

Marta Skiba (m.skiba@aiu.uz.zgora.pl)

 <https://orcid.org/0000-0002-4248-0378>

Anna Bazan-Krzywoszańska (a.bazan@aiu.uz.zgora.pl)

 <https://orcid.org/0000-0001-5648-0443>

Agata Stępińska-Kaczmarczyk (a.stepinska-kaczmarczyk@aiu.uz.zgora.pl)

 <https://orcid.org/0000-0002-7707-1689>

Institut Architektury i Urbanistyki, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski

Emisja zanieczyszczeń w strukturze miejskiej. Model aktualnych wyzwań proekologicznych i energooszczędnych w dostosowaniu miast do zmian klimatycznych

Emission of pollutants in the urban structure. A model of current pro-ecological and energy-saving challenges in adapting cities to climate change

Streszczenie

Na podstawie wyników przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że miejsca, do których (z zewnątrz) przepływa najwięcej azotu, wraz z różnymi produktami niezbędnymi do utrzymania funkcji miejskich, są również największymi emiterami zanieczyszczeń azotowych. Oprócz azotu miejsca te emitują również największą ilość gazów cieplarnianych oraz tych ze spalania węglowodorów. Na podstawie przedstawionego w artykule modelu obiegu azotu w mieście Zielona Góra można przygotować politykę zmniejszającą emisję zanieczyszczeń spowodowanych tradycyjnie rozwijającą się gospodarką, która ma wpływ na negatywne zmiany klimatyczne. Proponowane zmiany w polityce miejskiej powinny przeciwdziałać w miejscach największej emisji zanieczyszczeń oraz zmierzać do osiągnięcia gospodarki o obiegu zamkniętym.

Słowa kluczowe: obieg azotu, zanieczyszczenia, GIS, Zielona Góra

Abstract

Based on the results of the analyzes carried out, it can be concluded that the places to which the most nitrogen flows (from the outside), together with various products needed to maintain urban functions, are also the largest emitters of nitrogen pollutants. In addition to nitrogen, these places also emit the largest amount of greenhouse gases and those from the combustion of hydrocarbons. Based on the model of the nitrogen cycle in the city of Zielona Góra presented in the article, a policy can be prepared to reduce the emission of pollutants caused by the traditionally developing economy, which has an impact on negative climate changes. The proposed changes in urban policy should counteract in places of the greatest emission of pollutants and aim at achieving a circular economy.

Keywords: nitrogen cycle, pollution, GIS, Zielona Góra

1. WSTĘP

Większość światowej populacji mieszka obecnie w miejscach, w których poziom zanieczyszczenia powietrza ze względu na emisje z głównych źródeł, takich jak przemysł, wytwarzanie energii, transport i spalanie w gospodarstwach domowych, znacznie przekracza wytyczne zdrowotne Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) dotyczące jakości powietrza. Główne pierwotne zanieczyszczenia powietrza, emitowane bezpośrednio do środowiska w wyniku spalania paliw kopalnych i biomasy, obejmują zanieczyszczenia gazowe, takie jak: dwutlenek siarki (SO_2), dwutlenek azotu (NO_2), tlenek węgla (CO) i lotne związki organiczne (LZO) oraz pył zawieszony (PM) (Turner i in., 2020). Obecnie poziomy CO są często niskie w krajach rozwiniętych (ze względu na stosowanie kontroli emisji – katalizatorów), natomiast wysokie w pobliżu źródeł spalania biomasy. Wtórne zanieczyszczenia powietrza powstają w atmosferze z pierwotnych zanieczyszczeń i obejmują m.in. tlenki azotu (NO_x) i węglowodory, takie jak LZO, które reagują w obecności światła słonecznego (Turner i in., 2020). Te zanieczyszczenia mogą każdego roku powodować dyskomfort, choroby, mogą również wywoływać choroby u zwierząt, także hodowlanych, i uszkadzać roślinność (rośliny uprawne). Przyczyniają się również do wytwarzania smogu i kwaśnych deszczów, powodując choroby układu oddechowego i raka oraz zubożenie warstwy ozonowej, co przyczynia się do globalnego ocieplenia (Almetwally i in., 2020). Zanieczyszczenie powietrza ma także negatywny wpływ na wydajność pracy i zdolności poznawcze (Tofield, 2017).

Ze względu na złożoność źródeł emisji, przetwarzania chemicznego i transportu czasoprzestrzenne wzorce zanieczyszczeń powietrza mogą być zmienne lokalnie i mogą zasadniczo różnić się od siebie (Wang i in., 2023). UE chce osiągnąć neutralność klimatyczną do 2050 r. i ten cel wraz z przejściowym celem redukcji emisji o 55% do 2030 r. są zapisane w europejskim prawie klimatycznym. Wśród różnych inicjatyw podjętych przez UE znajduje się rozporządzenie w sprawie wspólnego wysiłku redukcyjnego, które jest aktualizowane w ramach pakietu legislacyjnego „Fit for 55” (*Kluczowe propozycje legislacyjne...*, 2021).

Aktualnie większość krajów i miast udostępnia wskaźniki jakości powietrza (AQI – Air Quality Index), które są zintegrowanym podejściem do ilościowego określania poziomów jakości powietrza. Wskaźnik jakości powietrza opiera się na pomiarze w czasie rzeczywistym pyłu zawieszonego ($\text{PM}_{2.5}$ i PM_{10}), ozonu (O_3), dwutlenku azotu (NO_2), dwutlenku siarki (SO_2) i emisji tlenku węgla (CO). Jest to łatwo interpretowalna wartość dla ogółu populacji, aby zrozumieć możliwe narażenie na zanieczyszczenie powietrza. Poziomy wskaźnika AQI są obliczane na stacjach pomiarowych (w miastach – jedno miejsce lub kilka). Jednak dominujące zanieczyszczenia powietrza są zmienne geograficznie ze względu na różnorodność wkładów źródłowych (Wang i in., 2023). Ponieważ poziomy zanieczyszczeń różnią się przestrzennie i czasowo, trudno jest uchwycić zmiany w małej skali lub punkty zapalne narażenia na zanieczyszczenia powietrza w mieście, dlatego ogólnomiejskie modele badań opisywane

w literaturze są w skali tygodniowej lub dwutygodniowej do średnioterminowej lub długoterminowej, np. w Chinach badania Wanga i in. (2023).

W literaturze przedmiotu brakuje opracowań dotyczących wzorców przepływu azotu w mieście, identyfikacji jego źródeł i miejsc największej jego emisji. Brakuje także określenia – od czego zależy rozkład emisji azotu w mieście? Czy można zidentyfikować w mieście struktury zwiększonej emisji szkodliwego azotu?

Ten artykuł przedstawia identyfikację miejsc emisji zanieczyszczeń azotowych w strukturze miejskiej na podstawie badań miasta Zielona Góra w granicach administracyjnych (historyczny rdzeń miasta wraz z jego otoczeniem produkcyjno-rolniczym).

1.1. AZOT W ZANIECZYSZCZENIACH

Azot jest podstawowym składnikiem powietrza, tworzy liczne związki organiczne i nieorganiczne – kwasy, tlenki i sole, oraz jest jednocześnie niezbędnym składnikiem białek, budującym komórki organizmów, peptydów, kwasów nukleinowych czy neuroprzekazników. Organizmy żywe nie mogą się obyć bez niego. Jednak jako azot reaktywny (Nr) oraz w tlenkach NO_x jest uznawany za główny składnik zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych w mieście. Wśród gazów cieplarnianych (GHG – *greenhouse gas*) podtlenek azotu (N_2O) stanowi poważne zagrożenie dla klimatu i warstwy ozonowej. Jest to trzeci najobficiej emitowany gaz cieplarniany (GHG) po dwutlenku węgla (CO_2) i metanie (CH_4), odpowiedzialny za 6% emisji ekwiwalentu CO_2 w 2014 r. (CAIT, 2017). Jego obfitość w atmosferze stale rośnie od przełomu wieków o około 0,25% rocznie. Kluczowym czynnikiem jest wzrost reaktywnego azotu (N) w biosferze (każdej formy N innej niż azot atmosferyczny – N_2) głównie w wyniku stosowania nawozów syntetycznych i obornika do produkcji żywności (Kanter i in., 2020). Inne źródła emisji N_2O to przemysł, energetyka, transport i ścieki.

Badania Gallowaya z zespołem wykazały, że miasta przekształcają globalny obieg azotu w rekordowym tempie, odzwierciedlając zwiększone spalanie paliw kopalnych, rosnące zapotrzebowanie na azot w rolnictwie i przemyśle oraz wszechobecną nieefektywność jego wykorzystania. Wiele antropogenicznego azotu jest tracone z powietrzem, wodą i glebą, co powoduje kaskadę problemów środowiskowych i zdrowotnych ludzi. Jednocześnie produkcja żywności w niektórych częściach świata charakteryzuje się niedoborem azotu, co uwydatnia nierówności w dystrybucji nawozów zawierających azot (Galloway i in., 2008).

Spośród związków NO_x za najważniejsze i dominujące uważa się tlenek azotu (NO) i dwutlenek azotu (NO_2). W większości przypadków tlenek azotu (NO) jest uwalniany w wyniku spalania paliw kopalnych w wysokiej temperaturze. Tlenek azotu jest przekształcany w dwutlenek azotu (NO_2) w wyniku utleniania w atmosferze przez utleniacze atmosferyczne, takie jak ozon. Nawet przy niskim poziomie reagentów obecnych w atmosferze proces utleniania zachodzi szybko. Większość tlenków azotu jest bezbarwna, bezwonna i niepalna; jednak dwutlenek azotu wraz z innymi cząsteczkami w atmosferze tworzy czerwonawo-brązową pokrywę, która jest widoczna nad kilkoma miastami (Garba i in., 2018; Almetwally i in., 2020).

Aby w miastach osiągnąć cele zrównoważonego rozwoju i poczynić szybkie postępy w realizacji ambitnych celów, choćby tych określonych w programach UE, np. „Fit for 55”, potrzebne są ograniczenia emisji zanieczyszczeń u źródła, w szczególności w miastach, gdzie mieszka większość ludności i gdzie zanieczyszczenie jest największe. Wysiłki na rzecz poprawy jakości powietrza koncentrują się na ograniczaniu emisji (Chojnacka i in., 2023). Zarządzanie jakością powietrza obejmuje podejmowanie decyzji, które źródła kontrolować i w jakim stopniu. Szacunki frakcji spożycia związków zawierających azot (zależne od ilości i gęstości zaludnienia) mogą pomóc w ustaleniu priorytetów (Apte i in., 2017).

Centra miejskie, jak i wsie biorą udział w przepływie azotu. Przyjmują i gromadzą wiele materiałów, takich jak azot (N) i jego związki, ze swojego otoczenia, czyli z terenów rolniczych i hodowlanych (usytuowanych wokół miast i stanowiących jego zaplecze). Bittman wraz z zespołem określił wielkość i sposób napływu azotu i jego związków. Określił, że wpływ azotu jest zdominowany przez:

- import karmy dla zwierząt gospodarskich w celu wsparcia produkcji nabiału i drobiu;
- import żywności ludzkiej;
- import azotu jako nawozu;
- import azotu w powietrzu atmosferycznym.

Istnieje także transfer azotu z ekosystemów rolniczych na miejskie wypierające import żywności, np. poprzez produkcję lokalną.

Wpływ azotu jest zdominowany przez:

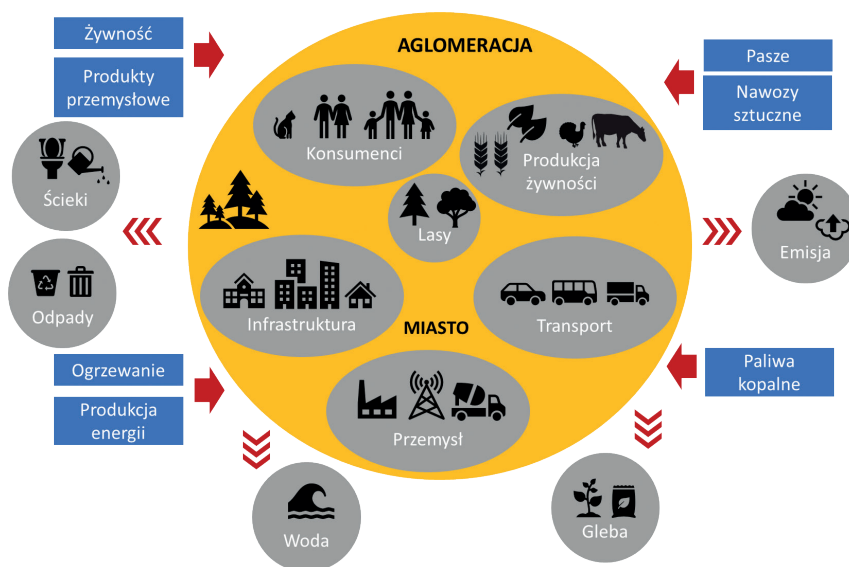
- usuwanie ścieków;
- usuwanie odpadów stałych;
- emisje atmosferyczne (Bittman i in., 2019).

2. METODOLOGIA I DANE WEJŚCIOWE

Określono, że obszary miejskie i podmiejskie są miejscami transformacji reaktywnego azotu (Nr). Azot reaktywny (Nr) wchodzi do tych obszarów jako żywność, produkty, paliwo, nawozy lub zwierzęta gospodarskie. Nakłady te są następnie przekształcane w produkty (np. żywność hodowaną na miejscu lub mięso z importowanego inwentarza żywego), które są albo konsumowane w mieście, albo eksportowane, a także bezpośrednio lub później zamieniane w odpady lub emisje do wody lub powietrza (w tym niereaktywny N_2), jak przedstawiono na uproszczonym modelu przepływu związków azotu w mieście – il. 1.

Pytania badawcze dotyczą określenia:

- 1) Które obszary w mieście są najbardziej narażone na zanieczyszczenie azotem i jego związkami?
- 2) Które obszary miasta wykazują zwiększoną emisję azotu i od czego w największym stopniu ona zależy?



Il. 1. Uproszczony model przepływu azotu w mieście – założenia do identyfikacji źródeł związanych z emisją związków azotu w odniesieniu do struktury przestrzennej miasta Zielona Góra. Oprac. aut.



Il. 2. Schemat wykorzystanej metodologii umożliwiającej identyfikację nieprawidłowości i źródeł zwiększonej emisyjności zanieczyszczeń, ze szczególnym uwzględnieniem azotu w mieście. Oprac. aut.

2.1. ZIELONA GÓRA JAKO MIEJSCE BADAŃ

Powierzchnia gminy Zielona Góra o statusie miejskim uległa znaczącej zmianie z dniem 1 stycznia 2015 r., kiedy to w jej granice włączone zostały tereny gminy wiejskiej Zielona Góra (Dz.U. z 2014 r. poz. 1023). Analiza aktualnego stanu zagospodarowania przestrzennego miasta Zielona Góra wskazuje, że w jego skład w obecnej granicy wchodzi dawne historyczne miasto i otaczające je tereny wiejskie. Aktualny dokument planistyczny odnoszący się do kierunków zagospodarowania przestrzennego zawiera opracowania dla miasta Zielona Góra i dla Gminy Zielona Góra, nie uwzględnia jednak odniesienia do przepływu azotu¹. Znaleźć w nim można podział na jednostki o różnych morfologiach i informacje o nieprzystających do siebie sposobach zagospodarowania, różnej polityce kształtowania zabudowy i intensywności rozwoju funkcji. Zatem tak różne obszary, o różnej gęstości zaludnienia, strukturze urbanistycznej i odmiennych funkcjach powinny odróżniać także przepływy azotu (Winiwarter i in., 2020).

Teren miasta Zielona Góra na potrzeby tego artykułu podzielono na kwartały jednorodne pod względem struktury urbanistycznej, gęstości zaludnienia (niektóre kwartały są niezamieszkałe) oraz dominującej funkcji (także rolnej i produkcyjnej). Dane wejściowe wyróżniono na podstawie badań przepływu azotu i założeń wykonanych w trakcie realizacji grantu² w Instytucie Inżynierii Środowiska na Uniwersytecie Zielonogórskim przez zespół pod kierunkiem Wilfrieda Winiwartera (tabela 1).

Tabela 1. Najważniejsze przepływy reaktywnego azotu. Oprac. aut.

Lp.	Wejście	Wskaźniki do modelowania	Wyjście	
			recykling	emisje
1.	Żywność	N/ osobę/ rok	obornik	do wody
2.	Produkty		osad ściekowe	
3.	Paliwo		kompost	do powietrza
4.	Zwierzęta gospodarskie			
5.	Nawozy	N/ ha/ rok		

Miasto Zielona Góra składające się z rdzenia, czyli historycznego miasta Zielona Góra, oraz jego wiejskiego otoczenia zostało podzielone na 102 kwartały na potrzeby artykułu. Wydzielone kwartały charakteryzują się wewnętrzną homogeniczną strukturą urbanistyczną oraz jednolitym zagospodarowaniem i sposobem użytkowania. Kwartały scharakteryzowano z uwagi

¹ Zob. https://bip.zielonagora.pl/akty/1/12524/w_sprawie_zmiany_Studium_uwarunkowan_i_kierunkow_zagospodarowania_przestrzennego_miasta_i_gminy_Zielona_Gora/ [dostęp: 27.05.2023].

² Identyfikacja nieprawidłowości związanych z emisją związków azotu w odniesieniu do struktury przestrzennej miasta NCN (Poland), project UMO-2018/29 / Z / ST10 / 02986 NSFC (China), project 71961137011 FFG (Austria), project 870234.

na sposób zaopatrzenia w ciepło i ciepłą wodę użytkową, a także opisano na podstawie danych GIS zebranych w Urban Atlas oraz bazy danych Lasów Państwowych Nadleśnictwa Zielona Góra. Dzięki danym GUS (baza danych miejskich ulic oraz sołectw) w każdym kwartale określono liczbę osób zamieszkujących miasto. Należy zwrócić uwagę, że niektóre kwartały nie są zamieszkałe (np. 56–60, 63–66, 71–75, 80–81, 89–90, 92–93, 96–99). Z uwagi na duże rozdrobienie danych dotyczących zagospodarowania terenu zdecydowano się na ich agregację do ośmiu klas przedstawionych w tabeli 2. Modelowanie na potrzeby artykułu zostało przeprowadzone w programie ArcGIS Pro 2.9, w oparciu o przygotowane wskaźniki przedstawiające sumę emisji do powietrza zanieczyszczeń azotowych na mieszkańca oraz na jednostkę powierzchni z uwagi na klasyfikację zagospodarowania terenu (il. 2). W modelowaniu, z uwagi na niskie szacunki, pominięto emisję azotu i jego związków do gleby i wód gruntowych.

Tabela 2. Klasyfikacja zagospodarowania terenu wykorzystana do identyfikacji źródeł zanieczyszczeń azotowych w mieście Zielona Góra. Oprac. aut.

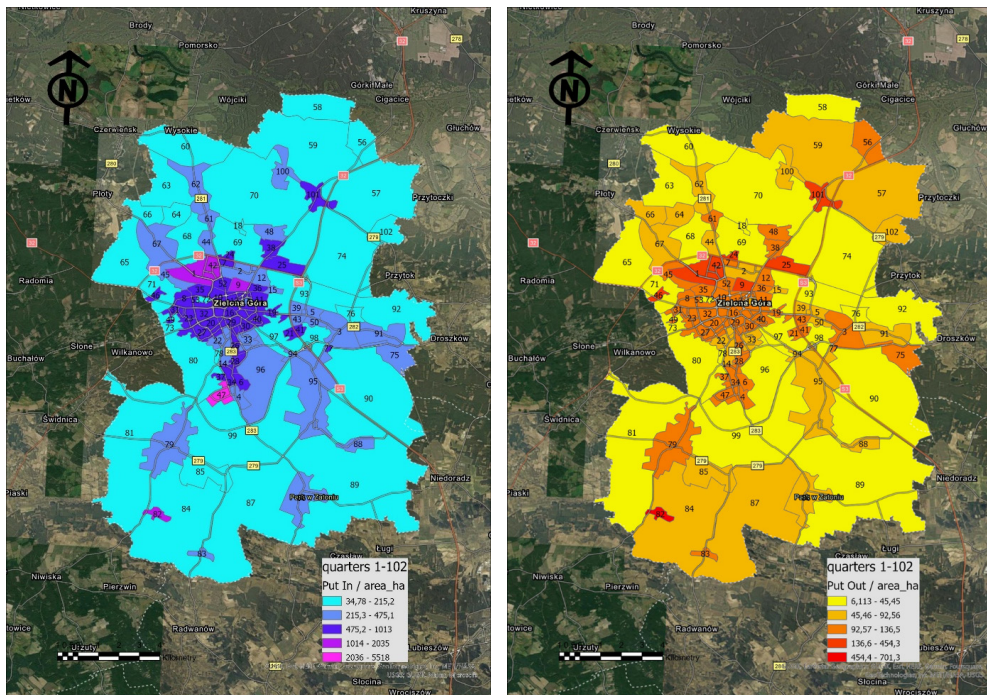
Lp.	Typ pokrycia terenu	Suma [ha]	Wskaźnik [kgN/ rok/ ha]	
			Wejście	Wyjście
1.	Tereny rolne	7464,49	106,3	103,6
2.	Zabudowa	2894,91	769,7	133,8
3.	Las	16 310,80	46,88	3,66
4.	Tereny przemysłowe	49,94	12 757,9	4605,3
5.	Drogi	520,8	8,6	43,7
6.	Tereny zieleni miejskiej	463,15	23,1	23,1
7.	Składowisko odpadów	26,13	7969,0	11,5
8.	Woda	86,46	5,2	–

3. WYNIKI

Największe znaczenie dla identyfikacji źródeł emisji zanieczyszczeń w mieście Zielona Góra i oddziaływania reaktywnego azotu mają tereny przemysłowe. Są to miejsca o funkcjach produkcyjnych, ale także ciepłownie, elektrociepłownie, a dodatkowo tereny produkcji zwierzęcej i rolniczej – inwentarz, pasze, produkty. Terenami zdominowanymi przez takie funkcje są kwartały: 1 – teren elektrociepłowni (wpływ spalania paliw kopalnych), 96 – składowisko odpadów, oraz 95 – obszar intensywnej zabudowy podmiejskiej o dużej powierzchni z gruntami do produkcji rolnej, podobnie jak kwartał 47 – teren intensywnej zabudowy jednorodzinnej z rozproszonym indywidualnym doprowadzeniem ciepła ze spalania węglowodorów. Źródłem największych ilości azotu emitowanego do atmosfery są tereny rolnicze (tu największy wpływ

ma ulatnianie się nawozów sztucznych wykorzystywanych do produkcji), ciepłownię i spalarnię węglowodorów – zlokalizowane w kwartale 1 (elektrociepłownia dla miasta Zielona Góra), oraz miejsca produkcji roślinnej i zwierzęcej, tj. kwartały 57, 59, 84, 87, 89. Analizując podane dane, można wskazać, że dużym emitentem zanieczyszczeń azotowych pozostają tereny mieszkalne jako miejsca importu i spalania produktów zawierających azot (dotyczy to produktów spożywczych oraz przygotowywania ciepłej wody użytkowej i ciepła). Jest to szczególnie widoczne na terenach otaczających ściśle centrum (rdzeń) Zielonej Góry. Najmniejsze znaczenie mają tereny typowo leśne – kwartały 60, 65, 70, 74, 80, 99.

Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że miejsca intensywnie zamieszkałe (do których z zewnątrz przepływa najwięcej azotu wraz z różnymi produktami niezbędnymi do utrzymania funkcji bytowych) są również największymi emiterami zanieczyszczeń azotowych. Oprócz azotu miejsca te emitują również największą ilość gazów cieplarnianych oraz tych ze spalania węglowodorów. Na przedstawionym modelu przepływu azotu w mieście średniej wielkości, jakim jest Zielona Góra, można przygotować politykę łągącą wpływ emisji zanieczyszczeń na zmiany klimatyczne spowodowane tradycyjnie rozwijającą się gospodarką.



Il. 3. Wyniki przepływu i emisji zanieczyszczeń azotem dla modelu Zielonej Góry w podziale na 102 kwartały. Po lewej źródła azotu (wejście) przyporządkowane według powierzchni kwartału i liczby jego mieszkańców. Po prawej emisja (wyjście) azotu do powietrza dla każdego kwartału zabudowy. Oprac. aut.

Proponowane zmiany w polityce miejskiej powinny zmierzać do osiągnięcia gospodarki o obiegu zamkniętym, uwzględniającej rozproszoną energetykę, która czerpie energię i ciepło z biogazowni, minimalizując spalanie węglowodorów.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki badań nad emisją zanieczyszczeń, przepływami i transformacją azotu reaktywnego w bilansie w Zielonej Górze. Przedstawiono wejście i wyjście dla modelu rozkładu azotu w kwartałach miejskich. Jest to kontynuacja rozważań na temat wyodrębnienia aktualnych problemów i wyzwań miast w utrzymaniu dobrostanu mieszkańców i przeciwdziałaniu zmianom klimatu. Konceptje celowych upraw roślin energetycznych, uzupełnionych zagospodarowaniem odpadu zawierającego azot reaktywny, czyli obornika, osadu ściekowego i kompostu w miastach, do wykorzystania w procesie fermentacji do produkcji biogazu, energii i ciepła są realną szansą na wypełnienie zobowiązań unijnych przez Polskę, ale przede wszystkim stwarzają wiele korzyści dla społeczeństwa i kraju, z niezależnością energetyczną i gospodarką obiegu zamkniętego na czele.

Polityka miejska skoncentrowana na przeciwdziałaniu zanieczyszczeniom środowiska, w tym azotem reaktywnym (gleby, wód i powietrza), powinna zapewnić:

- 1) przewietrzanie miasta (zgodnie z głównym kierunkiem wiatru – południowy zachód) wraz z tworzeniem rezerwarów zimnego powietrza – koszonych łąk na południowym zachodzie miasta (kwartały 81, 84, 87);
- 2) wspieranie budowy przydomowych kompostowników zwiększających recykling odpadów organicznych oraz części zielonych roślin (kwartały 3, 67, 75, 79, 82–83, 95);
- 3) budowę lokalnych biogazowni umożliwiających recykling odpadów oraz śmieci zawierających azot reaktywny (głównie kwartały z odzwierzęcą produkcją żywności: 100–101);
- 4) system umożliwiający wykorzystanie i zagospodarowanie produktu po fermentacji z biogazowni i z przydomowych kompostowników jako nawozu naturalnego (który po transformacji z azotu reaktywnego w azot depozytowy jest korzystny; kwartały 91, 100–101). Optymalizacja zapotrzebowania na kluczowy składnik aminokwasów – budulca organizmów żywych – azotu, przy jednoczesnej minimalizacji jego negatywnych konsekwencji wymaga zintegrowanego, interdyscyplinarnego podejścia i opracowania strategii zmniejszenia ilości odpadów, które mogą być emitentami tego zanieczyszczenia.

Polityka przestrzenna powinna skupić się na odnawialnych, lokalnych źródłach energii, które pomogą zwiększyć poziom bezpieczeństwa energetycznego poprzez dywersyfikację źródeł energii i wykorzystanie w szczególności biomasy, powszechnie dostępnej i uznanej jako odpad/śmieci, a zawierającej azot reaktywny. Biomasa należy do najtańszych źródeł energii, a jednocześnie umożliwia recykling produktów ubocznych i śmieci zawierających azot – uznany za zanieczyszczenie, które jednak z powodzeniem może być uniwersalnym nośnikiem energii.

Bardziej skoncentrowane działania w zakresie N₂O mogłyby pomóc w osiągnięciu tych celów przy jednoczesnym osiągnięciu szeregu innych – od ochrony różnorodności biologicznej po poprawę jakości powietrza i wody. W przyszłych badaniach należy skupić wysiłki na rankingu kryteriów i doborze scenariuszy wpływu polityki na zmniejszanie źródeł emisji azotu w mieście.

BIBLIOGRAFIA

- Aliyu, G., Sanz-Cobena, A., Müller, Ch., Zaman, M., Luo, J., Liu, D., Yuan, J., Chen, Z., Niu, Y., Arowolo, A., Ding, W. (2018). A meta-analysis of soil background N₂O emissions from croplands in China shows variation among climatic zones. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 267, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.08.003>
- Almetwally, A.A., Bin-Jumah, M., Allam, A.A. (2020). Ambient air pollution and its influence on human health and welfare: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 24815–24830.
- Apte, J.S., Bombrun, E., Marshall, J.D., Nazaroff, W.W. (2012). Global intraurban intake fractions for primary air pollutants from vehicles and other distributed sources. *Environmental Science & Technology*, 46, 3415–3423. <https://doi.org/10.1021/es204021h>
- Bittman, S., Sheppard, S.C., Poon, D., Hunt, D.E. (2019). How efficient is modern peri-urban nitrogen cycling: A case study. *Journal of Environmental Management*, 244, 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.054>
- CAIT. (2017). *Climate Data Explorer World Resources Institute*. Washington DC.
- Chojnacka, K., Skrzypczak, D., Szopa, D., Izydorczyk, G., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A. (2023). Management of biological sewage sludge: Fertilizer nitrogen recovery as the solution to fertilizer crisis. *Journal of Environmental Management*, 326(A), 116602. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116602>
- Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z.C., Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P., Sutton, M.A. (2008). Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320, 889–892.
- Kanter, D.R., Ogle, S.M., Winiwarter, W. (2020). Building on Paris: integrating nitrous oxide mitigation into future climate policy. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 47, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.04.005>
- Kluczowe propozycje legislacyjne pakietu Fit for 55 jako determinanty wzrostu ubóstwa energetycznego w Unii Europejskiej.* (2021). Pobrane z: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-9-2021-004843_PL.html [dostęp: 11.04.2023].
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 29 lipca 2014 r. w sprawie połączenia gmin, ustalenia granic niektórych gmin i miast, nadania niektórym miejscowościom statusu miasta oraz zmiany siedziby władz gminy (Dz.U. z 2014 r. poz. 1023).

- Tofield, A. (2017). Air pollution and traffic noise effect on blood pressure. *European Heart Journal*, 38(2), 71–72. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehw607>
- Turner, M.C., Andersen, Z.J., Baccarelli, A., Diver, W.R., Gapstur, S.M., Pope, C.A., Prada, D., Samet, J., Thurston, G., Cohen, A. (2020). Outdoor air pollution and cancer: An overview of the current evidence and public health recommendations. *CA – A Cancer Journal for Clinicians*, 70, 460–479.
- Wang, Y., Huang, L., Huang, C., Hu, J., Wang, M. (2023). High-resolution modeling for criteria air pollutants and the associated air quality index in a metropolitan city. *Environment International*, 172, 107752. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107752>
- Winiwarter, W., Amon, B., Bai, Z., Greinert, A., Kaltenecker, K., Ma, L., Myszograj, S., Schneidergruber, M., Suchowska-Kisielewicz, M., Wolf, L., Zhang, L., Zhou, F. (2020). Urban nitrogen budgets: flows and stock changes of potentially polluting nitrogen compounds in cities and their surroundings – a review. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 17(1), 57–71. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2020.1841241>
- Zhan, Y., Luo, Y., Deng, X., Zhang, K., Zhang, M., Grieneisen, M.L., Di, B. (2018). Satellite-Based Estimates of Daily NO₂ Exposure in China Using Hybrid Random Forest and Spatiotemporal Kriging Model. *Environmental Science & Technology*, 52, 4180–4189.
- https://bip.zielonagora.pl/akty/1/12524/w_sprawie_zmiany_Studium_uwarunkowan_i_kierunkow_zagospodarowania_przestrzennego_miasta_i_gminy_Zielona_Gora/ [dostęp: 27.05.2023]