różnica sięga 2 mg/dm<sup>3</sup>.

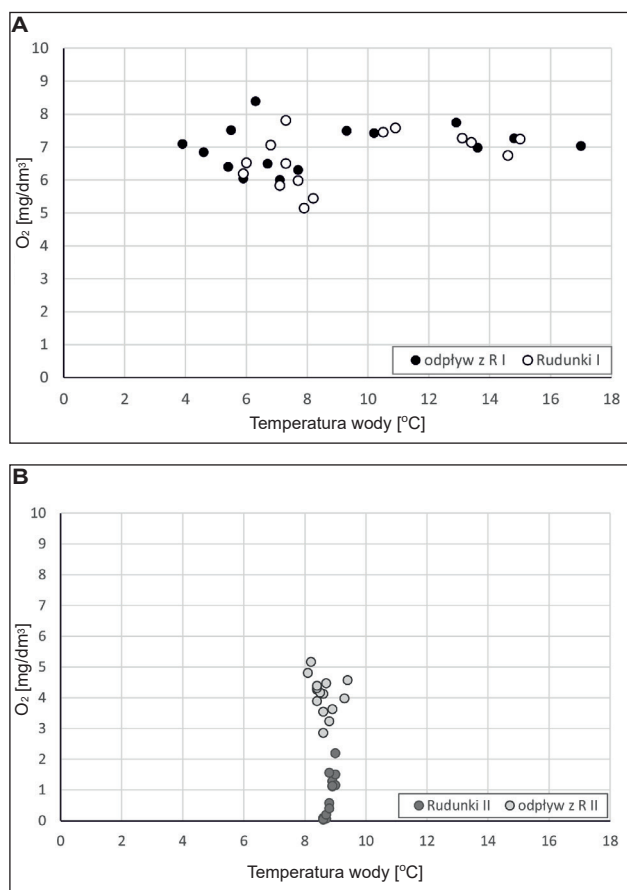


Rys. 8. Zakres zmian stężeń tlenu rozpuszczonego w wodzie zarejestrowanych w punktach pomiarowych: A – w porze zimowej, B – w porze wiosennej

Fig. 8. The range of changes the dissolved oxygen concentration in water recorded in measurement points: A – in winter, B – in spring

Odniesienie zarejestrowanego poziomu stężeń tlenu rozpuszczonego w różnych zbiornikach wodnych pozwala uchwycić ich osobliwość w tym względzie – rys. 9 i rys. 10. Obraz relacji uzyskany dla obu źródeł – rys. 9, wyraźnie je od siebie odróżnia. W Rudunkach I (rys. 9a) wiosną temperatura wody nie wydaje się oddziaływać na zawarty w wodzie tlen, natomiast zimą, kiedy woda jest chłodniejsza dyspersja punktów świadczy o kilku nakładających się okolicznościach sprzyjających natlenieniu bądź też odtlenieniu wód. Odniesienie stężenia tlenu do temperatury wody ukazuje, że dla obu sezonów relacja jest podobna, przy czym wody odpływające z niszy zimą są nieco chłodniejsze i bardziej zasobne w tlen.

Drugie z badanych źródeł (rys. 9b) charakteryzuje się tym, że stężenia rozpuszczonego tlenu kształtują się w bardzo szerokich granicach, przy bardzo ograniczonych zmianach temperatury wód. Na niewielkim dystansie dzielącym wypływ spod ziemi od odpływu z niszy (ok. 1,5 m) – fot. 1., następuje w tej niszy wyraźny wzrost stężenia rozpuszczonego tlenu, podczas gdy temperatura wody waha się w granicach 1,5°C.

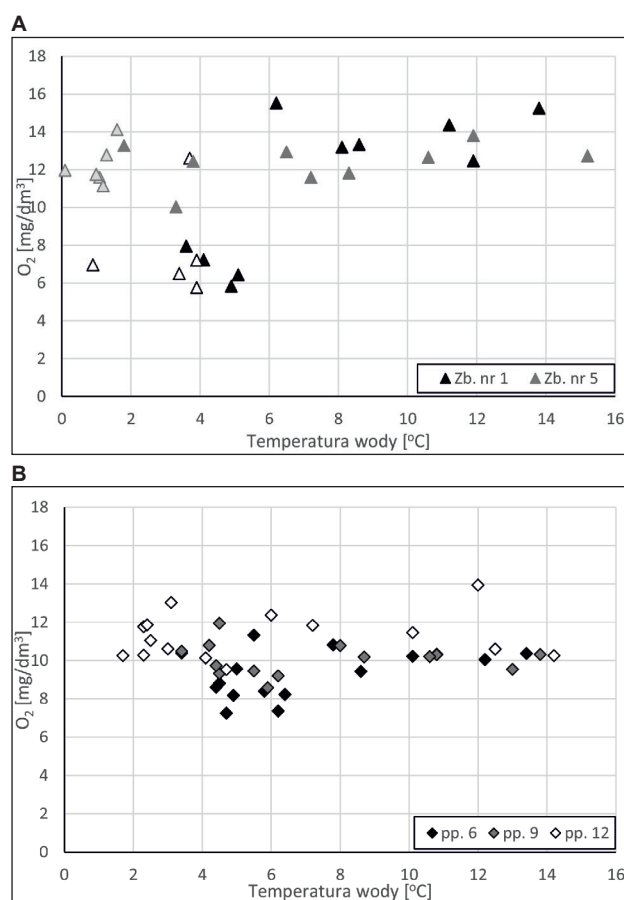


**Rys. 9.** Zmiany stężenia tlenu rozpuszczonego w wodach źródłanych w odniesieniu do ich temperatury: A – Rudunki I, B – Rudunki II

**Fig. 9.** Changes in the concentration of dissolved oxygen in spring waters in relation to their temperature: A – Rudunki I, B – Rudunki II

Zestawiono ze sobą stężenia tlenu do temperatury wody w dwóch skrajnych zbiornikach nr 1 i nr 5 – rys. 10a. Stężenia tlenu w chłodniejszych wodach były

wyraźnie niższe w zbiorniku górnym niż w tzw. stawie dolnym. Wiosną, gdy temperatura wody się podniosła, taka różnica już się nie zaznaczyła. Generalnie stężenie tlenu rozpuszczonego w toni wodnej zbiornika nr 5 wydaje się w bardzo ograniczonym stopniu korespondować z jej termiką. Nawet zlodzenie tego zbiornika nie wydaje się oddziaływać na stężenia tlenu, co z kolei można zauważyć w zbiorniku nr 1, kiedy cztery na siedem przypadków najniższych stężeń tlenu wystąpiło przy jego zlodzeniu. Rys. 10b ukazuje, jak Dzierżązna pomiędzy pp. 6 i pp. 9 traci świadectwo oddziaływania zbiornika nr 1. W pp. 12 rzeka reprezentuje warunki panujące w zbiornikach nr 2 i nr 3. Zimą w zbiorniku nr 5 woda rzeczna dodatkowo uległa niewielkiemu schłodzeniu i zasileniu w tlen rozpuszczony.

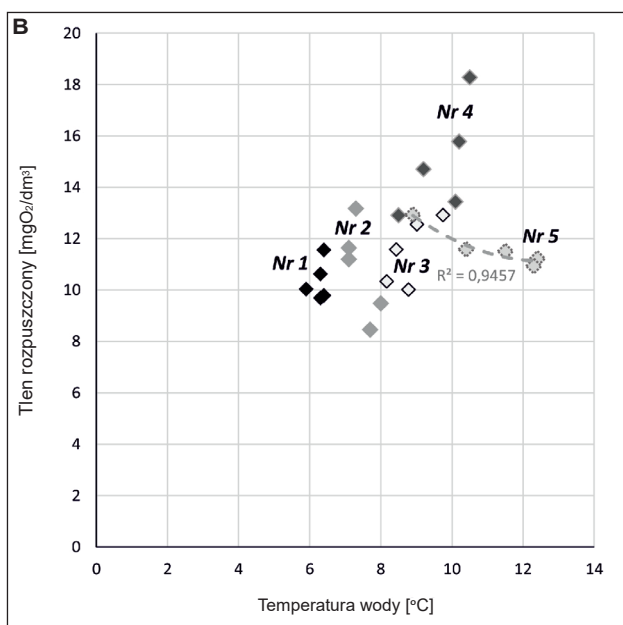
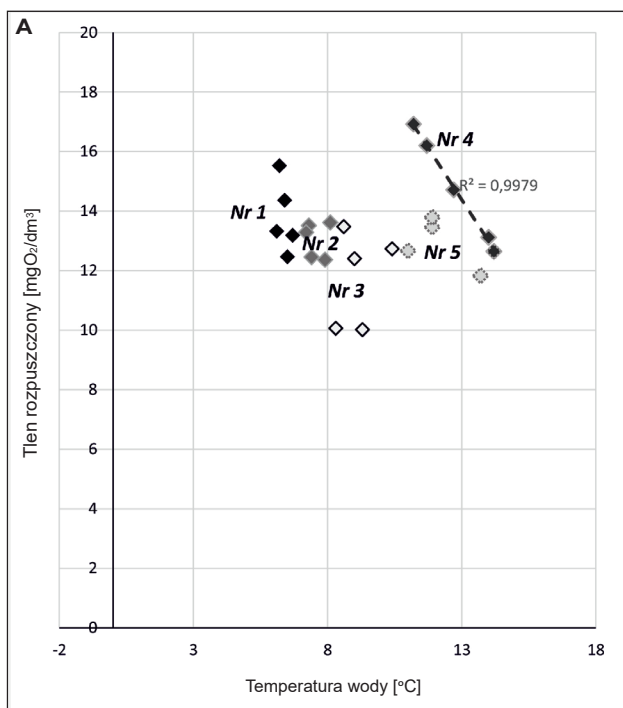


**Rys. 10.** Zmiany stężenia tlenu rozpuszczonego w wodach Dzierżąznej i zbiorników retencyjnych w relacji do ich temperatury: A – zbiorniki; uwaga: symbole z jaśniejszym wnętrzem oznaczają przypadki przy zlodzeniu zbiornika, B – rzeka

**Fig. 10.** Changes in dissolved oxygen concentration in the river waters of Dzierżązna and retention reservoirs in relation to their temperature: A – reservoirs; note: symbols with a lighter interior indicate cases of icing of the reservoir, B – river

Pomiary stężenia rozpuszczonego w warstwie podpowierzchniowej wody w zbiorniku i jego części naddennej wykazały, że istnieje poważna różnica w relacji temperatura wody i stężenie rozpuszczonego tlenu pomiędzy tymi dwiema warstwami (rys. 11).

W warstwie podpowierzchniowej temperatura wody nie wpływa na stężenie tlenu rozpuszczonego za wyjątkiem zbiornika nr 4, gdzie ilość tego gazu szybko maleje wraz z wygrzewaniem się toni wodnej (rys. 11a). W warstwie naddennej zbiorników wraz ze wzrostem temperatury wody stężenie tlenu rośnie, w zbiorniku nr 4 osiągając bardzo wysokie wartości (rys. 11b). Wyjątkiem jest zbiornik nr 5, w którym stężenie tlenu nad dnem maleje przy wzroście temperatury wody.



**Rys. 11.** Temperatura wody i stężenie tlenu rozpuszczonego w przy powierzchniowej (A) i naddennej (B) warstwie wody badanych zbiorników retencyjnych

**Fig. 11.** Water temperature and dissolved oxygen concentration in the under the surface (A) and above-bottom (B) parts in the tested retention reservoirs

## 5. Dyskusja

W świetle przeprowadzonych pomiarów zimowych i wiosennych zaznaczają się trzy ważne kwestie:

- wód wyphywających spod ziemi w źródłach i odphywających z nisz źródłiskowych,
- wód Dzierżąznej (Maliny), jako kontinuum, poprzez które transportowany jest tlen i jak tę drogę modyfikują zbiorniki retencyjne,
- natlenienie wód samych zbiorników retencyjnych różniących się położeniem w profilu rzeki i wielkością.

Tlen w płytkich wodach podziemnych występuje, gdy są one zasilane szybko przemieszczającymi się poprzez strefę aeracji wodami infiltracyjnymi, nie napotykającymi na swojej drodze substancji redukujących, zwłaszcza węgla organicznego (Macioszczyk, Dobrzyński 2002). Warunki stwierdzone w źródłach wskazują, że w Rudunkach II wyphywają wody o bardzo niskiej zawartości tlenu rozpuszczonego. Osady, które deponowane są w miejscach ich wyphywu (fot. 1), świadczą o obecności w nich związków  $Fe^{2+}$ . Spływająca po powierzchni dna niszy woda natlenia się, jednak nie osiąga poziomu, jaki wykazują pobliskie wody rzeczne w pp. 8 – rys. 8. Źródło Rudunki I reprezentuje inne warunki tlenowe. Tutaj woda w wyphywie zawiera tyle samo tlenu, co woda odphywająca z niszy – rys. 9a. W rozległej formie krenologicznej (rys. 2), wypełnionej w części obumarłą materią organiczną, nie ma możliwości utrzymania rozpuszczonego tlenu w penetrujących takie osady wodach podziemnych (Porowska 2004; Mazurek 2010). Wody wyphywają w dzień niszy w sposób rozproszony i koncentrują stopniowo odpływ z jego powierzchni. Możliwy jest ich kontakt ze strefą korzeniową makrofitowej roślinności zimozielonej (Kucharski 2007), przez co następuje ich natlenienie. Dno jest przez tą roślinność zacienione, więc rozwój glonów bentosowych jest bardzo utrudniony. Dalsza koncentracja strug wody w niszy nie wywołuje wyraźnego dotlenienia – rys. 8. Taka właśnie woda trafia niemalże bezpośrednio do pierwszego zbiornika retencyjnego, gdzie w porze zimowej, przy silniejszym wychłodzeniu toni wodnej, nieznacznie wzrasta w niej stężenie tlenu rozpuszczonego (rys. 8a). Wiosną, wraz z rozpoczęciem aktywności wegetacyjnej glonów, ilość tlenu rozpuszczonego wzrasta już bardzo wyraźnie (rys. 8b).

Przeciętne parametry tlenowe wód źródłanych w Rudunkach I zimą kształtowały się następująco: stężenie tlenu  $6,2 \text{ mg/dm}^3$  przy nasyceniu 51%, natomiast wiosną odpowiednio:  $7,3 \text{ mg/dm}^3$  i 58% nasycenia. Na odpływie z tej niszy zimą stężenie tlenu wyniosło przeciętnie  $6,5 \text{ mg/dm}^3$  i 54% nasycenia, a wiosną  $7,3 \text{ mg/dm}^3$  i nasycenie 58,5%. Są to wielkości blisko sobie odpowiadające – stan natlenienia wód tego źródła konstrytuuje się więc w czasie koncentracji odpływu w rozległym dniu. Podobnie małą dyspersję warunków tlenowych w rozległej niszy źródłiskowej w Ciosnach-Sadach, gdzie woda spływa laminarnie wśród roślinności makrofitowej, stwierdził Ziulkiwicz (2016).

W Rudunkach II w porze zimowej przeciętne stężenie tlenu w wodach wyphywających spod ziemi wyniosło 1,3 mg/dm<sup>3</sup> i nasycenie 11%, wiosną wyraźnie mniej: 0,1 mg/dm<sup>3</sup> i 0,8%. Zimą w wodach odphywających z niższej wody w wodzie było 4,3 mg/dm<sup>3</sup>, a nasycenie wyniosło 38%. Wiosną natlenienie było nieznacznie mniejsze: 3,9 mg/dm<sup>3</sup> i nasycenie 36%. Podobnie szybko nasycenie się wód podziemnych tlenem w czasie ich spływu po powierzchni dna niszy źródłkowej, jak w Rudunkach II, obserwowano w źródłach strefy młodoglacjalnej przy ich profilowaniu hydrochemicznym Mazurek (2010).

Obraz natlenienia Dzierżąznej (Maliny) w pierwszym punkcie pomiarowym poniżej zbiornika nr 1 jest inny zimą i inny wiosną. Kolejne punkty pomiarowe na biegu rzeki ukazują, jak wody płynące swobodnie korytem sukcesywnie się natleniają (rys. 8). Przy temperaturach wody w granicach 4–5°C przebiega to dużo bardziej efektywnie (rys. 8a), niż w temperaturach 8–12°C (rys. 8b). W odcinku, gdzie woda traci impet ruchu, tj. powyżej zbiornika nr 2, ilość rozpuszczonego tlenu obniża się nieznacznie. Pomiędzy pp. 6 i pp. 9 uzyskano obraz zmian fizykochemicznych, których reprezentantem są temperatura wody i stężenia rozpuszczonego tlenu, w kontinuum rzeczonym. W porze zimowej stopniowemu wychłodzeniu towarzyszy wyraźny wzrost stężenia rozpuszczonego tlenu (rys. 5a i 8a), natomiast wiosną, kiedy wody rzeczne stopniowo się ogrzewają (rys. 5b), stężenia rozpuszczonego tlenu nie spadają, lecz nieznacznie rosną (rys. 8b), co może wskazywać na oddziaływanie procesu biochemicznego natlenienia wody. Przeciętne poziomy stężenia tlenu zimą nie spadały na tym odcinku Dzierżąznej poniżej 8,4 mg/dm<sup>3</sup> i 70% nasycenia, natomiast wiosną, odpowiednio 10,3 mg/dm<sup>3</sup> i 73% nasycenia tlenem. Przesycenie toni wodnej tlenem występowało tylko w porze wiosennej i nie przekroczyło maksimum 107%. Podobny poziom natlenienia stwierdza się w innych ciekach płynących szybko, w korycie o dużym spadku (Kanownik i Kowalik 2008; Ostrowski i Bogdał 2008; Bogdał i in. 2014). Są to wyniki jednocześnie wyraźnie wyższe od uzyskanych w Dzierżąznej na dalszym jej biegu, gdzie spadek koryta i prędkość ruchu wody są niższe (Burchard i in. 2006; Moniewski 2015).

Poniżej pp. 9 Dzierżąznej (Malina) wpływa do dwóch małych zbiorników, nr 2 i nr 3. Pierwszy, mniejszy z nich, ma w strefie brzegowej więcej roślinności zanurzonej. Niewielka korekta stężenia tlenu rozpuszczonego wskazuje, że jego część jest zużywana na mineralizację obumarłej materii organicznej zdeponowanej na dnie. Poziomy stężenia tlenu jest jednak w obu zbiornikach wyraźnie wyższy, niż w zbiorniku nr 1 – rys. 8a. Wiosną dysproporcja pomiędzy tymi zbiornikami jeszcze się pogłębia. Stężenie tlenu w zbiornikach nr 2 i nr 3 wyraźnie wzrosło wraz z ogrzewaniem wody (rys. 5b i 8b), co może wskazywać na aktywizację biochemicznych źródeł dostawy tlenu w cieplejszych wodach, choć nie tak intensywną, jak w zbiorniku nr 1, który wykazał wyższe stężenia tlenu niż zbiorniki nr 2 i nr 3.

Generalnie w zbiornikach nr 1–3 stwierdzono spadek stężenia tlenu w wodach przypowierzchniowych wraz ze wzrostem temperatury wody (rys. 8a), czego nie da się jednoznacznie stwierdzić w przypadku wód naddennych tych zbiorników (rys. 8b).

Przeciętne nasycenie wód mniejszych zbiorników rencyjnych zimą kształtowało się na poziomie: nr 1: 53%, nr 2: 73% i nr 3: 71%. Wiosną te charakterystyki były wyraźnie wyższe, odpowiednio: 123%, 120% i 109%, natomiast w przypadku pomiarów przeprowadzonych nad dnem poszczególnych zbiorników, przeciętne nasycenie wód tlenem wyniosło odpowiednio: 94%, 102% i 109%. Są to wielkości, które nie wskazują na możliwość wystąpienia deficytów tlenowych spowodowanych intensyfikacją procesu mineralizacji dennej materii organicznej wraz ze wzrostem temperatury wody w zbiornikach w porze wiosennej.

Na krótkim odcinku pomiędzy zbiornikami nr 3 i nr 4, płynąc w umocnionym korycie, Dzierżązna zimą szybko pozyskuje tlen. Cienka warstwa zimnej wody i szybki, turbulentny przepływ sprzyjają aeracji. Wiosną ten proces nie jest już zauważalny. Dzierżązna dziedziczy po zbiornikach nr 2 i nr 3 ich temperaturę (wyższą niż w pp. 9) – rys. 5b oraz stężenie tlenu rozpuszczonego (wyższe niż w pp. 9) – rys. 8b, choć jego stężenia w efekcie przepływu korytem nie wzrastają. W zbiorniku nr 4, pozbawionym makrofitowej roślinności zanurzonej, zimą, przy stosunkowo chłodnej wodzie (rys. 5a) oraz częściowym opróżnieniu czaszy zbiornika z wody, następuje intensywne dotlenienie wody. Zarejestrowane stężenia tlenu są najwyższe ze wszystkich badanych obiektów – rys. 8a. W porze wiosennej przyrost stężenia tlenu nie jest już tak wysoki, bo o 2 mg/dm<sup>3</sup>, kiedy temperatura wody wzrosła o 11°C. Pomiar stężenia tlenu w wodzie naddennej i podpowierzchniowej wykazały odmienny przebieg reakcji na wiosenne wygrzewanie się wody (rys. 11). Nad dnem stężenie tlenu bardzo szybko rosło, podczas gdy w strefie przypowierzchniowej szybko malało wraz ze wzrostem temperatury wody. Jest to świadectwo efektywnej produkcji tlenu przez florę bentosową, natomiast przy powierzchni wody tlen jest zużywany i uwalniany do atmosfery przy nasyceniu sięgającym 140%.

Woda Dzierżąznej w największym i zarazem najgłębszym zbiorniku nr 5 wykazuje stężenia tlenu niższe, niż stwierdzono w położonym bezpośrednio powyżej zbiorniku nr 4. Zimą różnica sięga 1 mg/dm<sup>3</sup> (rys. 8a), a wiosną przekracza 2 mg/dm<sup>3</sup> (rys. 8b). Taką dysproporcję w natlenieniu przylegających do siebie akwenów płytszych i głębszych stwierdzili Jaguś i Rzętała (2008). Interesujący jest fakt obniżenia stężeń tlenu w warstwie naddennej zbiornika nr 5 wraz ze wzrostem temperatury wody (rys. 11b). Może to wskazywać na aktywizację biochemicznego rozkładu materii organicznej zdeponowanej na dnie zbiornika. Świadectwo tego, jednak w dużo większym wymiarze, zarejestrowano wiele lat wcześniej, w roku hydrologicznym 2002. Wtedy wody wyphywające z tego zbiornika kwalifikowały się pod względem tlenu rozpuszczonego do wód pozaklasowych (Burchard i in. 2006), a 15.04.2002 r. stwierdzono świadectwa zrzutu wód bez-



tlenowych. W korycie rzeki poniżej zbiornika nr 5 znaleziono wiele martwych ryb i raków. Pomiary wykazały stężenie tlenu  $3,2 \text{ mg/dm}^3$  i nasycenie tlenem 34%, czyli powyżej granicy 10% przyjętej dla wód beztlenowych, pomimo iż przez cały pozostały okres badań wielkość ta utrzymywała się powyżej  $62\%^2$  (materiały archiwalne Pracowni Ochrony Jakości Wód WNG UŁ).

Przeciętne nasycenie wód zretencjonowanych w obu stawach rekreacyjnych – górnym (zbiornik nr 4) i dolnym (nr 5) kształtowało się zimą na poziomie, odpowiednio: 99% i 86%, a wiosną: 136% i 114%. W warstwie naddennej obu zbiorników przeciętne nasycenie wody tlenem wyniosło: 137% i 103%. Są więc to wartości wyraźnie wyższe od stanu z roku 2002, nie grożące deficytem tlenowym zgubnym dla zwierząt, choć samo przesylenie wody tlenem też nie stanowi dla nich komfortu (Kajak 2001). Taki stan w swoich maksymalnych wielkościach sięga wiosną w badanych zbiornikach: nr 1: 152%, nr 2: 149%, nr 3: 123%, nr 4: 177% i nr 5: 137%. Są to wielkości charakterystyczne dla zbiorników o wysokiej produkcji pierwotnej (Gołdyn 2000; Sobczyńska-Wójcik i in. 2013). Bardzo wysoki poziom nasycenia wody tlenem w warstwie naddennej zbiornika nr 4: 197%, wskazuje na istotny udział również w tym procesie fitoplanktonu bentosowego.

Wody torfowiska niskiego odpowiadały, pod względem zawartości tlenu rozpuszczonego, wodom źródła Rudunki II (rys. 8). Ujście w spągu torfowiska ubogich w tlen wód podziemnych i penetracja przez nie kilkudziesięciocentymetrowej grubości pokładu osadów organicznych, nie sprzyjało natlenieniu wód odpływających z tego obiektu. Natlenienie odbywało się dopiero na niewielką skalę przy powierzchni tafli wody, pod warunkiem, że zimą nie występowało zlodzenie, wtedy stężenie tlenu spadało do  $1,0\text{--}1,5 \text{ mg/dm}^3$ . Wiosną, przy aktywizacji bujnie porastających torfowisko helofitów i zawieszono w wodzie biosestonu, stężenia tlenu wzrosły dwu- trzykrotnie. W skali badanych obiektów były to jednak wielkości nadal bardzo wyraźnie odbiegające od wód rzecznych i zretencjonowanych (rys. 8b).

Przeciętne nasycenie tlenem wód badanego torfowiska zimą wyniosło 11%, wiosną 49%. Zimą, zwłaszcza przy zlodzeniu w takim akwenu panują warunki beztlenowe i toksyczne, ze względu na pojawienie się siarkowodoru, który był wyczuwalny po wykonaniu otworu w lodzie.

Spływ wód Dzierżąznej od źródeł poprzez kolejne zbiorniki retencyjne sprawia, że wody pozyskują coraz więcej tlenu rozpuszczonego. Pomiary wykonywane zimą ukazują inny scenariusz tych zmian niż wiosną, zwłaszcza dla wód swobodnie płynących korytem rzeczny między zbiornikiem nr 1 i nr 2. Same zbiorniki retencyjne przyczyniają wodom rzeczny tlenu rozpuszczonego w ilości  $1,5\text{--}3,5 \text{ mg/dm}^3$ . Należy zauważyć, że im większy jest to zbiornik, tym większą bezwładnością w generowanych zmianach się charakteryzuje – tab. 3, czyli jego wody wykazują bardziej stabilne warunki tlenowe pomiędzy porą zimową i wiosenną.

**Tabela 3.** Zmiana średniego stężenia tlenu rozpuszczonego w wodzie pomiędzy zimą i wiosną

**Table 3.** Change in the mean concentration of dissolved oxygen in water between winter and spring

Zbiornik	Zmiana
Nr 1	+6,64 $\text{mg/dm}^3$
Nr 2	+3,90 $\text{mg/dm}^3$
Nr 3	+2,28 $\text{mg/dm}^3$
Nr 4	+1,63 $\text{mg/dm}^3$
Nr 5	+0,47 $\text{mg/dm}^3$

Zestawiając ze sobą wyniki pomiarów zimowych z wiosennymi uzyskujemy bardzo podobny obraz wzrostu stężenia tlenu rozpuszczonego pomiędzy pierwszym (pp. 1) i ostatnim punktem pomiarowym (nr 15), tj. o ok.  $6 \text{ mg/dm}^3$ . Zimą dominuje proces dyfuzji, czemu sprzyja niska temperatura wody, wiosną natomiast rozpoczyna się wegetacja fitoplanktonu dennego i zawieszono.

Przy efektywnym zagrożeniu dopływem zanieczyszczeń z urbanizującej się zlewni – co wykazały badania w roku 2002 (Burchard i in. 2006) i roku 2019 (Ziulkiewicz i in. 2021), należy się spodziewać postępującej eutrofizacji zbiorników retencyjnych i w efekcie tego zmian warunków tlenowych w górnym, źródłiskowym odcinku Dzierżąznej (Maliny). Depozycja na dnie dużej masy obumarłej materii organicznej może prowadzić do pojawienia się sytuacji, której ślady rozpoznano wiosną w roku 2002.

## 6. Podsumowanie i wnioski

W ramach zrealizowanych prac badawczych udokumentowano proces natleniania się wód Dzierżąznej (Maliny). Pomiary wykonywane zimą ukazują inny obraz tych zmian, niż wiosną. W porze zimowej jest on bardziej spójny dla wód płynących i zretencjonowanych, niż wiosną, kiedy zmiany natlenienia w zbiornikach retencyjnych mają wyraźnie większy zakres, niż w rzece. Pomimo tych rozbieżności przyrost stężenia tlenu rozpuszczonego w Dzierżąznej, pomiędzy pierwszym i ostatnim punktem badawczym jest w obu sezonach bardzo zbliżony i wynosi około  $6 \text{ mg/dm}^3$ .

Stwierdzono, że im większy jest zbiornik retencyjny na biegu Dzierżąznej (Maliny), tym większą bezwładnością w generowanych zmianach natlenienia wód rzecznych się charakteryzuje – czyli jego wody wykazują bardziej stabilne warunki tlenowe pomiędzy porą zimową i wiosenną.

Udokumentowane wczesną wiosną wysokie poziomy nasycenia tlenem zretencjonowanych wód Dzierżąznej (Maliny) są charakterystyczne dla zbiorników o wysokiej produkcji pierwotnej. Na uwagę zasługuje silne nasycenie wody tlenem w warstwie naddennej zbiornika nr 4 – kąpieliska, taka okoliczność wskazuje na istotny udział w tym procesie fitoplanktonu bentosowego.

Warunki termiczne oraz charakter ruchu wody w badanych obiektach wskazują, że w porze zimowej zasadniczym procesem dostawy tlenu do wód jest dyfuzja gazu

<sup>2</sup> Stężenia tlenu wyniosły przy minimum  $3,2 \text{ mg/dm}^3$ , a dolną granicę obserwacji stanowiło  $7,0 \text{ mg/dm}^3$ .

z atmosfery. Wiosną, gdy rośnie temperatura wody, co utrudnia efektywną rozpuszczalność tlenu atmosferycznego, na znaczeniu zyskuje fotosynteza roślinności wodnej ze wskazaniem na fitoplankton zawieszony i denny. Z kolei za ubytek tlenu w wodzie, poza oddychaniem zwierząt wodnych, odpowiada utlenianie zredukowanych form żelaza, co stwierdzono w źródle Rudunki II oraz mineralizacja obumarłej materii organicznej zachodząca w zbiornikach retencyjnych i zasadniczo w torfowisku niskim.

Wiosną tylko wody źródlane i torfowe nie mieściły się w normie stężenia rozpuszczonego tlenu dla wód II klasy jakości wód powierzchniowych (9,1 mg/dm<sup>3</sup>) (Rozporządzenie... 2021), natomiast zimą do grupy tej zaliczono również zbiornik nr 1 i wody Dzierżąnej (Maliny) bezpośrednio poniżej jego obiektu. Tak więc badane wody płynące i zretencjonowane reprezentują zasadniczo dobrą jakość, choć problemem dla zwierząt wodnych są wiosenne stany wysokiego przesylenia toni wodnej tlenem.

## 7. Bibliografia

- Bartnik, A., Tomaszewski, E., 2000. Charakterystyka sieci rzecznej małej zlewni położonej w strefie krawędziowej Wyżyny Łódzkiej. *Acta Universitatis Lodzianis. Folia Geographica Physica* 5, 49–65, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Bogdał, A., Kanownik, W., Kowalik, T., Ostrowski, K., Rajda, W., 2014. Jakość i walory użytkowe wód odpływających ze zlewni wybranych zbiorników małej retencji planowanych na Pogórzu Ciężkowickim. Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków.
- Bojanowska, P., 2006. Gospodarowanie wodą w zlewni Dzierżąnej, [w:] Burchard, J., Ziulkiewicz, M. (red.), Stan i antropogeniczne zmiany jakości wód w Polsce, Tom IV: Stan jakości wód zlewni Dzierżąnej. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Burchard, J., Mela, S., 1995. Ilościowa i jakościowa charakterystyka wód źródłanych strefy krawędziowej Wzniesień Łódzkich. Materiały VIII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej: Chemizm opadów atmosferycznych, wód powierzchniowych i podziemnych, Łódź, IX.1995, 14–16.
- Burchard, J., Hereźniak-Radecka, U., Walisch, M., Ziulkiewicz, M., 2006. Hydrochemiczna charakterystyka wód rzecznych zlewni Dzierżąnej, [w:] Burchard, J., Ziulkiewicz, M. (red.), Stan i antropogeniczne zmiany jakości wód w Polsce, Tom IV: Stan jakości wód zlewni Dzierżąnej. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Gołdyn, R., 2000. Zmiany biologicznych i fizykochemicznych cech jakości wody rzecznej pod wpływem jej piętrzenia we wstępnych, nizinnych zbiornikach zaporowych. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Adama Mickiewicza, Poznań.
- Hereźniak-Ciotowa, U., Ziulkiewicz, M., 1997. Chemizm wód źródłanych Strugi Dobieszkowskiej (Młynówki). *Acta Universitatis Lodzianis. Folia Geographica Physica* 2, 169–177, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Jaguś, A., Rzętała, M., 2008. Znaczenie zbiorników wodnych w kształtowaniu krajobrazu (na przykładzie kaskady jezior Pogorii). Akademia Techniczno-Humanistyczna, Uniwersytet Śląski, Bielsko-Biała–Sosnowiec.
- Jokiel, P., Maksymiuk, Z., 2000. Morfologiczne i geologiczne tło procesu obiegu wody w małej zlewni położonej w północnej części Wyżyny Łódzkiej. *Acta Universitatis Lodzianis. Folia Geographica Psychica* 5, 9–28, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Kajak, Z., 2001. Hydrobiologia-limnologia. Ekosystemy wód śródlądowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kanownik, W., Kowalik, T., 2008. Walory użytkowe wody rzeki Wilgi w aspekcie jej magazynowania w małym zbiorniku retencyjnym. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus* 7 (3), 23–31.
- Klatkowa, H., 1996. Elementy glaciektoniczne w budowie geologicznej i rzeźbie podłódzkiej części środkowej Polski, [w:] Przejawy glaciekttoniki w Polsce Środkowej. *Acta Geographica Lodzianis* 72, 7–104, Łódzkie Towarzystwo Naukowe, Łódź.
- Kucharski, L., 2007. Flora źródeł – skład i gatunki wskaźnikowe, [w:] Jokiel, P. i in. (red.), Źródła Polski. Wybrane problemy krenologiczne. Regina Poloniae, Łódź.
- Macioszczyk, A., Dobrzyński, D., 2002. Hydrogeochemia strefy aktywnej wymiany wód podziemnych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Maksymiuk, Z., 1979. Warunki występowania wód podziemnych i strefy ich kontaktu z wodami powierzchniowymi w regionie łódzkim. *Acta Universitatis Lodzianis. Nauki Matematyczno-Przyrodnicze* 21, 123–129.
- Maksymiuk, Z., Mela, S., 1995. Źródła Polski Środkowej. *Acta Universitatis Lodzianis. Folia Geographica* 20, 109–119, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Mazurek, M., 2010. Hydrogeomorfologia obszarów źródłowych (dorzecze Parsęty, Polska NW). Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Adama Mickiewicza, Poznań.
- Moniewski, P., 2004. Źródła regionu łódzkiego. *Acta Geographica Lodzianis* 87, 1–140. Łódzkie Towarzystwo Naukowe, Łódź.
- Moniewski, P., 2015. Cechy fizykochemiczne wód powierzchniowych i ich sezonowa zmienność na przykładzie Dzierżąnej. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus* 14 (3), 93–106.
- Ostrowski, K., Bogdał, A., 2008. Ocena jakości i walorów użytkowych wody odpływającej ze zlewni potoku Korzeń w aspekcie jej magazynowania w zbiorniku małej retencji. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus* 7 (3), 3–11.
- Pęczkowska, B., Figiel, Z., 2006. Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000, Pierwszy Poziom Wodonośny, ark. Zgierz (590). PIG–PIB, Warszawa.
- Porowska, D., 2004. Zawartość rozpuszczonego tlenu i dwutlenku węgla w wodach podziemnych wybranych środowisk hydrogeochemicznych. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, 24.
- Rozporządzenie z dnia 25 czerwca 2021 roku w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego oraz sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych, a także środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych. *Dziennik Ustaw* z dnia 13.08.2021, poz. 1475.
- Sobczyńska-Wójcik, K., Koc, J., Rafałowska, M., 2013. Temperature and oxygen profiles of restored water bodies. *Ecological Chemistry and Engineering A* 20 (10), 1115–1125. [https://doi.org/10.2428/ceca.2013.20\(10\)101](https://doi.org/10.2428/ceca.2013.20(10)101)
- Starmach, J., 2000. Kierunki badań ekosystemów wodnych rzek i zbiorników zaporowych. *Kosmos* 49 (1), 279–286.
- Wojewódzki program małej retencji dla województwa łódzkiego, 2005. Wojewódzki Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych w Łodzi [materiały niepublikowane].
- Ziulkiewicz, M., 2006. Źródła w rezerwacie „Struga Dobieszkowska”, [w:] Moniewski, P. i in. (red.), Ogólnopolska Konferencja Naukowa „Źródła – środowiskowe aspekty badań”, Tom I. Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki, Łódź, 80–84.
- Ziulkiewicz, M., 2016. Hydrogeochemia źródeł w strefie krawędziowej Wzniesień Łódzkich. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Ziulkiewicz, M., Burchard, J., Hereźniak-Radecka, U., 2006. Hydrochemiczna charakterystyka wód źródłanych zlewni Dzierżąnej, [w:] Burchard, J., Ziulkiewicz, M. (red.), Stan i antropogeniczne zmiany jakości wód w Polsce, T. IV: Stan jakości wód zlewni Dzierżąnej. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 85–100.
- Ziulkiewicz, M., Grulke, R., Gajda, N., 2021. Identyfikacja dopływu substancji biogennej ze strefy hyporeicznej do koryta ciekłu źródłowego na obszarze podmiejskim, [w:] Czerniawski, R., Bilski, P. (red.), Funkcjonowanie i ochrona wód płynących. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin, 264–281.

Żelazna-Wieczorek, J., Sochacka, A., Ziułkiewicz, M., 2010. Zróżnicowanie zbiorowisk okrzemek w źródłach rezerwatu Struga Dobieszowska, [w:] Ziułkiewicz, M. (red.), Stan i antropogeniczne zmiany jakości wód w Polsce, T. VI. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 165–175.

**Źródła internetowe**

<https://sk.gis.gov.pl/index.php/kapielisko/316> [dostęp: 10.12.2021, ostatnia aktualizacja: 31.08.2021].

[https://wody.isok.gov.pl/imap\\_kzgw/?gmap=gpSIGW](https://wody.isok.gov.pl/imap_kzgw/?gmap=gpSIGW)





Tomasz Kalicki<sup>1</sup>  • Paweł Przepióra<sup>1</sup>  • Michał Jabłoński<sup>2</sup> • Marcin Frączek<sup>1</sup>   
Łukasz Podrzycki<sup>3</sup>



<sup>(1)</sup> Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Instytut Geografii i Nauk o Środowisku, Zakład Geomorfologii i Geoarcheologii

<sup>(2)</sup> Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Studenckie Koło Naukowe „Złoty Bazant”

<sup>(3)</sup> Naukowiec niezrzeszony

E-mail: [tomaszkalicki@ymail.com](mailto:tomaszkalicki@ymail.com); [pawelprzepiora1988@gmail.com](mailto:pawelprzepiora1988@gmail.com); [michaljablonski98@wp.pl](mailto:michaljablonski98@wp.pl); [marcinfraczek1987@gmail.com](mailto:marcinfraczek1987@gmail.com); [lukasz88.kielce@gmail.com](mailto:lukasz88.kielce@gmail.com)

## Zróznicowanie litologiczne i wiek kemów koło Suchedniowa (Wyżyna Kielecka)

## Lithological diversity and age of kames near Suchedniów (Kielce Upland)

### Zarys treści

Wzgórza i terasy kemowe położone na Płaskowyżu Suchedniowskim (północna część Wyżyny Kieleckiej) były przedmiotem badań w latach 70. XX wieku. W 2019 r. rozpoczęto nowymi metodami dalsze badania w celu określenia wieku i genezy osadów budujących te formy. Kemy powstały podczas zlodowaceń środkowopolskich (MIS 6), ok. 175–137 tys. lat temu. Urozmaicona hipsometria, ze wzgórzami i obniżeniami, spowodowała rozdzielenie wkraczającego lądolodu na dwa loby. W trakcie deglacjacji w części międzylobowej występowała duża zmienność warunków sedymentacji (5 poziomów akumulacji w profilach KR II i 4 w KR I). Spowodowało to wyższe położenie (KR II) kemów wodnolodowcowych z przewagą osadów piaskowo-żwirowych nieprzykrytych moreną. Uformowane niżej (KR I) kemy złożone, zbudowane z poziomów akumulacyjnych o naprzemiennie występujących drobniejszych osadach (kemy limnoglacialne) i grubszych – piaskowo-żwirowych (kemy wodnolodowcowe) zostały przykryte moreną ablacyjną z głazami narzutowymi. Formy te powstały podczas deglacjacji arealnej i topnienia bloków martwego lodu. Tempo tego procesu było zmienne i trwało od kilkudziesięciu do kilku tysięcy lat, co mimo pojawiających się inwersji, potwierdzają uzyskane daty TL. Plejstocenska terasa fluwialna (PK 1) oraz holocenijskie aluwia w dnie doliny Kamionki zostały wcięte w osady kemów i teras kemowych.

**Słowa kluczowe** Zlodowacenia środkowopolskie (odra), kompleks środkowopolski, akumulacja międzylobowa, kemy.

### Abstract

The kame hills and terraces located in the Suchedniów Plateau (northern part of the Kielce Upland) were the subject of research in the 1970s. In 2019, further study was started using new methods to determine the age and genesis of the sediments that build these forms. Varied hypsometry, with hills and depressions, divided the advanced ice sheet into two lobes. During deglaciation in the inter-lobe part, there was a large variability of sedimentation conditions (5 accumulation members in KR II and 4 in KR I profiles). It was resulted in the higher position (KR II) of fluvioglacial kames with dominant of sand and gravel sediments not covered with moraine. The lower (KR I), complex kames were formed, composed of alternately occurring accumulation members of finer sediments (limnoglacial kames) and coarser – sand-gravel (fluvioglacial kames) covered with ablation moraine with erratics. These forms were created during areal deglaciation and the melting of blocks of dead ice. The rate of this process was variable, and it lasted from several dozen to several thousand years, which is confirmed by the obtained TL dates, despite the appearing inversions. The Pleistocene fluvial terrace (PK 1) and the Holocene alluvia in the bottom of the Kamionka valley were cut into kames and kame terraces sediments.

**Keywords** Middle-Polish (odra) glaciations, Middle Polish Complex, inter-lobe accumulation, kames.

## 1. Wprowadzenie

Tematyka form i osadów glacialnych na obszarze Polski jest bardzo obszerna (m.in. Czarnocki 1927; Pałowski 1928; Różycki 1967, 1972; Lewandowski i in. 1975; Lindner 1988, 2004, 2005; Maruszczak 1993; Wysota 2002; Ber i in. 2007; Ludwikowska-Kędzia, Olszak 2009; Rdzany i in. 2015, 2021ab; Marks i in. 2019; Dzierżek, Lindner 2021; Ludwikowska-Kędzia 2021; Wieczorek i in. 2021). Zlodowacenia środkowopolskie wywarły duży wpływ na budowę geologiczną

i rzeźbę Gór Świętokrzyskich (m.in. Czarnocki 1931; Klatka 1964; Różycki 1967; Lindner 1978; Fedorowicz 1996; Lindner 1996; Marks 2004; Lindner, Marks 2012), ich północnego przedpola (m.in. Bartosik 1972; Lewandowski i in. 1975; Filonowicz 1978, 1979; Rdzany 1993, 2009; Przepióra 2010, 2012; Kuształ, Kalicki 2016; Kalicki i in. 2017; Jabłoński 2021) oraz terenów położonych na południowy wschód (m.in. Ludwikowska-Kędzia i in. 2015; Ludwikowska-Kędzia 2000, 2018, 2021) i na zachód (Filonowicz 1972; Lindner 1977) od głównego Pasma Łysogórskiego.

Urozmaicona rzeźba terenu Płaskowyżu Suchedniowskiego spowodowała, że łądolód w czasie zlodowaceń środkowopolskich (kompleks środkowopolski) wkroczył do Kotliny Suchedniowskiej dwoma obniżeniami od północy i zachodu (Lewandowski i in. 1975), zajmując niemal całą zlewnię Kamionki (Lindner 1978). W czasie deglacjacji arealnej na stokach wzgórz na zachód od Suchedniowa powstały formy akumulacji międzylobowej – kemy i kilka poziomów teras kemowych (Lewandowski in. 1975).

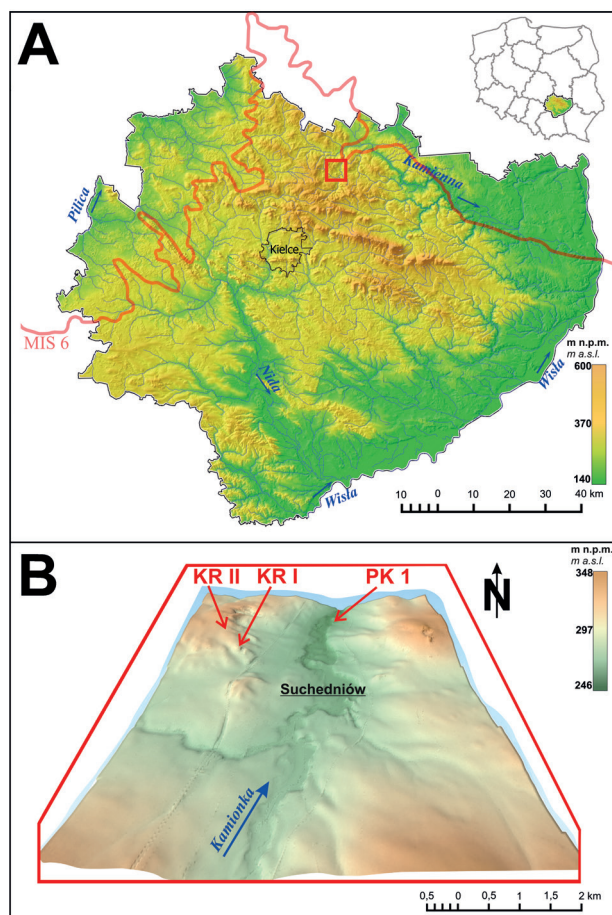
W ostatnich latach zagadnienia dotyczące osadów oraz rzeźby glacialnej doliny Kamionki były podejmowane okazjonalnie przy realizacji innych badań geomorfologicznych (m.in. Kalicki i in. 2017; Przepióra 2017, 2021). Nowe, bardzo dobre i rozległe odświeżenia będące efektem budowy drogi S7 w ostatnim dziesięcioleciu pozwoliły na ponowne opisanie i opróbowanie profili w piaskowniach na zachód od Suchedniowa, które poprzednio studiowane były wiele lat temu przez Lewandowskiego i in. (1975). Rozpoczęte w 2019 r. prace umożliwiły, przy użyciu współczesnych metod, udokumentowanie zmian sedymentacyjnych z użyciem kodów litogenetycznych i litofacjalnych (Zieliński 2014) i datowanie metodą TL osadów budujących wzniesienia w środkowej części zlewni Kamionki, a także przedstawić model 3D ewolucji tego obszaru. Są to pierwsze tak szczegółowo opracowane profile osadów kemowych w regionie świętokrzyskim.

## 2. Lokalizacja i charakterystyka obszaru

Obszar badań położony jest na Płaskowyżu Suchedniowskim będącym częścią Wyżyny Kieleckiej (Kondracki 1977; Solon i in. 2018), ok. 30 km na północ od Kielc (rys. 1) i wchodzi w skład północnego obrzeżenia mezozoicznego Gór Świętokrzyskich. Znajduje się on w zlewni Kamionki. Jest to rzeka III rzędu o długości ok. 107 km, prawostronny dopływ Kamiennej. Jej średni spadek ok. 5‰ oraz odcinki przełomowe nadają Kamionce charakter rzeki górskiej (Przepióra 2017, 2021).

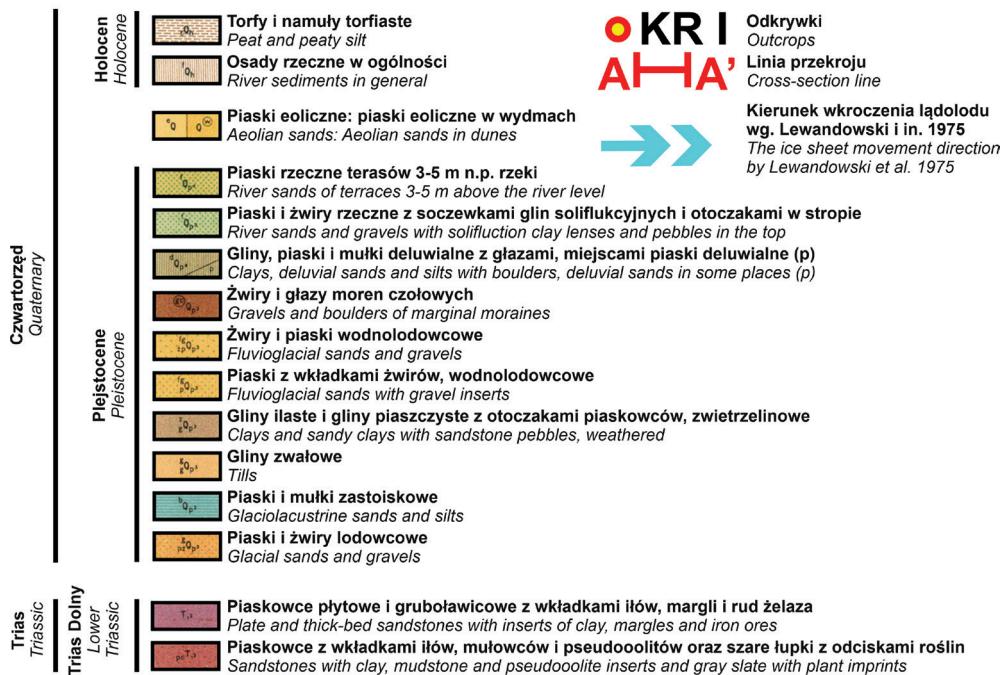
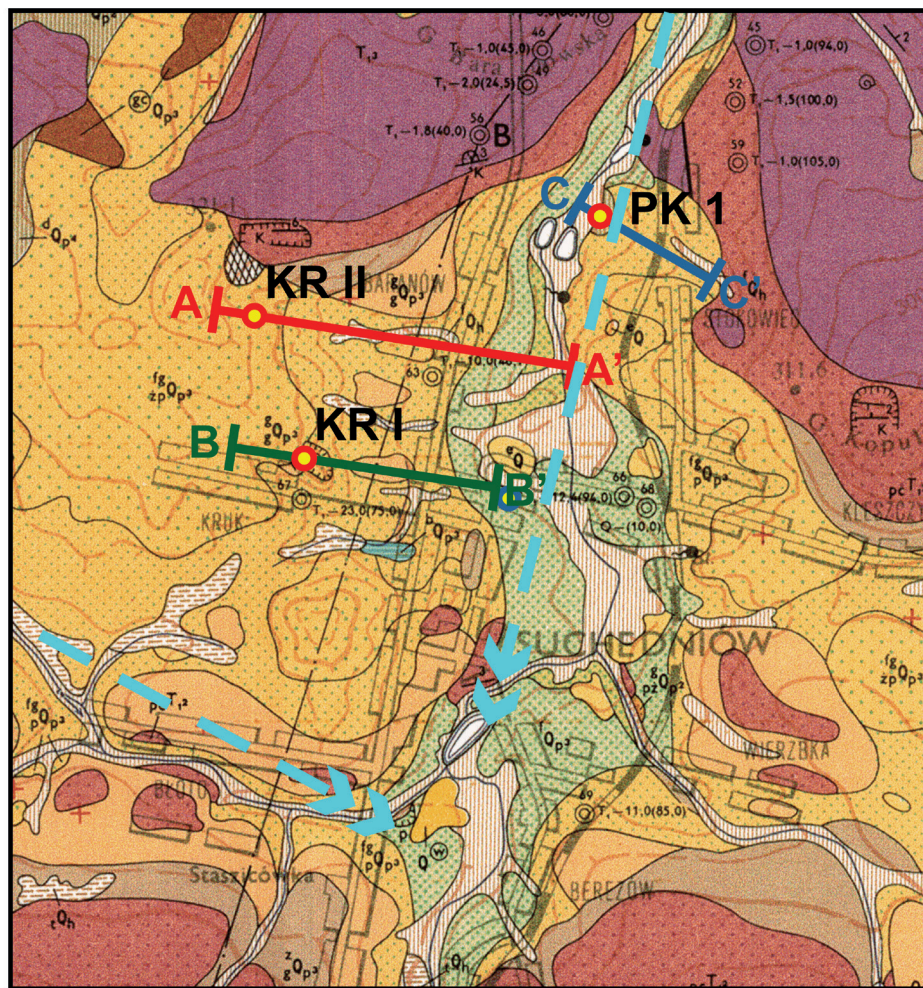
W trakcie zlodowaceń środkowopolskich (Mojski 2005; Lindner i in. 2012), dno doliny Kamionki zostało wypełnione osadami pochodzenia lodowcowego i wodnolodowcowego (rys. 2; Filonowicz 1978, 1979). Przykryły one przedczwartorzędowe podłoże, którego wychodnie występują na pobliskich, niekiedy przekraczających wysokość 300 m n.p.m., wzgórzach. Są to przede wszystkim charakterystyczne dla tej części regionu świętokrzyskiego, czerwone piaskowce triasowe. Miąższość osadów plejstoceńskich w rejonie badanych stanowisk jest stosunkowo niewielka i niekiedy nie przekracza 1 m (rys. 2; Jabłoński 2021; Przepióra 2021). Ich miąższość wzrasta w obrębie elewacji morfologicznych, które tworzą piaszczysto-żwirowe wzgórza kemowe oraz kilka poziomów teras kemowych w zachodniej części zlewni Kamionki (Lewandowski i in. 1975; Przepióra, 2017, 2021; Kalicki i in. 2020, 2021b, Jabłoński 2021). W piaski fluwioglacjalne, które wypełniają wyraźne obniżenie terenu w rejonie Suchedniowa, zostały włożone aluwia wyższej terasy Kamionki z okresu stadiu warty (rys. 3; Kalicki i in. 2017), a także aluwia niższej, prawdopodobnie vistuliańskiej terasy i holocenijskiej równiny zalewowej (Przepióra 2021).

Szczegółowe badania zostały wykonane w dwóch stanowiskach. Profil KR II położony jest na 5-metrowej ścianie nieczynnej piaskowni na Szpicu (N 51°03'27,14", E 20°48'51,84"), ok. 300 m na południe od kopalni „Włochy” w Baranowie. Profil KR I położony jest na zachodniej, 15-metrowej ścianie piaskowni na Kruku przy ul. Zagórskiej w Suchedniowie (N 51°03'02,37", E 20°49'04,67").



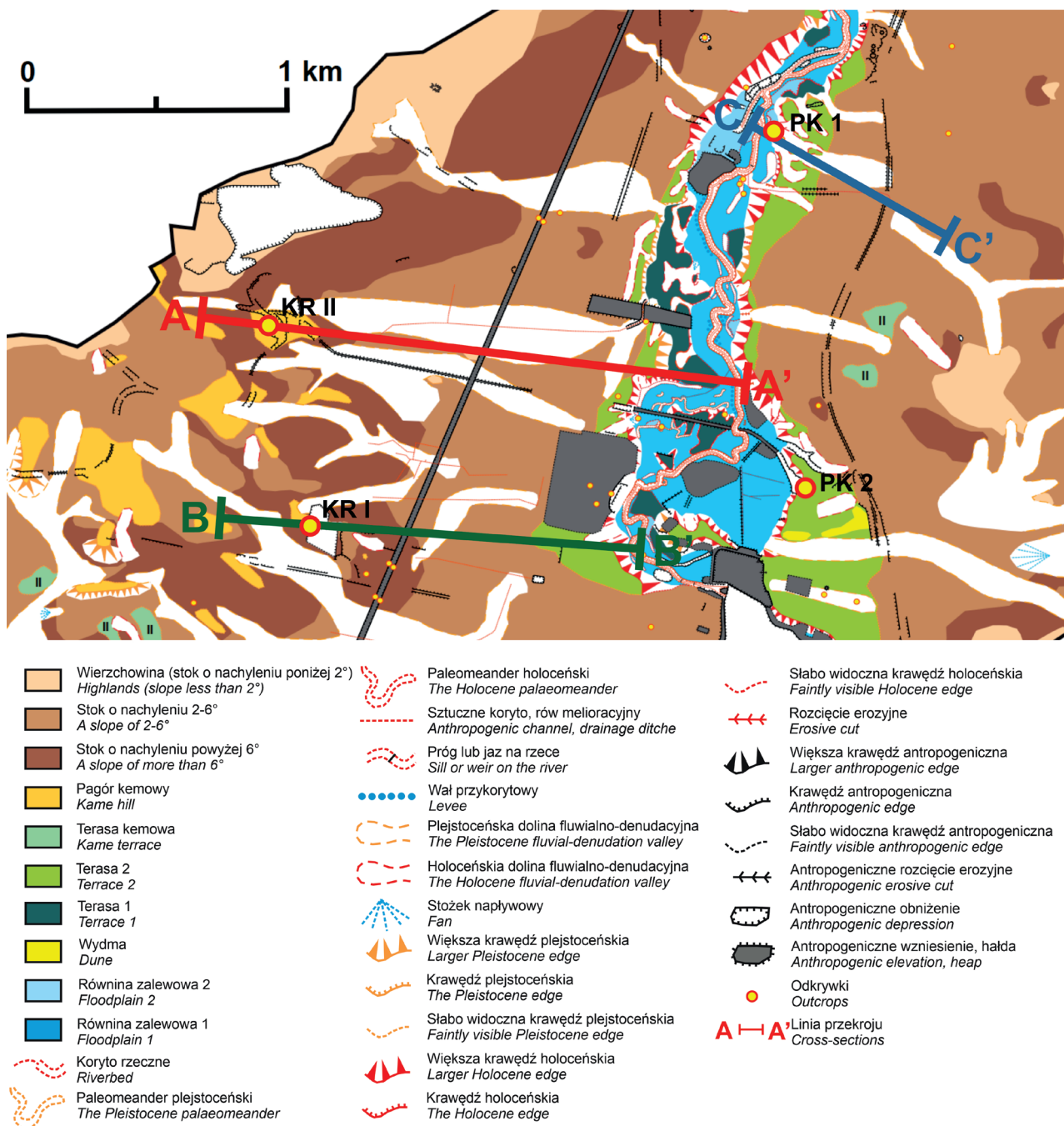
**Rys. 1.** Położenie obszaru badań na numerycznym modelu terenu (NMT) województwa świętokrzyskiego (A) oraz Kotliny Suchedniowskiej (B) (oprac. M. Frączek na podstawie danych pozyskanych z CODGiK MGGP Aero, Nr GI-FOTO.703.44.2014) oraz maksymalny zasięg zlodowaceń środkowopolskich (wg Marks i in. 2019)

**Fig. 1.** Location of the study area on the Digital Elevation Model (DEM) of the Świętokrzyskie Voivodeship (A) and Suchedniów Basin (B) (by M. Frączek based on data obtained from CODGiK MGGP Aero, No. GI-FOTO.703.44.2014) and Middle-Polish glaciations maximum range (by Marks *et al.* 2019)



Rys. 2. Budowa geologiczna okolic Suchedniowa (środkowy odcinek Kamionki) (Filonowicz 1978, 1979, uzupełnione)

Fig. 2. Geological structure of the Suchedniów region (middle section of the Kamionka River) (Filonowicz 1978, 1979, supplemented)



Rys. 3. Mapa geomorfologiczna badanego obszaru (Przepióra 2021, uzupełnione)

Fig. 3. A geomorphological map of study area (Przepióra 2021, supplemented)

### 3. Cel i metody badań

Głównym celem prowadzonych w latach 2019–2021 badań była tekstura i struktura oraz wiek osadów budujących wzgórze kemowe koło Suchedniowa w oparciu o nowe odślonięcia. Umożliwiło to nawiązanie i korelację z wynikami wcześniejszych badań Lewandowskiego i in. (1975), a także ich częściową weryfikację z użyciem metod sedimentologicznych i datowań bezwzględnych.

Ogólna sytuacja morfologiczna stanowisk została rozpoznana w oparciu o archiwalne odwierty geologiczne, wycinek szczegółowej mapy geomorfologicznej (Przepióra

2017, 2021) i geologicznej (Filonowicz 1979), wykonane przekroje hipsometryczne przebiegające przez oba stanowiska KR I oraz KR II (Jabłoński 2021) oraz wyższą terasę Kamionki PK 1 (Kalicki i in. 2017).

W trakcie badań terenowych wykorzystano dwie koparki oraz sprzęt alpinistyczny, co umożliwiło odślonięcie kilkunastometrowej ściany, jej opis geologiczny i gleboznawczy oraz dokumentację fotograficzną (rys. 4). Z wydzielonych warstw w profilu KR I pobrano 69 próbek do analiz sedimentologicznych oraz 11 do datowania termoluminescencyjnego (TL), natomiast z KR II odpowiednio 28 i 4 próbki.





**Rys. 4.** Prace terenowe w piaskowni na stanowisku KR II (A) (fot. P. Przepióra 2020) oraz KR I (B, C, D, E, F) przy użyciu koparki oraz zestawu alpinistycznego (fot. P. Przepióra 2019)

**Fig. 4.** Field works in the sand pit at the KR II (A) (photo P. Przepióra 2020) and KR I (B, C, D, E, F) site using an excavator and a climbing set (photo P. Przepióra 2019)

W Laboratorium Geomorfologiczno-Hydrologicznym Zakładu Geomorfologii i Geoarcheologii Instytutu Geografii i Nauk o Środowisku Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach wykonano analizę uziarnienia metodą sitową z wykorzystaniem zestawu sit (DIN ISO 3310/1) i przesiewaczy „Retsch-Rahmen”, a dla grubszych osadów zestawu sit i wytrząsarki „Multiserw-Morek” LpzE-2e. Naj-

grubszą frakcję budującą górną część profilu zmierzono w terenie metodą planimetryczną przy użyciu łąty niwelacyjnej (Rutkowski 1995). Dla dwóch próbek z domieszką osadów ilasto-pylastych z profilu KR II zastosowano metodę dyfrakcji laserowej z wykorzystaniem analizatora wielkości cząstek „Mastersizer 3000” firmy Malvern Instruments Ltd.

Wyniki uziarnienia wraz ze wskaźnikami Folka-Warda (1957) zostały przedstawione graficznie w programach GRANULOM i Corel Draw.

W oparciu o opis terenowy oraz analizy granulometryczne w profilach wydzielono poziomy akumulacyjne (kompleksy) i subpoziomy różniące się dominującą litologią, kodami litofacjalnymi i litogenetycznymi.

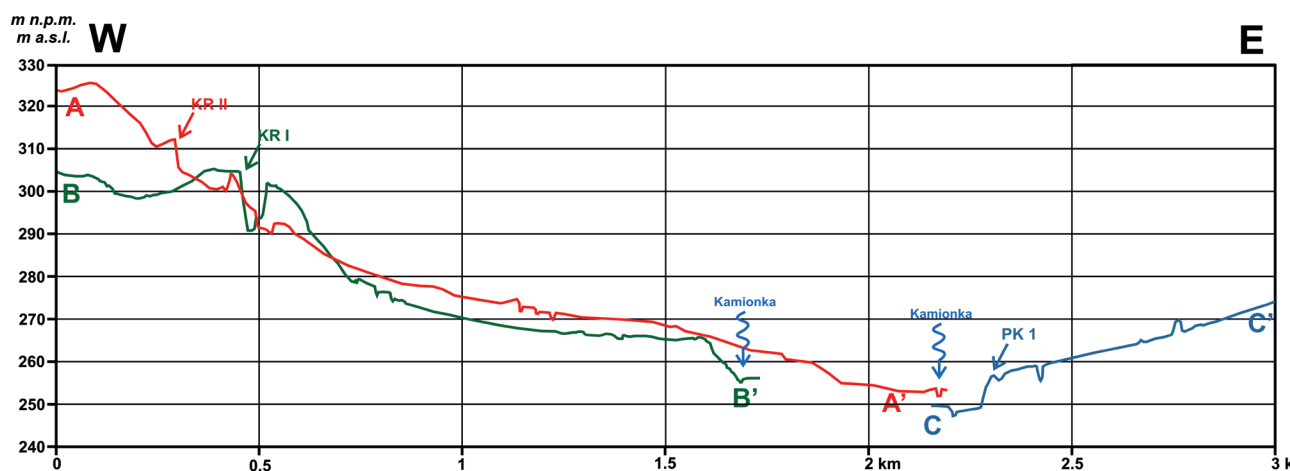
Datowania TL wykonano na czytniku „Laboratory Leader-Analyser RA’04” oraz mierniku stężenia pierwiastków promieniotwórczych „MAZAR-01”. Próbki po oczyszczeniu z wykorzystaniem ultradźwięków, wody destylowanej i 10% HCl zostały podzielone i wyzerowane pod lampą UV w ciągu 24 godzin. Ziarna kwarcu zostały naświetlone pro-

mieniami gamma dawkami 100, 200 oraz 300 Grey (Gy) w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie (Kalicki i in. 2020, 2021a).

Przy użyciu silnika graficznego „Unreal Engine 4” opracowano model 3D rekonstruujący etapy ewolucji obszaru w czasie recesji lądolodu środkowopolskiego.

#### 4. Wyniki badań

Badane szczegółowo stanowiska oddalone są od siebie o ok. 800 m. Profile w obu piaskowniach położone są na różnych poziomach (rys. 5). Stropy profili KR II i KR I znajdują się odpowiednio na wysokościach 312 i 306,6 m n.p.m.



Rys. 5. Przekroje hipsometryczne przez badane stanowiska KR I i KR II oraz terasę fluwialną na stanowisku PK 1 (Kalicki i in. 2017)

Fig. 5. Hipsometric cross-sections of the KR I and KR II study sites and the fluvial terrace at the PK 1 site (Kalicki et al. 2017)

##### 4.1. Profil KR II – wyższy kem

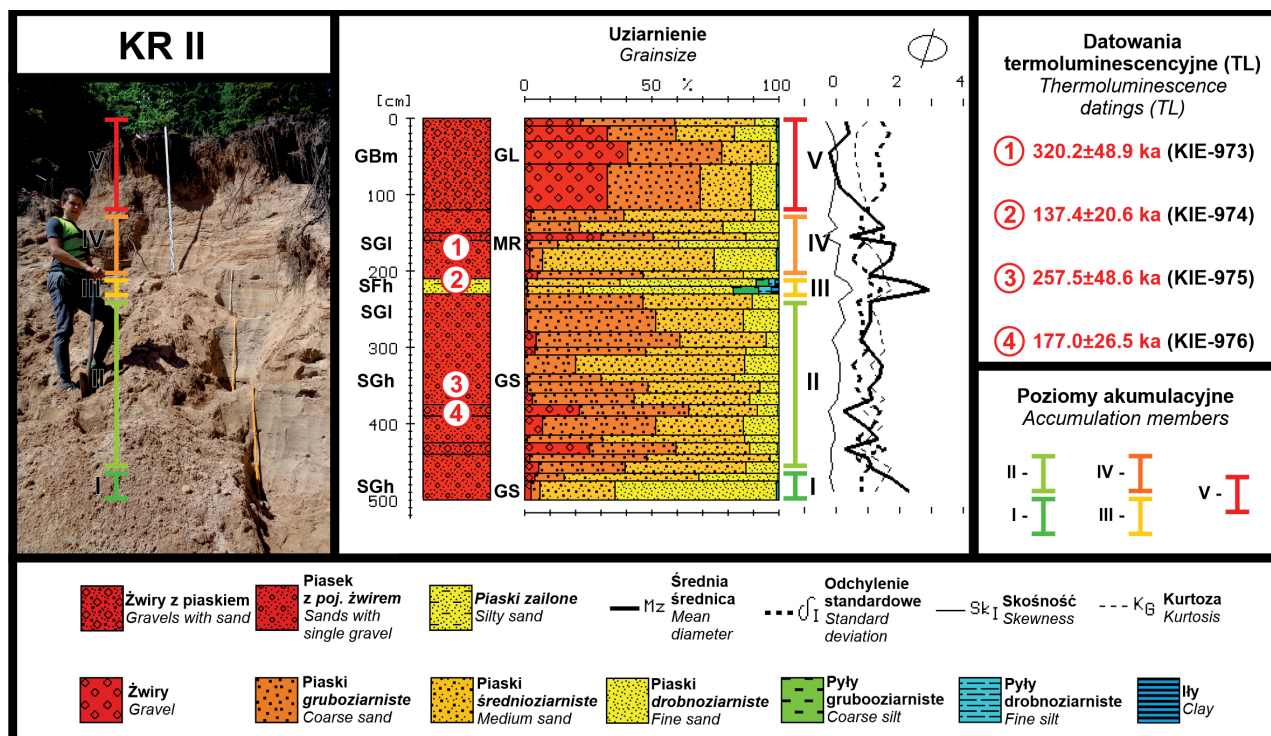
W profilu wydzielono 5 poziomów akumulacyjnych (rys. 6; Jabłoński 2021). W pierwszym poziomie (I) (głębokość 5,0–4,8 m p.p.t.) występują poziomo warstwowane piaski drobno- i średnioziarniste z pojedynczymi żwirami (SGh). Średnia średnica ( $Mz$ ) wynosi około 2,4  $\phi$ , a wysortowanie osadów ( $\delta_1$ ) jest umiarkowane (ok. 0,9).

Na głębokości 4,8 do 2,2 m znajduje się drugi poziom (II). Poza dwoma wyraźnymi wkładkami żwirów (ok. 20–25% udziału) na głębokości 4,3 i 3,8 m przeważają piaski grubo- i średnioziarniste z niewielką domieszką żwiru przeważnie o poziomym warstwowaniu (SGh). W górnej części poziomu występują osady o warstwowaniu przekątnym (SGI). Udział piasku drobnoziarnistego nie przekracza 15%, a domieszka frakcji pylastej jest znikoma. Średnia średnica ziaren ( $Mz$ ) warstw z większą zawartością żwirów wynosi ok. 0,4  $\phi$ , a ich wysortowanie jest słabe ( $\delta_1 = 1,4$ ), natomiast osadów piaszczystych ( $Mz$  ok. 1,2  $\phi$ ) wysortowanie jest umiarkowane ( $\delta_1 < 1$ ). W poziomie tym wykonano dwa datowania TL osadów z głębokości 3,75 i 3,6 m p.p.t., które dały wyniki odpowiednio 177,0  $\pm$  26,5 tys. lat (KIE-976) oraz 257,5  $\pm$  38,6 tys. lat (KIE-975).

Na głębokości 2,2–2,1 m wydzielono trzeci poziom (III), który tworzą piaski drobnoziarniste, zailone (domieszka osadów frakcji ilastej, pylastej ponad 20%), poziomo warstwowane (SFh). Średnia średnica ziaren ( $Mz$ ) ma wartość od 2,5 do 3,0  $\phi$ , a wysortowanie jest słabe ( $\delta_1$  ok. 1,2).

Czwarty poziom (IV) na głębokości od 2,1 do 1,2 m obejmuje piaski średnio- i drobnoziarniste, a jego wykształcenie jest podobne do osadów poziomu drugiego na głębokości 4,8–2,2 m. Zawartość żwirów waha się od kilku do nawet 30%. Są to umiarkowanie wysortowane ( $\delta_1 = 0,8$ –1,0) osady przekątnie warstwowane (SGI) ze strukturami depozycyjnymi megariplemarków. Średnia średnica ziaren ( $Mz$ ) dla warstw piaszczystych wynosi ok. 1  $\phi$ , natomiast dla ławic ze żwirami ok. 0,5  $\phi$ . Wykonano dwa datowania TL na głębokości 2,1 oraz 1,6 m, które dały wyniki odpowiednio 137,4  $\pm$  20,6 tys. lat (KIE-974) oraz 320,2  $\pm$  48,0 tys. lat (KIE-973).

Ostatni, piąty poziom (V) znajduje się na głębokości od 1,2 do 0,0 m. Charakteryzuje się on znacznie większą zawartością żwirów (do 40%) w osadach piaszczystych, natomiast domieszki ilów i pyłów są znikome (do 1%). Występują tu liczne, pojedyncze otoczaki skał skandynawskich (granit rapakiwi), jak i lokalnego piaskowca o średnicy do 10 cm. Osady w niemal całym poziomie akumulacyjnym mają strukturę masywną, szczególnie w górnej jego części



Rys. 6. Stanowisko KR II (fot. P. Przepióra 2019) i profil granulometryczny, poziomy akumulacyjne oraz datowania TL (Jabłoński 2021, zmienione). Kody litofacjalne: GBm – żwir z głazami, struktura masywna, SGH – piasek żwirowy, warstwowanie poziome, SGI – piasek żwirowy, przekątne warstwowanie małokątowe, SFh – piasek mułowy/ilasty, warstwowanie poziome; Kody litogenetyczne: GL – depozycja glacialna, GS – pokrywa żwirowa, MR – megariplemarki (wg Zielińskiego 2014)

Fig. 6. KR II site (photo by P. Przepióra 2019) with granulometry profile, accumulation members and TL dating (Jabłoński 2021, revised). Lithofacial signatures: GBm – boylderly gravel, massive structure, SGH – gravelly sand, horizontal lamination, SGI – gravelly sand, long-angle cross stratification, SFh – silty/clayey sand, horizontal lamination. Lithogenetical signatures: GL – glacial deposition, GS – gravel sheet, MR – megaripple marks (according to Zieliński 2014)

(GBm). Średnia średnica ziaren (Mz) osadów piaszczysto-żwirowych budujących matriks wypełniający przestrzeń pomiędzy większymi głazami waha się od ok. -0,4 do 0,8 φ, a ich wysortowanie jest słabe (δ<sub>i</sub> od 1 do 1,8) (rys. 6). W górnej części tego poziomu, na piaskach różnoziarnistych z licznymi głazami i otoczkami wykształciła się gleba – arenosol zbielicowany (SBb) z poziomami Ol-AE-E-C na siedlisku boru świeżego *Peucedano-Pinetum*.

#### 4.2. Profil KR I – niższy kem

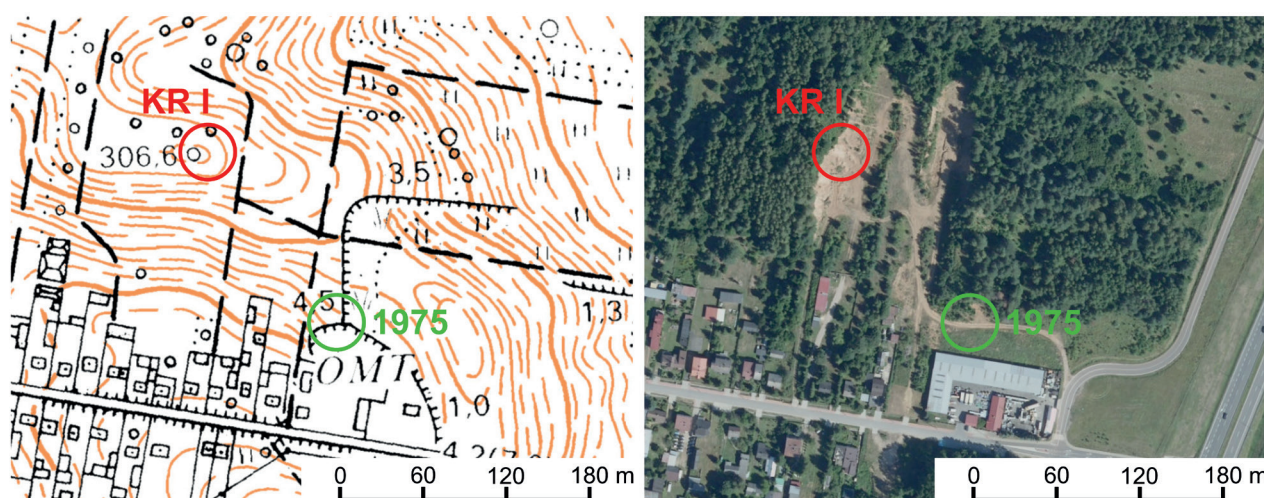
Profil KR I jest zlokalizowany w nowej części piaskowni położonej ok. 150 m na NW i ok. 10 m wyżej od części badanej przez Lewandowskiego i in. (1975) (rys. 7). W profilu KR I na ścianie zachodniej wyrobiska o wysokości 15,2 m wydzielono cztery poziomy akumulacyjne.

Pierwszy poziom akumulacyjny (I), na głębokości od 15,2 do 13,0 m p.p.t. (rys. 8), zbudowany jest z poziomo warstwowanych piasków (Sh) średnio- i drobnoziarnistych z bardzo niewielką domieszką (ok. 1%) materiału pylastego. Na głębokości 13,8–13,6 m w piaskach pojawiają się drobne, kilku milimetrowe żwiry, których udział w próbce wynosi ok. 1%. Średnia średnica ziaren (Mz) waha się od 1,8 do 2,3 φ, natomiast wysortowanie osadów jest umiarkowanie dobre i umiarkowane (δ<sub>i</sub> od 0,55 do 0,8). Wiek TL osadów budujący ten poziom akumulacyjny określono

w dwóch próbkach pobranych na głębokości 15,0 oraz 13,8 m. Uzyskano odpowiednio daty 175,4 ± 26,3 ka (KIE-971) oraz 154,2 ± 23,1 ka (KIE-970).

Drugi poziom akumulacyjny (II), na głębokości od 13,0 do 7,3 m (rys. 8), jest zbudowany z naprzemiennie występujących warstw żwirowo-piaszczystych i piaszczysto-żwirowych o warstwowaniu poziomym (GSh, SGH) oraz przekątnym (GSp, SGp). W jego obrębie można wydzielić dwa subpoziomy: IIa w dolnej części (13,0–9,8 m) z dominacją osadów grubszych i IIb w górnej części (9,8–7,3 m) z drobniejszymi osadami. Najgrubsza frakcja buduje warstwy dolnego subpoziomu (IIa), gdzie średnia średnica ziaren (Mz) wynosi -1,2 φ. Udział procentowy żwirów jest bardzo zróżnicowany i waha się od poniżej 10% do nawet 80%. Warstwy te występują naprzemiennie z drobnymi osadami, tj. piaskami zailonami, które dominują w górnym subpoziomie (IIb), gdzie średnia średnica ziaren (Mz) wynosi od 0,9 do 3 φ. Poziom ten był datowany na głębokościach 12,7, 11,6, 10,0 (subpoziomu IIa) oraz 9,4 i 8,1 m (subpoziomu IIb). Dla dolnego subpoziomu uzyskano odpowiednio daty: 75,2 ± 26,3 ka (KIE-969), 218,1 ± 32,7 ka (KIE-968), 268,9 ± 40,3 ka (KIE-967), a dla górnego 205,1 ± 30,8 ka (KIE-966) oraz 155,7 ± 23,3 ka (KIE-965).

Trzeci poziom akumulacyjny (III) wydzielono na głębokości od 7,3 do 2,5 m (rys. 8). Przeważają tu osady piaszczysto-żwirowe. W dolnej (7,3–6,4 m), środkowej



Rys. 7. Lokalizacja profili w piaskowni przy ul. Zagórskiej w Suchedniowie (KR I) wykonanych przez Lewandowskiego i in. (1975) (zielony kolor) oraz przez autorów w 2019 r. (czerwony kolor) na archiwalnej mapie topograficznej (1965) oraz współczesnej ortofotomapie badanego obszaru ([www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl))

Fig. 7. The profiles location in the sandpit near Zagórska st. at Suchedniów (KR I) made by Lewandowski *et al.* (1975) (green) and by authors in 2019 (red) on the archival topographic map (1965) and the modern orthophotomap of the study area ([www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl))

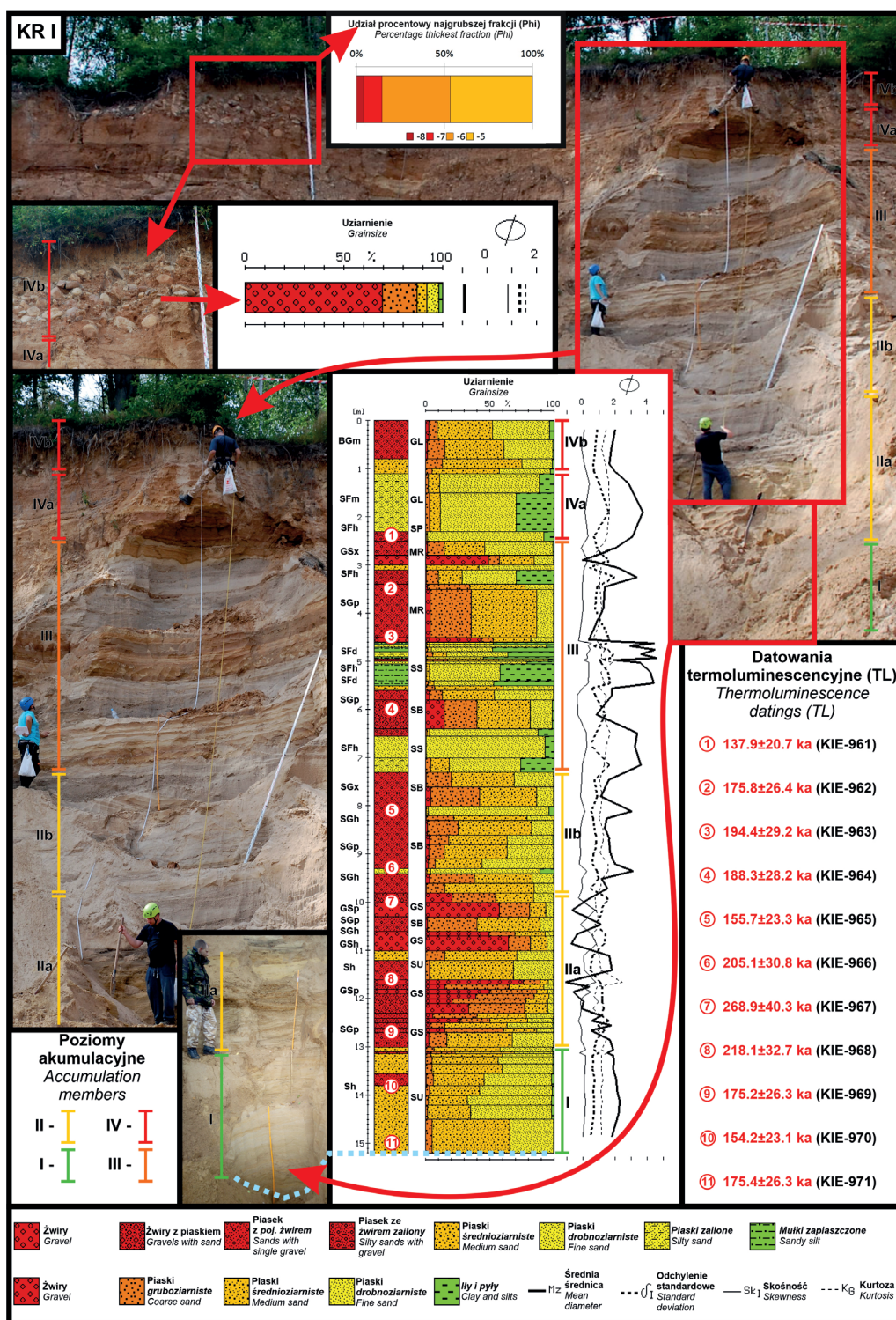
(5,6–4,6 m) i górnej (3,4–3,1 m) części tego poziomu występują przewarstwienia osadów piaszczysto-pylastych, gdzie udział frakcji pylastej może dochodzić nawet do 60%, a średnia średnica ziaren ( $M_z$ ) przekracza nawet 4,5  $\phi$ . Występują także dobrze lub umiarkowanie dobrze wysortowane piaski drobnoziarniste (np.  $\delta_1$  ok. 0,45 na głębokości 6,8 m). Jednak w całym poziomie występują również niewielkie przewarstwienia żwirowe, w których udział tej najgrubszej frakcji osiąga prawie 50%, a średnia średnica ziaren ( $M_z$ ) wynosi  $-0,10 \phi$ . Również i w tym poziomie występują naprzemiennie osady o warstwowaniu przekątnym (SGp) i poziomym (SFh). Stwierdzono na tym poziomie występowanie m.in. struktur obciążeniowych (np. struktury kropłowe) i krioturbacji na różnym etapie rozwoju, a także megariplemarki, uskoki oraz powstałe na nich niewielkie kanały erozyjne wypełnione wtórnie osadami (rys. 9). Poziom ten był datowany TL na głębokościach 6,0, 4,5 oraz 3,5 m odpowiednio na  $188,3 \pm 28,2$  ka (KIE-964),  $194,4 \pm 29,2$  ka (KIE-963) oraz  $175,8 \pm 26,4$  ka (KIE-962).

Najwyższy, czwarty poziom akumulacyjny (IV), morenowy można podzielić na dwie części (rys. 6) różniące się występowaniem eratyków (rys. 9A). Na głębokości od 2,5 do 1,1 m (IVa) w osadach piaszczystych brak jest głazów i żwirów, a udział frakcji ilasto-pylastej osiąga nawet 30%. Struktura tych osadów jest zwarta i masywna (SFm) bez wyraźnych warstw i ze słabym wysortowaniem ( $\delta_1$  do 1,5). Na głębokości ok. 2,4 m, z cienkiej warstwy osadów piaszczystych uzyskano datę TL  $137,9 \pm 20,7$  ka KRI TL1 (KIE-961). Subpoziom IVb (1,1 do 0,0 m) budują głównie osady gruboklastyczne (BGm), przeważnie grube żwiry przemieszane z licznymi głazami (ok. 70% udziału frakcji) osiagającymi rozmiary do 20–30 cm (od  $-5$  do  $-8 \phi$ ) i piaszczysto-pylastym matriksem (rys. 8, 9). Są to przeważnie słabo obtoczone głazy oraz otoczaki lokalnego piaskowca dolnotriasowego i skandynawskiego granitu

rapakiwi. W górnej części tego poziomu wykształciła się gleba – arenosol rdzawy (SNrd) z poziomami Ol-A-BvC-C na siedlisku boru świeżego *Peucedano-Pinetum*.

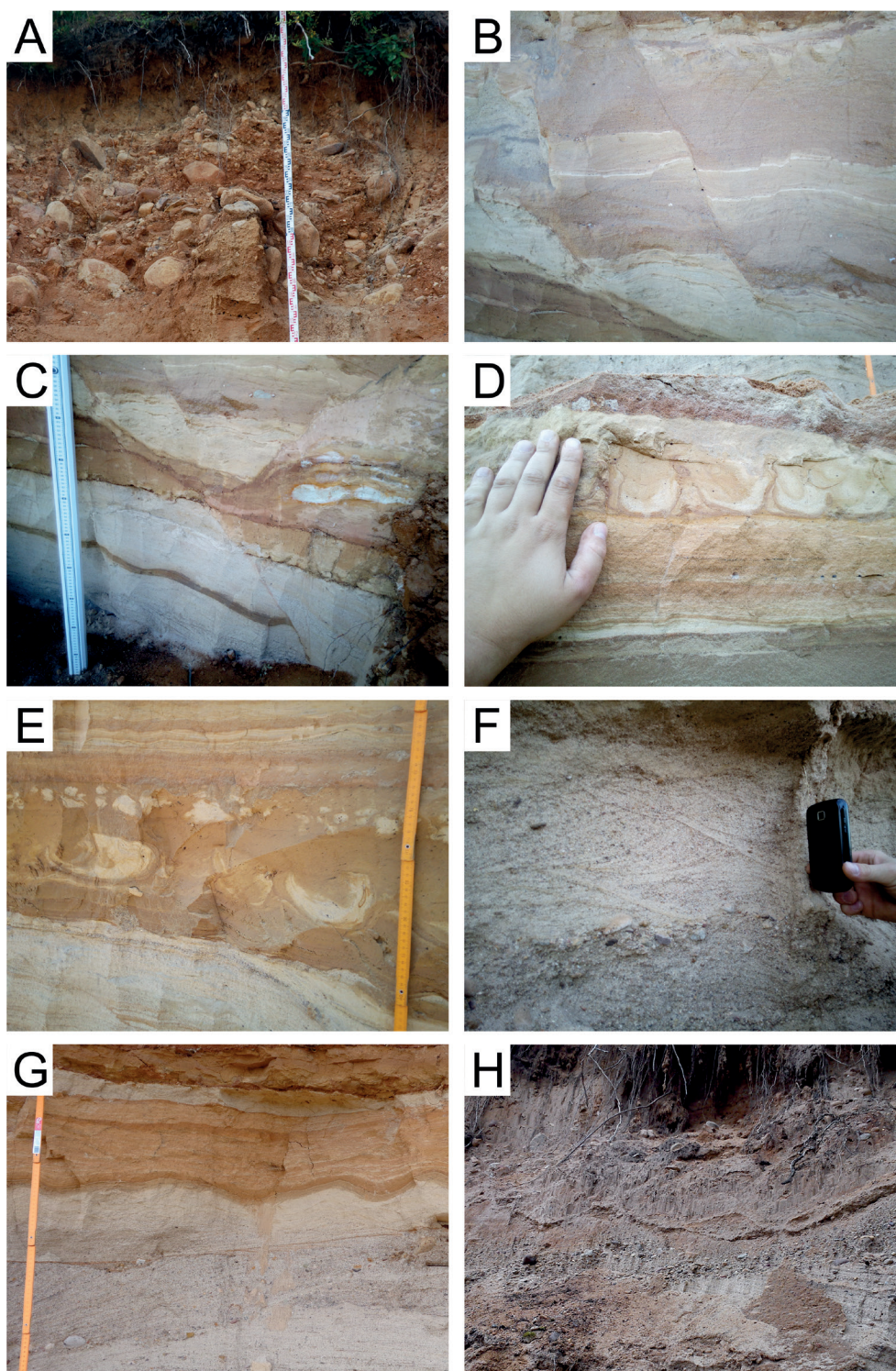
## 5. Dyskusja

Duże zróżnicowanie osadów zarówno dla kemów limnoglacialnych, gdzie dominują osady drobnoziarniste (piaski gliniasto-pylaste/mułki piaszczyste), jak i fluwioglacialnych, w których dominuje frakcja piaszczysta i żwirowa (piaski ze żwirami, piaski z pojedynczymi żwirami z przewarstwieniami piasków drobnoziarnistych), wskazuje na dużą zmienność warunków sedymentacji i energii przepływów wód, co może wynikać z wahań intensywności ablacji (por. Bartkowski 1968; Bałuk 1974; Huddart, Bennet 1997; Terpiłowski 2001, 2007, 2008; Gruszka, Terpiłowski 2015). Kem znajdujący się wyżej na stoku (profil KR II), w którym niemal zupełnie brak osadów drobniejszych (z wyjątkiem III poziomu akumulacyjnego o bardzo małej miąższości) można uznać za fluwioglacialny. Powstawał on w początkowym stadium recesji lądolodu, kiedy przepływy odbywały się jedynie w obrębie międzylobowej elewacji, podobnie jak kem w Kamieńsku pomiędzy lobami Pilicy i Luciąży oraz Widawki (Wachecka-Kotkowska 2015). Kem wyższy (profil KR II) odróżnia się od kemu niższego (profil KR I) brakiem moreny na osadach fluwioglacialnych. W kolejnym etapie deglacjacji arealnej lądolód rozpadł się na bryły martwego lodu, które wypełniały obniżenia (profil KR I). W końcowym etapie do przetajny lodowej (V poziom akumulacyjny) dostawały się z moreny ablacyjnej, prawdopodobnie wskutek ześlizgnięcia z powierzchni brył martwego lodu, stosunkowo drobne eratyki wraz z materiałem drobniejszym. Na brak przepływów hydraulicznych może wskazywać struktura masywna V poziomu (rys. 8, 9A).



**Rys. 8.** Stanowisko KR I (fot. T. Kalicki i P. Przepióra 2019) i profil granulometryczny, poziomy akumulacyjne oraz datowania TL. Kody litofacjalne: BGm – głazy ze żwirem, struktura masywna, GSx – żwir piaszczysty, warstwowania przekątne – ogólne, GSp – żwir piaszczysty, płaskie warstwowanie przekątne, SGh – piasek żwirowy, warstwowanie poziome, SGp – piasek żwirowy, płaskie warstwowanie przekątne, SGx – piasek żwirowy, warstwowania przekątne – ogólne, Sh – piasek, warstwowanie poziome, SFD – piasek mułowy/ilasty, struktura zaburzona, SFh – piasek mułowy/ilasty, warstwowania poziome, SFm – piasek mułowy/ilasty, struktura masywna. Kody litogenetyczne: GL – depozycja glacialna, GS – pokrywa żwirowa, MR – megariplemarki, SB – piaszczyste formy dna, SU – pokrywa piaszczysta, SP – wypełnienie rozmycia, SS – drobnoziarnista depozycja zawieszinowa (wg Zielińskiego 2014)

**Fig. 8.** KR I site (photo by T. Kalicki and P. Przepióra 2019) with granulometry profile, accumulation members and TL dating. Lithofacial signatures: BGm – gravelly boulder, massive structure, GSx – sandy gravel, cross-stratification, GSp – sandy gravel, planar cross-stratification, SGh – gravelly sand, horizontal lamination, SGp – gravelly sand, planar cross-stratification, SGx – gravelly sand, cross stratification, Sh – sand, horizontal lamination, SFD – silty/clayey sand, deformed, SFh – silty/clayey sand, horizontal lamination, SFm – silty/clayey sand, massive structure. Lithogenetical signatures: GL – glacial deposition, GS – gravel sheet, MR – megaripple marks, SB – sandy bedforms, SU – sandy upper plane bed, SP – scour pool, SS – suspension settling (according to Zieliński 2014)



**Rys. 9.** Wybrane struktury w profilu KR I: Głazy eratywne i piaski zailone – poziom akumulacyjny IVb (A), uskoki na głęb. 4,0–3,0 m (B, C) oraz osady wypełniające kanał erozyjny powstały na jednym z uskoków (C), odkształcenia obciążeniowe i krioturbacyjne (struktury kropłowe) osadów w różnym etapie rozwoju na głęb. 4,7 i 5,3 m (D, E), przekątne warstwowania megariplemarkowe na głęb. od 4,5–3,5 m (F) oraz megariplemarki na głęb. 2,5 m (G) – poziom akumulacyjny III (fot. T. Kalicki, P. Przepióra 2019). Wybrane struktury w profilu KR II: Megariplemarki na głęb. 1,5 m (H) (fot. P. Przepióra 2011)

**Fig. 9.** Selected structures in the KR I profile: Erotic boulders and silted sands – accumulation member IVb (A), faults at 4.0–3.0 m depth (B, C) and sediments filling the erosion channel formed in the place of one of them (C), load-casting and cryoturbations deformations (drop structures) of sediments at various stages of its formation at a depth of 4.7 and 5.3 m (D, E), diagonals of megaripple marks layer at 4.5–3.5 m depth (F), and megaripple marks at 2.5 m depth (G) – accumulation member III (photo T. Kalicki, P. Przepióra 2019). Selected structures in the KR II profile: Megaripple marks at 1.5 m depth (H) (photo P. Przepióra 2011)

W oparciu o starsze (Lewandowski i in. 1975) i najnowsze dane można wnioskować, że położony niżej na stoku kem (profil KR I) ma bardziej złożoną budowę. Poziom akumulacyjny (II) żwirowo-piaszczysty jest typowy dla kemów fluwioglacjalnych, natomiast najniższy (I) i środkowy (III), z kilkoma przewarstwieniami, piaszczysto-pylastymi o miąższości do 1 m, jest typowy dla kemów limnoglacjalnych (por. Baraniecka 1969; Klimaszewski 1978; Mojski 2005; Wachecka-Kotkowska 2015). Występują tu również syngenetyczne uskoki, kanały erozyjne (rys. 9BC) oraz struktury powstałe w trakcie upłynniania i odwadniania osadów (Allen 1970; Gradziński i in. 1986) (rys. 9DE), co było związane z bardzo silnym nasiąknięciem osadów wodą z topniejących brył martwego lodu (Lewandowski i in. 1975; Kalicki i in. 2020, 2021b). W profilu KR I (podobnie jak w KR II) zachowane są struktury megariplomarkowe wskazujące na etapy akumulacji osadów w trakcie wysokoenergetycznych przepływów (rys. 9FG). Całość okrywa morena ablacyjna o strukturze masywnej i z dużymi eratykami (IV poziom akumulacyjny) (rys. 9A). W nawiązaniu do trzech kompleksów wydzielonych przez Lewandowskiego i in. (1975), w odkrywkach położonych ok. 10 m niżej niż profil KR I można korelować kompleks I (mułków i piasków drobnoziarnistych) z poziomem akumulacyjnym I. W obecnie badanym profilu odstania się jedynie najwyższa część kompleksu I. Kompleksowi II (piaszczysto-żwirowemu) odpowiada poziom akumulacyjny II podobnie wykształcony. Poziom akumulacyjny III nie występował w odstąpieniach z lat 70. i należy sądzić, że to on tworzy wyższe części kemu przykryte przez poziom akumulacyjny IV z eratykami tożsame z kompleksem III Lewandowskiego i in. (1975) (tab. 1).

**Tabela 1.** Porównanie kompleksów (Lewandowski i in. 1975) z poziomami akumulacyjnymi wydzielonymi w profilu KR I

**Table 1.** Comparison of the complexes (Lewandowski *et al.* 1975) with the accumulation members in the KR I profile

Kompleksy według Lewandowskiego i in. 1975	Poziomy akumulacyjne
I	I
II	II
III	IV

Datowania TL potwierdziły, że kemy powstawały w okresie deglacjacji lądolodu zlodowacenia środkowopolskiego (MIS 6) (Lisiecki, Raymo 2005). Na podstawie uzyskanych z profilu KR I dat (od  $137,9 \pm 20,7$  tys. lat do  $268,9 \pm 40,3$  tys. lat) (Kalicki i in. 2020, 2021b) i KR II ( $137,4 \pm 20,6$  tys. lat –  $320,2 \pm 48,0$  tys. lat) można stwierdzić, że oba kemy powstawały w podobnym czasie, choć ich pozycja morfologiczna wskazuje, że wyżej położony kem jest nieco starszy.

Odmłodzenie lub postarzenie próbek, akumulacja w środowisku pozbawionym ekspozycji na światło (np. pod czapą lodową) lub włączanie starszych osadów (nie w pełni „wyzerowanych”) do młodszych, może być przyczyną pojawiania się inwersji dat (Bluszcz 2000), zwłaszcza w profilu KR II. Inwersje, jak i błąd metody, ok. 15-procentowy, uniemożliwiają precyzyjne datowanie poszczególnych poziomów akumulacyjnych, natomiast daty pozwalają oszacować wiek samej formy. Inwersja dat występuje też w profilu KR I, pomimo znacznie większej liczby datowań. W profilu datowanym od spągu do stropu na ok. 175 tys. lat, inwersje zarówno prowadzące do odmłodzenia, jak i postarzenia związane są z występującymi warstwami żwirowymi. Największe odchylenia i postarzenie datowań do 270–205 tys. lat występują w żwirowo-piaszczystym poziomie akumulacyjnym III na głębokości 12,0–9,0 m. Wyraźnie młodsze daty uzyskane dla moreny ablacyjnej (poziom akumulacyjny IV) może wskazywać na hiatus sedymentacyjny rozdzielający te osady od podścielających osadów limnoglacjalnych.

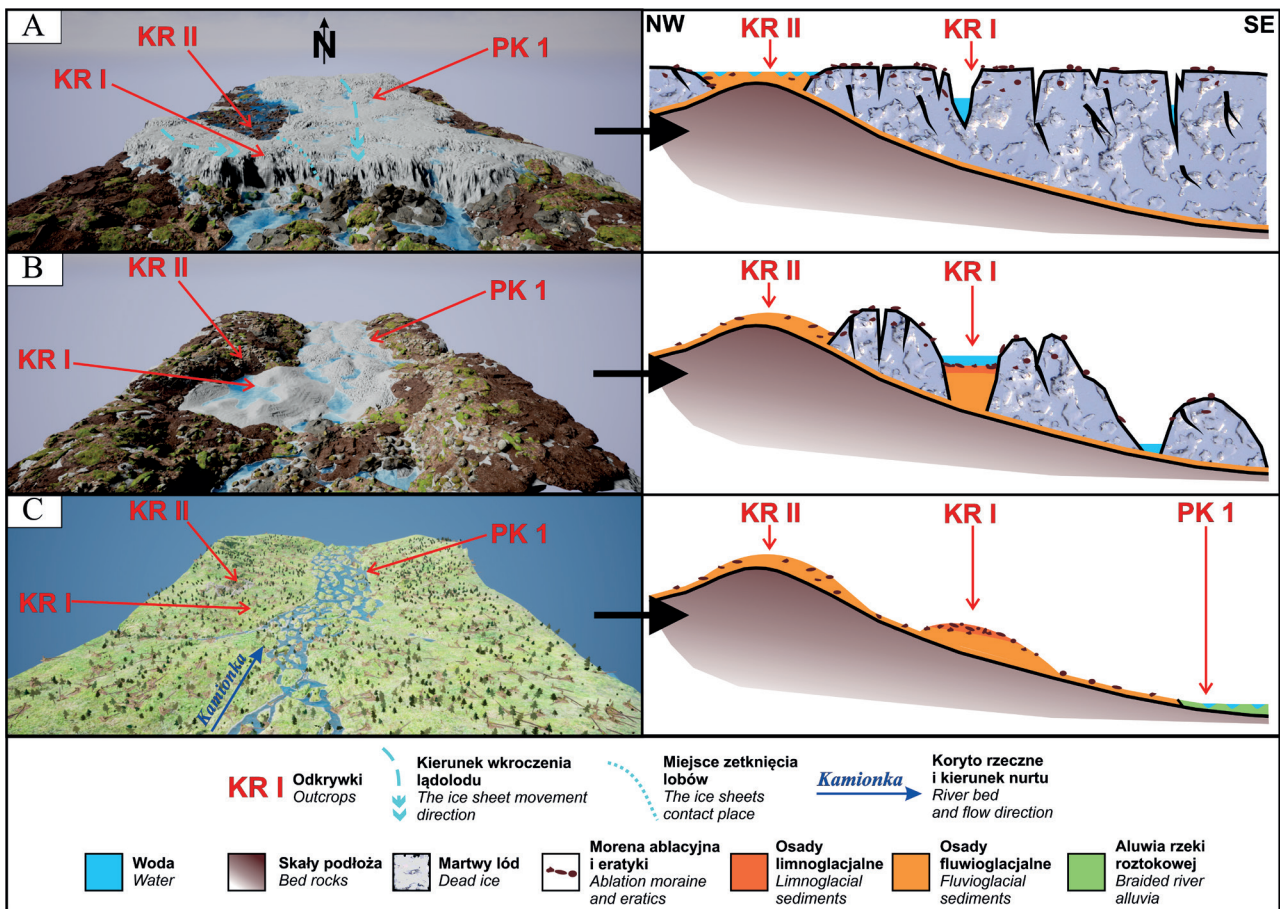
Erozja u schyłku stadiału warty rozcięta osady kemo-we, a w dolinie Kamionki formowały się aluwia datowane w profilu PK 1 na 140–90 tys. lat. (rys. 3; Kalicki i in. 2017; Przepióra 2017, 2021).

## 6. Wnioski

Przeprowadzone datowania osadów wskazują, że kemy w pobliżu Suchedniowa powstawały w czasie stadiału warty (MIS 6), ok. 175–137 tys. lat temu, kiedy lądolód wkraczał do Kotliny Suchedniowskiej dwoma lobami (rys. 10A). W trakcie deglacjacji arealnej i wytapiania się brył martwego lodu występowała duża zmienność warunków sedymentacji (5 poziomów akumulacyjnych w KR II i 4 w KR I). W wyższym położeniu występują kemy fluwioglacjalne (KR II) z dominującymi osadami piaszczysto-żwirowymi nie przykryte moreną, natomiast niżej (KR I) powstały kemy złożone, zbudowane z na przemian występujących drobniejszych osadów limnoglacjalnych i grubszych – piaszczysto-żwirowych osadów fluwioglacjalnych, które przykrywa morena ablacyjna z eratykami (rys. 10B). Zmienność ta wynika z rosnącej odległości od czoła lądolodu i malejącej ilości wód proglacjalnych. Po zaniku brył martwego lodu rozpoczęła się akumulacja aluwii przez roztokową Kamionkę (rys. 10C).

## Podziękowania

Autorzy dziękują p. Wiesławie Malec, Andrzejowi Łabuzie i Zygmuntowi Staszewskiemu, właścicielom działek, którzy umożliwili dostęp do stanowiska w piaskowni przy ul. Zagórskiej (KR I) oraz Nadleśniczemu Nadleśnictwa Suchedniów, p. mgr. inż. Piotrowi Fitasowi za udostępnienie drugiego stanowiska na terenie Leśnictwa Kruk (KR II). Szczególne wyrazy wdzięczności wyrażamy operatorom koparek, p. Karolowi Pałysiewiczowi i Krzysztofowi Ziolkiewiczowi, którzy pomogli przy wykonaniu kilkunastometrowego odstąpienia. Dziękujemy również prof. UJK dr hab. Annie Świercz za dyskusję merytoryczną.



**Rys. 10.** Modele rekonstruujące etapy deglacjacji w Kotlinie Suchedniowskiej w czasie zlodowaceń środkowopolskich oraz powstawania kemów (KR I oraz II) i wyższej terasy Kamionki (PK 1): A – początek deglacjacji i akumulacji osadów wyższego kemu KR II oraz dolnej części niższego kemu KR I, B – dalszy etap deglacjacji i akumulacji osadów budujących górną część kemu KR I, C – etap całkowitego zaniku brył martwego lodu i rozwoju równiny aluwialnej rzeki roztokowej (PK 1)

**Fig. 10.** Models showing the deglaciation stages in Suchedniów Basin during the Middle-Polish glaciations and the formation of kames (KR I and II) and upper terrace of Kamionka (PK 1): A – beginning of the deglaciation and sediment accumulation of the higher kame (KR II) and the bottom part of the lower kame (KR I), B – the next stage of deglaciation and sediments accumulation of the KR I kame upper part, C – the stage of complete disappearance of the dead ice blocks and the braided river alluvial plain development (PK 1)

## 7. Literatura

- Allen, J.R.L., 1970. Physical processes of sedimentation. George Allen and Unwin LTD, London.
- Bałuk, A., 1974. Zespół form kemowych w okolicach Kuleszy Kościelnej na Nizinie Podlaskiej. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 269, 121–136.
- Baraniecka, M.D., 1969. Klasyfikacja form kemowych na tle typów i dynamicznych etapów deglacjacji. Kwartalnik Geologiczny 13(2), 442–458.
- Bartkowski, T., 1968. Kemy na obszarze Niziny Wielkopolskiej a deglacjacja. Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią 21, 3–31.
- Bartosik, J., 1972. Geomorfologia obrzeżenia Gór Świętokrzyskich w okolicach Iłży. Acta Geographica Lodziensia 29, 1–87.
- Ber, A., Lindner, L., Marks, L., 2007. Propozycja podziału stratygraficznego czwartorzędu Polski. Przegląd Geologiczny 55, 115–118.
- Bluszcz, A., 2000. Datowanie luminescencyjne osadów czwartorzędowych – teoria, ograniczenia problemy interpretacyjne. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1434, Gliwice.
- Czarnocki, J., 1927. O zlodowaceniach środkowej części Gór Świętokrzyskich. Posiedzenia Naukowe Państwowego Instytutu Geologicznego 17, 18–21.
- Czarnocki, J., 1931. Dyluwium Gór Świętokrzyskich. Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego 7, 82–105.
- Dzierżek, J., Lindner, L., 2021. Problemy maksymalnego zasięgu i zaniku lądolodu skandynawskiego w Górach Świętokrzyskich, [w:] Dobrowolski, R., Orłowska, A., Hołub, B., Janicki, G. (red.), Glacjal i peryglacjal Europy Środkowej. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, 183–188.
- Fedorowicz, S., 1996. Wiek TL osadów plejstoceniowych w Janowie nad Radomką i problem zasięgu lądolodów w czasie zlodowaceń środkowopolskich (odry, warty) w strefie NW obrzeżenia Gór Świętokrzyskich. Przegląd Geologiczny 44, 935–937.
- Filonowicz, P., 1972. Plejstocen na obszarze południowo-zachodniej części Gór Świętokrzyskich. Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego 42(1), 105–116.
- Filonowicz, P., 1978. Objasnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50 000, ark. Skarżysko-Kamienna. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1–71.
- Filonowicz, P., 1979. Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Skarżysko-Kamienna. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Folk, R.L., Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology 27.
- Gradziński, R., Kostecka, A., Radomski, A., Unrug, R., 1986. Zarys sedymentologii. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Gruszka, B., Terpiłowski, S., 2015. Sedimentary record of the younger Saalian ice margin stagnation in Eastern Poland: Development of



- a regular pattern of glaciolacustrine kames. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97(2), 279–298.
- Huddart, D., Bennett, M.R., 1997. The Castairs Kames (Lanarkshire, Scotland): Morphology, sedimentology and formation. *Journal of Quaternary Science* 12, 467–484.
- Jabłoński, M., 2021. Litologia i geneza osadów w Lesie Krukowskim (Suchedniów, województwo świętokrzyskie). Praca dyplomowa, UJK, Kielce.
- Kalicki, T., Przepióra, P., Podrzycki, Ł., 2017. Struktura i geneza terasy Kamionki obok Suchedniowa. *Acta Geographica Lodziensia* 106(5), 53–64.
- Kalicki, T., Przepióra, P., Podrzycki, Ł., 2020. Diversity and age of sediments building kame hills near Suchedniów (Kielce Upland, central Poland) – first results. 2<sup>nd</sup> International Scientific Conference „Problems of Regional Geology of the West of the East European Platform and Adjacent Territories”, 9–10 December 2020. Faculty of Geography and Geoinformatics at the Belarusian State University, Minsk, Białoruś.
- Kalicki, T., Głuszewski, W., Frączek, M., Przepióra, P., 2021a. Luminescencyjne datowania w badaniach geoarcheologicznych. *Postępy Techniki Jądrowej* 64(3), Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Polskie Towarzystwo Nukleoniczne, Warszawa, 34–41.
- Kalicki, T., Przepióra, P., Frączek, M., Podrzycki, Ł., 2021b. Zróżnicowanie i wiek osadów kemu w Suchedniowie – (Wyżyna Kielecka) – pierwsze wyniki, [w:] Dobrowolski, R., Orłowska, A., Hołub, B., Janicki, G. (red.), *Glacja i peryglacja Europy Środkowej*. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin, 206–208.
- Klatka, T., 1964. Geomorfologia Gór Świętokrzyskich. *Roczniki Gleboznawcze* 15, 129–154.
- Klimaszewski, M., 1978. Geomorfologia. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Kondracki, J., 1977. Regiony fizycznogeograficzne Polski. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Kusztal, P., Kalicki, T., 2016. Geological-geomorphological structure of the Czarna Konecka river valley downstream of Stąporków (Polish Uplands), [w:] Kalicki, T., Frączek, M., Przepióra, P. (red.), *Field Guide. Fluvial Archives Group Biennial Meeting „Evolution of river valleys in Central Europe”*, Kielce, 66–70.
- Lewandowski, J., Romanek, A., Studencki, M., 1975. Formy akumulacji międzylobowej w rejonie Suchedniowa. *Kwartalnik Geologiczny* 4, 887–906.
- Lindner, L., 1977. Pleistocene glaciations in the western part of the Holy Cross Mountains, central Poland. *Studia Geologica Polonica* 53, 1–143.
- Lindner, L., 1978. Rozwój paleogeomorfologiczny zachodniej części regionu świętokrzyskiego. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego XLVIII – 3/4*, 479–508.
- Lindner, L., 1988. Jednostki glacialne i interglacialne w plejstocenie regionu świętokrzyskiego. *Przegląd Geologiczny* 41(7), 31–39.
- Lindner, L., 1996. Pomazowieckie osady lodowcowe i wodnolodowcowe w rejonie Białej Podlaskiej i ich wiek w świetle dyskusji nad problemem zlodowacenia warty w Polsce. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 373, 87–96.
- Lindner, L., 2004. Zarys stratygrafii plejstocenu Regionu Świętokrzyskiego. *Prace Instytutu Geografii Akademii Świętokrzyskiej* 13, Kielce, 7–31.
- Lindner, L., 2005. Nowe spojrzenie na liczbę, wiek i zasięgi zlodowaceń środkowopolskich w południowej części środkowowschodniej Polski. *Przegląd Geologiczny* 53(2), Państwowy Instytut Geologiczny, 145–150.
- Lindner, L., Marks, L., 2012. O podziale klimatostratygraficznym kompleksu środkowopolskiego w plejstocenie Polski. *Przegląd Geologiczny* 60(1), 36–45.
- Lisiecki, L.E., Raymo, M.E., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}O$  records. *Paleoceanography* 20(1), 1–17.
- Ludwikowska-Kędzia, M., 2000. Ewolucja środkowego odcinka doliny rzeki Belnianki w późnym glacie i holocenie. Wydawnictwo Akademickie DIALOG, Warszawa.
- Ludwikowska-Kędzia, M., 2018. Litologia, geneza i stratygrafia osadów czwartorzędowych w południowej części Gór Świętokrzyskich. Instytut Geografii, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach.
- Ludwikowska-Kędzia, M., 2021. Plejstocen południowej części Gór Świętokrzyskich, [w:] Dobrowolski, R., Orłowska, A., Hołub, B., Janicki, G. (red.), *Glacja i peryglacja Europy Środkowej*. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, 219–221.
- Ludwikowska-Kędzia, M., Olszak, I., 2009. Litologia i stratygrafia peryglacialnych osadów stokowych Pasma Bielskiego w rejonie Huty Starej Koszary, [in:] Ludwikowska-Kędzia, M., Wiatrak, M. (red.), *Znane fakty – nowe interpretacje w geologii i geomorfologii Gór Świętokrzyskich*. Instytut Geografii, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, 75–89.
- Ludwikowska-Kędzia, M., Pawelec, H., Adamiec, G., 2015. Sedimentological interpretation and stratigraphical position of glacial deposits in the Napęków area (Holy Cross Mountains, Poland). *Geologos* 21(4), 261–284.
- Marks, L., 2004. Zasięgi lądolodu zlodowacenia warty w Polsce, [w:] Harasimiuk, M., Terpiłowski, S. (red.), *Zlodowacenie Warty w Polsce*. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin, 27–35.
- Marks, L., Bińska, K., Woronko, B., Majecka, A., Teodorski, A., 2019. Revision of the late Middle Pleistocene stratigraphy and palaeoclimate in Poland. *Quaternary International* 534, December 2019, 5–17
- Maruszczak, H., 1993. Thermoluminescence chronostratigraphy of glacial deposits of the Maximum and Wkra (= I postmaximum) stadials of the Warta Glaciation in northeastern Poland. *Geological Quarterly* 37, 81–96.
- Mojski, J., 2005. Ziemie polskie w czwartorzędzie, zarys morfogenezy. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Pawłowski, S., 1928. Czy istnieją L3 i L4 w Polsce? *Przegląd Geograficzny IV, Polskie Towarzystwo Geologiczne*, 175–176.
- Przepióra, P., 2010. Zlodowacenia na północnym przedpolu Gór Świętokrzyskich. Maszynopis pracy licencjackiej. Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy Jana Kochanowskiego w Kielcach.
- Przepióra, P., 2012. Formy i osady glacialne w rejonie Suchedniowa. Maszynopis pracy magisterskiej, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach.
- Przepióra, P., 2017. Naturalne i historyczne zmiany zlewni Kamionki (Płaskowyż Suchedniowski) w subatlantyku. Maszynopis pracy doktorskiej, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach.
- Przepióra, P., 2021. Subatlantyckie przemiany zlewni Kamionki na Wyżynie Kieleckiej, [w:] Kalicki, T. (red.), *Geografia-Geoarcheologia, Monografie, T. 1. Ośrodek Badań Europy Środkowo-Wschodniej, Kielce-Białystok*.
- Rdzany, Z., 1993. Kształtowanie rzeźby terenu między górną Rawką a Pilicą w czasie zaniku lądolodu warciańskiego. *Łódzkie Towarzystwo Naukowe, Acta Geographica Lodziensia* 73.
- Rdzany, Z., 2009. Rekonstrukcja przebiegu zlodowacenia warty w regionie łódzkim. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Rdzany, Z., Frydrych, M., Szmidt, A., Tarnawska, K., 2015. W sprawie genezy i wieku form rzeźby glacialnej pogranicza Wysoczyzn Kaliskiej i Tureckiej. *Acta Universitatis Lodzianensis. Folia Geographica Physica* 14, 37–53. <https://doi.org/10.18778/1427-9711.14.04>
- Rdzany, Z., Frydrych, M., Kossowski, M., Szmidt, A., 2021a. Dynamika procesów glacialnych w strefie zasięgu maksymalnego lądolodu warciańskiego w okolicach Radomska. XII Zjazd Geomorfologów Polskich, Książka abstraktów, 62.
- Rdzany, Z., Kasprzak, M., Okupny, D., Szmidt, A., 2021b. Współczesne przemiany rzeźby strefy staroglacjalnej Niżu Polskiego, [w:] Kostrzewski, A., Krzemień, K., Migoń, P., Starkel, L., Winowski, M., Zwoliński, Z. (red.), *Współczesne przemiany rzeźby Polski*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, 415–482.

- Różycki, S., 1967. Plejstocen Polski środkowej na tle przeszłości w górnym trzeciorzędzie. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Różycki, S., 1972. Problemy czwartorzędu Gór Świętokrzyskich. Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego 42 (1), 67–79.
- Rutkowski, J., 1995. Badania uziarnienia osadów bardzo gruboziarnistych, [w:] Mycielska-Dowgiałło, E., Rutkowski, J. (red.), Badania osadów czwartorzędowych. Wybrane metody i interpretacja wyników. Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski, 106–114.
- Solon, J., Borzyszkowski, J., Bidłasik, M., Richling, A., Badora, K., Balon, J., Brzezińska-Wójcik, T., Chabudziński, Ł., Dobrowolski, R., Grzegorzczak, I., Jodłowski, M., Kistowski, M., Kot, R., Krąż, P., Lechnio, J., Macias, A., Majchrowska, A., Malinowska, E., Migoń, P., Myga-Piątek, U., Nita, J., Papińska, E., Rodzik, J., Strzyż, M., Terpiłowski, S., Ziąja, W., 2018. Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. *Geographia Polonica* 91 (2), 143–170.
- Terpiłowski, S., 2001. Strefa marginalna lądolodu warciańskiego na Wysoczyźnie Siedleckiej w świetle analizy litofacjalnej. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin.
- Terpiłowski, S., 2007. Genesis of transverse kame trains in eastern Poland. *Sedimentary Geology* 193, 59–69.
- Terpiłowski, S., 2008. Kemy jako wskaźnik deglacjacji Niziny Podlaskiej podczas zlodowacenia warty. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin.
- Wachecka-Kotkowska, L., 2015. Rozwój rzeźby obszaru między Piotrkowem Trybunalskim, Radomskiem a Przedborzem w czwartorzędzie. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Wieczorek, D., Stachur, M., Wachecka-Kotkowska, L., Marks, L., Krzyszowski, D., Zieliński, A., Karaś, M., 2021. Similarities among glacial and interglacials in the LR04 benthic oxygen isotope stack over the last 1.014 million years revealed by cluster analysis and a DTW algorithm. *Global and Planetary Change* 202. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103521>  
[www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)
- Wysota, W., 2002. Stratygrafia i środowiska sedymentacji zlodowacenia wisły w południowej części Dolnego Powiśla. Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń.
- Zieliński, T., 2014. Sedymentologia osadów rzek i jezior. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Adama Mickiewicza, Poznań.



Maciej Kossowski

Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Geografii Fizycznej  
E-mail: [maciej.kossowski@geo.uni.lodz.pl](mailto:maciej.kossowski@geo.uni.lodz.pl)



## Zastosowania dronów w badaniach rzeźby terenu, struktury i tekstury osadów na przykładach z Polski Środkowej

### The use of drones in the study of relief, structure and texture of sediments on examples from Central Poland

#### Zarys treści

Drony (bezzałogowe statki powietrzne – BSP) wraz z rozwojem technologii są coraz częściej wykorzystywane do rozwiązywania problemów naukowych. Dotyczy to w szczególności nauk o Ziemi i środowisku, w tym geomorfologii, geologii strukturalnej i sedymentologii. Obok kwestii sprzętowo-technicznych, równoległy rozwój programów fotogrametrycznych oraz systemów służących do zwiększania precyzji pomiarów przebiegu lotu dronów, przyczyniają się do możliwości tworzenia zarówno map terenu, jak i modeli 3D o coraz większej dokładności. W niniejszej pracy opisano możliwości wykorzystania dronów wyposażonych w niemetryczną kamerę RGB lub sensor termalny do badania przemian morfologicznych terenu na podstawie analizy zdjęć, ortofotomap i modeli 3D. Badania testowe przeprowadzono w dolinach Warty i Pilicy w rejonie sztucznych zbiorników oraz na wysoczyznach morenowych i płaskowyżach – głównie w kopalniach odkrywkowych. Wynika z nich, że odpowiednie zaplanowanie lotu i konfiguracja pracy kamery statku powietrznego gwarantują uzyskanie właściwych danych niezbędnych do późniejszej obróbki w oprogramowaniu, np. GIS. Do najważniejszych parametrów zaliczono: określenie obszaru planowanego nalotu, wysokość lotu nad poziomem gruntu, prędkość statku powietrznego, prędkość powtarzalności kamery oraz dokładność generowanego materiału.

#### Słowa kluczowe

BSP, RTK, GPS, mezoformy terenu, litologia, geologia, Jeziorsko, Zbiornik Sulejowski, fotogrametria, ortofotomapy, antropopresja, prawo lotnicze.

#### Abstract

Drones (UAV, unmanned aerial vehicles), along with the development of technology, are more and more used to solve scientific problems. This is particularly true for Earth and environmental sciences, including geomorphology, structural geology and sedimentology. In addition to hardware and technical issues, the parallel development of photogrammetric programs and systems for increasing the precision of drone flight path measurements are contributing to the ability to create land maps as well as 3D models with increasing accuracy. This paper describes the possibility of using drones carrying a non-metric RGB camera or thermal sensor, for the study of morphological changes of terrain based on the analysis of photographs, orthophotos and 3D models. Test studies were carried out in the valleys of the Warta and Pilica rivers in the area of artificial reservoirs, as well as on moraine uplands – mainly in open-pit mines. The results of these tests show that proper flight planning and configuration of the aircraft's camera work guarantee obtaining the right data necessary for later processing in software, such as GIS. The most important parameters included: determination of the area of the planned raid, flight altitude above ground level, aircraft speed, camera repetition rate and accuracy of the generated material.

#### Keywords

UAV, RTK, GPS, relief mezoforms, litology, geology, Jeziorsko, Sulejowski Reservoir, photogrammetry, orthophotos, anthropopressure, aviation law.

## 1. Wprowadzenie

Techniki fotogrametrii i teledetekcji (niegdyś fotointerpretacji) od wielu lat z powodzeniem były stosowane w naukach o Ziemi (Olędzki 2007). Dynamiczny rozwój techniki fotogrametrycznej oraz dronów, przyczynił się do rozwoju fotogrametrii niskiego pułapu (*low-altitude aerial photogrammetry*) (Bernasik, Mikrut 2007; Bakuła, Ostrowski 2012; Pyka i in. 2020). Technika ta pojawiła się w latach 70. i 80. XX w., kiedy zaczęto stosować pojęcie „teledetekcja cyfrowa” głównie w odniesieniu do przetwarzania obrazów satelitarnych (Ciołkosz, Kęsik 1989; Kowalewski 2000). Wraz z postępującą miniaturą

ryzującą systemów cyfrowych i pomiarowych, technika pomiarów z bezzałogowych statków powietrznych (BSP) (Będkowski, Piekarski 2017) najpierw znalazła powszechne zastosowania w geodezji. Obecnie jest wykorzystywana również w innych dziedzinach, w tym coraz częściej w badaniach nad przemianami rzeźby terenu (Fernández-Lozano, Gutiérrez-Alonso 2016; Taddia i in. 2020). Prace fotogrametryczne wykonywane z drona, w porównaniu do fotogrametrii średniego i wysokiego pułapu (przy użyciu samolotów oraz satelitów), charakteryzują się niższym kosztem wykonania opracowań, możliwością wykonania nalotów ze znaczną powtarzalnością (nawet codziennie) oraz indywidualnymi ustaleniami

parametrów opracowania, takich jak piksel terenowy (GSD – *Ground Sampling Distance*), ramy czasowe i miejsce wykonywania pomiaru oraz dokładne określenie granic obszaru badawczego (Budiharto i in. 2021). Prowadząc badania fotogrametryczne z drona należy określić stopień ryzyka lotu. Służy do tego wybór odpowiedniej kategorii. Na potrzeby przedstawianych badań geomorfologicznych zostały opisane dwie kategorie – otwarta oraz szczególna, zgodnie z aktualnymi przepisami (*Ustawa z dnia 3 lipca 2002 roku – Prawo lotnicze*). Obraz terenu uzyskany z dronów jest dokładniejszy niż w przypadku lotów realizowanych na większych wysokościach, dla których często należy stosować dodatkowe korekcje ze względu na stan zapylenia lub zamglenia powietrza.

## 2. Metody badań

Metody pracy z dronami dla celów pomiarów geomorfologicznych podobnie jak w geodezji, powinny gwarantować uzyskanie wyników o możliwie jak najwyższej dokładności. Naloty dronami zostały zmodyfikowane na potrzeby badań geomorfologicznych i geologicznych. Mapy i modele 3D zostały wykonane dzięki zastosowaniu drona DJI Phantom 4 RTK wyposażonego w niemetryczną kamerę światła widzialnego posiadającą mechaniczną migawkę, która skutecznie zapobiega efektowi *rolling shutter* (efekt rozmycia obrazu mogący nastąpić podczas wyzwalania migawki elektronicznej). A w przypadku zdjęć termalnych zastosowano drona DJI Matrice 210 wyposażonego w bolometr cyfrowy DJI Zenmuse XT S.

W terenie przeprowadzono testy na przydatność dronów i sensorów do badania zmian objętości oraz powierzchni małych form rzeźby, ustalenia parametrów elementów struktury oraz tekstury skał (głównie frakcji głazowej i żwirowej). Powtarzanie nalołów i ujęć służyło sprawdzeniu z jaką precyzją można udokumentować zasięg i rodzaj lokalnej antropopresji oraz zakres dynamicznych zmian morfologii terenu, które zachodzą w krótkim czasie, np. w ciągu kilku dni, a nawet kilku godzin. Praktyka wykonywania pomiarów fotogrametrycznych ukazuje zasadność prowadzenia badań w oparciu o punkty kontrolne oraz fotopunkty (Remzi i in. 2021). W przypadku zastosowania BSP wyposażonych jedynie w odbiorniki GPS/GNSS dokładność otrzymanych danych jest znacznie niższa niż w przypadku korzystania z drona z modułem RTK lub użycia fotopunktów w terenie (Sanz-Ablanedo Enoc i in. 2018).

Planując badania geomorfologiczno-geologiczne z użyciem drona należy przed lotem uwzględnić: 1) aktualne wymogi formalno-prawne (w tym zgody na prowadzenie badań); 2) dokładne sprawdzenie warunków atmosferycznych; 3) oceny ryzyka; 4) wyznaczenie celów.

Do analizy wykorzystano zdjęcia w formacie jpg wykonane z BSP z wysokości 60–120 m powyżej poziomu gruntu. Fotografie przetworzono w programach fotogrametrycznych DJI Terra na ortofotomapę. Za geolokalizację zdjęć odpowiada system nawigacyjny GPS, którego pomiary zostały dodatkowo skorygowane przez system

RTK, co daje wysoką skuteczność pozycjonowania w czasie rzeczywistym (Czarnecki 2010; Bakuła, Przechodziński 2013). Korekcja lokalizacji systemu RTK była niezbędna, by opracowanie nieposiadające fotopunktów cechowała odpowiednia precyzja, natomiast brak wykonania pomiarów fotopunktów na powierzchni kartowanego terenu był podyktowany tym, że badania były prowadzone nad gruntem niestabilnym.

## 3. Cel pracy

Głównym celem artykułu jest przedstawienie przydatności popularnych dronów wyposażonych w odbiornik GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) lub odbiornik sygnału GNSS wraz z systemem RTK (*Real Time Kinematic*) do badań geomorfologiczno-geologicznych w oparciu o wyniki badań testowych.

Jako podstawę do prowadzenia tego typu badań opisano na początku wymogi prawne oraz wybrane zagadnienia metodologiczne związane z fotogrametrią niskiego pułapu, które mogą być przydatne dla osób planujących tego typu studia.

## 4. Zarys wymogów prawnych, warunków przyrodniczych i technicznych użytkowania dronów w badaniach geomorfologicznych

Przed startem drona należy skupić się na kwestiach prawnych oraz bezpieczeństwem planowanego lotu. Szacuje się, że obecnie w Polsce jest użytkowanych ok. 100 tys. dronów o masie startowej od 0,25 kg do 600 kg (Ostrichansky, Szmigiero 2020). Zgodnie z aktualnymi przepisami, każdy kto lata dronem, nie będącym zabawką, jest zobowiązany do przejścia szkolenia, zdobycia odpowiednich uprawnień oraz pozwolenia na planowany lot. Na stronie internetowej Urzędu Lotnictwa Cywilnego zamieszczono szczegółowy opis, jakimi parametrami charakteryzują się drony-zabawki (<https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/czesto-zadawane-pytania-faq/496-sprzet/5518-czy-moj-dron-zalicza-sie-do-zabawek>). Obecnie na rynku raczej trudno znaleźć drona-zabawkę, który umożliwiłby przeprowadzenie badań terenowych, w czasie których często konieczne jest korzystanie z lotu poza zasięgiem wzroku. Wymaga to odpowiedniego, sprawdzonego sprzętu, a przede wszystkim zezwolenia na lot w odpowiedniej kategorii (otwartej lub szczególnej) i zgodnej z adekwatnym scenariuszem (patrz podrozdziały 4.1 i 4.2). Wybór opisywanych zasad i wymogów prawnych został przeprowadzony dla wykonania lotów BSP typu multirotor (wielowirnikowiec) o maksymalnej masie startowej do 25 kg dla celów badań geomorfologicznych.

### 4.1. Kategoria otwarta

Loty w kategorii otwartej to prace niskiego ryzyka, wymagające jedynie zalogowania się (*check in*) w aplikacji Droneradar (<https://droneradar.eu>). Loty te można realizować tylko w zasięgu wzroku pilota lub obserwatora

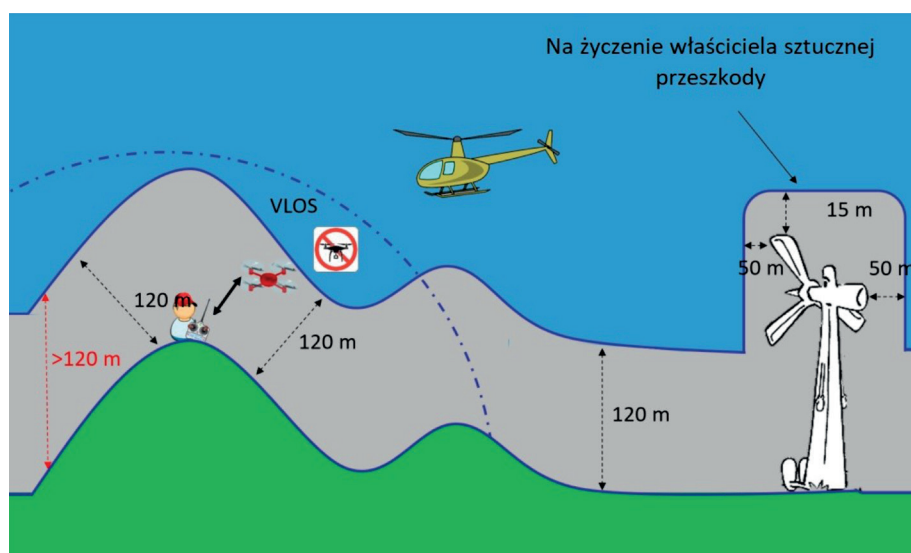
w odległości maksymalnie 120 m od najbliższego punktu powierzchni terenu. Maksymalna masa drona nie może przekraczać 25 kg.

Użytkownicy dronów mogą wybrać jedną z trzech podkategorii utworzonych ze względu na ograniczenia operacyjne oraz warunki jakim muszą sprostać piloci BSP i drony:

- A1 – dopuszczalny jest lot nad osobami postronnymi (z niektórymi ograniczeniami), zabronione jest jednak latanie nad zgromadzeniami osób (sytuacja, w której zagęszczenie osób uniemożliwia im przemieszczanie się);
- A2 – zabronione jest wlatywanie nad pojedyncze osoby i zgromadzenia ludzkie. Najmniejsza odległość pozioma od osób wynosi 30 m albo 5 m, jeśli BSP posiada funkcję ograniczającą prędkość lotu;
- A3 – zabronione jest wlatywanie nad pojedyncze osoby i zgromadzenia ludzkie. Loty dronem są dozwolone w bezpiecznej odległości, wynoszącej co najmniej 150 m w odległości poziomej od zabudowań mieszkalnych, użytkowych, rekreacyjnych lub przemysłowych.

Zezwolenie na wykonanie lotu w kategorii otwartej pozwala na lot dronem w zasięgu wzroku w miejscach oddalonych od grup ludzkich oraz zabudowań. O ile strefa lotnicza, w której wykonujemy lot, nie wymaga wykonywania misji w kategorii szczególnej lub certyfikowanej, z powodzeniem możemy używać drona do inspekcji wizualnych rzeźby terenu, a nawet wykonać niewielki nalot fotogrametryczny tworząc cyfrową mapę lub model 3D formy terenu. Jednak obiekty linearne, takie jak odcinki rzek, klify, wybrzeża, a także formy wymagające wielohektarowych nalotów, np. delty, jeziora, rozległe kopalnie odkrywkowe wymagają uprawnień do przeprowadzania misji poza zasięgiem wzroku (BVLOS), czyli w kategorii szczególnej lub certyfikowanej.

W kategorii otwartej maksymalna wysokość lotu nie może przekraczać 120 m ponad gruntem. Wyjątek stanowi lot, w czasie którego pilot omija przeszkodę o wysokości co najmniej 105 m, kiedy BSP może wzbić się na wysokość 15 m powyżej przeszkody zachowując od niej dystans w poziomie mniejszy niż 50 m (rys. 1).



Rys. 1. Ogólne zasady wykonywania operacji w zasięgu wzroku (VLOS) w kategorii otwartej na podstawie <https://ulc.gov.pl/drony/kategoria-otwarta-informacje>

Fig. 1. General rules for carrying out operations in the visual light of sight (VLOS) in open category based on <https://ulc.gov.pl/drony/kategoria-otwarta-informacje>

## 4.2. Kategoria szczególna

Kategoria szczególna służy do wykonywania bardziej zaawansowanych lotów dronami o średnim ryzyku. Niezbędna jest rejestracja wszystkich operatorów systemów BSP bez względu na masę używanego drona, a loty odbywają się w oparciu o Krajowe Scenariusze Standardowe (NSTS). W przyszłości planowane jest zastąpienie ich przez Scenariusze Standardowe (STS). Kluczowym warunkiem jest uzyskanie zezwolenia na prowadzenie badań terenowych za pomocą operacji lotniczej od ULC (Urzędu Lotnictwa Cywilnego). Jednym z warunków otrzymania zgody jest przedstawienie ryzyka planowanej misji. Metoda SORA (*Specific operations risk assessment*), opiera się

na przedłożeniu wniosku z oceną ryzyka wraz z metodami zapobiegawczymi oraz przedstawieniu wytycznych dotyczących przestrzegania bezpieczeństwa operacyjnego do ULC (<https://www.easa.europa.eu/downloads/110913/en>). Kolejną metodą jest predefiniowana ocena ryzyka (PDRA – *predefined risk assessment*) – uproszczona forma oceny ryzyka zaproponowana przez EASA (European Union Aviation Safety Agency). Jeśli planowana misja jest objęta wykazem PDRA, dopuszcza się postępowanie zgodnie z instrukcjami, a odpowiednią dokumentację należy złożyć do Urzędu Lotnictwa Cywilnego (tab. 1). W przypadku stosowania krajowych scenariuszy (NSTS) istnieje możliwość ubiegania się o zezwolenie na lot w oparciu o uproszczoną procedurę bezpieczeństwa.

**Tabela 1.** Wykaz PDRA na podstawie dokumentu Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (<https://www.easa.europa.eu/downloads/110913/en>, s. 39–40)

**Table 1.** PDRA list based on Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (<https://www.easa.europa.eu/downloads/110913/en>, pp. 39–40)

PDRA	Charakterystyka statku powietrznego	BVLOS/VLOS	Obszar przelotu	Największy dystans od pilota drona	Maksymalna wysokość	Rodzaj przestrzeni powietrznej
PDRA-S01	maksymalny wymiar charakterystyczny do 3 m i masa startowa do 25 kg	VLOS	kontrolowany obszar gruntu, który może być położony w zaludnionym obszarze	w zasięgu wzroku	150 m	kontrolowana lub niekontrolowana, z niskim ryzykiem spotkania z załogowym samolotem
PDRA-S02	maksymalny wymiar charakterystyczny do 3 m i masa startowa do 25 kg	BVLOS	kontrolowany obszar gruntu, który jest w całości położony w słabo zaludnionym obszarze	2 km z obserwatorem lub 1 km bez obserwatora	150 m	kontrolowana lub niekontrolowana, z niskim ryzykiem spotkania z załogowym samolotem
PDRA-G01	maksymalny wymiar charakterystyczny do 3 m i typowa energia kinetyczna do 34 kJ	BVLOS	obszary słabo zaludnione	bez obserwatora do 1 km	150 m	niekontrolowana, z niskim ryzykiem spotkania z załogowym samolotem
PDRA-G02	maksymalny wymiar charakterystyczny do 3 m i typowa energia kinetyczna do 34 kJ	BVLOS	obszary słabo zaludnione	nie dotyczy	jak ustalono dla zarezerwowanej lub wydzielonej przestrzeni powietrznej	zarezerwowana lub wydzielona dla lotu drona
PDRA-G03	maksymalny wymiar charakterystyczny do 3 m i typowa energia kinetyczna do 34 kJ	BVLOS	obszary słabo zaludnione	nie dotyczy	50 m od ziemi, chyba że w zarezerwowanej lub wydzielonej przestrzeni powietrznej	kontrolowana lub niekontrolowana przestrzeń powietrzna, jeżeli wysokość jest poniżej 50 m, w przeciwnym razie zarezerwowana lub wydzielona przestrzeń powietrzna

Poniżej przedstawiono cztery z dziewięciu istniejących scenariuszy standardowych wraz z przykładami ich praktycznego zastosowania. Pozwalają one na loty najpopularniejszymi obecnie dronami do 4 kg oraz wielowirnikowcami do 25 kg.

NSTS 01 – Scenariusz stosuje się głównie do lotów w zasięgu wzroku (VLOS) i maksymalnej wysokości 120 m powyżej poziomu gruntu oraz BSP o masie startowej do 4 kg. Dopuszcza się oderwanie wzroku od drona w celu skontrolowania ustawień aparatury oraz posilkowanie się tak zwanym obserwatorem, który ma za zadanie cały czas śledzić lot drona. Dozwolone są loty nad ludźmi oraz zwierzętami, jednak pilot ponosi zawsze odpowiedzialność za bezpieczeństwo. Scenariusz ten jest przydatny przy wykonywaniu pomiarów i obserwacji niewielkich powierzchniowo obiektów, np. nalotów fotogrametrycznych fragmentów ozów, sandrów, pojedynczych form skalnych, małych jezior, fragmentów brzegów, jednostek warstwowania lub poziomów glebowych. Formalna możliwość lotu nad ludźmi i zwierzętami będzie też przydatna podczas wykonywania wieloosobowych ekspedycji naukowych oraz badań terenowych na stanowiskach dokumentacyjnych ([https://edziennik.ulc.gov.pl/DU\\_ULC/2020/69/akt.pdf](https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/69/akt.pdf)).

NSTS 02 – Scenariusz podobny do NSTS 01, ale dotyczący jedynie dronów wielowirnikowych (MR) i platform latających o maksymalnej masie startowej do 25 kg, które mogą przenosić bardziej skomplikowane urządzenia pomiarowe, takie jak LiDAR, georadar, kamery multispektralne oraz zaawansowane kamery fotogrametryczne. Umożliwia również przeprowadzenie pomiarów meteorologicznych oraz stanu zapylenia atmosfery ([https://edziennik.ulc.gov.pl/DU\\_ULC/2020/70/akt.pdf](https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/70/akt.pdf)).

NSTS 05 – Scenariusz ten zezwala na loty i misje dronami do 4 kg poza zasięgiem wzroku, do 2 km od pilota i do maksymalnej wysokości 120 m. Prowadząc badania geomorfologiczne można wykonywać badania fotogrametryczne na znacznie większym obszarze, nawet do kilku kilometrów kwadratowych, np. jezior, delt, dużych form krasowych lub polodowcowych, rozległych zbczycy dolin lub kotlin. Warunkuje to optymalizacja miejsca startu i lądowania drona względem trasy wykonywanego nalotu oraz kątów widzenia kamery. Loty poza zasięgiem wzroku są szczególnie niebezpieczne, gdyż pilot może liczyć jedynie na wskazania kontrolera drona. Ponadto istnieje możliwość utraty połączenia drona z aparaturą sterującą wskutek zbyt dużej odległości od operatora, bariery oro-

graficznej (pagórki i inne wzniesienia), drzew, zabudowań, a w szczególności metalowych konstrukcji oraz urządzeń nadawczo-odbiorczych ([https://edziennik.ulc.gov.pl/DU\\_ULC/2020/73/akt.pdf](https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/73/akt.pdf)).

NSTS 06 – Scenariusz pozwala na wykonywanie lotów poza zasięgiem wzroku do 2 km od pilota oraz wysokości do 120 metrów nad powierzchnią terenu wielowirnikowcem o masie startowej do 25 kg. Zgodnie z tym scenariuszem można wykonywać prace badawcze nad znaczną powierzchnią terenu dronami wyposażonymi w specjalistyczne urządzenia pomiarowe. Należy jednak pamiętać o niezbędnych procedurach bezpieczeństwa, unikaniu zbliżania drona do ludzi, zwierząt oraz innych użytkowników przestrzeni powietrznej ([https://edziennik.ulc.gov.pl/DU\\_ULC/2020/74/akt.pdf](https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/74/akt.pdf)).

Dodatkowo należy zapoznać się z występowaniem tzw. stref geograficznych, które zdefiniowano na potrzeby utworzenia aktualnych przepisów dotyczących lotów dronami. Rozporządzenie wykonawcze Komisji UE 2019/947 z dnia 24 maja 2019 roku zawiera zapis: „Strefa geograficzna dla bezzałogowych systemów powietrznych oznacza część przestrzeni powietrznej wyznaczoną przez właściwy organ, która ułatwia, ogranicza lub wyklucza operacje z użyciem bezzałogowych systemów powietrznych, aby wyeliminować zagrożenia związane z bezpieczeństwem, prywatnością, ochroną danych osobowych, ochroną lub środowiskiem wynikające z operacji z użyciem tych systemów” (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:02019R0947-20200606&from=PL>).

BSP powinien posiadać również numer pilota nadany podczas rejestracji w systemie elektronicznym na stronie <https://drony.ulc.gov.pl/>.

### 4.3. Warunki przyrodnicze

Przed lotem należy dobrze rozpoznać warunki lokalne w jakich prowadzone będą badania oraz skorzystać ze sprawdzonych serwisów pogodowych. Normy eksploatacji BSP, takie jak siła wiatru, opady atmosferyczne oraz nieprzekraczalna temperatura są określone w instrukcji obsługi.

Należy sprawdzić aktywność geomagnetyczną w postaci wskaźnika KP (ang. *K-Index*). Parametr ten określa natężenie radiacji cząstek słonecznych, które przenikając przez atmosferę oddziałują na pole magnetyczne Ziemi. Za wzrost wskaźnika KP odpowiadają erupcje słoneczne powodujące wzmożone promieniowanie, co może powodować pogorszenie samopoczucia u ludzi, ale także problemy z łącznością z nadajnikami GPS/GNSS w dronach i innych urządzeniach pomiarowych. Wartość wskaźnika KP waha się od 0 do 9. Wartości 0–3 są bezpieczne dla pilotowania dronów, przy wartości 4 zaleca się szczególną ostrożność oraz pilną obserwację zmian tego parametru, natomiast przy wartości równej lub większej niż 5 loty i misje wykonywane dronem nie są wskazane (Al-Gbory, Al-Ubaidi 2020; Matzka i in. 2021; <https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>).

Przed wykonaniem lotu należy dokładnie skontrolować, czy nie występują warunki lub obiekty mogące zakłócić bezprzewodową komunikację kontrolera z dronem. Wysokie drzewa, zabudowania, wzniesienia lub urozmaicona rzeźba, bliskość konstrukcji stalowych, takich jak dachy budynków, maszty lub mosty mogą spowodować pogorszenie zasięgu i jakości sygnału lub nawet jego utratę. Należy zwracać szczególną uwagę na linie transmisyjne, które z pewnej odległości są trudne do zobaczenia przez pilota lub obserwatora drona. Istotnym problemem są również ptaki. Istnieją liczne, udokumentowane przypadki ataków ptaków drapieżnych na niewielkie drony, a jednym z najbardziej „dokuczliwych” gatunków są mewy.

### 4.4. Aspekty techniczne

Badania geomorfologiczne wykonywane z dronów wykorzystują teoretyczne i praktyczne doświadczenia geodezji, teledetekcji oraz fotointerpretacji z wykonywania nalotów fotogrametrycznych (Bujakiewicz, Preuss 2000), czy prawne związane z użytkowaniem przestrzeni powietrznej przez pilotów BSP (Pyka i in. 2020).

#### 4.4.1. Wybór miejsca startu i lądowania oraz kontrola techniczna drona

Jakość i zasięg sygnału w terenie uzależniony jest od wyboru miejsca startu i lądowania oraz punktu, z którego będzie pilotowany dron. Miejsce startu i lądowania powinno być stabilne i płaskie, najlepiej użyć do tego celu składanej maty dostosowanej do wielkości używanego drona. Przed każdym lotem, a nawet po każdej zmianie baterii, zalecana jest inspekcja drona i użytych akcesoriów. Sprawdzić należy wizualny stan obudowy i śmigieł, a także stan baterii i silników oraz czy dron podczas lotu nie wydaje niepokojących dźwięków. Każde pęknięcie, odkształcenie, przebarwienie, ślady korozji powinny zostać naprawione, usunięte lub wymienione, np. śmigła. Należy przestrzegać warunków transportu oraz eksploatacji BSP, które zalecił producent. Zapewnia to bezpieczeństwo podczas lotu oraz minimalizuje ryzyko zaistnienia niepożądanych sytuacji.

#### 4.4.2. Parametry techniczne lotu

Parametry nalotu fotogrametrycznego mogą być zapisane w formie pliku kml, który dostarczany jest do kontrolera drona. Niektóre systemy BSP pozwalają na konfigurację parametrów nalotu z poziomu aparatury, m.in. DJI Phantom 4 RTK oraz seria Dronów DJI Matrice 210 oraz DJI Matrice 300. Istnieje kilka popularnych programów do projektowania nalotów fotogrametrycznych, np. Pix4Dmapper, atonicMapper, DJI Terra Pro.

W zależności od przyjętego celu badania można wybrać kilka rodzajów nalotu. Nalot z podwójną siatką lub nalot z trybem rejestracji kamery pod różnym kątem rea-

lizuje się przy tworzeniu modelu 3D. Trwa on 2 do 5 razy dłużej niż misja dla ortofotomapy. Dzięki pracy kamery pod różnymi kątami jest możliwa dokładna rekonstrukcja obiektów niedostępnych do precyzyjnego przetworzenia w przypadku nadirowego ustawienia sensora. Do uzyskania mniej wymagających modeli 3D może okazać się wystarczający pojedynczy nalot fotogrametryczny z kamerą skierowaną nadirowo. Zadowalające efekty uzyskuje się ustawiając pokrycie podłużne na poziomie 80% oraz pokrycie poprzeczne co najmniej na 60% (Qin i in. 2013; Gruber 2019). Taki produkt może okazać się mniej precyzyjny w miejscach o pionowym nachyleniu (budynki, skarpy).

Podczas projektowania misji fotogrametrycznej (rys. 2) do wykonania opracowań 2D należy określić najistotniejsze parametry lotu potrzebne do przeprowadzenia badań. Należą do nich:

- **Powierzchnia terenu.** Wielkość obszaru oraz jego ukształtowanie wpływa na czas trwania i bezpieczną wysokość nalotu, ilość potrzebnych pakietów baterii oraz typ pozwoleń na lot.
- **Wysokość lotu.** Od wysokości lotu drona zależy parametr GSD – pixel terenowy określający zdolność rozdzielczą ortofotomapy wyrażaną najczęściej w centymetrach. Im niższy lot, tym szczegółowość opracowania będzie wyższa. Niższy lot oznacza też mniejszą prędkość przelotową ograniczoną głównie szybkością pracy kamery.
- **Czas pracy drona w powietrzu oraz czas zmiany baterii.** Należy uwzględnić wysokość i prędkość lotu, siłę wiatru, odległość miejsca wykonywania zdjęć lub pomiarów od miejsca startu i lądowania, poziom naładowania i stan baterii. Zazwyczaj producent podaje orientacyjny czas w jakim dron może utrzymać się w powietrzu wykorzystując w pełni naładowaną, sprawną baterię.
- **Wpływ warunków meteorologicznych.** Określając szacunkowy czas przebywania drona w powietrzu należy uwzględnić warunki meteorologiczne, w szczególności poziom zachmurzenia oraz nasłonecznienia. Zmieniająca się pogoda może spowodować pojawienie się mozaiki oświetlonych i zacienionych elementów opracowania. Podczas planowania dłuższych, trwających kilka godzin nalogów, należy uwzględnić wybór dnia i porę o jak najmniej zróżnicowanym poziomie ekspozycji słonecznej.
- **Ilość nawrotów BSP.** Ze względu na zużycie energii w dronie należy dążyć do niezbędnego minimum ilości nawrotów.
- **Zakres pokrycia podłużnego oraz poprzecznego.** Pokrycie poprzeczne określa wzajemny stopień pokrycia między sąsiednimi szeregami, niezbędne dla późniejszego połączenia szeregów w spójny oraz możliwy do scalenia blok zdjęć. Pokrycie podłużne określa zdjęcia wykonane w taki sposób, by terenowe zasięgi fotografii częściowo się nakładały.
- **Parametry aparatu: czas otwarcia migawki, ISO oraz przesłona.** Optymalne ustawienie parametrów aparatu gwarantuje odpowiednią ekspozycję zdjęć. Czas otwarcia migawki, zwłaszcza w trakcie wykonywania zdjęć w locie, powinien być na tyle krótki, by zdjęcia nie



Rys. 2. Planowanie misji fotogrametrycznej w programie DJI Terra

Fig. 2. Photogrammetric mission planning in DJI Terra software



były „poruszone”. Zbyt duży parametr ISO najczęściej powoduje „zaszumienie” zdjęć, co nie tylko zmniejsza ich czytelność, ale również powoduje trudności w ich łączeniu w programach fotogrametrycznych. Ustawienie maksymalnego otworu przesłony w wielu kamerach może powodować utratę ostrości zwłaszcza na rogach kadru. Praktyka fotograficzna wskazuje, że najczęściej obiektywy uzyskują swe najlepsze parametry optyczne przy przesłonie domkniętej o jedną lub dwie działki.

## 5. Wyniki badań testowych

Wyniki badań to zdjęcia, obrazy termalne, opracowania 2D oraz 3D. Pochodzą z przetworzenia fotogrametrycznego geotagowanych zdjęć z BSP oraz późniejszym przetworzeniu w programach ArcMap 10.4.1, DJI Terra oraz DJI Thermal Analysis Tool 3.

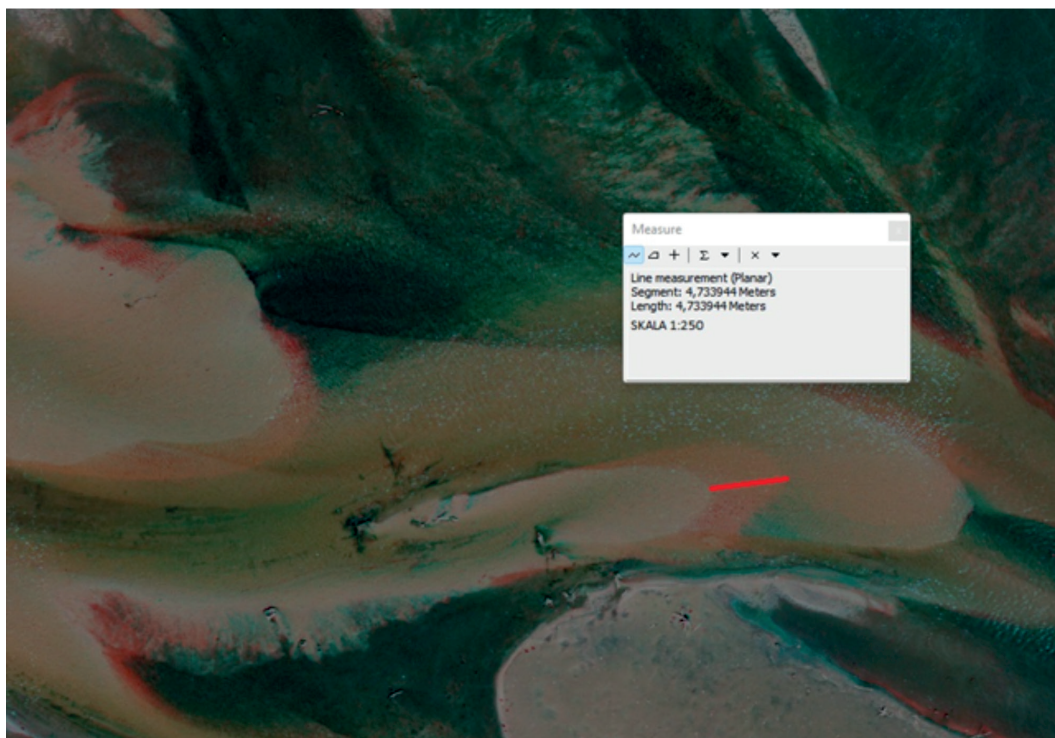
### 5.1. Badania z zakresu geomorfologii fluwialnej

Najstarsze materiały, które zostały wykorzystane do cyfrowej fotointerpretacji terenów dolin rzecznych pochodzą z lat 50. i 60. XX w. Były to monochromatyczne zdjęcia lotnicze wykonywane z nalotów odbywających się w cyklach rocznych lub kilkuletnich (Kowalewski 2000). Taka powtarzalność badań pozwalała na prześledzenie tylko ogólnej tendencji rozwoju morfologii koryt. Szczegółowe badania transformacji form w poszczególnych porach roku lub zmian zachodzących po zjawiskach ekstremalnych wymagają badań o większej częstotliwości. Liczne czynniki,

z których najistotniejsze są powodzie, długotrwałe susze, nagłe zjawiska meteorologiczne, zmiany antropogeniczne wpływają na kształtowanie się morfologii. Brak zdjęć wykonanych w odpowiednim czasie uniemożliwia zarejestrowanie i prześledzenie dynamicznych przemian wywoływanych tymi przyczynami.

#### 5.1.1. Analiza form rzeźby na terenie delty w zbiorniku Jeziersko

W celu sprawdzenia możliwości wykorzystania fotogrametrii wykonywanej z BSP w badaniach procesów morfodynamicznych zostały wykonane w okresie wiosennym dwa naloty nad fragmentem delty w zbiorniku Jeziersko. Proces napełniania zbiornika w dniach 24 i 26.04.2022 r. zarejestrowano na zdjęciach RGB wykonanych z drona DJI Phantom 4 RTK. Dwie mapy zostały wygenerowane w programie DJI Terra, a następnie przetworzone w programie ArcMap ver.10.4.1. W wyniku regulacji przezroczystości warstw oraz dominanty kolorystycznej zostały na mapach wydodrębnione różnice, które zaszły na danym fragmencie terenu. Dotyczy to zwłaszcza fluwialnego przemieszczania materiału dennego w formie fach przedstawionego na fragmencie w skali 1:250. Zasięg zmian zaznaczono na fotografii czerwoną linią (fot. 1), wielkość transportu dochodziła do 5 m. Raport dotyczący jakości opracowań uzyskany w programie DJI Terra ukazał przeciętny błąd georeferencyjny (RMSE) na poziomie 0,02 m w przypadku nalotu wykonanego w dniu 24.06.2022 r. oraz 0,022 m w przypadku nalotu wykonanego 26.06.2022 r. Każdy z nalotów wraz z przygotowaniem trwał ok. 5,5 godz.

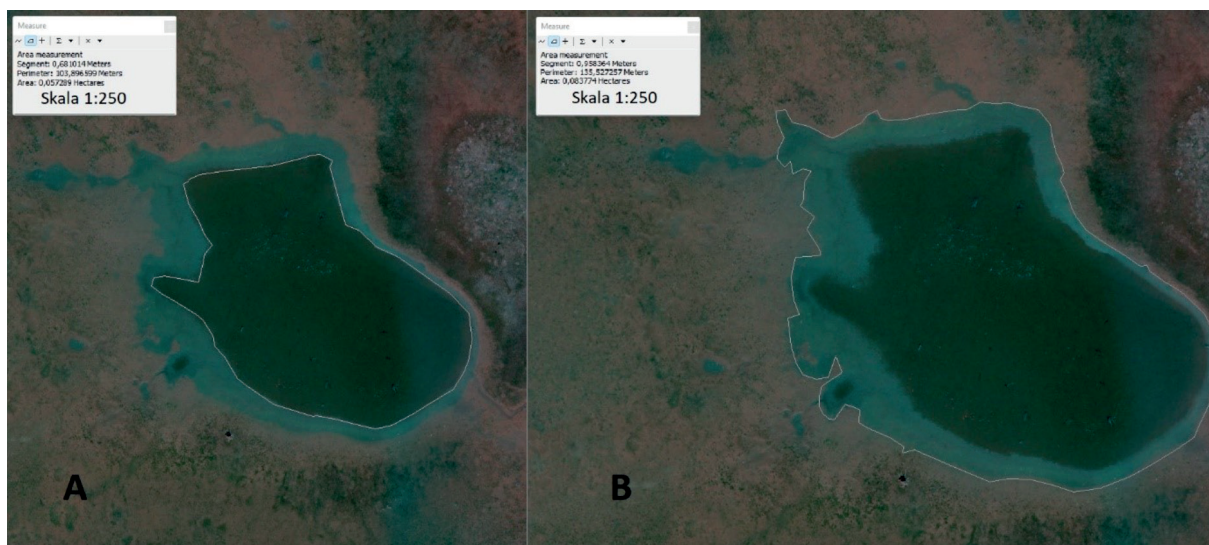


Fot. 1. Fluwialny transport (czerwona linia) materiału dennego w obrębie fach

Photo 1. Fluvial transport (red line) of bed load in bars

Analizowano również niewielkie, efemeryczne zbiorniki występujące licznie w obrębie delty w okresie obniżonego poziomu wody. W wyniku podnoszenia się lustra

wody jedno z nich w okresie dwóch dni zwiększyło swój obszar z 0,57 ha (fot. 2a) do 0,84 ha (fot. 2b). Różnice zostały zobrazowane na opracowaniach w skali 1:250.



**Fot. 2.** Zmiany powierzchni małego efemerycznego jeziora w obrębie delty w Zbiorniku Jeziorsko: (A) stan z 24.04.2022 r., powierzchnia jeziora ok. 0,057 ha; (B) stan z 26.04.2022 r., powierzchnia jeziora ok. 0,084 ha

**Photo 2.** Changes of the ephemeral small lake surface within the Jeziorsko reservoir delta: (A) Status as of 24.04.2022, lake area about 0.057 ha; (B) Status as of 26.04.2022, lake area about 0.084 ha

### 5.1.2. Analiza wysokościowa obszaru delty Zalewu Sulejowskiego

Pomiary fotogrametryczne z BSP mogą służyć do tworzenia mapy powierzchni terenu (DSM, *Digital Surface Model*). Dzięki dokładnym pomiarom pozycji każdego wykonanego zdjęcia istnieje możliwość wykonania mapy hipsometrycznej. Nalot wykonano Dronem DJI Phantom 4 RTK, więc dane zostały dostarczone jedynie z sensora RGB. Przykład przedstawiony na rys. 3 ukazuje wysokość terenu nie tylko ponad wodą, ale także batymetrię. Dzięki użytemu algorytmowi zinterpretowano wartości występujące pod powierzchnią wody w zbiorniku, w którym wyraźnie widoczne są linie nurtu. Taki wynik mógł być uzyskany dzięki nalotowi w sprzyjających warunkach pogodowych, braku bezpośredniej operacji słonecznej, gdyż niebo było równomiernie pokryte chmurami. Przeciętny błąd georeferencyjny (RMSE) wyniósł 0,023 m. Nalot wraz z przygotowaniem trwał około 3,5 godz.

### 5.1.3. Pomiary objętościowe, powierzchniowe i linearne obiektów wybrzeża klifowego Zbiornika Jeziorsko

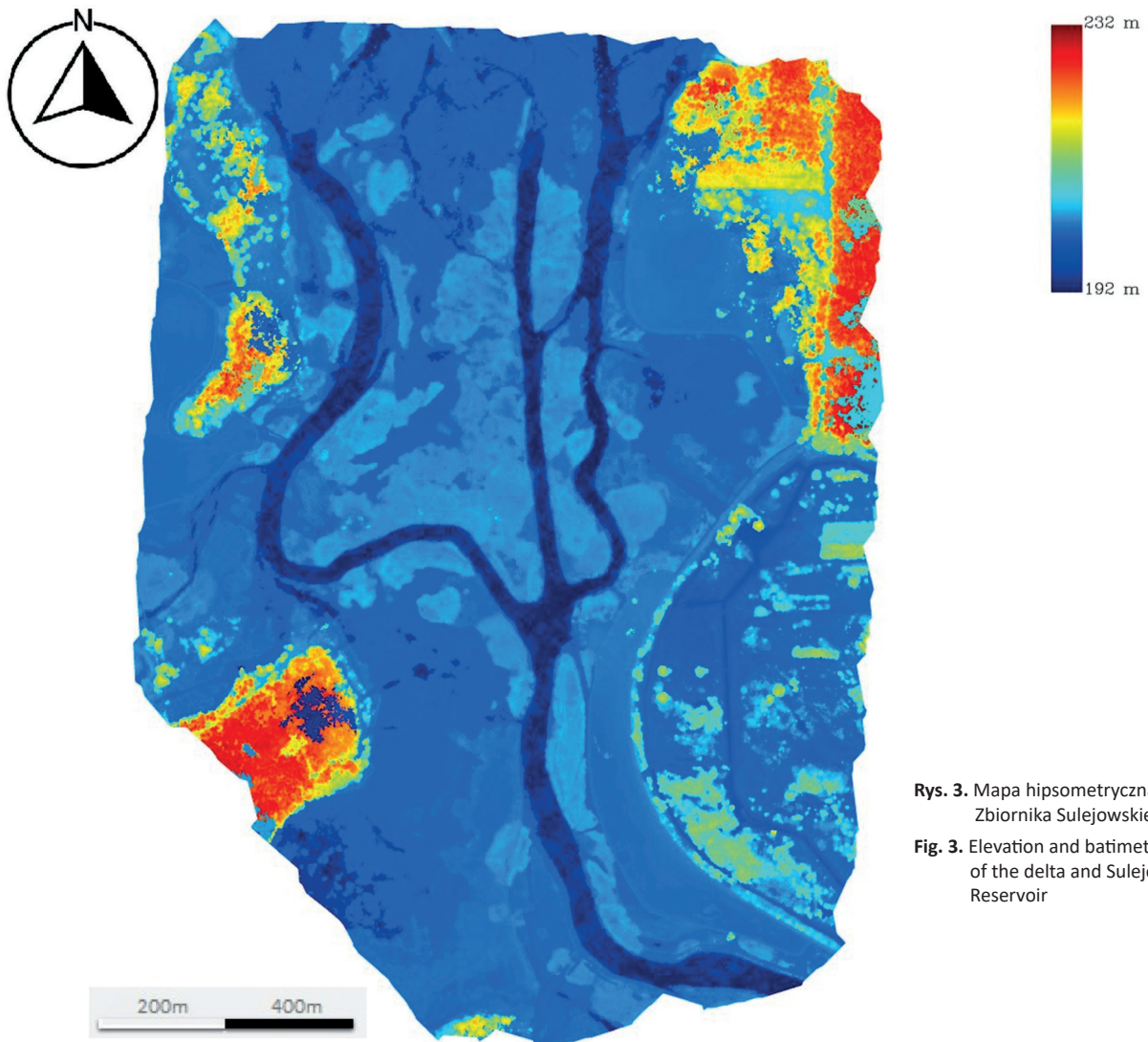
Model 3D fragmentu klifu koło wsi Brodnia-Kolonia nad Zbiornikiem Jeziorsko powstał w wyniku przetworzenia 725 zdjęć wykonanych dronem DJI Phantom 4 RTK z wysokości ok. 60 m nad poziomem gruntu. Przeciętny błąd georeferencyjny (RMSE) wyniósł 0,037 m. Nalot wraz z przygotowaniem trwał około 1,5 godziny. Otrzymany produkt, wygenerowany w programie DJI Terra Pro, można eksportować jako chmurę punktów lub model w kilku popularnych rozszerzeniach, m.in.: .obj, .las, .ply. Na mo-

delu o dużej szczegółowości możliwe jest rozpoznanie pojedynczych form skalnych, szczegółów spękań ściany skalnej oraz pojedynczych drzew. Pozwala to m.in. na analizę objętości pojedynczych dużych klastów o średnicy rzędu kilkudziesięciu cm (fot. 3). Określenie zakresu błędów pomiarowych w zależności od średnicy klastów żwirowych lub głazowych wymaga jeszcze kolejnych testów.

Opracowanie 3D ukazało linię pęknięcia zwięzłych osadów diamiktonowych w obrębie klifu, a także pomiar jej długości (8,94 m) i wysokości (5,46 m) (rys. 4).

### 5.1.4. Pomiary termalne wybranych elementów Zalewu Sulejowskiego

Analiza termalna wybranych obszarów Zbiornika Sulejowskiego została wykonana przy użyciu drona DJI Matrice 210 v2.0 wraz z dołączonym niechłodzonym bolometrem cyfrowym DJI Zenmuse XT S oraz kamerą światła widzialnego DJI Zenmuse X5S. Przed rozpoczęciem nalotu oraz po jego zakończeniu zostały wykonane pomiary termometrem BOSCH PTD 1. Wybrane miejsca zostały wyselekcjonowane pod względem zróżnicowanych cech termicznych, takich jak piaski, żwiry, roślinność niska, roślinność wysoka, roślinność brzegowa, woda przy brzegu oraz toń zbiornika (rys. 5). Pobrane dane zawierające informacje na temat temperatury odbicia oraz lokalnej wilgotności zostały uśrednione i posłużyły do dokładnej kalibracji parametrów termalnych w programie DJI Thermal Analysis Tool 3. Pomiar został przeprowadzony 26.07.2022 r. ok. godziny 10:30. Pokrycie nieba chmurami nie przekraczało 15%, a temperatura powietrza wynosiła 23°C.



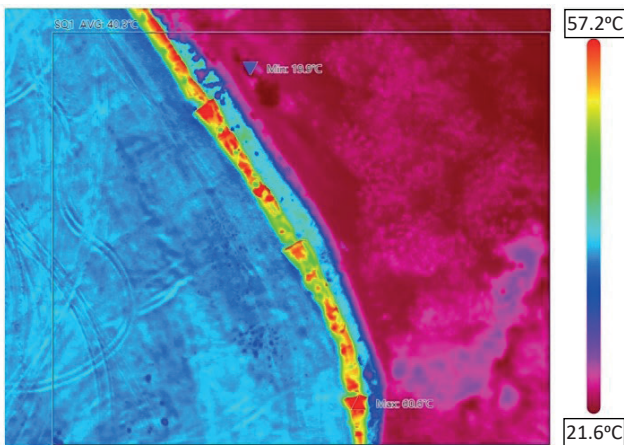
Rys. 3. Mapa hipsometryczna delty Zbiornika Sulejowskiego  
Fig. 3. Elevation and bathymetric map of the delta and Sulejów Reservoir



Fot. 3. Pomiar objętości pojedynczej skały  
Photo 3. Volume measurement of a single rock



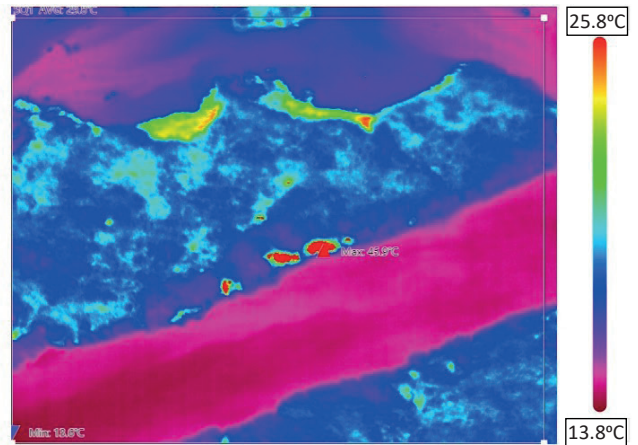
Rys. 4. Fragment modelu klifu z widocznym pęknięciem oraz pomiar jego długości i wysokości  
 Fig. 4. Fragment of the cliff model with a broken surface visible



DJI\_0136\_R.JPG  
 2022/07/26 10:44:56

Measurements

SQ1	MIN	19.9°C
	AVERAGE	40.3°C
	MAX	60.6°C



DJI\_0040\_R.JPG  
 2022/07/26 10:34:55

Measurements

SQ1	MIN	13.6°C
	AVERAGE	29.8°C
	MAX	45.9°C

Rys. 5. Obrazy termalne fragmentu delty w Zbiorniku Sulejowskim (zdjęcia skośne obszar ok. 600 m<sup>2</sup>)  
 Fig. 5. Thermal images of the delta fragment in the Sulejów Reservoir (oblique photos area about 600 m<sup>2</sup>)

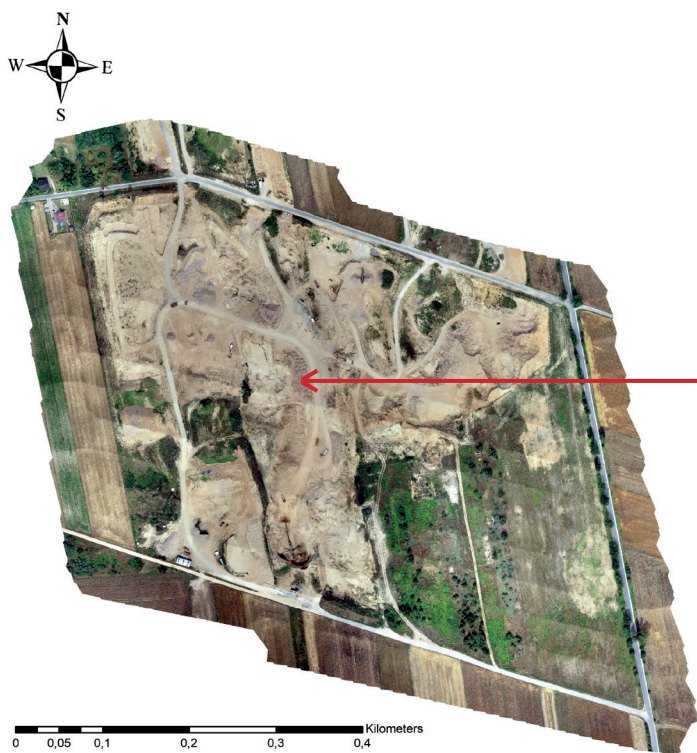
Stwierdzono znaczną różnicę temperatur w obrębie badanego obszaru sięgającą nawet do około 50°C. Najcieplejsze były czarne elementy wałów brzegowych, gdzie temperatura miejscami przekraczała 60°C. Najchłodniejsza okazała się toń wody w głębszych partiach zbiornika, gdzie pomiar wykazał temperaturę około 13–14°C.

### 5.1.5. Pomiary w żwirowni „Adamów”

W trakcie wykonywania nalołów fotogrametrycznych w obrębie tej kopalni, położonej w pobliżu Radomska, największym problemem okazało się zapewnienie optymalnego zasięgu dron–kontroler lotu oraz jakości sygnału GPS. Opisane niedogodności są charakterystyczne dla startu z wyrobiska, często kilkadziesiąt m poniżej poziomu terenu otaczającego. Aby zachować bezpieczeństwo

i zminimalizować ryzyko utraty sygnału należy wybrać miejsce startu znajdujące się poza obszarem kopalni. Podczas nalołu, który został wykonany 28.07.2021 r., panowała bezchmurna pogoda, co umożliwiło naloł z prędkościami zbliżonymi do maksymalnych dla parametru powtarzalności kamery. Maksymalna prędkość przelotu wyniosła około 11 m/s.

W wyniku pojedynczego nalołu dronem DJI Phantom 4 RTK na wysokości około 100 m nad poziomem gruntu powstało opracowanie 2D obejmujące obszar całej kopalni, niespełna 0,4 km<sup>2</sup> (fot. 4). Opracowanie charakteryzuje się rozdzielczością 2,7 cm piksela terenowego (GSD, *Ground Sampling Distance*). Można rozróżnić oraz zmierzyć pojedyncze klasty należące do frakcji gwałowej oraz większe żwiry (mapa 1).



**Fot. 4.** Obszar kopalni „Adamów”

**Photo 4.** The area of the min “Adamów”



**Mapa 1.** Zbliżenie na fragment z widocznymi pojedynczymi klastami

**Map 1.** Close-up of a section with individual rocks visible

## 6. Podsumowanie i wnioski

Rozwój fotogrametrii niskiego pułapu i postęp technologiczny w zakresie możliwości wykorzystania BSP otwierają obecnie nowe możliwości badań terenowych z zakresu geomorfologii i geologii. Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność stosowania dronów do badań geomorfologicznych i geologicznych, w zakresie zarówno struktury, jak i tekstury osadów czwartorzędowych.

Badacz przeprowadzający lot BSP podlega jednak restrykcyjnym i często modyfikowanym przepisom prawa lotniczego. Dotyczy to zarówno Polski, jak i innych państw.

Niezbędne jest posiadanie odpowiednich kwalifikacji, pozwoleń na loty oraz przestrzeganie wymogów prawnych.

Testowe badania dynamicznie zmieniających się form fluwialnych w trudno dostępnych terenach doliny Warty (okolice Zbiornika Jeziorsko) oraz doliny Pilicy (Zalew Sulejowski), pozwoliły udokumentować szybkie zmiany morfologiczne form akumulacyjnych w korytach rzecznych i w dnie zbiorników, zmiany wynikające z sukcesji roślinnej, zmiany poziomu wody oraz zmiany antropogeniczne wynikające z użytkowania zbiornika i jego przebudowy.

Mapy obszaru wykonane w odstępie dwóch dni wykazały już możliwość zaobserwowania mierzalnych zmian

w morfologii form dna. Przeprowadzone testy pokazały skuteczność wykorzystania BSP do obserwacji zmian morfologii delt w zbiornikach wodnych i wielu innych obiektów przestrzennych, pomiarów objętościowych pojedynczych mikroform, czy nawet większych klastów, do tworzenia map hipsometrycznych oraz geomorfologicznych.

Praktyka lotów fotogrametrycznych przy użyciu dronów wykazała niebagatelny wpływ warunków atmosferycznych na finalną jakość opracowania. Najlepsze opracowania 2D, jak i 3D uzyskano wykonując loty podczas możliwie jednolitego zachmurzenia lub w przypadku bezchmurnej pogody podczas górowania słońca.

Warunki, takie jak zamglenie, zapylenie oraz zróżnicowany poziom ustępcznienia w ciągu wykonywania jednego nalotu wpływały negatywnie na jakość wykonanego opracowania.

Ilość zdjęć niezbędna do wytworzenia opracowań dwuwymiarowych była ściśle związana z wielkością mapowanej powierzchni, wysokością lotu drona oraz ustawieniami parametru pokrycia podłużnego i poprzecznego. Dla najczęściej stosowanych parametrów nalotów charakteryzujących się pokryciem podłużnym zdjęć wynoszącym 65% oraz pokryciem poprzecznym wynoszącym 75%, wysokością lotu 110 m można przyjąć, że dla niewielkich opracowań wynoszących do 1 ha wystarczy około 180–200 zdjęć. Dla opracowań wielohektarowych, np. dla fragmentów delt rzeki, jednorazowy nalot wymagał wykonania ponad 2 000 zdjęć. Analizy jakościowe wykazały, że tak dobrane parametry zawsze gwarantowały możliwość odpowiedniego połączenia ze sobą zdjęć z poszczególnych szeregów.

Wykonując badania terenowe przy pomocy dronów, mamy istotny wpływ na dokładność oraz rozdzielczość wykonanych prac. Przedstawione opracowania fotogrametryczne charakteryzowały się relatywnie niewielkim błędem georeferencyjnym (RMSE), który mieścił się w przedziale od 0,02 m do 0,037 m. Taka dokładność pozwalała na obserwację i analizę zmian nawet subtelnych szczegółów w zakresie pokrycia terenu. W przypadku analiz termalnych, otrzymane wyniki mogą posłużyć do analiz struktury powierzchni, jak również przemian w użytkowaniu terenu. Użycie fotopunktów, punktów kontrolnych, systemu RTK lub pokrewnych systemów zapewniających zwiększenie precyzji pomiarów, wpływa pozytywnie na dokładność otrzymanych opracowań.

Wyniki badań fotogrametrycznych, których rezultatem były zarówno opracowania 2D jak i 3D można określić danymi ilościowymi. Wybraną cechą terenu lub jej zakres można zmierzyć oraz porównać zmiany występujące w czasie. Badania termalne wykazują w tym względzie cechy badań jakościowych. Umożliwiają one rozróżnienie typu wykorzystywania terenu, w tym przekształcenia antropogenicznego środowiska.

#### Podziękowania

Autor składa podziękowania recenzentom – prof. Tomaszowi Kalickiemu oraz dr Stanisławowi Krysiakowi za wnikliwe i merytoryczne uwagi.

## 7. Literatura

- Al-Gbory, M.M., Al-Ubaidi, N.M., 2020. Geomagnetic Kp Index and Planetary Magnetosphere Size Relationship: For Mercury and Jupiter During two Types of Geomagnetic Conditions. *Baghdad Science Journal* 17(3), 806–817. <https://doi.org/10.21123/bsj.2020.17.3.0806>
- Bakuła, M., Ostrowski, W., 2012. Zastosowanie cyfrowej kamery niemetrycznej w fotogrametrii lotniczej na wybranych przykładach. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 24, 11–20.
- Bakuła, M., Przeszelski, P., 2013. Technologia wiarygodnego pozycjonowania RTK GPS/GLONASS. *Przegląd Geodezyjny* 7, 3–9.
- Bernasik, J., Mikrut, S., 2007. Fotogrametria inżynierska. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, 1–106.
- Będkowski, K., Piekarski, E., 2017. Podstawy fotogrametrii i teledetekcji dla leśników. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 1–154.
- Budiharto, W., Irwansyah, E., Suroso, J.S., Chowanda, A., Ngarianto, H., Agung Santoso Gunawan, A., 2021. Mapping and 3D modelling using quadrotor drone and GIS software. *Journal of Big Data* 8(48), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00436-8>
- Bujakiewicz, A., Preuss, R., 2000. Aspekty kształcenia i badań naukowych na tle wymogów współczesnych technologii fotogrametrycznych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 10(29), 1–9.
- Ciołkosz, A., Kęsik, A., 1989. Teledetekcja Satelitarna. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1–294.
- Czarnecki, K., 2010. Geodezja współczesna w zarysie. Książka i Wiedza/Gall, Katowice, 1–488.
- Fernández-Lozano, J., Gutiérrez-Alonso, G., 2016. The Use of UAVs (Unmanned Air Vehicles) in Geology, [w:] *Petrology of Magmatic and Metamorphic Complexes At Tomsk (Russia)*. Volume: Proceedings (8) – Tomsk CTSI Publishing House, 1–399.
- Gruber, G.W.J., 2019. Review of DJI Phantom 4 RTK for the Surveying Industry. Rozprawa doktorska University of Southern Queensland Faculty of Health, Engineering and Sciences ENG4111/ENG4112 Research Project, 14–73.
- Kowalewski, G., 2000. Fotointerpretacja cyfrowa w badaniach oddziaływania zbiorników zaporowych na środowisko przyrodnicze (na przykładzie Zalewu Koronowskiego). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 10, 48–1: 48–12.
- Matzka, J., Stolle, C., Yamazaki, Y., Bronkalla, O., Morschhauser, A., 2021. The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity. *Space Weather* 19. <https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
- Ołędzki, J.R. (red.) 2007. Teledetekcja Środowiska 38: Regiony Geograficzne Polski. Uniwersytet Warszawski, 1–337.
- Ostrihansky, M., Szmigiero, M., 2020. Prawo Dronów. Bezzałogowe statki powietrzne w prawie Unii Europejskiej oraz Krajowym. Wolters Kluwer.
- Pyka, K., Wiącek, P., Guzik, M., 2020. Surveying with Photogrammetric Unmanned Aerial Vehicles. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing* 32, 79–102.
- Qin, R., Gruen, A., Xianfeng, Huang, 2013. UAV-Project-Building a reality-based 3D model. *Coordinates*, IX. 18–26. 21. Post-Processing Kinematic Mode MDPI, Drone Journal.
- Remzi, E., Alkan, E., Aydin, A., 2021. A Comparative Analysis of UAV-RTK and UAV-PPK Methods in Mapping Different Surface Types. *European Journal of Forest Engineering* 2021, 12–25. <https://doi.org/10.33904/ejfe.938067>
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J., Rodríguez-Pérez, J., Ordóñez, C., 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs10101606>

Taddia, Y., Stecchi, F., Pellegrinelli, A., 2020. Coastal Mapping using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode. *Drones* 2020. <https://doi.org/10.3390/drones4020009>

*Ustawa z dnia 3 lipca 2002 roku, Prawo lotnicze* (Dz.U., 2019, poz. 1580 z późn. zm.).

#### Źródła internetowe

<https://droneradar.eu/> (dostęp: 30.12.2022).

<https://drony.ulc.gov.pl/> (dostęp: 30.12.2022).

[https://edziennik.ulc.gov.pl/DU\\_ULC/2020/69/akt.pdf](https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/69/akt.pdf) (dostęp: 30.12.2022).

[https://edziennik.ulc.gov.pl/DU\\_ULC/2020/70/akt.pdf](https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/70/akt.pdf) (dostęp: 30.12.2022).

[https://edziennik.ulc.gov.pl/DU\\_ULC/2020/73/akt.pdf](https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/73/akt.pdf) (dostęp: 30.12.2022).

[https://edziennik.ulc.gov.pl/DU\\_ULC/2020/74/akt.pdf](https://edziennik.ulc.gov.pl/DU_ULC/2020/74/akt.pdf) (dostęp: 30.12.2022).

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:02019R0947-20200606&from=PL> (dostęp: 30.12.2022).

<https://ulc.gov.pl/pl/drony/kategoria-szczegolna/5299-kategoria-szczegolna> (dostęp: 30.12.2022).

<https://www.easa.europa.eu/downloads/110913/en> (dostęp: 30.12.2022).

<https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index> (dostęp: 30.12.2022).

<https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/czesto-zadawane-pytania-faq/496-sprzet/5518-czy-moj-dron-zalicza-sie-do-zabawek> (dostęp: 30.12.2022).

<https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/kategoria-otwarta-informacje> (dostęp: 30.12.2022).

# Spis treści

## Contents

### ARTYKUŁY ARTICLES

**Rafał Grulke • Maciej Ziulkiewicz**

Warunki tlenowe wód powierzchniowych w odcinku źródłiskowym Dzierżąznej (Maliny)  
/Oxygen conditions of surface waters in the spring section of Dzierżązna (Malina)/..... 7

**Tomasz Kalicki • Paweł Przepióra • Michał Jabłoński • Marcin Frączek • Łukasz Podrzycki**

Zróżnicowanie litologiczne i wiek kamów koło Suchedniowa (Wyżyna Kielecka)  
/Lithological diversity and age of kames near Suchedniów (Kielce Upland)/..... 21

**Maciej Kossowski**

Zastosowania dronów w badaniach rzeźby terenu, struktury i tekstury osadów na przykładach z Polski Środkowej  
/The use of drones in the study of relief, structure and texture of sediments on examples from Central Poland/..... 35