

AGNIESZKA CHECHELSKA

<https://orcid.org/0009-0002-0955-2437>

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Szkoła Doktorska PK

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Polska

a.chechelska@doktorant.pk.edu.pl

Zanieczyszczenie świetlne jako potencjalny czynnik eutrofizacji – przykład miejskich zbiorników w Krakowie

Light Pollution as a Potential Factor in Eutrophication –
the Example of Urban Water Bodies in Kraków

Abstract: Light pollution affects multiple components of the environment, yet its impact on aquatic ecosystems remains poorly understood. Studies suggest that artificial light at night can disrupt the vertical migration of zooplankton and initiate phytoplankton photosynthesis at inappropriate times, promoting eutrophication and water quality deterioration. To verify this hypothesis, four water reservoirs in Kraków were monitored from April to September 2024. Chlorophyll *a* concentrations were analyzed in relation to the brightness of the night sky, as measured by the Light Pollution Monitoring Laboratory (Cracow University of Technology). Periods when temperature exceeded 10°C were taken into account, and monthly average values were used. In two reservoirs, a strong correlation was found between the level of light pollution and the concentration of chlorophyll *a* ($r = 0.75$ and $r = 0.7$). In the reservoir located in the Dłubnia River basin, which flows through agricultural areas, a low correlation ($r = 0.18$) was found, which may result from intensive nutrient inflow masking the potential impact of light. In contrast, in the reservoir where no correlation was observed ($r = -0.03$), low chlorophyll *a* concentrations were also recorded, which may indicate limited susceptibility to eutrophication. The results indicate the potential impact of light pollution on trophic processes and justify the need for further long-term research in this area.

Keywords: eutrophication; light pollution; aquatic ecosystems

Abstrakt: Zanieczyszczenie świetlne oddziałuje na różne komponenty środowiska, ale jego wpływ na ekosystemy wodne jest wciąż słabo znany. Badania sugerują, że sztuczne światło nocne może zakłócać pionową migrację zooplanktonu oraz inicjować fotosyntezę fitoplanktonu w niewłaściwych porach, co sprzyja eutrofizacji i pogorszeniu jakości wód. W celu weryfikacji tej hipotezy przepro-

wadzano monitoring czterech zbiorników wodnych w Krakowie (w okresie od kwietnia do września 2024 r.). Analizowano stężenie chlorofilu *a* w odniesieniu do jasności nocnego nieba, mierzonej przez Pracownię Monitoringu Zanieczyszczenia Światłnego Politechniki Krakowskiej. Uwzględniono okresy, w których temperatura przekraczała 10°C, a także posłużono się miesięcznymi średnimi wartościami. W dwóch zbiornikach odnotowano silną korelację pomiędzy poziomem zanieczyszczenia świetlnego a stężeniem chlorofilu *a* ($r = 0,75$ i $r = 0,7$). W zbiorniku zlokalizowanym w zlewni rzeki Dłubni, przepływającej przez tereny rolnicze, stwierdzono niską korelację ($r = 0,18$), co może wynikać z intensywnego dopływu biogenów, maskującego potencjalny wpływ światła. Natomiast w zbiorniku, w którym nie zaobserwowano korelacji ($r = -0,03$), odnotowano jednocześnie niskie stężenia chlorofilu *a*, co może wskazywać na jego ograniczoną podatność na proces eutrofizacji. Wyniki wskazują na potencjalny wpływ zanieczyszczenia świetlnego na procesy troficzne i uzasadniają potrzebę dalszych, długoterminowych badań w tym obszarze.

Słowa kluczowe: eutrofizacja; zanieczyszczenie świetlne; ekosystemy wodne

WSTĘP

Obecnie ekosystemy wodne narażone są na szereg presji antropogenicznych. Do najważniejszych z nich należą zmiany wzorców opadów i wzrost temperatury, wynikające ze zmian klimatu, a także rozwój hodowli zwierząt gospodarskich oraz turystyki, prowadzący do zwiększonego zużycia wody (Ebner i in., 2022). Presje te mogą prowadzić do zmian warunków troficznych zbiorników wodnych oraz do wzrostu stężenia azotanów, co w konsekwencji może przyspieszać proces eutrofizacji. Zjawisko to stanowi obecnie jeden z najpoważniejszych problemów środowiskowych związanych z jakością wód (Balcerzak, 2009). Eutrofizacja niesie za sobą szereg negatywnych konsekwencji, takich jak: pogorszenie jakości wody spowodowane nadmiernym rozwojem fitoplanktonu i zakwitami glonów; dominacja cyjanobakterii zdolnych do wytwarzania toksyn szkodliwych dla organizmów; obniżenie zawartości tlenu w wodzie (anoksja); pojawianie się nowych chorób (Akinawo, 2023).

Jedną z presji antropogenicznych, której wpływ dopiero od niedawna uwzględnia się w badaniach środowiskowych, jest zanieczyszczenie światłem. Wpływ sztucznego oświetlenia nocnego (ALAN) na zooplankton został wykazany przez Moore i in. (2000) już w 2000 r. Oddziaływanie to dotyczyło przede wszystkim pionowej migracji zooplanktonu. W warunkach naturalnych organizmy te przebywają w ciągu dnia w głębszych warstwach wody, prawdopodobnie unikając drapieżników, natomiast nocą przemieszczają się ku powierzchni, gdzie żerują na fitoplanktonie (Häfler i in., 2017). Według Moore i in. (2000) pionowa migracja zooplanktonu pod wpływem zanieczyszczenia świetlnego uległa ograniczeniu zarówno pod względem amplitudy (osobniki *Daphnia* przebywały średnio o około 2 m głębiej), jak i liczebności (o 10–20% mniej osobników). Zjawisko to, występujące na większą skalę, może

prowadzić do nadmiernego wzrostu fitoplanktonu, którego naturalny konsument – zooplankton – jest ograniczany przez zanieczyszczenie światłem.

W innym eksperymencie Ludvigsen i in. (2018) wykorzystali autonomiczny pojazd poruszający się po powierzchni wody do oceny głębokości, na jaką ALAN oddziałuje na środowisko wodne. Wykazano, że wpływ ten sięgał do głębokości 80 m. Co więcej, po wyłączeniu źródła światła zooplankton szybko powrócił do swojego naturalnego wzorca migracji, co sugeruje, że zmiany wywołane przez zanieczyszczenie światłem mają charakter odwracalny.

Kolejnym badaniem dotyczącym wpływu ALAN na fitoplankton była praca Diamantopoulou i in. (2021), której celem była ocena oddziaływania różnych długości fal światła na mikroalgę *Tetraselmis suecica*. W eksperymencie zastosowano cztery warunki ekspozycji: białe światło ALAN, zielone światło ALAN, czerwone światło ALAN oraz całkowitą ciemność. Wyniki wykazały, że najbardziej oddziaływał zielony ALAN, gdyż pod jego wpływem tempo wzrostu zwiększyło się o 5%, liczba komórek wzrosła o 67%, a zawartość chlorofilu a zwiększyła się o 49% w porównaniu z próbą kontrolną, którą stanowiła ciemność.

Zbadano również wpływ zanieczyszczenia świetlnego na fotofizjologię cyjanobakterii *Microcystis aeruginosa* (Poulin i in., 2014). Wyniki wykazały wzrost stężenia chlorofilu wewnątrzkomórkowego, a także wpływ na inne reakcje fotofizjologiczne, takie jak maksymalna wydajność kwantowa separacji ładunków oraz absorpcja fotosystemu II. Zmiany te sugerują, że zanieczyszczenie światłem może zwiększać produkcję białek wiążących chlorofil, wpływając tym samym na reakcje fotofizjologiczne organizmu.

Dotychczasowe badania koncentrowały się głównie na ekosystemach morskich i oceanicznych (Ludvigsen i in., 2018) lub prowadzone były w warunkach laboratoryjnych (Diamantopoulou i in., 2021; Poulin i in., 2014). Istnieje jednak potrzeba prowadzenia badań w środowisku miejskim, gdzie zbiorniki wodne są szczególnie narażone na zanieczyszczenie świetlne, a zasoby wodne mają istotne znaczenie. Dlatego w ramach opisanego w niniejszym artykule eksperymentu podjęto próbę oceny wpływu sztucznego oświetlenia nocnego na migrację zooplanktonu w kontekście wzrostu eutrofizacji oraz pogorszenia jakości wód w czterech wybranych zbiornikach wodnych zlokalizowanych w Krakowie.

MATERIAŁY I METODY

Próbki wody pobierano raz w tygodniu w okresie wegetacyjnym (od kwietnia do września) w 2024 r., przed świtem, w godzinach 03:50–06:25, w celu wyeliminowania wpływu światła słonecznego. Pobór prowadzono w czterech zbior-

nikach wodnych zlokalizowanych w Krakowie: Stawie Płaszowskim, Zalewie Nowohuckim, Stawie Dąbskim oraz Oczku w Parku Lotników. Próbkę pobierano z przypowierzchniowej warstwy wody (około 20 cm od lustra wody). Lokalizacja punktów poboru była uzależniona od dostępności linii brzegowej. We wszystkich zbiornikach, z wyjątkiem Zalewu Nowohuckiego, punkty poboru były oświetlane wyłącznie przez łunę miejską. W przypadku Zalewu Nowohuckiego punkt poboru znajdował się w odległości około 6 m od latarni.

Wszystkie badane zbiorniki znajdują się w wschodniej części Krakowa i mają pochodzenie antropogeniczne (zob. ryc. 1; zob. także: Bąk i in., 2017; Zachariasz i Porada, 2019). Staw Płaszowski powstał w miejscu dawnego wydobywania żwiru i gliny i zajmuje powierzchnię 9 ha (Zachariasz i Porada, 2019). Zalew Nowohucki, o powierzchni około 6,6 ha, został utworzony w celach rekreacyjnych (Mundała i in., 2016). Staw Dąbski powstał w miejscu dawnego wydobywania gliny i ma powierzchnię 2,1 ha (Eggenbauer i in., 2016). Oczko w Parku Lotników jest stosunkowo nowym elementem infrastruktury miejskiej Krakowa i również zostało utworzone w celach rekreacyjnych (Referat Mediów Miejskich, 2021).



Ryc. 1. Położenie obszaru badań (opracowanie własne na podstawie danych OpenStreetMap)

Fig. 1. Location of the study area (own elaboration based on data from OpenStreetMap)

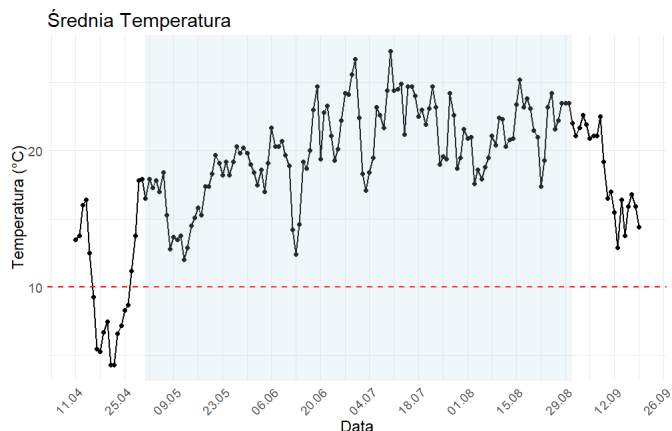
Pobrane próbki transportowano do laboratorium w termosach. Analizy laboratoryjne rozpoczynano zwykle w ciągu 2–3 godzin od momentu poboru próbek. W warunkach laboratoryjnych oznaczano zawartość chlorofilu a metodą fluorescencji z wykorzystaniem sondy Moldanke bbe Algae Torch. Parametr ten stanowi powszechnie stosowany wskaźnik eutrofizacji (Boyer i in., 2009). Za pomocą tej samej sondy oznaczano również stężenie cyjanobakterii oraz mętność wody. Każdy pomiar wykonywano trzykrotnie, a następnie obliczano średnią arytmetyczną. Z dalszych analiz wykluczono dane, dla których wyniki poszczególnych powtórzeń wykazywały znaczne rozbieżności, związane głównie z obecnością roślinności wodnej lub skupisk glonów w próbkach.

Dane dotyczące jasności nocnego nieba pozyskano z Pracowni Monitoringu Zanieczyszczenia Światelnego Politechniki Krakowskiej. W badaniu wykorzystano dane pomiarowe z miernika Sky Quality Meter SQM-LU-DL-R1 (Unihedron, Kanada), pochodzące ze stacji pomiarowej nr 6 zlokalizowanej w Ogrodzie Botanicznym w Krakowie. Opracowanie danych polegało na obliczeniu średnich wartości z rejestracji wykonywanych każdej nocy w godzinach 23:00–01:00, odpowiadających okresowi najciemniejszych warunków nocnych.

Dane meteorologiczne pochodziły z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego i zostały pozyskane ze stacji meteorologicznej Kraków-Observatorium, zlokalizowanej w Ogrodzie Botanicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego przy ul. Kopernika 27 w Krakowie.

Analizy statystyczne przeprowadzono przy użyciu oprogramowania R z interfejsem RStudio. Normalność rozkładu analizowanych danych oceniono za pomocą testu Shapiro–Wilka, natomiast do oceny zależności pomiędzy zmiennymi zastosowano współczynnik korelacji Pearsona.

Ze względu na fakt, że podczas zakwitów fitoplanktonu zawartość chlorofilu a może wzrastać wielokrotnie, do analiz wykorzystano średnie wartości miesięczne. Ponadto, mając na uwadze zależność procesu eutrofizacji od warunków pogodowych, takich jak opady, temperatura czy aktywność wiatru (Ali i in., 2025), uwzględniono jedynie okresy charakteryzujące się względnie stałą temperaturą, przekraczającą 10°C (zob. ryc. 2). W związku z tym analizą objęto miesiące od maja do sierpnia.



Ryc. 2. Średnia temperatura w analizowanym okresie z zaznaczeniem przedziału czasowego uwzględnionego w analizie (opracowanie własne)

Fig. 2. Mean temperature over the analyzed period, with the time interval considered in the analysis indicated (own elaboration)

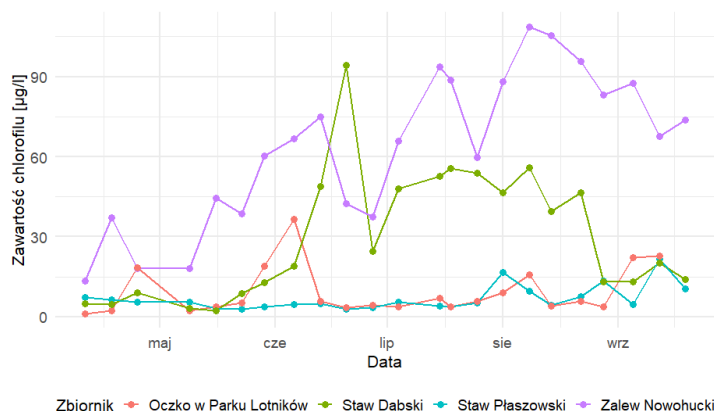
Wybrana metoda badawcza wiąże się z pewnymi ograniczeniami. Jednym z nich jest wykorzystanie jasności nocnego nieba jako miary zanieczyszczenia świetlnego na danym obszarze. Parametr ten stanowi wypadkową dwóch czynników: naturalnej poświaty księżyca oraz jasności nieba wynikającej z działalności antropogenicznej. Na potrzeby niniejszej pracy wykorzystano pomiary pochodzące z jednego punktu, które odzwierciedlają warunki związane z łuną świetlną miasta, ale mogą nie oddawać rzeczywistych warunków panujących przy poszczególnych zbiornikach wodnych. W przyszłości wskazane byłoby uzupełnienie badań o pomiary SQM wykonywane bezpośrednio w miejscu i czasie poboru próbek wody.

Dodatkowo chlorofil a, choć jest powszechnie uznawanym wskaźnikiem eutrofizacji, nie stanowi jej jedynego wyznacznika. Aby ocenić potencjalny wpływ oświetlenia nocnego na proces eutrofizacji, należałoby uwzględnić również takie parametry jak: stężenie tlenu rozpuszczonego, temperatura oraz zawartość azotu i fosforu. Pozwoliłoby to lepiej ocenić zależności między stężeniem chlorofilu a oraz badanymi parametrami środowiskowymi.

WYNIKI

Najwyższe zawartości chlorofilu a odnotowano w próbkach pobranych z Zalewu Nowohuckiego (zob. ryc. 3). Zaobserwowano stopniowy wzrost jego wartości od kwietnia do sierpnia, a następnie niewielki spadek we wrześniu, przy czym wartości te pozostawały najwyższe spośród badanych zbiorników (około 60–105 µg/l). W prób-

kach ze Stawu Dąbskiego zawartość chlorofilu a wzrastała od czerwca, osiągając maksimum w połowie miesiąca (około 90 $\mu\text{g/l}$). Następnie wartości utrzymywały się na zbliżonym poziomie do połowy sierpnia. Zawartości chlorofilu a w próbkach z Oczka w Parku Lotników były stosunkowo niskie (około 5–10 $\mu\text{g/l}$), ale odnotowano kilka epizodów wzrostu: na początku czerwca (około 35 $\mu\text{g/l}$), sierpnia (około 15 $\mu\text{g/l}$) oraz września (około 25 $\mu\text{g/l}$). Najniższe wartości chlorofilu a stwierdzono w Stawie Płazowskim, ponieważ przez większość okresu badań utrzymywały się one na poziomie około 5 $\mu\text{g/l}$, z nieznacznym wzrostem na początku września (około 20 $\mu\text{g/l}$).



Ryc. 3. Zawartość chlorofilu a w czterech analizowanych zbiornikach w badanym okresie (opracowanie własne)

Fig. 3. Chlorophyll a content in the four studied water bodies during the analyzed period (own elaboration)

Uwzględniając średnie wartości mierzonych parametrów, najwyższe zawartości chlorofilu a, cyjanobakterii oraz najwyższą mętność wody odnotowano w Zalewie Nowohuckim, natomiast najniższe wartości tych parametrów stwierdzono w Stawie Płazowskim. Najwyższy średni stosunek zawartości cyjanobakterii do chlorofilu a wystąpił w Oczku w Parku Lotników (zob. tab. 1).

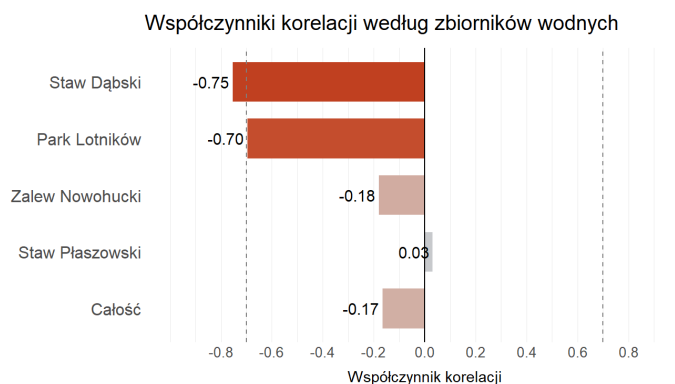
Tab. 1. Średnie zawartości chlorofilu a i cyjanobakterii, wartość mętności oraz średni stosunek cyjanobakterii do chlorofilu a w czterech analizowanych zbiornikach w badanym okresie (opracowanie własne)

Tab. 1. Mean chlorophyll a and cyanobacteria contents, turbidity, and the average cyanobacteria-to-chlorophyll a ratio in the four studied water bodies during the analyzed period (own elaboration)

	Staw Płazowski	Zalew Nowohucki	Oczko w Parku Lotników	Staw Dąbski
Chlorofil a [$\mu\text{g/l}$]	6,8	63,9	9,3	30,0
Cyjanobakterie [$\mu\text{g/l}$]	1,5	12,7	1,7	1,7
Średni stosunek cyjanobakterii do chlorofilu a	0,21	0,17	0,27	0,06
Mętność [FTU]	3,4	11,5	2,8	3,9

Wyniki korelacji pomiędzy średnią miesięczną jasnością nocnego nieba a średnią miesięczną zawartością chlorofilu a oraz pomiędzy średnią miesięczną jasnością nocnego nieba a średnią miesięczną zawartością cyjanobakterii w wodzie przyjmowały wartości ujemne, co wynika z zastosowanej jednostki jasności nocnego nieba (mag/arcsec^2). Jest to jednostka o skali logarytmicznej i odwrotnej, w której gwiazda o jasności 0 magnitudo jest 100 razy jaśniejsza od gwiazdy o jasności 5 magnitudo (Ścieżor, 2013). W związku z tym ujemne wartości współczynnika korelacji wskazują, że większemu zanieczyszczeniu światłem towarzyszyła wyższa zawartość chlorofilu a w wodzie. Im bliższa -1 była wartość współczynnika korelacji, tym silniejsza była zależność pomiędzy analizowanymi zmiennymi.

Wyniki korelacji pomiędzy jasnością nocnego nieba a zawartością chlorofilu a były najwyższe w Stawie Dąbskim oraz w Oczku w Parku Lotników – wynosiły odpowiednio $-0,75$ oraz $-0,70$, co wskazuje na silną zależność. W Zalewie Nowohuckim korelacja ta była niska ($-0,18$), natomiast w Stawie Płaszowskim praktycznie nie występowała ($0,03$; zob. ryc. 4).

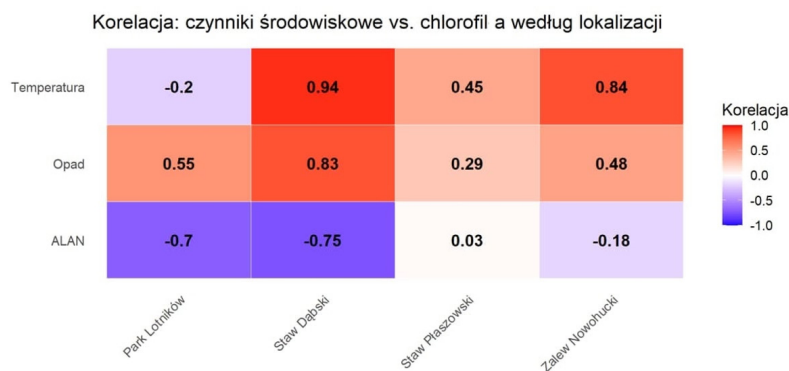


Ryc. 4. Współczynnik korelacji jasności nocnego nieba z zawartością chlorofilu a, przedstawiony dla poszczególnych zbiorników wodnych (opracowanie własne)

Fig. 4. Correlation coefficient between night sky brightness and chlorophyll a content, shown for each water body (own elaboration)

Porównując korelację jasności nocnego nieba z zawartością chlorofilu a w wodzie z korelacjami pomiędzy zawartością chlorofilu a oraz temperaturą powietrza i sumą opadów atmosferycznych, stwierdzono, że temperatura w większości przypadków wykazywała najsilniejszą zależność i tym samym najwyższe powiązanie z zawartością chlorofilu a. W przypadku Stawu Dąbskiego wszystkie analizowane współczynniki korelacji przyjmowały wysokie wartości i wynosiły $-0,75$ dla jasności nocnego nieba, $0,83$ dla opadu oraz $0,94$ dla temperatury. Natomiast w Stawie Płaszowskim wartości korelacji były wyraźnie niższe i wynosiły odpowiednio $0,03$, $0,29$ oraz $0,45$. Dla

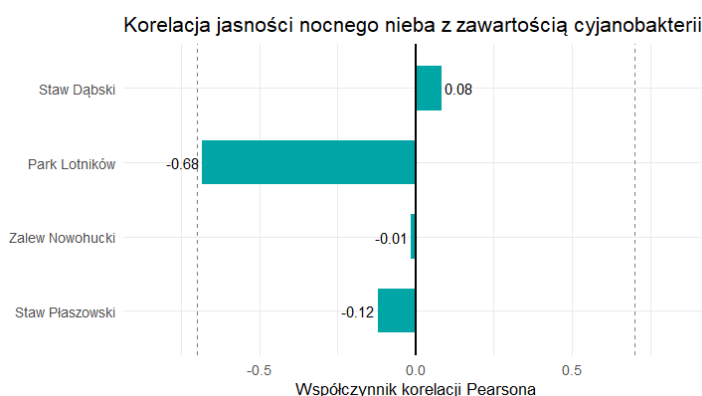
Zalewu Nowohuckiego najwyższą wartość korelacji odnotowano dla temperatury (0,84), co wskazuje, że proces eutrofizacji w tym zbiorniku jest prawdopodobnie silnie zależny od tego czynnika. Odmienny charakter wykazało Oczko w Parku Lotników, dla którego najwyższą korelację stwierdzono w odniesieniu do jasności nocnego nieba, przy jednocześnie ujemnej korelacji z temperaturą (zob. ryc. 5).



Ryc. 5. Korelacje między czynnikami środowiskowymi a zawartością chlorofilu a w poszczególnych zbiornikach wodnych (opracowanie własne)

Fig. 5. Correlations between environmental factors and chlorophyll a content in the individual water bodies (own elaboration)

Korelacja pomiędzy jasnością nocnego nieba a zawartością cyjanobakterii była w większości zbiorników niska (od $-0,12$ do $0,08$). Wyjątkiem było Oczko w Parku Lotników, gdzie wartość tej korelacji wyniosła $-0,68$, co stanowi wynik porównywalny z korelacją uzyskaną dla zawartości chlorofilu a (zob. ryc. 6).



Ryc. 6. Współczynnik korelacji jasności nocnego nieba z zawartością cyjanobakterii przedstawiony dla poszczególnych zbiorników wodnych (opracowanie własne)

Fig. 6. Correlation coefficient between night sky brightness and cyanobacteria content in the individual water bodies (own elaboration)

DYSKUSJA

Najwyższe wartości korelacji (zob. ryc. 5) pomiędzy jasnością nocnego nieba a zawartością chlorofilu a odnotowano w Oczku w Parku Lotników ($-0,7$) oraz w Stawie Dąbskim ($-0,75$). Ujemne wartości współczynników wynikają z charakterystyki jednostki stosowanej do opisu jasności nocnego nieba (mag/arcsec^2), w której wyższe wartości odpowiadają ciemniejszemu niebu. Oznacza to, że silniejszemu zanieczyszczeniu światłem (jaśniejszemu niebu) towarzyszy wyższa zawartość chlorofilu a. Zbiorniki te znajdują się w niewielkiej odległości od siebie, co może sugerować, że podobne warunki środowiskowe sprzyjają silniejszemu wpływowi jasności nocnego nieba na obserwowane wyniki.

Podobne badanie przeprowadzili Ścieżor i Balcerzak (2015), w którym wykazali silną zależność liniową ($R^2 = 0,97$) między zawartością chlorofilu a w powierzchniowej warstwie wody Zbiornika Dobczyckiego a jasnością nocnego nieba. Dodatkowo badacze stwierdzili, że zawartość chlorofilu a nie była powiązana z innymi parametrami zewnętrznymi, na podstawie czego postawili hipotezę, że jasność nocnego nieba może być istotnym czynnikiem wpływającym na jego zawartość. Uzyskane wyniki w badaniu własnym częściowo różnią się od obserwacji Ścieżora i Balcerzaka (2015), ponieważ zawartość chlorofilu a wykazywała korelację również z innymi czynnikami środowiskowymi, takimi jak opad i temperatura, co sugeruje, że jasność nocnego nieba może stanowić jeden z czynników wpływających na proces eutrofizacji. Dokładniejsze określenie udziału jasności nocnego nieba w tym procesie wymaga jednak przeprowadzenia badań długoterminowych. Należy również uwzględnić wpływ lokalizacji badanych obiektów. Istotną różnicą jest też to, że w naszym przypadku analizie poddane były zbiorniki zlokalizowane na terenie dużego miasta – Krakowa, natomiast w badaniu Ścieżora i Balcerzaka analizowany był Zbiornik Dobczycki, położony około 20 km od centrum Krakowa.

Wysoka korelacja zawartości zarówno chlorofilu a, jak i cyjanobakterii z jasnością nocnego nieba w Oczku w Parku Lotników może być związana z najwyższym spośród badanych zbiorników stosunkiem zawartości cyjanobakterii do chlorofilu a (zob. tab. 1). Wskazuje to na relatywnie większy udział cyjanobakterii w strukturze fitoplanktonu. Jednocześnie jest to zbiornik, w którym pozostałe czynniki środowiskowe, takie jak opady i temperatura, wykazywały najsłabszą korelację z zawartością chlorofilu a. Możliwe zatem, że silna zależność pomiędzy jasnością nocnego nieba a zawartością chlorofilu a jest pośrednio związana z reakcją cyjanobakterii na nocne oświetlenie. Nadmierny wzrost cyjanobakterii wiąże się z negatywnymi konsekwencjami dla całych ekosystemów, takimi jak produkcja toksyn oraz obniżenie bioróżnorodności (Czerwik-Marcinkowska, 2019).

Uzyskane wyniki są zgodne z wcześniejszymi badaniami, według których warunki świetlne mogą wpływać na wzrost i funkcjonowanie cyjanobakterii. Jak podają Poulin i in. (2014), nawet niskie natężenia zanieczyszczenia świetlnego mogą wpływać na fotofizjologię cyjanobakterii. Grubisic i in. (2017) wykazali, że ekspozycja na sztuczne światło nocne prowadziła do zmian w składzie zespołów peryfitonowych, w tym do zmniejszenia udziału cyjanobakterii wiosną. Z kolei Muhetaer i in. (2020) wykazali gatunkowo specyficzne reakcje cyjanobakterii na różne natężenia światła, obejmujące zmiany tempa wzrostu. Ponadto wykazano, że łuna świetlna może zwiększać liczebność fototrofów, w tym cyjanobakterii, nawet $32 (\pm 22)$ razy, a także zmieniać skład i aktywność społeczności bakteryjnych ocenianych na podstawie analiz 16S rRNA na poziomie DNA oraz transkryptów RNA, szczególnie u wolno żyjących cyjanobakterii i bakterii fototroficznych (Fonvielle i in., 2025).

Wartość współczynnika korelacji między zawartością chlorofilu a oraz jasnością nocnego nieba dla Stawu Płaszowskiego była bliska zeru ($-0,03$), co wskazuje na brak zależności pomiędzy analizowanymi zmiennymi. Może to wynikać z relatywnie niskiej zawartości chlorofilu a w tym zbiorniku, której średnia wartość wynosiła $6,8 \mu\text{g/l}$. Interpretację tę potwierdzają również niskie wartości korelacji pomiędzy zawartością chlorofilu a oraz temperaturą i opadami.

Korelacja pomiędzy jasnością nocnego nieba a zawartością chlorofilu a w Zalewie Nowohuckim była również niska ($-0,18$). Może to wynikać z faktu, że zbiornik ten należy do zlewni rzeki Dłubni, w której obserwowano wysoki poziom zanieczyszczeń pochodzenia rolniczego (Synowiec i in., 2007). Może to prowadzić do zwiększonego dopływu biogenów, takich jak azot i fosfor, co sprzyja intensywnemu rozwojowi fitoplanktonu niezależnie od oddziaływania światła nocnego (Zhu i in., 2024). W Zalewie Nowohuckim odnotowano także najwyższe wartości mętności (zob. tab. 1), co może ograniczać przenikanie światła w głąb toni wodnej i w konsekwencji zmniejszać wpływ zanieczyszczenia świetlnego na pionową migrację zooplanktonu. Wysoka korelacja pomiędzy stężeniem chlorofilu a oraz temperaturą wody może wynikać z niewielkiej głębokości tego zbiornika (maksymalnie $2,5 \text{ m}$; zob. Zachariasz i Porada, 2019), sprzyjającej szybkiemu nagrzewaniu się wody.

Należy przy tym uwzględnić, że analiza obejmowała wyłącznie okresy, w których temperatura przekraczała 10°C , co oznacza, że rzeczywisty wpływ jasności nocnego nieba na proces eutrofizacji może być niższy. W analizowanym przedziale czasowym zawartości chlorofilu a osiągały jednak najwyższe wartości, a skutki eutrofizacji były najbardziej wyraźne, co czyni ten okres szczególnie istotnym z punktu widzenia prowadzonych badań.

WNIOSKI

Uzyskane wyniki wskazują na potencjalny wpływ zanieczyszczenia świetlnego na procesy eutrofizacji w wybranych zbiornikach wodnych Krakowa. Ze względu na ograniczony obszar badań oraz stosunkowo niewielką liczbę wykonanych pomiarów konieczne są dalsze, długoterminowe badania, prowadzone w różnych regionach świata charakteryzujących się odmiennym poziomem zanieczyszczenia światłem, w celu potwierdzenia poczynionych obserwacji i oceny rzeczywistego wpływu ALAN na proces eutrofizacji.

Wskazane jest również rozszerzenie zakresu analiz o pomiary stężenia tlenu rozpuszczonego, temperatury oraz zawartości azotu i fosforu. W przyszłości celowe byłoby także prowadzenie pomiarów jasności nocnego nieba bezpośrednio w miejscu i czasie poboru próbek, co mogłoby pomóc w wyjaśnieniu, dlaczego najsilniejsze korelacje zaobserwowano w dwóch zbiornikach położonych w niewielkiej odległości od siebie.

PODZIĘKOWANIA

Autorka składa podziękowania dr. hab. inż. Andrzejowi Bielskiemu, prof. PK (Katedra Wodociągów, Kanalizacji i Monitoringu Środowiska, Politechnika Krakowska) za udostępnienie infrastruktury laboratoryjnej niezbędnej do realizacji badań.

DOSTĘPNOŚĆ DANYCH

Dane dotyczące jasności nocnego nieba są publicznie dostępne na stronie Pracowni Monitoringu Zanieczyszczenia Świetlnego Politechniki Krakowskiej: <https://lightpollution.pk.edu.pl/pomiary.php>

Informacje dotyczące temperatury powietrza oraz sum opadów atmosferycznych pozyskano z publicznie dostępnych zasobów Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej: https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne

Dane dotyczące stężenia chlorofilu a, cyjanobakterii oraz mętności zostały zamieszczone w załączniku.

BIBLIOGRAFIA

- Akinawo, S.O. (2023). Eutrophication: Causes, Consequences, Physical, Chemical and Biological Techniques for Mitigation Strategies. *Environmental Challenges*, 12, artykuł 100733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>
- Ali, I., Neverova-Dziopak, E., Kowalewski, Z. (2025). Assessment of Spatio-Temporal Dynamics of Dal Lake's Trophic State. *Water*, 17(3), artykuł 314. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17030314>
- Balcerzak, W. (2009). *Eutrofizacja wód stojących – prognozowanie i wpływ na technologię uzdatniania wody*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- Bąk, B., Szelać, A., Radwanek-Bąk, B., Szczygalski, W. (2017). Gospodarka złożami kopalni ilastych ceramiki budowlanej w Polsce w ostatnim ćwierćwieczu. *Górnictwo Odkrywkowe*, 58(3), 77–83.
- Boyer, J.N., Kelble, C.R., Ortner, P.B., Rudnick, D.T. (2009). Phytoplankton Bloom Status: Chlorophyll a Biomass as an Indicator of Water Quality Condition in the Southern Estuaries of Florida, USA. *Ecological Indicators*, 9(6), 56–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.11.013>
- Czerwik-Marcinkowska, J. (2019). *Algologia. Praktyczny przewodnik*. PWN.
- Diamantopoulou, C., Christoforou, E., Dominoni, D.M., Kaiserli, E., Czyzewski, J., Mirzai, N., Spatharis, S. (2021). Wavelength-Dependent Effects of Artificial Light at Night on Phytoplankton Growth and Community Structure. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 288(1953), artykuł 20210525. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0525>
- Ebner, M., Schirpke, U., Tappeiner, U. (2022). How Do Anthropogenic Pressures Affect the Provision of Ecosystem Services of Small Mountain Lakes? *Anthropocene*, 38, artykuł 100336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2022.100336>
- Eggenbauer, P., Obrist, A., Tokmačija, B., Wagner, A. (2016). The Assessment of Environmental Changes of Selected Water Bodies in the Area of Cracow Over the Past Two Decades. W: B. Gersbeck-Schierholz, M. Byalsky (Eds.), *Bionature 2016: The Seventh International Conference on Bioenvironment, Biodiversity and Renewable Energies* (s. 1–8). IARIA Press.
- Fonvielle, J., Thuile Bistarelli, L., Tao, Y., Woodhouse, J.N., Shatwell, T., Villalba, L.A., Berger, S.A., Kyba, C.C.M., Nejtgaard, J.C., Jechow, A., Kupprat, F., Stephan, S., Walles, T.J.W., Wollrab, S., Hölker, F., Dittmar, T., Gessner, M.O., Singer, G.A., Grossart, H.-P. (2025). Skyglow Increases Cyanobacteria Abundance and Organic Matter Cycling in Lakes. *Water Research*, 278, artykuł 123315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123315>
- Grubisic, M., Singer, G., Bruno, M.C., Grunsven, R.H.A. van, Manfrin, A., Monaghan, M.T., Hölker, F. (2017). Artificial Light at Night Decreases Biomass and Alters Community Composition of Benthic Primary Producers in a Sub-Alpine Stream. *Limnology and Oceanography*, 62(6), 2799–2810. DOI: <https://doi.org/10.1002/lno.10607>
- Häfker, N.S., Meyer, B., Last, K.S., Pond, D.W., Hüppe, L., Teschke, M. (2017). Circadian Clock Involvement in Zooplankton Diel Vertical Migration. *Current Biology*, 27(14), 2194–2201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.06.025>
- Ludvigsen, M., Berge, J., Geoffroy, M., Cohen, J.H., Torre, P.R. de la, Nornes, S.M., Singh, H., Sørensen, A.J., Daase, M., Johnsen, G. (2018). Use of an Autonomous Surface Vehicle Reveals Small-Scale Diel Vertical Migrations of Zooplankton and Susceptibility to Light Pollution under Low Solar Irradiance. *Science Advances*, 4(1), artykuł eaap9887. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9887>
- Moore, M.V., Pierce, S.M., Walsh, H.M., Kvalvik, S.K., Lim, J.D. (2000). Urban Light Pollution Alters the Diel Vertical Migration of Daphnia. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 27(2), 779–782. DOI: <https://doi.org/10.1080/03680770.1998.11901341>

- Muhetaer, G., Asaeda, T., Jayasanka, S.M.D.H., Baniya, M.B., Abeynayaka, H.D.L., Rashid, M.H., Yan, H. (2020). Effects of Light Intensity and Exposure Period on the Growth and Stress Responses of Two Cyanobacteria Species: *Pseudanabaena Galeata* and *Microcystis Aeruginosa*. *Water*, 12(2), artykuł 407. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12020407>
- Mundała, P., Szwałec, A., Siejka, Z., Kędzior, R., Lipka, K. (2016). Zanieczyszczenie wybranymi metalami ciężkimi osadów dennych Zalewu Nowohuckiego. *Acta Agrophysica*, 23(2), 455–465.
- Poulin, C., Bruyant, F., Laprise, M.-H., Cockshutt, A.M., Vandenhecke, J.M.-R., Huot, Y. (2014). The Impact of Light Pollution on Diel Changes in the Photophysiology of *Microcystis Aeruginosa*. *Journal of Plankton Research*, 36(1), 286–291. DOI: <https://doi.org/10.1093/plankt/fbt088>
- Referat Mediów Miejskich (2021). *Rajskie miejsce w sercu Czyżyn*. Online: https://krakow.pl/krakow_w_formie/251461,2173,komunikat,rajskie_miejsce_w_sercu_czyzyn.html (dostęp: 3.07.2026).
- Synowiec, K., Główna, A., Cieśla, G., Reczek, T. (2007). *Ocena jakości wód powierzchniowych w województwie małopolskim w roku 2006*. Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Krakowie. Online: <https://www.krakow.wios.gov.pl/Press/monitoring/rzeki/wyniki/ocena06.pdf> (dostęp: 3.07.2026).
- Ścieżor, T. (2013). A New Astronomical Method for Determining the Brightness of the Night Sky and Its Application to Study Long-Term Changes in the Level of Light Pollution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 435(1), 303–310. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stt1297>
- Ścieżor, T., Balcerzak, W. (2015). Wpływ zanieczyszczenia świetlnego na eutrofizację Zbiornika Dobczyckiego. *Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych*, 64(4), 599–610.
- Zachariasz, A., Porada, K. (2019). Water in Krakow's Gardens, Parks and Areas of Greenery. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 603(5), artykuł 052038. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/5/052038>
- Zhu, L., Cui, T., Runa, A., Pan, X., Zhao, W., Xiang, J., Cao, M. (2024). Robust Remote Sensing Retrieval of Key Eutrophication Indicators in Coastal Waters Based on Explainable Machine Learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 211, 262–280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.04.007>

ZAŁĄCZNIK



<https://wydawnictwo.umcs.eu/assets/Annales-b-zanieczyszczenie-swietlne-jako-potencjalny-czynnik-eutrofizacji-zalacznik-1.xlsx>

PUBLICATION INFO		
SUBMITTED: 2025.12.30	ACCEPTED: 2026.07.03	PUBLISHED ONLINE: 2026.07.27