



Wpływ warunków pogodowych na skład chemiczny i zasilanie oczek w zagłębieniach meteorytowych (rezerwat „Meteoryt Morasko”, Poznań)

The influence of weather conditions on the chemical composition and supply of kettle ponds in meteorite depressions (“Meteoryt Morasko” reserve, Poznań)

Maciej Major^{1,2}  Maria Chudzińska¹  Mikołaj Majewski^{1,2} 

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

¹ Stacja Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego „Poznań-Morasko”

² Instytut Geoekologii i Geoinformacji

ul. B. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań

maciej.major@amu.edu.pl (autor korespondencyjny) • maria.chudzinska@amu.edu.pl •

mikolaj.majewski@amu.edu.pl

Zarys treści. Podstawowym celem prowadzonych badań było rozpoznanie panujących warunków pogodowych i określenie ich wpływu na skład chemiczny i zasilanie oczek występujących w kraterach meteorytowych zlokalizowanych w rezerwacie „Meteoryt Morasko” w północnej części Poznania. Badania realizowano w latach hydrologicznych 2018-2022, z wyjątkiem pierwszego roku pomiarowego, kiedy z przyczyn administracyjnych badania rozpoczęto dopiero w maju. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że warunki meteorologiczne miały duży wpływ na funkcjonowanie oczek zlokalizowanych na badanym obszarze. Kształtowały skład chemiczny wód powierzchniowych, decydowały o typie zasilania oczek, a zmniejszające się sumy opadów atmosferycznych i zwiększające się wartości temperatury powietrza oraz parowania miały decydujący wpływ na okresowy zanik oczek.

Słowa kluczowe: zagłębienia meteorytowe, oczka, rezerwat „Meteoryt Morasko”, skład chemiczny wód, zasilanie zbiorników wodnych.

Keywords: meteorite depressions, kettle ponds, “Meteoryt Morasko” reserve, water chemical composition, water supply.

Wstęp

Zagłębienia bezodpływowe są stałym elementem krajobrazu strefy młodoglacjalnej, zajmują duży odsetek jej powierzchni. Są różnej genezy, ale na terenach objętych ostatnim zlodowaceniem plejstoceńskich lodowców skandynawskich dominują przede wszystkim zagłębienia wytopiskowe (Major, 2012).

Podstawową formą bezodpływową jest **zagłębienie** terenowe. Niekiedy tego typu zagłębienie jest wypełnione wodą i wtedy tworzy zbiornik – **oczko** lub mokradło. Każde zagłębienie posiada własną powierzchnię **zlewnię bezodpływową**. Granice takiej zlewni jednostkowej wyznaczają przeważnie formy wypukłe okalające zagłębienie. Skupienie sąsiadujących ze sobą zlewni bezodpływowych tworzy **obszar bezodpływowy** powierzch-

niowo, którego zasięg wyznaczają działy wodne zlewni peryferycznych (Drwal, 1975; Major, 2009, 2010, 2012).

Spośród 76. typów genetycznych mis jeziornych istniejących na świecie (Hutchinson, 1957), jednym z nich są jeziora (oczka) meteorytowe. Ich unikalność wynika z faktu, że o powstaniu niecki jeziornej nie decydowały wyłącznie procesy i zjawiska odbywające się na Ziemi (jak w przypadku pozostałych 75. typów), lecz czynnik pochodzenia kosmicznego. Na obszarze Polski jedynym miejscem istnienia tego typu oczek jest rezerwat „Meteoryt Morasko”, zlokalizowany w północnej części Poznania (ryc. 1) (Choiński i Ptak, 2017).

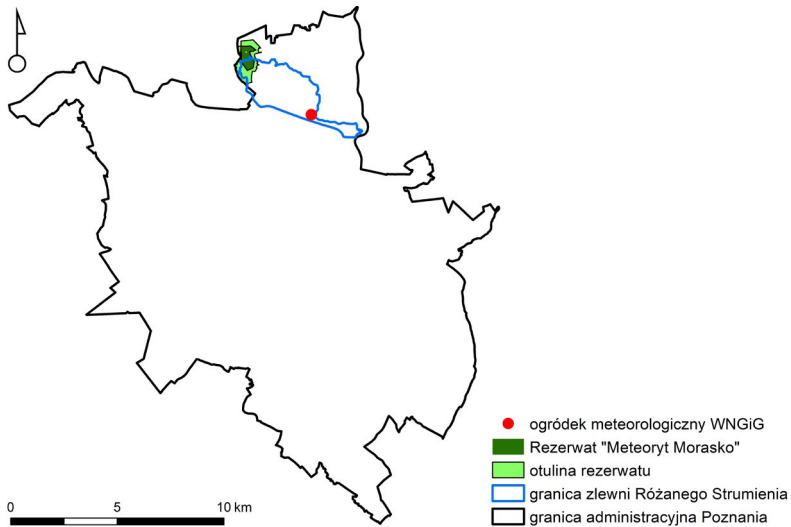
Różne środowisko geograficzne zlewni powierzchniowo bezodpływowych, a w szczególności ich budowa geologiczna, warunkuje istnienie dwóch typów różniących się między sobą mechanizmem krążenia wody: **obszarów bezodpływowych ewapotranspiracyjnych**, gdzie parowanie jest głównym procesem bilansującym opad i noszących cechy bezodpływowości całkowitej oraz obszarów **bezodpływowych chłonnych**, gdzie wsiąkanie jest głównym procesem bilansującym opad i w związku z tym noszących cechy bezodpływowości tylko powierzchniowej (Drwal, 1975; Drwal i Hrynyszak, 2003; Major, 2009, 2010, 2012). Odnosząc powyższe stwierdzenie do pojedynczych obiektów w mniejszej skali, z hydrologicznego punktu widzenia, możemy wyróżnić dwa rodzaje zagłębień bezodpływowych: **ewapotranspiracyjne i chłonne**.

Początki badań meteorytu Morasko sięgają 1914 r., kiedy to dr Cobliner natknął się na pierwsze okazy tego meteorytu podczas kopania okopów wojskowych. Ich masy wynosiły 77,5 kg; 4,2 kg i dwie sztuki po 3,5 kg każdy. Do tej pory udokumentowano ponad 2000 kg materii meteorytu Morasko, składającego się z odłamków o wadze od kilku gramów do ponad 270 kg (Szczuciński i Muszyński, 2020). W rezerwacie przyrody utworzonym w 1976 r. w pobliżu „Góry Moraskiej” występuje łącznie siedem kraterów meteorytowych, które były przedmiotem wielu badań. W pięciu z nich są stałe bądź okresowe oczka i tym samym mają charakter ewapotranspiracyjny, a pozostałe dwa – chłonne.

Na przestrzeni ponad stu lat powstało wiele opracowań opisujących kraterę w północnej części Poznania w różnych aspektach (Stankowski, 2001, 2008; Stankowski i Muszyński, 2008; Świdnicki et al., 2016; Choiński i Ptak, 2017; Choiński et al., 2019). Mimo to nadal brakuje prac dotyczących funkcjonowania tych niezwykle cennych obiektów w ujęciu geoekologicznym. Celem niniejszej pracy jest uzupełnienie tej luki poprzez rozpoznanie panujących warunków pogodowych i określenie ich wpływu na skład chemiczny oraz zasilanie oczek występujących w kraterach meteorytowych zlokalizowanych w rezerwacie „Meteoryt Morasko”.

Obszar badań

Rezerwat „Meteoryt Morasko” powstał w 1976 r. Blisko połowa jego obszaru zlokalizowana jest w granicach zlewni Różanego Strumienia (ryc. 1). Zlewnia ta położona jest w północnej części Poznania i zajmuje powierzchnię ok. 7,7 km². Według podziału fizyczno-geograficznego Richlinga et al. (2021) znajduje się w obrębie dwóch mezoregionów: Pojezierza Poznańskiego (315.51) i Poznańskiego Przełomu Warty (315.52). Szczegółowy opis obszaru badań zawarto w artykule Major et al. (2022).



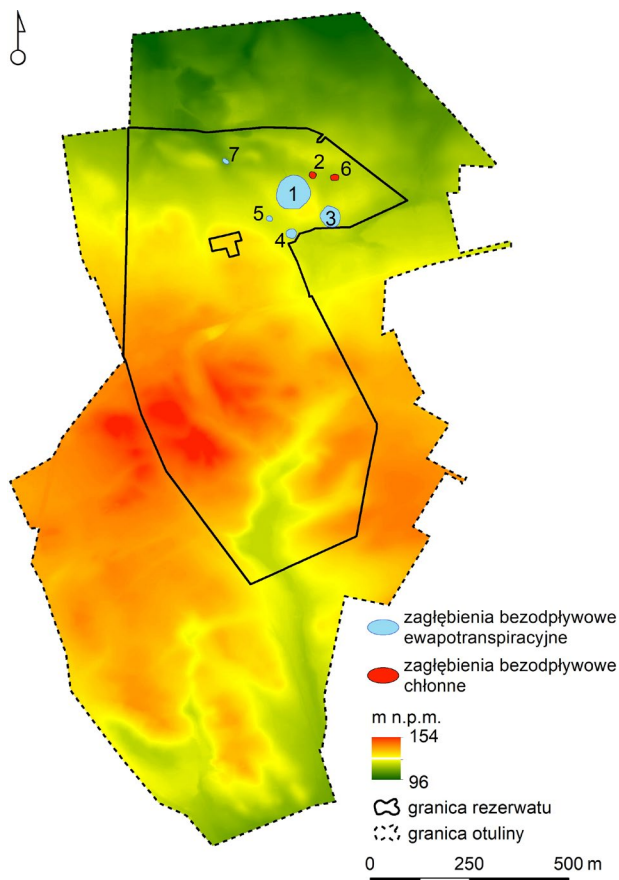
Ryc. 1. Lokalizacja rezerwatu „Meteoryt Morasko” na tle zlewni Różanego Strumienia oraz granic administracyjnych Poznania
Location of the “Meteoryt Morasko” reserve against the background of the Różany Stream catchment and the administrative borders of Poznań

Według przeglądowej mapy geomorfologicznej Polski pod redakcją Starkła (Rosa i Kozarski, 1980) w północnej części Poznania wyróżnia się wysoczyznę morenową falistą, równiny sandrowe, wały moren akumulacyjnych oraz plejstocenijskie równiny terasowe. Na północy tego obszaru znajduje się ciąg pagórów czołowomorenowych z kulminacją na Górze Moraskiej, a w okolicy rezerwatu „Meteoryt Morasko” występuje między innymi wysoczyzna morenowa falista, której wysokość waha się od 102 do 110 m n.p.m. (Major et al., 2022). W sąsiedztwie moren powstało również wiele obniżen z wytopienia bloków martwego lodu, wypełniających niegdyś rynny lodowcowe lub pogrzebanych w osadach lodowcowych (Stankowski, 2008).

W rezerwacie Meteoryt Morasko, oprócz zagłębien meteorytowych, charakterystycznymi formami terenu są przede wszystkim zagłębienia o średnicy do 100 m. Ich geneza związana jest z impaktem meteorytów, na co pierwszy zwrócił uwagę Pokrzywnicki (1964) i zinterpretował je jako krateru uderzeniowe. Impakt moraski miał miejsce między 5000 a 5500 lat temu (Tobolski, 1976; Stankowski i Muszyński, 1999; Stankowski, 2008; Szczuciński i Muszyński, 2020).

Krateru te obecnie mają średnice od 29,6 do 96,5 m i kształty zbliżone do okręgów – stosunek najdłuższej do najkrótszej średnicy waha się między 1,03 a 1,10. Tylko jedna mniejsza forma jest bardziej wydłużona, co być może jest efektem połączenia ze sobą dwóch bardzo blisko siebie utworzonych małych kraterów (Włodarski et al., 2017). Średnia głębokość kraterów wynosi od 1,2 do 12,1 m, a większość wypełniających je osadów organicznych może sięgać nawet do 4 m (Choiński et al., 2019).

Ilość wody wypełniającej oczka (ryc. 2) była zróżnicowana w okresie badań i często dochodziło do ich całkowitego zaniku. Choiński i Ptak (2017) na podstawie swoich badań stwierdzili, że długość maksymalna trzech największych zbiorników wynosiła od 7 do 55 m,



Ryc. 2. Rozmieszczenie zagłębień meteorytowych w rezerwacie „Meteoryt Morasko”
Distribution of meteorite depressions in the “Meteoryt Morasko” reserve

szerokość maksymalna kształtowała się w przedziale od 7 do 40 m, a głębokość maksymalna oscylowała od 0,4 do 2,6 m. Przedstawione przez tych autorów dane morfometryczne mis badanych obiektów potwierdziły, że analizowane oczka kształtem zbliżone są do okręgów. Wartości ich wskaźników wydłużenia wynosiły od 1,0 do 1,4. Im wartość wskaźnika jest większa, tym zagłębienie ma bardziej wydłużony kształt, a gdy wartość wskaźnika jest bliższa jedności, to obniżenie ma kształt bardziej zbliżony do okręgu.

Metody badań

Kartowania hydrochemiczne oczek prowadzone były czterokrotnie w roku, w różnych sezonach pogodowych, w pięciu latach hydrologicznych 2018-2022. W pierwszym roku pomiarowym badania rozpoczęto dopiero w maju ze względu na oczekiwanie na decyzję Regionalnego Dyrektora Ochrony Środowiska w Poznaniu dotyczącej zezwolenia na prowadzenie badań naukowych w rezerwacie „Meteoryt Morasko”.

Warunki pogodowe określono na podstawie pomiarów w ogródku meteorologicznym zlokalizowanym w sąsiedztwie gmachu Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Były to codzienne automatyczne i manualne pomiary podstawowych elementów meteorologicznych, a w szczególności opadów atmosferycznych, temperatury powietrza i parowania, które były podstawą oceny funkcjonowania geosystemów zlewni zagłębień bezodpywowych zlokalizowanych w rezerwacie „Meteoryt Morasko”. Pomiary automatyczne prowadzono z wykorzystaniem stacji meteorologicznej Hobo Onset S-THB-M008, rejestrując dane z częstotliwością 24 razy na dobę. Manualne pomiary były wykonywane raz dziennie przez obserwatorów Stacji ZMŚP Poznań-Morasko o godzinie 6.00 UTC (Kejna, 2021). Dane te zostały porównane z wynikami z wielolecia 1991-2020, uzyskanymi na Stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica.

Próbki wody z oczek pobierane były raz na kwartał, ręcznie, przy użyciu czerpaka kątownego do butelek z chemicznie obojętnego tworzywa (PP) o objętości 1 L. Aby zapewnić reprezentatywność uzyskanych wyników, stanowiska pobierania próbek wód z oczek w kraterach meteorytowych znajdowały się w stałych punktach, w tej samej odległości od brzegu, a ich lokalizacja była przede wszystkim zależna od ukształtowania misy zagłębienia.

Na miejscu wykonano pomiar temperatury wody, a próbki wody, zaraz po pobraniu, dostarczono do laboratorium. W niefiltrowanych próbkach oznaczono przewodność elektrolityczną właściwą (PEW_{25}) oraz pH. Następnie próbki przesączono przez filtr membranowy 0,45 μm (GF/A Whatmann) i przechowywano w temperaturze 4°C. Aby oznaczyć kationy metali, próbki utrwalano kwasem azotowym (65% HNO_3 Suprapure, Merck, Germany). Skład chemiczny badanych próbek analizowany był w Laboratorium Geoekologicznym Stacji ZMŚP Poznań-Morasko na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM oraz w Laboratorium Hydrochemicznym Stacji Geoekologicznej UAM w Storkowie. Oznaczenia pH i przewodności elektrolitycznej właściwej przeprowadzono potencjometrycznie (CPC 411 Elmetron). Na podstawie oznaczonej zasadowości metodą miareczkową z wykorzystaniem 0,1% oranżu metylowego (Chempur, Poland) i 0,05 N kwasu chlorowodorowego (HCl, Chempur, Poland) oraz przy użyciu biurety cyfrowej (Titrette Brand, Germany) wyznaczono stężenia jonów wodorowęglanowych.

Do oznaczenia kationów Na^+ , K^+ , Mg^{2+} i Ca^{2+} zastosowano technikę spektrometrii absorpcji i emisji atomowej (AAS/AES, SpectrAA-20 plus firmy Varian) z granicą oznaczalności wynoszącą 0,01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Stężenia jonów NH_4^+ , SiO_2 , PO_4^{3-} analizowano metodą spektrofotometryczną (Nanocolor UV/VIS II Macherey-Nagel), której próg wykrywalności dla tych jonów wynosił odpowiednio: 0,05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 0,005 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ i 0,05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Zjonizowaną krzemionkę (SiO_2) użyto jako wskaźnik zasilania oczek. Stężenia anionów SO_4^{2-} , NO_3^- i Cl^- oznaczano metodą chromatografii jonowej (DX-120 firmy Dionex) z granicą wykrywalności wynoszącą 0,01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

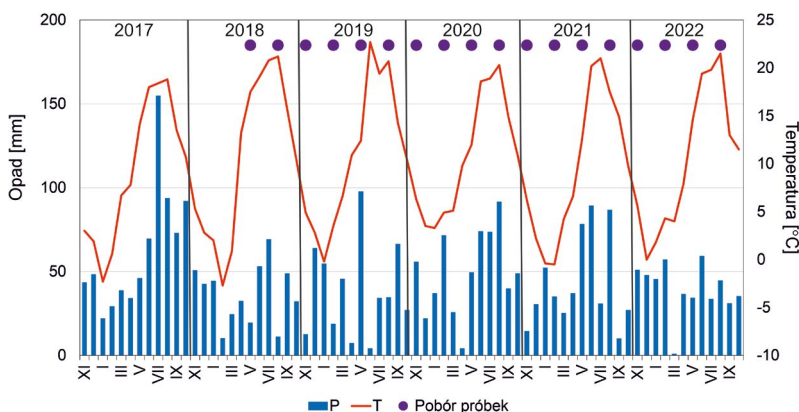
Do kontroli jakości wyników stosowano certyfikowane wzorce – bufory pH (Eurachem, Poland) i wzorce przewodności (Hamilton, Switzerland) oraz certyfikowane materiały odniesienia: ERM-CA408 *Simulated rainwater* (JRC, Joint Research Centre) oraz MISSISSIPPI-14 *River Water* (ECCC, Canada). Uzyskane wartości próbek kontrolnych ($x \pm \text{SD}$) i ich odchyłki (%) wyniosły odpowiednio: (7,48 \pm 0,20) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ i 96% dla Na^+ , (2,46 \pm 0,05) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ i 99% dla K^+ , (0,140 \pm 0,015) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ i 97% dla Mg^{2+} , (36,9 \pm 0,9) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ i 94% dla Ca^{2+} , (1,42 \pm 0,02) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ i 97% dla SO_4^{2-} , (2,10 \pm 0,03) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ i 104% dla NO_3^- i (1,93 \pm 0,02) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ i 98% dla Cl^- .

Wyniki i dyskusja

Uwarunkowania termiczno-opadowe

Okres pomiarowy przypadł na lata o wysokich średnich rocznych temperaturach powietrza oraz zróżnicowanych warunkach opadowych. Według klasyfikacji termicznej stosowanej w Zintegrowanym Monitoringu Środowiska Przyrodniczego (Lorenc, 1998), dwa lata (2017, 2021) były normalne pod względem temperatury powietrza, a pozostałe trzy były ciepłe. Poza rokiem 2017, który poprzedzał okres badawczy, we wszystkich latach średnie roczne temperatury powietrza były wyższe od średniej wieloletniej wynoszącej 9,4°C; zanotowanej na Stacji IMGW-PIB Poznań-Ławica w okresie referencyjnym 1991-2020. Najcieplejsze były lata 2019 i 2020 ze średnią roczną temperaturą równą 10,7°C; z kolei najchłodniejszymi latami były 2017 (9,3°C) oraz 2021 (9,5°C). Średnie miesięczne temperatury powietrza w zdecydowanej większości również kształtowały się powyżej średnich wieloletnich (ryc. 3). W całym 6-letnim okresie, w którym analizowano tylko warunki meteorologiczne, wystąpiło 14 miesięcy chłodnych. Najczęściej miało to miejsce w kwietniu oraz w maju (po trzy razy). Ponadto kwiecień 2021 r., ze średnią temperaturą 6,6°C; jako jedyny spośród 72 miesięcy był uznany jako bardzo chłodny. Połowa, bo 36 miesięcy charakteryzowała się temperaturami powyżej średniej. Największe odchylenia zarejestrowano w czerwcu, a czerwiec 2019 r. był ekstremalnie ciepły. Pozostałe 22 miesiące były normalne pod względem termicznym.

Większe zróżnicowanie wystąpiło w przypadku sum opadów atmosferycznych. W analizowanym okresie wystąpiły trzy lata suche (2018, 2019 i 2022) oraz po jednym roku normalnym (2021), wilgotnym (2020) i bardzo wilgotnym (2017). Zakres sum rocznych opadów atmosferycznych wynosił od 437,8 mm (2018; 101 mm poniżej średniej wieloletniej) do 744,2 mm (2017; 205,4 mm powyżej średniej wieloletniej). Typowy przebieg roczny z przewagą opadów w okresie letnim stwierdzono w latach 2017-2018 i 2020-2021



Ryc. 3. Warunki termiczno-opadowe zmierzone w ogródku meteorologicznym obok gmachu WNGiG UAM na tle terminów kartowań hydrochemicznych oczek zlokalizowanych w rezerwacie „Meteoryt Morasko”
P – opad atmosferyczny, T – temperatura powietrza

Thermal and precipitation conditions measured in the weather station next to the building of the Faculty of Geographical and Geological Sciences at Adam Mickiewicz University, against the backdrop of the hydrochemical survey dates of kettle ponds located in the “Meteoryt Morasko” reserve
P – precipitation, T – air temperature

(ryc. 3). W 2019 r. najwyższe opady zarejestrowano wiosną, z kolei rok 2022 charakteryzował się równomiernym rozkładem miesięcznych sum opadów. Najwyższe sumy miesięczne opadów zarejestrowano w lipcu 2017 r. (154,7 mm) oraz w maju 2019 r. (97,7 mm), natomiast zdecydowanie najsuchszymi miesiącami były: marzec 2022 r. (0,8 mm), czerwiec 2019 r. (4,1 mm) i kwiecień 2020 r. (4,1 mm). Według klasyfikacji opadowej (Kaczorowska, 1962), 5 miesięcy było skrajnie suchych, a 6 skrajnie wilgotnych.

Zwiększająca się częstość występowania dni gorących i upalnych wzmagała ewapotranspirację oraz występowanie susz meteorologicznych w okresie letnim. Utrzymujące się wysokie temperatury powietrza, coraz dłuższe okresy bezdeszczowe oraz stosunkowo niskie sumy opadów atmosferycznych (w szczególności od 2018 r., czyli od początku pomiarów) nie sprzyjały odbudowie zasobów wód powierzchniowych.

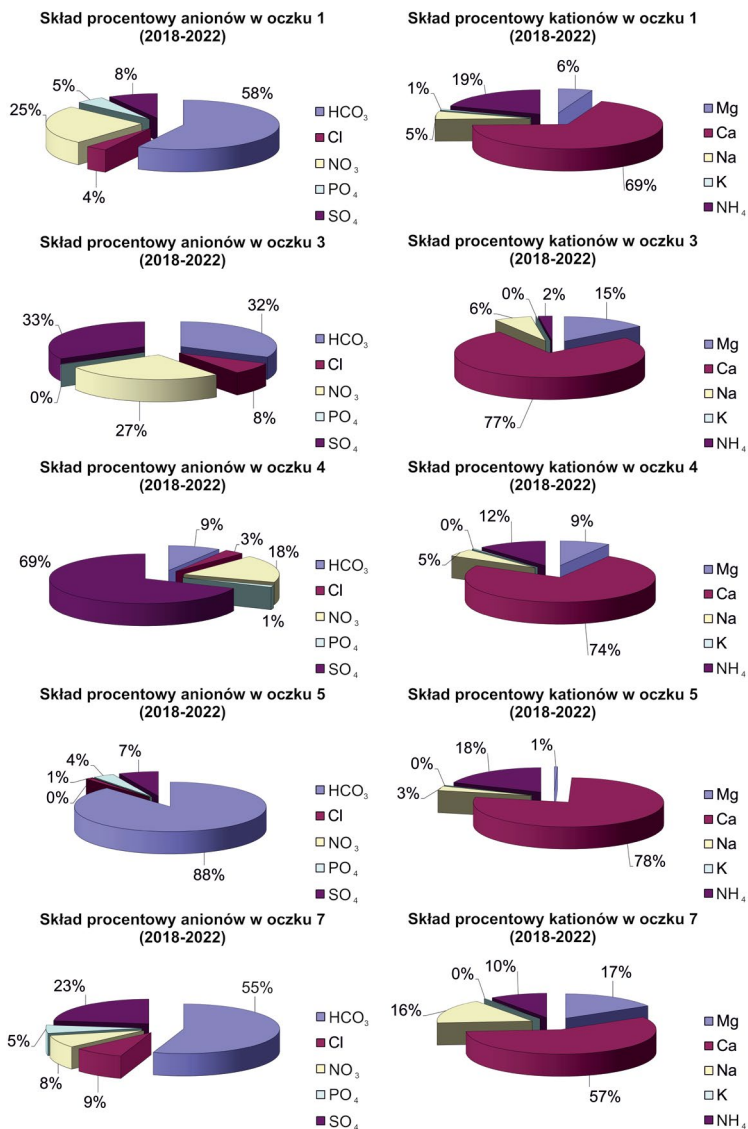
Skład chemiczny wód powierzchniowych

Wody badanych oczek charakteryzowały się odczynem normalnym lub lekko podwyższonym wg klasyfikacji Jansena i in. (1988). Średnie wartości pH wahały się od 5,13 pH w oczku nr 3 do 6,78 pH dla zagłębienia nr 1. Największe zróżnicowanie odczynu występowało w oczku nr 3, gdzie wartości pH mieściły się w przedziale od 4,26 do 7,82. Podobne zróżnicowanie odnotowano w przypadku przewodności elektrolitycznej właściwej. Średnie wartości wynosiły od 65,8 $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ w oczku nr 5 do 477,8 $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ w obniżeniu 3. Najszerzy zakres zmienności zaobserwowano od 65,8 $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ w zagłębieniu nr 5 do 802 $\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ w oczku nr 4. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. dotyczącym klasyfikacji stanu ekologicznego i chemicznego wód powierzchniowych (Dz.U. 2021, poz. 1475) przewodność elektrolityczna nie przekraczała wartości granicznych dla II klasy jakości wody.

Dominującym składnikiem dla wszystkich badanych wód były jony wapnia, których średnie wartości wynosiły od 17,5 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w oczku nr 7 do 72,8 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w zagłębieniu nr 3. Jon wapnia, jako główny kation większości wód powierzchniowych, dostaje się do zbiorników na skutek wymywania ze skał i gleby (Dojlido, 1995). Podobnie wysokie stężenia odnotowano dla jonów wodorowęglanowych, ze średnimi wartościami od 37,8 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w oczku nr 5 do 177,8 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w obniżeniu nr 3. Anion ten, dominujący w wodach powierzchniowych, pochodzi głównie z ługowania skał węglanowych i rozpuszczonego dwutlenku węgla, a także występuje razem z kationem Ca^{2+} (Macioszczyk, 1987).

Kolejnymi istotnymi jonami w składzie badanych wód były jony siarczanowe i azotanowe. Są to składniki, które zaznaczają swoją obecność w typie hydrogeochemicznym oczek w zagłębieniach meteorytowych. Siarczany dostają się do wód głównie wskutek opadów atmosferycznych oraz wymywania skał i gleb, a także z biochemicznego utleniania innych form siarki (Dojlido, 1995). Do oczek SO_4^{2-} dostarczane są również w wyniku spływów śródpokrywowych w kierunku den zagłębień bezodpływowych ze stoków okalających oczka, a ich źródłem w profilu glebowym są przede wszystkim procesy wietrzenia chemicznego i rozkładu materii organicznej (Szpikowski et al., 1998). Z kolei azotany, pochodzą głównie z opadów atmosferycznych i spływów powierzchniowych (Major, 2012). Najwyższe średnie stężenie jonów siarczanowych wystąpiło w oczku nr 4 (117,1 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$), a najniższe 3,5 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w zagłębieniu nr 1. Z kolei najwyższe średnie stężenia jonów azotanowych były podobne w dwóch oczkach: 34,3 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w obniżeniu nr 3 i 26,9 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ w zagłębieniu nr 4.

Procentowy skład chemiczny badanych wód powierzchniowych określono na podstawie średnich wartości stężeń poszczególnych jonów (ryc. 4). Według klasyfikacji Szczurkiewicza (Macioszczyk, 1987) wody z oczek P1 i P5 należą do dwuskładnikowych o typie hydrogeochemicznym wodorowęglanowo-wapniowym ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$). W punkcie P4 również występują wody dwujonowe siarczanowo-wapniowe ($\text{SO}_4\text{-Ca}$), natomiast w oczku P3 typ wód określono jako bardziej złożony, trójskładnikowy siarczanowo-wodorowęglanowo-

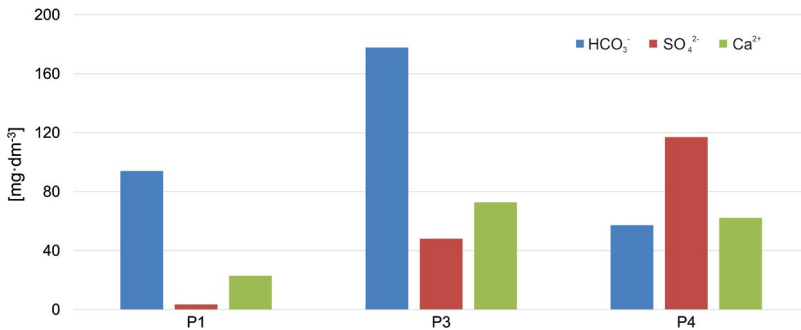


Ryc. 4. Uśredniony skład procentowy anionów i kationów w badanych oczkach zlokalizowanych w rezerwacie „Meteoryt Morasko” w latach hydrologicznych 2018-2022

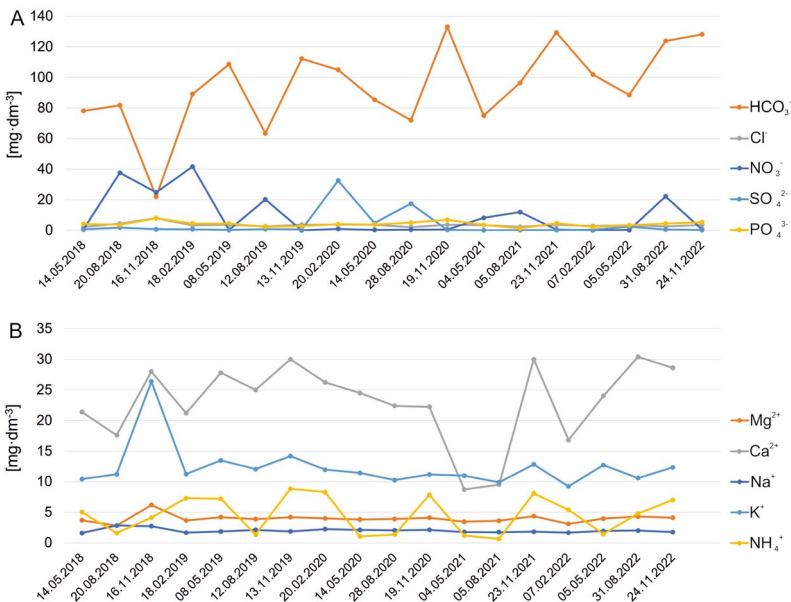
Average percentage composition of anions and cations in the investigated kettle ponds located in the "Meteoryt Morasko" reserve in 2018-2022 years

-wapniowy ($\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$). W obniżeniu P7 zaobserwowano wyższe zawartości jonów wodorowęglanowych w porównaniu do siarczanowych, co wskazuje na trójskładnikowy typ wody wodorowęglanowo-siarczanowo-wapniowy ($\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$). Z powyższych bilansów wynika, że dominującymi składnikami w badanych oczkach były: wapń, wodorowęglany oraz siarczany (ryc. 5), które są produktami wietrzenia chemicznego i potwierdzają dominujący udział zasilania gruntowego.

Składniki chemiczne w badanych zagłębieniach wykazywały dużą zmienność czasową (ryc. 6). Mimo niepełnych serii pomiarowych, wynikających z okresów suszy, na przykładzie oczka nr 1 zauważalny był wzrost wartości pH w okresie wiosenno-letnim oraz spadek



Ryc. 5. Średnie stężenia głównych jonów mających wpływ na typy hydrogeochemiczne wód w wybranych oczkach w rezerwacie „Meteoryt Morasko” w latach hydrologicznych 2018-2022
Average concentrations of major ions affecting hydrogeochemical types of water in selected kettle ponds in the “Meteoryt Morasko” reserve in 2018-2022 years



Ryc. 6. Zmienność czasowa anionów (A) i kationów (B) w oczku nr 1 w latach hydrologicznych 2018-2022
Temporal variability of anions (A) and cations (B) in pond No. 1 in 2018-2022 years

w okresie zimowym. Podobne sezonowe zmiany występowały w przewodności elektrolitycznej właściwej oraz w stężeniu jonów Ca^{2+} i HCO_3^- . Inna zauważalna prawidłowość dotyczyła jonów amonowych i fosforanowych. Jony biogenne najczęściej osiągały najwyższe stężenia w okresie zimowym, a niższe w okresie letnim. Zjawisko to jest związane głównie z pobieraniem tych związków przez rośliny oraz ustaniem procesów nitrifikacji.

Zasilanie oczek

Rodzaj zasilania oczek ma istotny wpływ na obieg materii w zlewniach bezodpływowych. Decyduje o terminach pojawiania się wody w zagłębieniach, czasie ich wypłynięcia, a także o związkach wód powierzchniowych i podziemnych oraz zdolnościach retencyjnych. Dlatego określenie sposobu zasilania oczek w granicach zlewni badanych zagłębień powinno być kluczowym elementem w analizie funkcjonowania obniżen bez powierzchniowego odpływu wód.

Jako wskaźnik rodzaju zasilania oczek wybrano wielkość stężenia zjonizowanej krzemionki (SiO_2) w wodach powierzchniowych. Metoda ta została skutecznie zastosowana w badaniach zagłębień bezodpływowych w zlewni górnej Parsęty w latach hydrologicznych 1999-2001 (Major, 2009) oraz w dorzeczu Parsęty w latach hydrologicznych 2005-2010, w celu określenia pochodzenia wód wypełniających oczka (Major, 2012).

Krzem należy do najpospolitszych pierwiastków skorupy ziemskiej, jest drugim po tlenie głównym składnikiem litosfery. Minerale zawierające krzem, takie jak krzemiany, glinokrzemiany i kwarc, charakteryzują się niską rozpuszczalnością, co sprawia, że krzem występuje w wodach w ograniczonych ilościach. W największych stężeniach krzemionka występuje w wodach podziemnych, a jej źródłem są wietrzejące krzemiany (Macioszczyk, 1987). Do wód dostaje się poprzez procesy wietrzenia oraz z biosfery, natomiast w wodach powierzchniowych SiO_2 najczęściej pochodzi z drenażu wód gruntowych i zasilania spływem śródpokrywowym (Dojlido, 1995). Dlatego jest dobrym wskaźnikiem pochodzenia wód powierzchniowych wypełniających dna zagłębień bezodpływowych. W wodach kwaśnych i obojętnych zawartość krzemionki zazwyczaj nie przekracza $10\text{--}20\text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, podczas gdy w wodach silnie zasadowych może osiągać setki $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ (Macioszczyk, 1987).

Na problem zaniku oczek zwracali też uwagę Choiński i Ptak (2017), wskazując, że brak alimentacji przez rzeki powoduje w okresach długich niedoborów opadów (najczęściej latem), przy jednoczesnym największym w tym okresie parowaniu, znaczne straty w bilansie wodnym oczek. Autorzy zauważali, że nawet niewielkie wahania poziomu wody mogą stanowić o drastycznym zmniejszeniu powierzchni oczek, a nawet o okresowym ich zaniku – jak miało to miejsce w przypadku najmniejszego zbiornika.

Warunki pogodowe w okresie pomiarowym miały duży wpływ na obecność wody w oczkach, a także na ich późniejszy zanik. Bardzo wilgotny rok 2017, poprzedzający rozpoczęcie badań, zapewnił obecność wody we wszystkich pięciu zagłębieniach bezodpływowych ewapotranspiracyjnych w maju 2018 r., co umożliwiło pobranie pięciu próbek do badań laboratoryjnych (tab. 1). Jednak w późniejszych okresach, wzrastające temperatury powietrza wzmagające parowanie oraz mniejsze sumy opadów, zwłaszcza w suchych latach 2018, 2019 i 2022, doprowadziły do zaniku oczek. Z tego powodu w terminach, w których prowadzono kartowania hydrochemiczne nie udało się pobrać próbek wody ze wszystkich badanych oczek. Najkorzystniejsza sytuacja miała miejsce w przypadku największego zbiornika nr 1, z którego próbki pobrano we wszystkich okresach pomiarowych,

z wyjątkiem lutego 2021 r., kiedy to zbiornik był całkowicie zlodzony. Z oczka nr 3 próbki pobrano jeszcze siedmiokrotnie, a z oczka nr 4 czterokrotnie. Najgorsza sytuacja dotyczyła pozostałych dwóch zagłębień. Z oczka nr 7 próbkę pobrano jedynie w sierpniu 2020 r., a w obniżeniu nr 7, po maju 2018 r., doszło do zaniku wody i w tym przypadku nie pobrano już żadnych próbek.

Choiński i Ptak (2017) uważają, że oczka położone w rezerwacie „Meteoryt Morasko” zasilane są bezpośrednio wodami opadowymi lub wodami podziemnymi. Jest to słuszne założenie, które można uszczegółowić na podstawie przeprowadzonych badań hydrochemicznych. W dorzeczu Parsęty, na podstawie badań hydrochemicznych z lat 2005-2010, wykorzystując zjonizowaną krzemionkę (SiO_2) jako wskaźnik, wyróżniono trzy rodzaje zasilania: gruntowo-opadowy, opadowo-gruntowy oraz opadowy (Major, 2012). Wyniki badań z dorzecza Parsęty znakomicie korespondują z wartościami stężeń zjonizowanej krzemionki w wodach oczek zlokalizowanych w rezerwacie „Meteoryt Morasko”. W tym przypadku również możemy mówić o trzech wyżej wymienionych rodzajach zasilania.

Do typu **gruntowo-opadowego** należy zaliczyć oczka nr 1 i 7, które charakteryzują się podwyższonymi stężeniami SiO_2 w wodach powierzchniowych w porównaniu do innych typów oczek, zbliżonymi wartościami stężeń krzemionki do wód podziemnych jak również szerokim zakresem zmienności SiO_2 (tab. 2, ryc. 7). Charakter **opadowo-gruntowy** przejawiają oczka o numerach porządkowych 3 i 4, gdzie zasilanie opadowe przeważało nad gruntowym, a przejawem tego były nieco niższe wartości stężeń zjonizowanej krzemion-

Tabela 1. Występowanie wody w zagłębieniach bezodpływowych ewapotranspiracyjnych w terminach karto-

wań hydrochemicznych oczek zlokalizowanych w rezerwacie „Meteoryt Morasko”
The occurrence of water in closed evapotranspiration basins during the hydrochemical survey dates of kettle ponds located in the “Meteoryt Morasko” reserve

Nr oczka	05.2018	08.2018	11.2018	02.2019	05.2019	08.2019	11.2019	02.2020	05.2020	08.2020	11.2020	02.2021	05.2022	08.2021	11.2021	02.2022	05.2022	08.2022	11.2022
1																			
3																			
4																			
5																			
7																			



woda

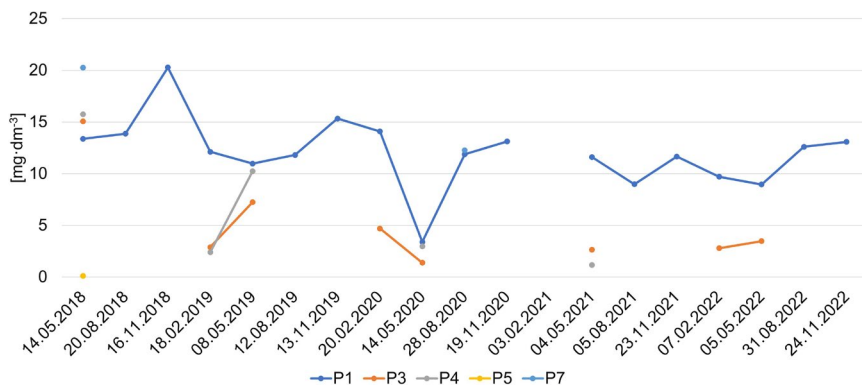


brak wody

Tabela 2. Zakresy wartości SiO_2 [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$] w wodach powierzchniowych badanych zagłębieniach bezodpływowych ewapotranspiracyjnych w rezerwacie „Meteoryt Morasko”

Ranges of SiO_2 [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$] values in surface waters of investigated closed evapotranspiration basins in the “Meteoryt Morasko” reserve

	Nr oczka				
	1	3	4	5	7
Minimum	3,39	1,37	1,16	0,11	12,26
Średnia	12,04	5,02	6,50	0,11	16,25
Maksimum	20,27	15,05	15,74	0,11	20,24



Ryc. 7. Zmienność czasowa SiO_2 w badanych oczkach w rezerwacie „Meteoryt Morasko”
Temporal variability of SiO_2 in the investigated kettle ponds in the “Meteoryt Morasko” reserve

ki w wodach powierzchniowych. Ponadto zaobserwowano zbliżone stężenia w różnych porach roku, także po okresach intensywnej opadów atmosferycznych oraz mniejsze zakresy zmienności SiO_2 . Najwyższe wartości SiO_2 w tych oczkach wystąpiły tylko w maju 2018 r., podczas pierwszego kartowania, kiedy woda wypełniała wszystkie badane zagłębienia (tab. 2, ryc. 7). Z kolei przedstawicielem trzeciego typu zasilania (**opadowego**) jest oczko nr 5, z którego próbkę wody pobrano tylko w maju 2018 r., kiedy to odnotowano bardzo niskie stężenie SiO_2 (tab. 2, ryc. 7).

Podsumowanie

Obecność pozaziemskiego materiału metalicznego oraz morfologiczne skutki jego upadku sprawiły, że rezerwat Meteoryt Morasko jest jednym z zaledwie kilkunastu takich udokumentowanych miejsc na Ziemi (Szczeniński i Muszyński, 2020). W latach 2018–2022 prowadzono w rezerwacie badania hydrochemiczne oczek zlokalizowanych w zagłębieniach meteorytowych. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że warunki meteorologiczne miały duży wpływ na funkcjonowanie oczek. Kształtowały one skład chemiczny wód powierzchniowych, decydowały o typie zasilania oczek, a zmniejszające się sumy opadów atmosferycznych i zwiększające się wartości temperatury powietrza oraz parowania miały decydujący wpływ na okresowy zanik oczek. Podobne wnioski zostały przedstawione przez m.in. Korytowskiego et al. (2023) na podstawie badań śródleśnego oczka bezodpływowego w zlewni Proсны (środkowa Polska).

Wody badanych zbiorników charakteryzowały się odczynem normalnym lub lekko podwyższonym, a przewodność elektrolityczna właściwa wykazywała duże zróżnicowanie przestrzenne. Dominującymi składnikami chemicznymi były: wapń, wodorowęglany oraz siarczany, które są produktami wietrzenia chemicznego i decydowały o typach hydrogeochemicznych wód. Pozostałe składniki chemiczne w badanych zagłębieniach charakteryzowały się dużą zmiennością czasową.

Wykorzystując zjonizowaną krzemionkę (SiO_2) jako wskaźnik zasilania oczek, wyróżniono w rezerwacie „Meteoryt Morasko” trzy grupy zagłębień różniących się rodzajem

zasilania: gruntowo-opadowym, opadowo-gruntowym oraz opadowym. Do typu **gruntowo-opadowego** zaliczono oczka nr 1 i 7, charakter **opadowo-gruntowy** przejawiały zbiorniki nr 3 i 4, natomiast oczko nr 5 reprezentowało typ **opadowy**.

Podobne wyniki dotyczące stężeń SiO_2 uzyskano w badaniach zagłębień bezodpływowych w zlewni górnej Parsęty w latach hydrologicznych 1999-2001 (Major, 2009) oraz w dorzeczu Parsęty w latach hydrologicznych 2005-2010 (Major, 2012).

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniem własnym Autorów artykułu.

Piśmiennictwo

- Choiński, A. & Ptak, M. (2017). Batymetria jezior meteorytowych w rezerwacie „Meteoryt Morasko”. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Meteorytowego*, 8, 23-29.
- Choiński, A., Muszyński, A., Ptak, M. & Słowik, M. (2019). Reconstruction of the primary bottom of a unique crater lake in the “Meteoryt Morasko Reserve” (Poland). *Bull. Geogr. Phys. Geogr. Series*, 17, 5-16. <https://doi.org/10.2478/bgeo-2019-0010>
- Dojlido, J.R. (1995). *Chemia wód powierzchniowych*. Białystok: Wyd. Ekonomia i Środowisko.
- Drwal, J. (1975). Zagadnienia bezodpływowości na obszarach młodoglacjalnych. *Zesz. Nauk. Wydz. Biol. i Nauk o Ziemi, Uniw. Gdański, Geografia* 3, 7-26.
- Drwal, J. & Hrynyszak, E. (2003). Obieg wody w wybranych geoekosystemach Pomorza Zachodniego. W: A. Kostrzewski, & J. Szpikowski (red.), *Funkcjonowanie geoekosystemów zlewni rzecznych, Obieg wody – uwarunkowania i skutki w środowisku przyrodniczym*, t. 3 (127-137). Poznań: Wydawnictwa UAM.
- Hutchinson, G.E. (1957). *A treatise on limnology. Volume 1. Geography, physics and chemistry*. New York, London: Wiley, Chapman & Hall.
- Jansen, W., Block, A. & Knaack, J. (1988). Kwaśne deszcze, Historia, powstawanie, skutki. *Aura*, 4, 18-19.
- Kaczorowska, Z. (1962). Opady w Polsce w przekroju wieloletnim. *Prace Geogr. IG PAN*, 33, 1-102.
- Kejna, M. (2021). Programy pomiarowe Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego: Program A1 – Meteorologia. W: A. Kostrzewski, M. Majewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Organizacja, system pomiarowy, metody badań. Wytyczne do realizacji* (s. 72-91). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska, Wydawnictwo Naukowe Bogucki.
- Korytowski, M., Stasiak, R. & Fiedler, M. (2023). Zmiany składników bilansu wodnego śródleśnych małych zbiorników wodnych w zlewni Proсны (środkowa Polska). *Przegląd Geograficzny*, 95, 2, 187-210.
- Lorenc, H. (1998). Ocena stopnia realizacji programu “obserwacje meteorologiczne i badania klimatyczne w systemie zintegrowanego monitoringu środowiska” oraz synteza uzyskanych wyników badań za okres 1994-1997. W: A. Kostrzewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geoekosystemów Polski* (s. 113-119). Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Macioszczyk, A. (1987). *Hydrogeochemia*. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- Major, M. (2009). *Charakter i funkcjonowanie zagłębień bezodpływowych w krajobrazie strefy młodoglacjalnej (Pomorze Zachodnie, górna Parsęta)*. Wyd. PTPN, Poznań.

- Major, M. (2010). Możliwości zastosowania teorii funkcjonowania geoekosystemu do badań obszarów bezodpływowych. *Przegląd Geograficzny*, 82, 1, 103-113.
- Major, M. (2012). *Funkcjonowanie zagłębień bezodpływowych w zróżnicowanych warunkach morfologicznych (dorzecze Parsęty, Pomorze Zachodnie)*. Poznań: Studia i Prace z Geografii i Geologii 27, Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Major, M., Chudzińska, M. & Majewski, M. (2022). Wielkość dostawy wybranych zanieczyszczeń atmosferycznych i ich wpływ na jakość wód w zurbanizowanej zlewni Różanego Strumienia w Poznaniu w latach hydrologicznych 2016-2020. *Przegląd Geograficzny*, 94(4), 415-436. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2022.4.1>
- Pokrzywnicki, J. (1964). I. Meteoryty Polski. II. Katalog meteorytów w zbiorach polskich. *Stud. Geol. Polon.*, 15, 9-140.
- Richling, A., Solon, J., Macias, A., Balon, J., Borzyszkowski, J. & Kistowski, M. (red.). (2021). *Regionalna geografia fizyczna Polski*. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Rosa, B. & Kozarski, S. (1980). *Przeglądowa mapa geomorfologiczna Polski 1:500 000, arkusz Poznań*. Warszawa: Instytut Geografii PAN.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 czerwca 2021 r. 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, 2021 (Dz.U. 2021, poz. 1475).
- Stankowski, W. (2001). The geology and morphology of the natural reserve „Meteoryt Morasko”. *Planetary and Space Science*, 49(7), 749-753. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(01\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(01)00011-3)
- Stankowski, W. (2008). *Meteoryt Morasko. Osobliwość obszaru Poznania*. Poznań: Wyd. Nauk. UAM.
- Stankowski, W. & Muszyński, A. (1999). *Meteorite craters from Morasko. The dating of Quaternary marine and land sediments*. W: Abstract of papers, posters and explanation to field trip, June 21-25. Poznań: Adam Mickiewicz University.
- Stankowski, W. & Muszyński, A. (2008). Time of fall and some properties of the Morasko meteorite. *Materials Science – Poland*, 26, 4, 887-902.
- Szczuciński, W., & Muszyński, A. (2020). Meteoryty, krater uderzeniowe i inne ślady kosmicznej katastrofy w rejonie Moraska pod Poznaniem. *Przegląd Geologiczny*, 68(8), 637-644.
- Szpikowski, J., Michalska, G. & Kruszyk, R. (1998). Raport Stacji Bazowej ZMŚP UAM w Storkowie za lata hydrologiczne 1994-1997. W: A. Kostrzewski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stan geoekosystemów Polski w latach 1994-1997*. Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Świdnicki, K., Basińska, A.M., Pronin, M. & Kuczyńska-Kippen, N. (2016). Meteorite crater ponds as source of high zooplankton biodiversity. *Biologia*, 71, 1361-1368. <https://doi.org/10.1515/biolog-2016-0162>
- Tobolski, K. (1976). Palynological investigations of bottom sediments in closed depressions. W: H. Hurnik (red.), *Meteorite Morasko and region of its fall* (s. 21-26), *seria Astronomia*, 2. Poznań: Uniwersytet im. Adama Mickiewicza.
- Włodarski, W., Papis, J. & Szczuciński, W. (2017). Morphology of the Morasko crater field (western Poland): Influences of pre-impact topography, meteoroid impact processes, and post-impact alterations. *Geomorphology*, 295, 586-597. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.025>

Summary

The basic form of closed landform form is a terrain depression. Sometimes, this type of depression is filled with water, forming a reservoir – a pond or a wetland. Each depression has its own closed catchment. The clustering of adjacent closed catchments forms a surface non-draining area, the extent of which is determined by the watershed of peripheral catchments (Drwal, 1975; Major, 2009, 2010, 2012). Among the 76 genetic types of lake basins identified worldwide (Hutchinson, 1957), meteorite lakes (kettle ponds) represent one such type. The specific geographical environments of closed catchments, particularly their geological structure, determine the existence of two types of basins based on water circulation mechanism: closed evapotranspiration basins and closed absorptive basins. Applying this concept on a smaller scale, from a hydrological perspective, we can distinguish precisely two types of closed depressions: evapotranspirational and absorptive.

In the nature reserve established in 1976 near the “Morasko Mountain” there are a total of seven meteorite craters. Five of them contain permanent or periodic kettle ponds, indicating an evapotranspirational character, while the remaining two are absorptive. Nearly half of its area lies within the Różany Strumień catchment (Fig. 1, Fig. 2), located in the northern part of Poznań, covering approximately 7.7 km².

Hydrochemical studies of the kettle ponds were conducted in this unique location during the hydrological years 2018–2022, with the exception of the first year when, for administrative reasons, the surveys began only in May. The amount of water filling the kettle ponds varied throughout the study period, and the ponds often disappeared completely.

The primary aim of the study was to identify prevailing weather conditions and determine their influence on the chemical composition and water supply of the kettle ponds in the meteorite depressions located in the “Meteoryt Morasko” reserve.

Based on the results, it was found that meteorological conditions (Fig. 3) have a significant impact on the functioning of kettle ponds in the studied area. These conditions influence the chemical composition of surface waters (Fig. 4), determine the type of pond supply, and decreasing amounts of precipitation along with increasing air temperature and evaporation rates, play a decisive role in the periodic disappearance of the kettle ponds (Table 1). Similar conclusions were reached by Korytowski et al. (2023) in a study of a mid-forest kettle pond in the Proсна catchment (central Poland).

The waters of the examined kettle ponds were characterized by a normal or slightly elevated pH levels, while specific electrolytic conductivity values showed significant spatial variability. The dominant components were calcium, bicarbonates, and sulfates, which are products of chemical weathering and determined the hydrogeochemical types of water (Fig. 5). Other chemical components in the examined depressions exhibited significant temporal variability (Fig. 6).

Using ionized silica (SiO₂) as an indicator of water supply, three groups of depressions with distinct water supply types were identified in the “Meteoryt Morasko” reserve: ground-rain, rain-ground, and rain. Depressions 1 and 7 were classified as ground-rain, characterized by elevated SiO₂ concentrations in surface, similar silica concentration to groundwater, and a wide range of SiO₂ variability. Kettle ponds 3 and 4 exhibited rain-ground characteristics, where precipitation supply predominated over groundwater, as indicated by slightly lower ionised silica concentrations in surface waters. Similar con-

centrations were observed across individual seasons, even after periods of intense rainfall, as well as smaller ranges of SiO_2 variability. In contrast, kettle ponds 5, representing the third type of supply (rain), was sampled only in May 2018, recording very low concentrations of SiO_2 at that time (Table 2, Fig. 7).

Similar SiO_2 concentrations results were obtained in studies of non-draining depressions in the upper Parsęta watershed during the hydrological years 1999-2001 (Major, 2009) and in the Parsęta River basin during the hydrological years 2005-2010 (Major, 2012).