

ZADANIE 1.1: Nawożenie użytków rolnych

Działanie 6

**Porównanie sald (nadwyżek) bilansów azotu i fosforu w Polsce
z wybranymi krajami członkowskimi Unii Europejskiej i HELCOM**

Autorzy:

Beata Jurga
Jerzy Kopiński
Anna Nieróbca

Puławy 2024

Spis treści

Zastosowane skróty	3
1. Wstęp.....	4
2. Metodyka.....	6
Ogólne założenia metodyki bilansu brutto składników mineralnych.....	6
Źródła danych i zakres analizy	7
Kryteria oceny sald bilansu azotu brutto i fosforu	10
3. Wyniki.....	13
Porównanie międzynarodowe bilansów azotu i fosforu.....	13
Saldo bilansu fosforu brutto GPB.....	18
Saldo bilansu azotu w Polsce.....	23
Saldo bilansu fosforu w Polsce.....	31
4. Podsumowanie	38

Zastosowane skróty

DJP - duża jednostka przeliczeniowa

EEA - Europejska Agencja ds. Środowiska

EUROSTAT - Europejski Urząd Statystyczny

F2F - strategia „Od pola do stołu” Europejskiego Zielonego Ładu

GNB - bilans azotu brutto *gross nitrogen balance*

GPB - bilans fosforu brutto *gross phosphorus balance*

GUS - Główny Urząd Statystyczny

OECD - Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju

UE - Unia Europejska

UR – użytki rolne

UR w d.k. - użytki rolne wykorzystywane rolniczo, utrzymywane w dobrej kulturze

WPR – Wspólna Polityka Rolna

1. Wstęp

1 maja 2004 r. Polska wstąpiła do Unii Europejskiej (UE). Polskie rolnictwo już od 20 lat funkcjonuje w ramach Wspólnej Polityki Rolnej (WPR). Warunki kreowane przez WPR stanowiły impuls do przemian strukturalnych, własnościowych w rolnictwie, przetwórstwie rolno-spożywczym, handlu, a pośrednim ich skutkiem było nasilenie się procesów specjalizacji, koncentracji i polaryzacji produkcji^{1,2,3,4}. Intensywność stosowanych technologii produkcji, obok uwarunkowań przyrodniczych i organizacyjno-ekonomicznych, jest jedną z cech, które różnicują polskie rolnictwo^{5,6,7}.

Funkcjonowanie Polski w ramach UE stwarza ciągle nowe wyzwania, stojące przed rolnictwem, związane z ochroną środowiska na obszarach wiejskich, dotyczące prawidłowego prowadzenia działalności produkcyjnej⁸. We współczesnym rolnictwie postindustrialnym coraz większą uwagę zwraca się na pełnienie przez nie funkcji użyteczności społecznej (będących odzwierciedleniem relacji zachodzących pomiędzy wartością środowiska - jako dobra publicznego, a wartością prowadzonej w tym środowisku produkcji rolniczej). Obecnie wyzwaniem dla polskiego rolnictwa, są cele mieszczące się w założeniach Europejskiego Zielonego Ładu (w tym strategii „Od pola do stołu” (F2F) i Unijnej Strategii na rzecz bioróżnorodności 2030 r. pod nazwą „Przywracanie przyrody do naszego życia”), tj. ograniczenie o 50% strat składników pokarmowych bez pogorszenia żyzności gleby, co ma pozwolić na ograniczenie stosowania nawozów o co najmniej 20% do 2030 r. Wynikają one z faktu, że rolnicza działalność powoduje znaczącą ingerencję w naturalny obieg składników pokarmowych, głównie poprzez intensyfikację produkcji mierzoną często poziomem zużycia $\text{kg NPK} \cdot \text{ha}^{-1}$ UR w nawozach mineralnych czy też poziomem obsady zwierząt w $\text{DJP} \cdot \text{ha}^{-1}$ UR.

¹ Ziętara W.: Kierunki i możliwości rozwoju gospodarstw mlecznych i trzodowych w Polsce. Roczn. Nauk. SERiA, 2005, 7(1): 300-305.

² Kopiński J.: Stopień polaryzacji intensywności i efektywności produkcji rolniczej w Polsce w ostatnich 10 latach. Roczn. Nauk. SERiA, 2013, 15(1): 97-103.

³ Kopiński J.: Trendy zmian głównych kierunków produkcji zwierzęcej w Polsce w okresie członkostwa Polski w UE. [w:] A. Olszańska i J. Szymańska (red.) Agrobiznes 2014. Rozwój agrobiznesu w okresie 10 lat przynależności Polski do UE. Wyd. Prace Naukowe UE we Wrocławiu, 2014, 361: 109-130.

⁴ Kopiński J.: Kierunki zmian produkcji zwierzęcej w Polsce w okresie członkostwa w UE. (W:) Zmiany w rolnictwie po 20 latach członkostwa Polski w UE. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2024 (w druku)

⁵ Krasowicz S., Filipiak K.: Czynniki decydujące o regionalnym zróżnicowaniu wykorzystania rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce. Roczn. Nauk. SERiA, 1999, 1(1): 153-158.

⁶ Kopiński J., Matyka M.: Stan obecny i przewidywane zmiany produkcji rolniczej w Polsce w perspektywie roku 2030. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2014, 40(14): 45-58.

⁷ Kopiński J.: Bilans azotu brutto - agrośrodowiskowy wskaźnik oddziaływania rolnictwa na środowisko. Opis metodyki, omówienie wyników bilansu na poziomie NUTS-0, NUTS-2. Wyd. IUNG-PIB Monografie i rozprawy naukowe, Puławy, 2017a, 55, ss. 116.

⁸ Oszmiańska M., Mielcarek M.: Ochrona środowiska w gospodarstwach chłopskich. Zesz. Nauk. AR „Rolnictwo LXXXVII”, Wrocław 2006, nr. 540: 409-414.

Należy jednak pamiętać, że o całkowicie zamkniętym obiegu składników pokarmowych można mówić tylko w naturalnych ekosystemach, z których nie zabiera się żadnej masy roślinnej. W rolnictwie natomiast jest przeciwnie, gdyż dąży się do maksymalizacji zbiorów użytkowych części roślin. Z plonami zabierane są składniki mineralne i ten ubytek, aby nie prowadzić do zubożenia żyzności gleb, musi być wyrównany nawozami naturalnymi i mineralnymi. Środowiskowe skutki intensywnej produkcji rolniczej ujawniają się w mierzalny sposób w zmianie wskaźników żyzności gleby oraz w składzie wód gruntowych czy jakości powietrza. Chociaż azot i fosfor należą do czynników warunkujących rozwój produkcji rolniczej, to gospodarowanie nimi jest integralną częścią ryzyka produkcyjnego, a związki tych składników (biogeny), kiedy przemieszają się do wód gruntowych i powierzchniowych mogą powodować ich eutrofizację oraz w przypadku azotu ulatniać się do atmosfery (wypływać w nadmiernych ilościach poza system rolniczy)⁹. Potencjalny stan zagrożenia jako skutek określonej intensywności gospodarowania, można ocenić na podstawie bilansu składników mineralnych¹⁰.

W krajach należących do Unii Europejskiej, w ramach Wspólnej Polityki Rolnej coraz mocniej i konsekwentniej uwzględnia się cele dotyczące ograniczenia zagrożeń środowiskowych powodowanych przez rolnictwo. Wcześniej były one stawiane w ramach „Działania rolno-środowiskowo-klimatycznego” objętego Programem Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020, a obecnie interwencji w Krajowym Planie Strategicznym WPR 2023-2027. Dla państw członkowskich UE (p. cz. UE) wytyczną jest w tym względzie Dyrektywa Azotanowa¹¹. Zagadnienia związane z ograniczeniem emisji składników mineralnych z rolnictwa są podnoszone także przez takie konwencje międzynarodowe jak HELCOM, OSPARCOM¹⁰.

Do oceny oddziaływania rolnictwa na środowisko stosowane są różne metody i modele w zależności od poziomu zastosowania i potrzeb odbiorców. Jednym z bardzo ważnych wskaźników służących do oceny potencjalnej presji na środowisko jako skutek oddziaływania działalności rolniczej, są bilanse składników nawozowych, w tym głównie azotu i fosforu, jako głównych biogenów¹². Stosowany jest on przez instytucje międzynarodowe, według metody zaproponowanej przez Organizację Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (OECD), a następnie

⁹ Kopiński J., Fotyma M.: Bilans azotu w krajach Unii Europejskiej na podstawie danych OECD. Pam. Puł., 2001, 124: 255-262.

¹⁰ Kopiński J., 2006: Bilans azotu (N) brutto w rolnictwie Polski na tle krajów należących do OECD. Nawozy i nawożenie, Puławy, 1(26): 112- 122.

¹¹ Dyrektywa Rady 91/676/EWG z dnia 12 grudnia 1991 r. dotyczącej ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez azotany pochodzenia rolniczego (Dz. U. UE.L. 91.375.1

¹² Kopiński J.: Bilans azotu brutto - agrośrodowiskowy wskaźnik oddziaływania rolnictwa na środowisko. Opis metodyki, omówienie wyników bilansu na poziomie NUTS-0, NUTS-2. Wyd. IUNG-PIB Monografie i rozprawy naukowe, Puławy, 2017a, 55, ss. 116.

zaadoptowanej przez EUROSTAT, tzw. „bilans brutto”¹³. W Polsce od 2003 roku określany jest on jako „bilans azotu brutto” (*gross nitrogen balances*)¹⁴, a wcześniej jako bilans „na powierzchni pola”. Salda bilansów świadczą o poprawności gospodarowania składnikami mineralnymi i są podstawowymi wskaźnikami agro-środowiskowymi¹⁵. Wymowa wyników bilansu, szczególnie w przypadku znacznych nadwyżek, może nabrać szczególnego znaczenia w zestawieniu ze stanem zasobności gleb i stanem jakości wód gruntowych, powierzchniowych¹⁶, czy jakości powietrza. Trzeba bowiem zaznaczyć, że oszacowana nadwyżka zawiera ilości składnika, które są akumulowane (bądź wyczerpywane) w glebie, a także potencjalnie emitowane do atmosfery oraz wymywane do wód gruntowych lub powierzchniowych.

2. Metodyka

Ogólne założenia metodyki bilansu brutto składników mineralnych

Celem sporządzania bilansów azotu oraz fosforu jest ocena stopnia obciążenia środowiska (gleba, woda, powietrze) tymi składnikami¹⁷. W bilansie brutto ocenia się stopień możliwego obciążenia gleby, wody, powietrza związkami azotu. W wyniku sporządzonego bilansu określa się różnicę pomiędzy całkowitą ilością wnoszonego azotu a wynoszonego z pola płodozmiennego rozumianego jako całość użytków rolnych, a zatem wchodzącego i wychodzącego z systemu produkcji rolnej¹⁸. Po stronie przychodów uwzględnia się ilość składnika wprowadzaną w formie nawozów mineralnych i naturalnych, a także ilości dostarczane do gleby z materiałem siewnym (sadzeniakowym), a w przypadku azotu również opad z atmosfery¹⁹ i wiązanie biologiczne. Po stronie rozchodów bilansu brutto uwzględnia się natomiast ilości składników w plonach głównych roślin zbieranych z gruntów ornych i użytków zielonych oraz w dających się określić zbieranych plonach ubocznych i poplonach (rys. 1). Saldo bilansu azotu brutto w stosunku do salda netto jest powiększone o wielkość emisji jego związków, tzw. „strat” gazowych, postaci amoniaku (NH₃) oraz tlenków i podtlenków azotu

¹³ Kremer A. M.: Nutrient Budgets EU-27, Norway, Switzerland. Methodology and Handbook. Eurostat/OECD. EC Eurostat, Luxembourg 2013. (ver. 1.02, 17.05.2013)

¹⁴ OECD: Gross Nitrogen Balances. Handboo. OECD Secretariat, Paris, 2004, **the 2nd draft**

¹⁵ Kopiński J.: Bilans azotu brutto jako agrośrodowiskowy wskaźnik zmian intensywności produkcji rolniczej w Polsce. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. Olsztyn, 2010, z. 547: 185-191.

¹⁶ Jadczyzyn T, Kopiński J.: Nawożenie azotem w Polsce – aspekt produkcyjny i środowiskowy. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2013, z. 34(8): 125-143.

¹⁷ Fotyma M., Kuś J.: Zrównoważony rozwój gospodarstwa rolnego. Pam. Puł., 2000, 120/I: 101-116.

¹⁸ Poland's National Inventory Reports. Greenhouse Gas Inventory for 1988-2012. IOŚ, KOBiZE, Warszawa, Maj 2014, ss. 417.

¹⁹ Dane GIOŚ: <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/air/quality/type/W> (6.06.2024).

(NO, N₂O) powstających w procesie produkcji zwierzęcej oraz przy przechowywaniu i stosowaniu nawozów naturalnych, a także azotowych nawozów mineralnych, osadów ściekowych oraz związków emitowanych z gleby, w tym m.in. w trakcie zabiegów uprawowych. Pełna ocena sald bilansu składników nawozowych powinna być dokonywana na podstawie okresu obejmującego minimum 3 lat. Saldo bilansu (brutto) składników nawozowych na poszczególnych poziomach dla porównań odnoszone jest do jednostki powierzchni ha użytków rolnych wykorzystywanych rolniczo, utrzymywanych w dobrej kulturze (UR w d.k.). W tabeli 1 zestawiono główne elementy bilansu azotu oraz fosforu brutto (strony przychodowej i rozchodowej).

Tabela 1. Elementy bilansu brutto azotu

Oznaczenie	Składowe elementy bilansu azotu
S _{min}	Nawozy mineralne
S _{org}	Nawozy naturalne
N _{sym}	Azot wiązany symbiotycznie
N _{atm}	Azot w opadzie z atmosfery
S _{msi}	Materiał siewny i sadzeniaki
S _{wyn}	Pobranie z plonami roślin
SNB	Saldo bilansu brutto azotu (N) $SNB = S_{min} + S_{org} + N_{sym} + N_{atm} + S_{msi} - S_{wyn}$
SP	Saldo bilansu brutto fosforu (P) $SPB = S_{org} + S_{min} + S_{msi} - S_{wyn}$

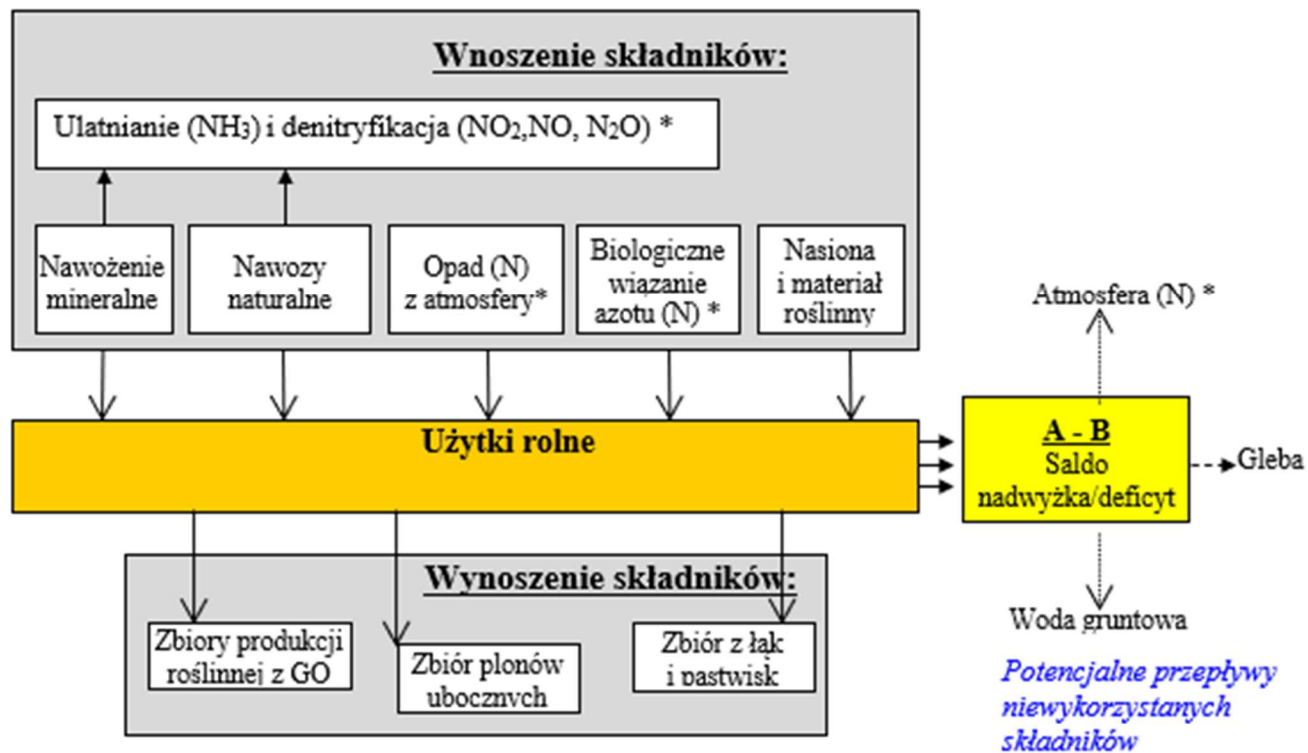
Źródło: Opracowanie własne

Źródła danych i zakres analizy

Ekspertyzę opracowano na podstawie danych:

- Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowego Instytutu Badawczego w Puławach (IUNG-PIB);
- Głównego Urzędu Statystycznego w Warszawie (GUS);
- Inspekcji Ochrony Środowiska uzyskanych w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (IOŚ)
- Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE),

- Europejskiego Urzędu Statystycznego EUROSTAT (data dostępu: 24.03.2024).



Zródło: opracowanie własne na podstawie: Kremer A. M.: *Nutrient Budgets EU-27, Norway, Switzerland. Methodology and Handbook*. Eurostat/OECD. EC Eurostat, Luxembourg 2013. (ver. 1.02, 17.05.2013)
 (*) – dotyczy tylko bilansu azotu

Rys. 1. Główne elementy bilansu brutto azotu brutto (N), fosforu (P) (*gross nutrients balances*) według metody EUROSTAT/OECD

Porównania sald bilansu azotu brutto oraz fosforu dokonano na podstawie danych EUROSTAT (porównanie międzynarodowe) oraz wyników analiz własnych (porównania na poziomie województw), dokonanych na podstawie danych GUS dotyczących: zbiorów upraw poszczególnych roślin²⁰, zużycia nawozów mineralnych (NPK) i wapniowych²¹, pogłowia zwierząt inwentarskich,²² powierzchni użytków rolnych i struktury zasiewów²³. Analiza, w układzie dynamicznym, obejmowała porównanie sald w latach 2019-2021 w odniesieniu do lat 2011-2013. Na potrzeby poniższej ekspertyzy, do porównań międzynarodowych, źródłem danych były wyniki bilansów azotu brutto (GNB) oraz bilansów fosforu brutto (GPB) z urzędu statystycznego Unii Europejskiej EUROSTAT-u (data dostępu: 24.03.2024). Przedmiotem analizy było porównanie sald bilansów następujących krajów: Dania, Niemcy, Francja, Włochy, Węgry, Niderlandy, Polska, Rumunia, Finlandia i Szwecja. Obliczono również średnie salda GNB i GPB dla p.cz. UE (27) oraz dla krajów członkowskich Komisji Ochrony Środowiska Morskiego Bałtyku – HELCOM (Dania, Estonia, Finlandia, Litwa, Łotwa, Niemcy, Polska, Szwecja) z wyłączeniem Rosji. Średnie saldo bilansów azotu i fosforu dla p.cz. UE, w latach 2011-2019, nie uwzględnia faktycznych wyników dla Danii, Włoch i Węgier, które nie raportowały wyników w latach 2016-2019 (Dania) i 2018-2019 (Węgry i Włochy). Rzeczone dane nie są udostępnione ani na stronach Europejskiej Agencji ds. Środowiska (EEA), ani na stronach OECD. W celu dokonania całościowej analizy policzono średnie wartości GNB oraz GPB z dostępnych lat (dla tych państw) i obliczone wartości podstawiono za brakujące dane. Dlatego podczas formułowania wniosków z uzyskanych wyników należy mieć na uwadze, że wyniki dla Włoch i Węgier za lata 2018-2019 oraz dla Danii za lata 2016-2019 są obarczone dużym poziomem niepewności i są uśrednionymi wartościami GNB i GPB od roku 2011.

Kryteria oceny sald bilansu azotu brutto i fosforu

Ze względu na ochronę środowiska bilans składników pokarmowych powinien być teoretycznie zrównoważony. Tak się dzieje na ogół w ekosystemach zamkniętych, naturalnych z których nie zbiera się żadnej masy roślinnej²⁴. Dotyczy to także oceny sald fosforu i potasu, gdzie saldo bilansu tych składników powinno być bliskie „0”. Naturalny obieg składników

²⁰ Produkcja upraw rolnych i ogrodnich (2002-2019), GUS, Warszawa, 2003-2020.

²¹ Środki produkcji w rolnictwie w roku gospodarczym 1999/2000...2019/2020. GUS, Warszawa, 2001-2021.

²² Zwierzęta gospodarskie w 2014.. 2019 roku. GUS, Warszawa, 2014-2020.

²³ Użytkowanie gruntów, powierzchnia zasiewów i pogłowia zwierząt gospodarskich w 2002, ... 2017 roku. GUS, Warszawa, 2003-2020.

²⁴ Tamże 13.

pokarmowych, a zwłaszcza azotu ulega zakłóceniu (przerwaniu) w trakcie produkcji rolniczej. Część azotu jest wyprowadzana poza system glebowy podczas zbioru roślin czy podczas wypasu zwierząt. Część związków azotu wydostaje się z obiegu rolniczego do hydrosfery i atmosfery, także w procesie działalności człowieka^{25,26}. Dzieje się tak m.in. w trakcie praktyk rolniczych sprzyjających większej denitryfikacji i powstawaniu lotnych związków azotu czy podtlenku azotu. Do strat azotu w glebie przyczynia się również pozostawianie jej bez okrycia roślinnością, szczególnie w warunkach dużych opadów i niskich temperatur. Dlatego mimo znacznych ilości azotu, dla pokrycia zwiększonego zapotrzebowania przez rośliny oraz jako przeciwdziałanie powstającym stratom, niezbędny jest jego dodatkowy wkład. W pewnym stopniu straty azotu z obiegu są niwelowane przez rośliny z rodziny bobowatych oraz nawozy organiczne i naturalne. Poważnym źródłem dodatkowego dopływu azotu do obiegu, wraz z rozwojem rolnictwa industrialnego, stały się nawozy nieorganiczne (mineralne). Jednak w trakcie nawożenia organicznego i mineralnego oraz w czasie przechowywania tych nawozów także powstają straty azotu, gdyż nie w każdej formie jest on w pełni absorbowany do gleby i dostępny (przyswajalny) dla roślin. Bardzo ważna jest tu forma nawozu, sposób i termin aplikacji. Dlatego w tej materii istnieje wciąż potencjał optymalizacji gospodarki nawozowej, zwłaszcza poprzez uregulowanie odczynu gleb i w konsekwencji lepszą efektywność wykorzystania składników pokarmowych (jako środek do poprawy produktywności produkcji roślinnej i ograniczenia możliwych strat do środowiska)^{27,28}.

²⁵ Fotyma M., Igras J., Kopiński J., Podyma W.: Ocena zagrożeń nadmiarem azotu pochodzenia rolniczego w Polsce na tle innych krajów europejskich. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2010, 20: 53-75.

²⁶ Fotyma M., Igras J., Kopiński J.: Wykorzystanie i straty obszarowe azotu z polowej produkcji roślinnej. [w:] Igras J., Pastuszek M. (red.) *Udział polskiego rolnictwa w emisji związków azotu i fosforu do Bałtyku*. IUNG-PIB Puławy, MIR Gdynia, 2009b: 105-158.

²⁷ Kopiński J., Ochal P.: Oszacowanie możliwości ograniczenia makroskładników nawozowych w wyniku poprawy stanu agrochemicznego gleb (odczynu) do roku 2030. *Mat. ekspertyzy dotyczące ocen wpływu na sektor rolny, itp. wraz z propozycją możliwych do wdrożenia w Polsce rozwiązań w zakresie jednego z celów Strategii F2F oraz Bioróżnorodności tj.: ograniczenia zużycia nawozów*. Ekspertyza dla MRiRW, Puławy, 5.06.2021 (materiały niepublikowane)

²⁸ Kopiński J., Jurga B.: Ekspertyza pt. „Prognoza bilansu azotu, fosforu brutto i potasu do roku 2030, z uwzględnieniem zmian zużycia N, P, K w nawozach, w tym mineralnych, produktywności roślinnej, w kontekście możliwych działań redukcyjnych (ograniczających) straty tych biogenów”. Ekspertyza w ramach „Analiza i propozycje wskaźników dla potrzeb Planu Strategicznego Wspólnej Polityki Rolnej, dotyczących realizacji celu Strategii „Bioróżnorodności” oraz Strategii „Od pola do stołu” (F2F) – ograniczania strat składników pokarmowych oraz stosowania/zużycia nawozów”. Ekspertyza na potrzeby Departamentu Klimatu i Środowiska MRiRW, Puławy, 2021, 3-31.

W praktyce, uwzględniając potrzeby produkcyjne oraz stan zasobności gleb w fosfor przyjmuje się, że jego saldo powinno pozostawać w granicach od 1 do 4 kg P/ha UR^{29,30}. Zrównoważenie bilansu azotu, zwłaszcza brutto, jest jednak w praktyce niemożliwe, gdyż rolnictwo nie mogłoby realizować swoich podstawowych celów produkcyjnych i ekonomicznych, uwzględniając bezpieczeństwo żywnościowe kraju. Z przeglądu wcześniejszych opracowań i prac dotyczących oceny bilansu azotu brutto wynika, że saldo tego wskaźnika powinno znajdować się w granicach 30-70 kg N/ha UR. Przeciętnie dla Polski, saldo to powinno oscylować ok. 50 kg N/ha UR, $\pm 10\%$. W tym względzie przyjęcie obowiązywania maksymalnych nadwyżek na poziomie 60 czy 80 kg N/ha UR w skali kraju może wydawać się do przyjęcia. Jednak w skali poszczególnych regionów (województw) ocena tej sytuacji może nie być tak jednoznaczna. Dlatego też wyznaczone maksimum powinno uwzględniać (odzwierciedlać) także znaczne regionalne zróżnicowanie warunków funkcjonowania polskiego rolnictwa^{31,32}. W wykazywanej nadwyżce bilansowej uwzględnione są straty gazowe związków azotu, tzw. ulatnianie (emisja) szacowane przez KOBiZE oraz straty powodowane chociażby przez zmienne, wynikające z niekorzystnego przebiegu warunków pogodowych czy słabą jakością i stanem agrochemicznym gleb (zakwaszenie), a także rzeczywisty poziom azotu działającego czy też nie w pełni wykorzystane inne tzw. poza nawozowe czynniki produkcji, m.in. postęp genetyczny, stymulatory wzrostu, ograniczające uzyskiwanie plonów zbliżonych do potencjalnych. Uwzględniając omówione wyżej czynniki, pomimo sporządzania bilansu każdego roku, przyjęto, że do ocen i porównań (analiz) okres ten powinien obejmować minimum 3 lata. Ogranicza się wówczas dużą zmiennością powodowaną warunkami pogodowymi lub rynkowymi.

W ocenie sald bilansów należy pamiętać o znacznym zróżnicowaniu regionalnym polskiego rolnictwa, widocznym nawet na poziomie województw w zakresie organizacji i poziomie intensywności produkcji³³, a wynikającym z różnych uwarunkowań przyrodniczo-

²⁹ Kopiński J.: Ekspertyza pt. Metody określenia sald bilansów NPK oraz zakresu ich bezpieczeństwa dla środowiska przyrodniczego. Ekspertyza na potrzeby IERiGŻ-PIB Warszawa, czerwiec 2017, 25 str. (mat. niepublikowane)

³⁰ Wrzaszcz W., Kopiński J.: Gospodarka nawozowa w Polsce w kontekście zrównoważonego rozwoju rolnictwa. Wyd. Studia i monografie, IERiGŻ-PIB, 2019, 178, ss. 145.

³¹ Poczta W., Bartkowiak N.: Regionalne zróżnicowanie rolnictwa w Polsce. J. Agribus. Rural Dev., 23(1), 95-109.

³² Matyka M., Krasowicz S., Kopiński J., Kuś J.: Regionalne zróżnicowanie zmian produkcji rolniczej w Polsce. Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy, 2013, 32(6), 143-165.

³³ Kopiński J., Krasowicz S.: Regionalne zróżnicowanie nawozochłonności produkcji roślinnej. (W:) Uwarunkowania i perspektywy rozwoju produkcji rolniczej w różnych regionach Polski. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2021, (materiały niepublikowane, w przygotowaniu do druku)

organizacyjnych i ekonomiczno-produkcyjnych³⁴, a nawet historycznych. Duże różnicowanie regionalne widoczne jest także w ocenie bilansów głównych składników nawozowych i efektywności ich wykorzystania^{35,36,37}.

3. Wyniki

Porównanie międzynarodowe bilansów azotu i fosforu

Saldo bilansu azotu brutto GNB

Z analizy danych zamieszczonych w tabeli 2 wynika, że saldo bilansu azotu brutto jest dodatnie we wszystkich analizowanych p.cz. UE (tab. 2), z wyjątkiem Rumunii (śr. GNB: -5,5 kg N/ha) i wykazuje ogromne zróżnicowanie (o rząd wielkości) od ok -27,4 kg N/ha w Rumunii do ponad 196 kg N/ha w Niderlandach. Na tle innych państw nadwyżka bilansowa azotu brutto w Polsce wykazywała stosunkowo niewielką zmienność i mieściła się w przedziale od 44,1 do 61,8 kg N/ha. Średnia nadwyżka bilansowa azotu brutto dla 27 p.cz. UE wynosiła, w analizowanym okresie 60,2 kg N/ha i jest znacznie wyższa od średniej wartości salda bilansu azotu obserwowanego w krajach HELCOM (38,9 kg N/ha), co może świadczyć o znacząco lepszym gospodarowaniu azotem w tych państwach. Średnia nadwyżka bilansowa azotu dla Polski wynosiła, w latach 2011-2019, nieco poniżej 50 kg N/ha i jest to wielkość poniżej średniego poziomu obserwowanego w p.cz. UE (27), ale wyższa od średniego salda bilansu azotu brutto obserwowanego w krajach grupy HELCOM. Z danych EUROSTAT wynika, że na przestrzeni ostatnich 9 lat w analizowanych p.cz.UE nie nastąpiła widoczna zmiana w wymiarze ochrony środowiska, tj. nadwyżka bilansowa azotu nie uległa znaczącym redukcjom. Obserwowana jest tylko minimalna tendencja spadkowa (która jest nieistotna statystycznie).

³⁴ Kopiński J., Krasowicz S.: Regionalne zróżnicowanie nawozochłonności produkcji roślinnej. (W:) Teoretyczne podstawy racjonalnego nawożenia. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2021, 65(19): 123-149.

³⁵ Jadczyzyn T, Kopiński J.: Nawożenie azotem w Polsce – aspekt produkcyjny i środowiskowy. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2013, z. 34(8): 125-143.

³⁶ Kopiński J.: Criterion to determine optimum surpluses of gross nitrogen balance on the level NUTS-0, NUTS-2. Acta Sci. Pol. Agricultura, 2016, 15(1): 29-36.

³⁷ Kopiński J.: Ocena gospodarowania fosforem w procesie produkcji rolniczej na poziomie NUTS-0, NUTS-2. Rocz. Nauk. SERiA, 2016, 18(1): 131-137.

Tabela 2. Bilans azotu brutto [kg/ha] dla wybranych krajów członkowskich Unii Europejskiej, krajów HELCOM i Polski za lata 2011-2019

Kraj	Bilans azotu brutto [kg/ha]									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Średnia 2011-2019
Polska	53,0	48,1	54,8	39,8	47,8	44,1	48,4	61,8	47,4	49,5
Dania	88	83,4	87,1	79,8	80	:	:	:	:	83,7*
Finlandia	50,2	47,5	46,5	47,5	49,5	47,4	51,5	58	43,7	49,1
Francja	49,1	23,5	29,7	29,6	37,3	47,5	33,7	40,8	38	36,6
Niderlandy	172,8	170	171,4	162,6	192,4	194,5	182	196,0	165,8	178,6
Niemcy	88,6	75,1	78,9	65,9	81,8	69,05	61,51	77,9	53,4	72,5
Rumunia	-11,2	16,3	4,2	-0,7	8,6	-1,4	-12,6	-27,4	-24,9	-5,5
Szwecja	42,2	31,2	34,5	30,7	31,7	36,7	35,3	60,6	26,1	36,6
Węgry	30,8	42,7	37	24,6	36,2	28,5	33,3	:	:	33,3*
Włochy	62,5	79,6	70,1	65,7	66	64,6	68	:	:	68,1*
HELCOM	52,8	45,8	45,1	39,5	43,0	27,8	27,4	41,0	28,0	38,9
UE (27)	62,6	61,7	61,4	54,6	63,1	61,5	58,5	65,3	53,5	60,2

* średnie wartości z dostępnych serii danych od roku 2011

Porównując wyniki salda bilansu azotu brutto dla lat 2011-2019 dla krajów HELCOM oraz p.cz. UE, można wysnuć kilka spostrzeżeń:

1. Widoczna tendencja spadkowa sald dla krajów HELCOM: Saldo bilansu azotu brutto dla HELCOM uległo zmniejszeniu z 52,8 kg N/ha w 2011 roku do 28,0 kg N/ha w 2019 roku. Na przestrzeni analizowanych lat można zauważyć ogólny trend zmniejszania nadmiaru azotu w regionie Morza Bałtyckiego.
2. Saldo bilansu azotu brutto w krajach grupy HELCOM jest znacznie niższe niż w p.cz. UE (27). Oznacza to, że gospodarka azotem w rolnictwie państw regionu Morza Bałtyckiego jest bardziej zoptymalizowana niż w p.cz. UE jako całości.

3. Stabilność sald bilansowych w p.cz. UE: Wartości dla p. cz. UE (27) pozostają stosunkowo stabilne w badanym okresie, oscylując wokół 60 kg N/ha z pewnymi fluktuacjami, ale bez wyraźnej tendencji wzrostowej lub spadkowej.
4. Różnice w podejściach i skutkach działań: Różnice w saldach bilansu azotu między krajami HELCOM a p.cz. UE mogą wynikać z różnic w polityce ochrony środowiska, praktykach rolniczych (systemów produkcji) i innych czynnikach regionalnych, w tym w znacznym stopniu wynikają także z uwarunkowań przyrodniczych (jakość gleb), klimatycznych (zmiennosc opadów) czy poziomu intensywności produkcji rolniczej.

Salda bilansu azotu brutto dla wybranych państw, krajów HELCOM oraz p.cz. UE w okresach trzyletnich 2011-2013, 2014-2016 oraz 2017-2019 zostały zaprezentowane w tabeli 3, a w celu ułatwienia wizualnej interpretacji danych - na podstawie tabeli 3 sporządzono również wykres, przedstawiony na rys. 2. Porównując GNB w trzech wybranych okresach (2011-2013, 2014-2016 i 2017- 2019) można zauważyć zdecydowany spadek średniej nadwyżki azotu w Rumunii (do poziomu -21,6 kg N/ha), Niemczech i krajach HELCOM. O ile redukcję nadwyżki azotu w Niemczech i krajach HELCOM można oceniać pozytywnie (wciąż jest to saldo dodatnie) o tyle w Rumunii obserwujemy zubażanie gleby z azotu. Wyczerpywanie glebowych zasobów azotu, bez ich uzupełniania, jest w dłuższej skali zjawiskiem niekorzystnym, degradującym żyzność gleby i powinno mu się przeciwdziałać. Z drugiej strony, Niderlandy prezentują najwyższe saldo bilansu azotu spośród badanych państw, co należy tłumaczyć intensywną produkcją rolniczą i stosowaniem wysokich dawek nawozów azotowych.

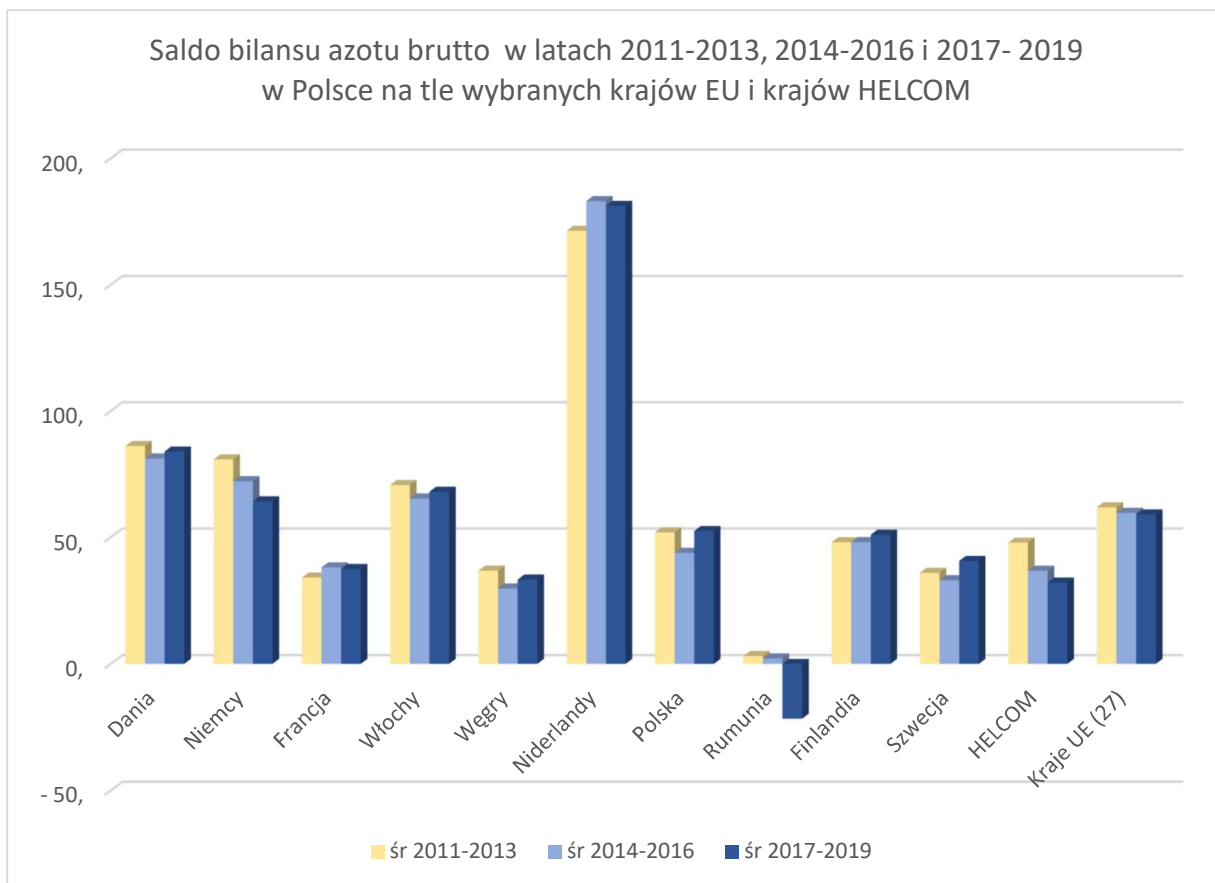
Saldo bilansu azotu w większości krajów (Dania, Francja, Włochy, Finlandia i Szwecja) wykazuje niewielkie fluktuacje, co sugeruje pewną stabilność w zarządzaniu azotem. Polska wykazuje niewielkie fluktuacje w wielkościach salda bilansu azotu, oscylując wokół wartości podobnych do średniej dla p.cz. UE. Saldo bilansu azotu dla krajów HELCOM wykazuje tendencję spadkową, co sugerowałoby skuteczność działań podejmowanych w celu poprawy jakości wód w regionie Morza Bałtyckiego.

Tabela 3. Porównanie sald bilansu azotu brutto dla wybranych państw, krajów HELCOM oraz państw członkowskich UE okresach trzyletnich 2011-2013, 2014-2016 oraz 2017-2019 (kg N/ha)

Kraj	Salda bilansu azotu brutto (kgN/ha)		
	2011-2013	2014-2016	2017-2019
Dania	86,2	81,3	84
Niemcy	80,9	72,3	64,3
Francja	34,1	38,1	37,5
Włochy	70,7	65,4	68,1
Węgry	36,8	29,8	33,3
Niderlandy	171,4	183,2	181,3
Polska	52,	43,9	52,5
Rumunia	3,1	2,2	-21,6
Finlandia	48,1	48,1	51,1
Szwecja	36,0	33,0	40,7
HELCOM	47,9	36,8	32,1
p.cz. UE (27)	61,9	59,7	59,1

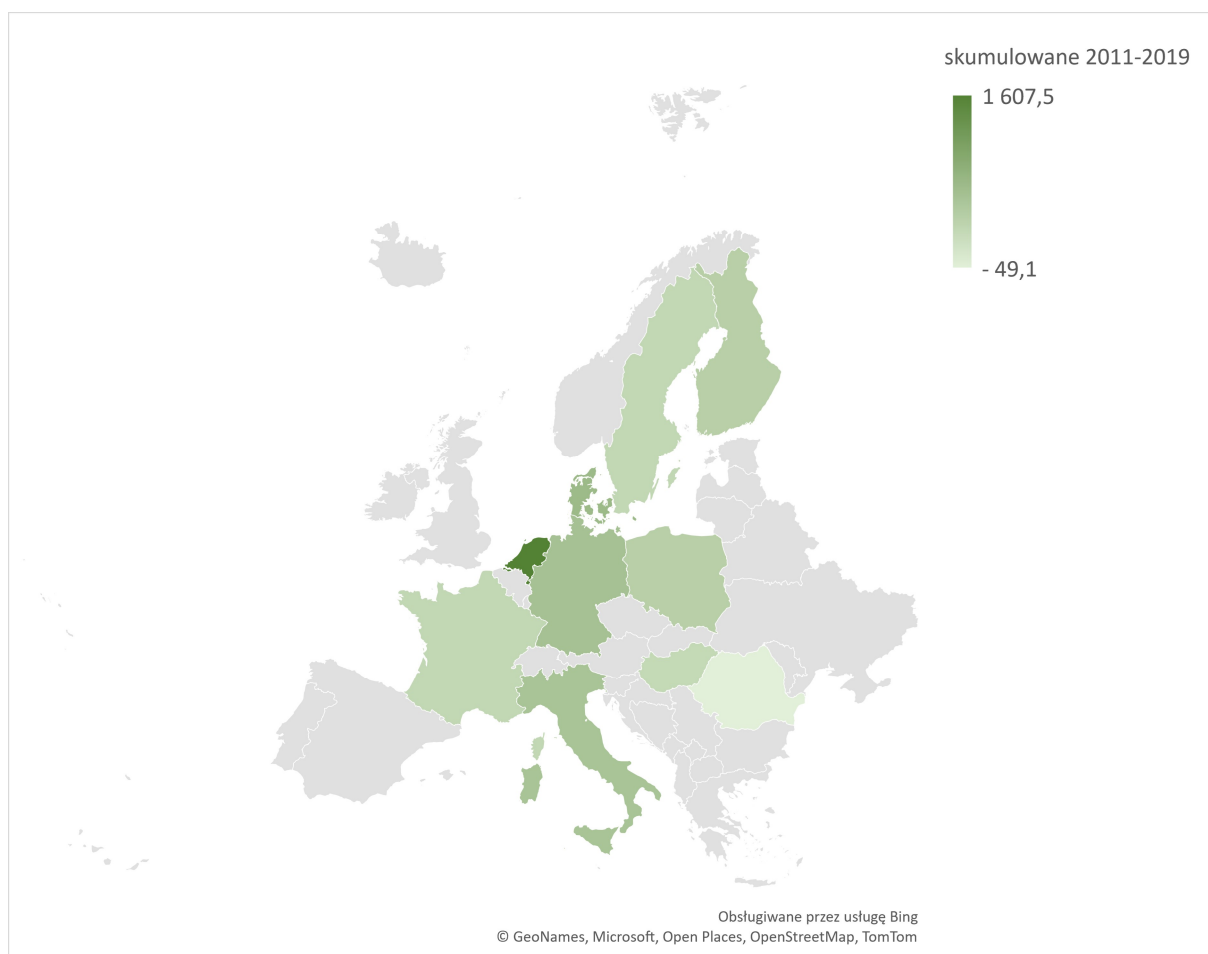
Podsumowując, analiza sald bilansu azotu brutto dla poszczególnych państw oraz organizacji takich jak HELCOM i UE wskazuje na różnorodność w podejściach i wynikach zarządzania azotem na przestrzeni ostatnich 9 lat. Tendencje spadkowe mogą świadczyć o skuteczności podejmowanych działań.

Analizując skumulowaną nadwyżkę bilansu azotu brutto za lata 2011-2019 dla wybranych p.cz. UE, krajów HELCOM i Polski (rys.3), można zauważyć, że Niderlandy wykazują zdecydowanie najwyższe sumaryczne saldo azotu (1608 kg N/ha!) w porównaniu z innymi badanymi państwami i regionami. Dania, Niemcy, Włochy mają również alarmujące zsumowane nadwyżki bilansu azotu i wydają się utrzymywać stosunkowo stabilne saldo azotu na przestrzeni analizowanych lat. Finlandia, Szwecja i Polska wykazują umiarkowane nadwyżki bilansu azotu, które również nie podlegają znaczącym fluktuacjom na przestrzeni analizowanego okresu.



Rys. 2. Porównanie sald bilansu azotu brutto dla wybranych państw, krajów HELCOM oraz p.cz. UE okresach trzyletnich 2011-2013, 2014-2016 oraz 2017-2019 (kg N/ha)

Rumunia wykazuje ujemne saldo bilansu azotu, co sugeruje, że kraj ten powinien podjąć działania racjonalizujące gospodarkę azotową, lub wyniki te wynikają z innego podejścia metodycznego. Istniejące znaczne różnice w nadwyżkach bilansu azotu między badanymi krajami, mogą wynikać z różnic w praktykach rolniczych, poziomie rozwoju gospodarczego i polityce ochrony środowiska. Analiza skumulowanej nadwyżki bilansu azotu brutto unaocznia różnice w zarządzaniu azotem między różnymi krajami i regionami oraz pozwala zidentyfikować obszary wymagające dalszych działań w celu ograniczenia zanieczyszczeń azotowych.



Rys.3. Skumulowana nadwyżka bilansu azotu brutto za lata 2011-2019 w wybranych krajach (kg N/ha)

Saldo bilansu fosforu brutto GPB

W tabeli 4 przedstawiono wyniki bilansu fosforu brutto [kg/ha] dla wybranych p.cz. UE, krajów HELCOM i Polski. Wśród analizowanych państw i regionów można zaobserwować zróżnicowane tendencje w bilansie fosforu brutto. Niektóre kraje mają dodatni bilans, co oznacza nadmiar fosforu (największą nadwyżkę fosforu wśród analizowanych krajów wykazuje Dania - śr. 7,2 kg P/ha i Niderlandy – śr. 4,1 kg P/ha), podczas gdy inne kraje (Niemcy, Włochy, Węgry, Rumunia, Szwecja) mają ujemny bilans, co oznacza w skali globalnej, korzystanie z glebowych rezerw tego składnika. Wyróżniające się deficyty fosforu w krajowych systemach rolniczych obserwowane są w Niemczech i Rumunii (-2,7 oraz -3,2 kg P/ha).

Tabela 4. Bilans fosforu brutto [kg P/ha] dla wybranych p.cz. Unii Europejskiej, krajów HELCOM i Polski za lata 2011-2019

Kraj	Bilans fosforu brutto [kg P/ha]									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Średnia 2011-2019
Dania	7,0	7,0	8,0	7,0	7,0	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
Niemcy	-0,4	-2,6	-1,0	-3,7	-2,0	-2,9	-5,2	-1,9	-4,8	-2,7
Francja	2,5	0,2	1,6	0,5	0,9	2,9	0,4	2,1	1,1	1,4
Włochy	-3,0	-2,0	-2,0	-1,0	-1,0	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8
Węgry	-3,2	0,0	-0,5	-2,7	-0,9	-2,8	0,0	1,4	1,4	-0,8
Niderlandy	6,6	3,2	4,5	1,2	3,9	4,7	2,2	6,9	4,0	4,1
Polska	5,7	3,0	3,2	0,3	2,1	0,8	1,3	4,0	3,6	2,7
Rumunia	-3,0	1,0	-2,0	-2,0	-0,7	-3,1	-5,6	-7,5	-6,1	-3,2
Finlandia	3,7	3,7	3,9	3,8	4,0	3,6	5,6	5,8	3,3	4,2
Szwecja	-0,1	-0,4	0,1	-1,3	-1,6	-0,2	-0,7	4,1	-1,5	-0,2
HELCOM	2,3	1,6	2,4	1,1	1,6	0,3	0,3	2,0	0,0	1,3
p.cz. UE (27)	1,4	1,6	1,5	0,8	:	:	:	:	:	

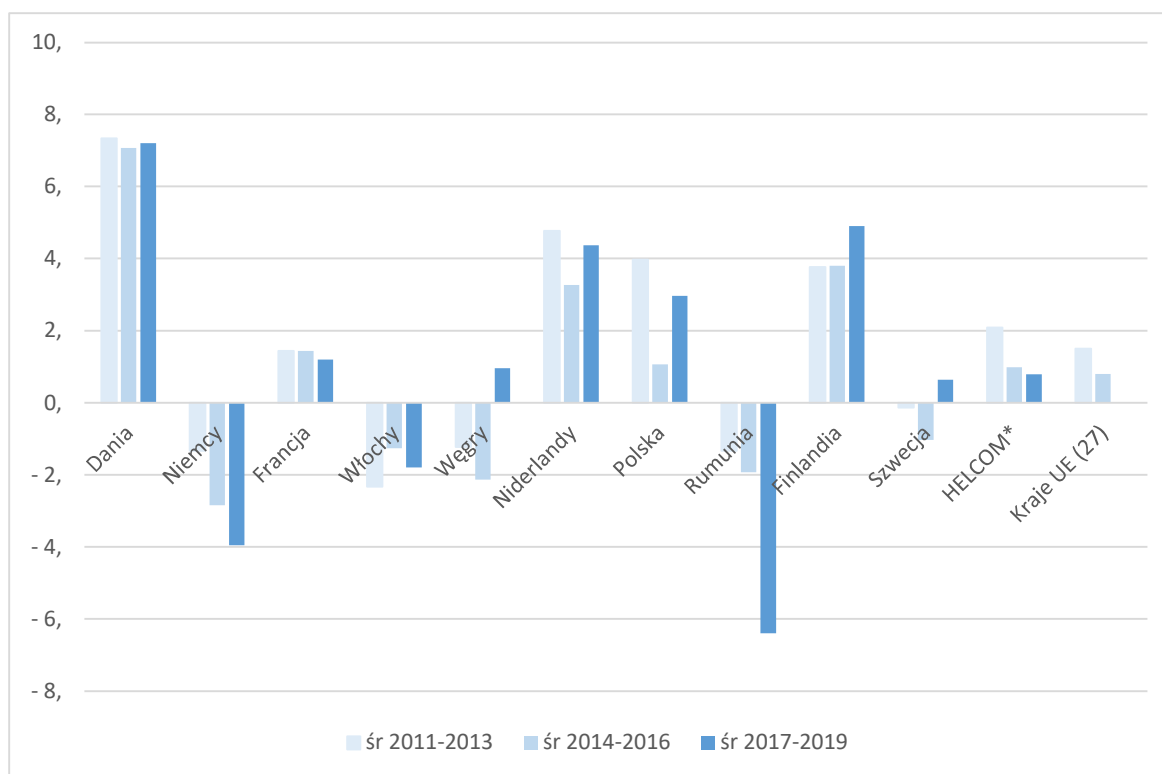
W niektórych krajach obserwuje się zmiany w bilansie fosforu w badanym okresie, co może być spowodowane różnymi czynnikami, takimi jak zmiany w praktykach rolniczych, polityce środowiskowej czy dostępności zasobów naturalnych. Bilanse fosforu dla krajów HELCOM wydają się być stosunkowo stabilne, oscylując wokół wartości dodatnich i wykazują tendencję malejącą, co może wskazywać na skuteczność podejmowanych wysiłków w zakresie optymalizacji nawożenia fosforem w regionie. Analiza bilansu fosforu brutto dla wybranych krajów i regionów pokazuje niejednolite tendencje i potrzeby zarządzania tym pierwiastkiem w glebach oraz środowisku wodnym. Wniosek ten sugeruje potrzebę indywidualnego podejścia do zarządzania fosforem, uwzględniającego specyficzne warunki i potrzeby poszczególnych krajów.

Analiza bilansu fosforu brutto dla Polski w porównaniu do innych krajów może dostarczyć wglądu w gospodarowanie tym pierwiastkiem w rolnictwie na tle pozostałych państw. Średnia wielkość bilansu fosforu dla Polski wynosiła 2,7 kg P/ha na przestrzeni lat 2011-2019. Polska ma dodatni bilans fosforu, co oznacza, że w ogólnej analizie wnosi nieznacznie więcej fosforu niż zużywa, ale w pewnym stopniu może to być usprawiedliwione znacznym udziałem gleb o niskiej i bardzo niskiej zasobności w ten składnik (ok. 1/3). Może to sugerować, że stosowane

praktyki rolnicze dostarczają wystarczającej ilości fosforu do gleb i istnieje jeszcze bardzo niewielka przestrzeń do usprawnienia gospodarowania tym składnikiem. Porównując bilans fosforu Polski z innymi krajami, można zauważyć, że Polska znajduje się w środkowej lub wyższej części tego zakresu. Oznacza to, że pod względem bilansu fosforu Polska nie wyróżnia się znacząco ani pod względem nadmiaru, ani deficytu fosforu w rolnictwie w porównaniu z innymi krajami europejskimi.

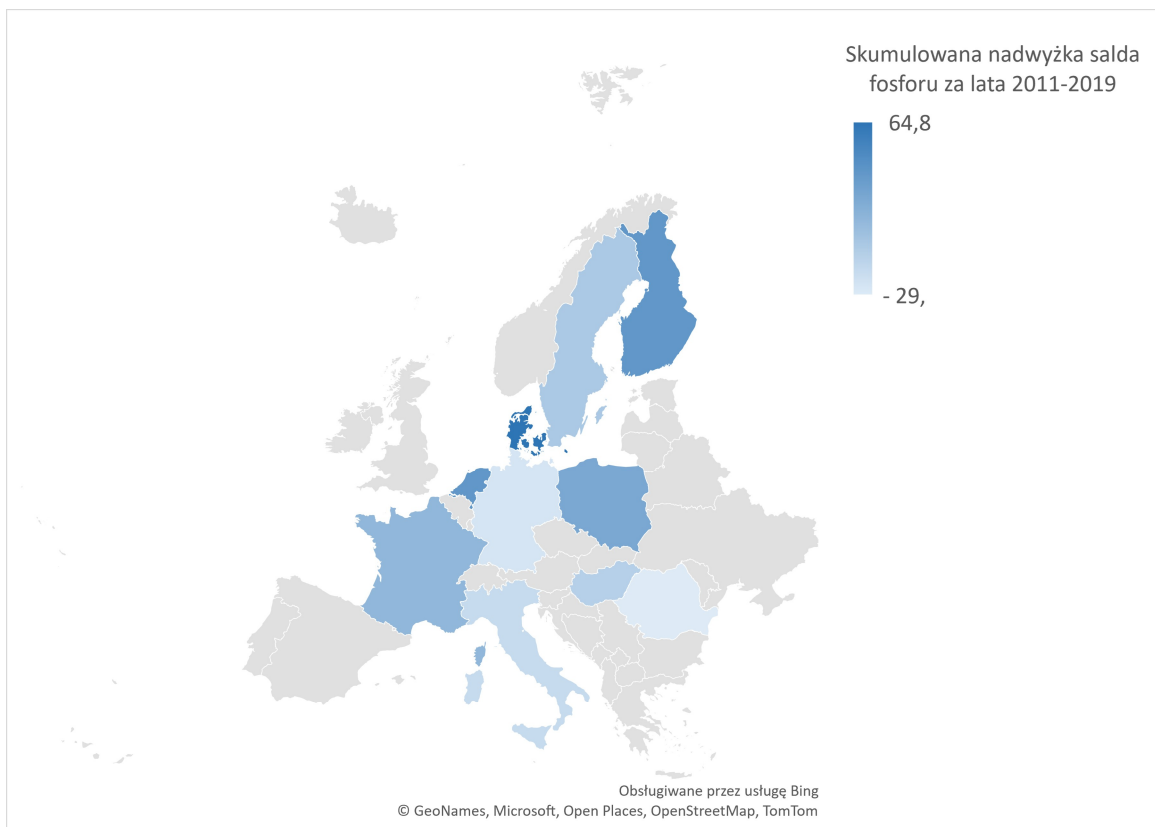
Rysunek 4 przedstawia saldo bilansu fosforu brutto w latach 2011-2013, 2014-2016 i 2017-2019 w Polsce na tle wybranych p.cz. EU i krajów HELCOM. Dania, Francja, Niderlandy, Finlandia oraz państwa HELCOM wykazują względną stabilność swoich bilansów fosforu na przestrzeni lat. Ich średnie wartości utrzymują się na podobnym poziomie w badanych okresach. Bilanse fosforu brutto w Niemczech i Rumunii wykazują tendencję malejącą w kolejnych badanych okresach. Polska i Szwecja wykazują pewną zmienność w swoich bilansach fosforu na przestrzeni lat. W Polsce, po relatywnie wysokiej wartości średniego bilansu w pierwszym okresie, następuje spadek w drugim okresie i ponowny wzrost w trzecim. W Szwecji, natomiast, wartości bilansu wahają się wokół zera.

Średnia wartość bilansu fosforu dla p.cz. UE (27) wykazuje tendencję malejącą na przestrzeni badanych okresów, co może sugerować, że wiele krajów w UE redukuje swoje nadwyżki fosforu. Analizując porównanie sald bilansu fosforu brutto dla krajów HELCOM w okresach trzyletnich (2011-2013, 2014-2016, 2017-2019), można zauważyć, że w pierwszym i drugim okresie (2011-2013 i 2014-2016) kraje HELCOM wykazywały dodatni bilans fosforu, oscylujący wokół wartości około 1,5-2,4 kg/ha. W trzecim analizowanym okresie (2017-2019) bilans fosforu dla krajów HELCOM spadł do zera, co oznacza, że ilość fosforu zużywanego przez kraje HELCOM do produkcji żywności i paszy była równoważna przez wnoszenie z nawozami i resztkami. Ten spadek może być interpretowany jako zmiana w gospodarowaniu fosforem lub usprawnienie gospodarowania tym składnikiem. Należy jednak zauważyć, że może to być sygnał, że istnieją wyzwania związane z gospodarowaniem fosforem w regionie.



Rys. 4 Saldo bilansu fosforu brutto w latach 2011-2013, 2014-2016 i 2017- 2019 w Polsce na tle wybranych p.cz. EU i krajów HELCOM (kg P/ha)

Podsumowując, analiza porównawcza sald bilansu fosforu brutto dla badanych państw i regionów wskazuje na różnorodność trendów i podejść w gospodarowaniu fosforem na przestrzeni lat. Tendencje malejące w niektórych krajach mogą świadczyć o skuteczności podejmowanych działań w celu ograniczenia nadmiarów fosforu, podczas gdy zmienność w innych krajach może wskazywać na potrzebę dalszych działań w zakresie optymalizacji zarządzania tym pierwiastkiem.



Rys. 5. Skumulowana nadwyżka bilansu fosforu brutto w kg/ha za lata 2011-2019 w wybranych krajach

Najwyższa skumulowana nadwyżka fosforu za lata 2011-2019 występuje w Danii, Finlandii i Niderlandach (odpowiednio: 64,8, 37,4 i 37,2 kg P/ha). Choć kompleksową ocenę salda bilansu fosforu należy przeprowadzać uwzględniając wiedzę o rodzaju, zasobności, odczynie gleb itp., to jednak nie można nie zauważyć, że tak znaczący nadmiar fosforu może powodować znaczące ryzyko dla środowiska w postaci: zagrożenia eutrofizacją i zanieczyszczeniem wód gruntowych, degradacji jakości gleb wykorzystywanych rolniczo i zaburzenia funkcjonowania ekosystemów naturalnych. Znacząco ujemne skumulowane saldo bilansu fosforu jest obserwowane w Niemczech, gdzie na przestrzeni 9 lat system produkcji rolniczej wykazuje deficyt 24,4 kg fosforu na hektar użytków rolnych. W Polsce skumulowana nadwyżka fosforu na przestrzeni analizowanych lat wyniosła 24 kg P/ha, co plasuje nasz kraj na 4 miejscu wśród analizowanych państw pod względem nadwyżki bilansowej fosforu i sugeruje potrzebę podjęcia działań racjonalizujących gospodarkę fosforem w skali kraju.

Saldo bilansu azotu w Polsce

Saldo bilansu azotu brutto oznacza różnicę pomiędzy dopływem ze wszystkich źródeł i odpływem w produktach roślinnych zabieranych z pola. Poniżej podano wzór wyliczenia salda bilansu azotu brutto.

SNB	Saldo bilansu brutto azotu (N)
	$\text{SNB} = S_{\text{min}} + S_{\text{org}} + N_{\text{sym}} + N_{\text{atm}} + S_{\text{msi}} - S_{\text{wrt}} - S_{\text{wrp}} - S_{\text{zup}}$

Objaśnienia skrótów:

SNB – saldo bilansu azotu brutto

S_{min} – azot w nawozach mineralnych i osadach przemysłowych i komunalnych

S_{org} – azot w wydalanych odchodach przez zwierzęta gospodarskie

N_{sym} – azot wiązany biologicznie przez rośliny bobowate i trawy na użytkach trwałych i przemiannych

N_{atm} – azot w opadzie (depozycje) atmosferycznym

S_{msi} – azot w materiale siewnym i sadzeniakach

S_{wrt} – azot wynoszony w zbiorach roślin towarowych

S_{wrp} – azot wynoszony w zbiorach roślin zbieranych na pasze

S_{zup} – azot w zbieranych plonach ubocznych roślin oraz poplonach

W tabeli 5 przedstawiono wyniki bilansów azotu brutto na poziomie regionalnym i krajowym (lata 2019-2021) oraz skalę zmian jakie zaszły od lat 2011-2013. Z przeprowadzonej oceny wynika, w ostatnich trzech latach nadwyżka bilansowa azotu brutto w Polsce wynosiła 38,7 kg N·ha⁻¹ UR w dkr i uległa zmniejszeniu w odniesieniu do stanu z lat 2011-2013 przeciętnie o 13,4 kg N·ha⁻¹ UR w dkr (tab. 5), kiedy to średnio saldo mieściło się na poziomie 52 kg N·ha⁻¹ UR w dkr. Jednocześnie w tym czasie wzrosła efektywność wykorzystania azotu o 15 p.p. do poziomu około 70%. W odniesieniu do analizowanych parametrów w Polsce występuje bardzo duże zróżnicowanie regionalne. W ostatnich latach ujemne saldo bilansu azotu notowane jest w województwie podkarpackim, natomiast dość wysokie nadwyżki bilansu azotu notowane są w województwach: kujawsko-pomorskim (55 kg N·ha⁻¹ UR w dkr) i wielkopolskim (78 kg N·ha⁻¹ UR w dkr), z efektywnością wykorzystania azotu mniejszą niż 65% (tab. 5). Województwa te należą do wiodących w produkcji żywca wieprzowego³⁸. W województwach wyróżniających się bardzo wysokimi nadwyżkami bilansu azotu na pola uprawne wnoszone są znaczne ilości tego składnika zarówno w nawozach mineralnych, jak i

³⁸ Kopiński J.: Kierunki zmian produkcji zwierzęcej w Polsce w okresie członkostwa w UE. (W:) Zmiany w rolnictwie po 20 latach członkostwa Polski w UE. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2024, (w druku)

naturalnych (pochodna wysokiej dostawy pasz przemysłowych), które pomimo wysokiej intensywności produkcji roślinnej nie są w wystarczającym stopniu wykorzystywane.

Oczywiście, w skali regionalnej na wyniki bilansu azotu brutto wpływ mają także inne zmienne, tj.:

- wilgotność gleby,
- warunki pogodowe
- jakość i stan agrochemiczny gleb, w tym czynniki limitujące (wg prawa minimum Liebiga, które tłumaczy, że wzrost organizmu jest ograniczony przez najslabiej dostępny czynnik, nawet jeśli inne zasoby są obficie dostępne; w praktyce oznacza to, że jeśli roślina potrzebuje wielu składników odżywczych do wzrostu, ale brakuje jej jednego konkretnego składnika, to właśnie ten brakujący składnik ograniczy jej wzrost, niezależnie od ilości innych dostępnych składników), tj. zakwaszenie, czy deficyt manganu lub fosforu
- rzeczywisty poziom azotu działającego
- poza nawozowe czynniki produkcji, m.in. postęp genetyczny, stymulatory wzrostu, rolnictwo precyzyjne 4.0 i 5.0, które umożliwiają uzyskiwanie plonów nie zbliżonych do potencjalnych, ale optymalnych.

Uzyskane wyniki bilansu azotu nawet na poziomie wojewódzkim mogą wskazywać na istnienie potencjalnych punktowych i obszarowych zagrożeń środowiskowych. Niewątpliwie pozytywnie należy ocenić fakt, że w omawianym okresie we wszystkich województwach nastąpiło zmniejszenie sald bilansowych azotu, w przedziale od 3,5 kg N·ha⁻¹ UR w dkr w województwie mazowieckim, do 20-25 kg N·ha⁻¹ UR w dkr w województwach: opolskim, dolnośląskim i zachodniopomorskim, wyspecjalizowanych w uproszonej organizacyjnie produkcji roślinnej (tab. 2). Porównanie wyników i zmian w bilansie azotu brutto dla województw jest potwierdzeniem postępującej polaryzacji intensywności produkcji rolniczej^{39,40}. Zachodzące zmiany są widoczne w układzie przestrzennym i czasowym.

W świetle konsekwencji przyjęcia krajowych bądź regionalnych limitów nadwyżek bilansu azotu brutto, należy stwierdzić, że o ile przeciętny poziom obecnego salda bilansu dla Polski mieści się poniżej proponowanych limitów, tj. 60 lub 80 kg N·ha⁻¹ UR w dkr, to na poziomie

³⁹ Kopiński J.: Stopień polaryzacji intensywności i efektywności produkcji rolniczej w Polsce w ostatnich 10 latach. Roczn. Nauk. SERiA, 2013, 15(1): 97-103.

⁴⁰ Kopiński J.: Określenie stopnia polaryzacji głównych kierunków produkcji zwierzęcej w Polsce. Roczn. Nauk. SERiA, 2014, 16(2): 142-147.

regionalnym tylko w województwie wielkopolskim saldo bilansu azotu przekracza poziom 60 kg N·ha⁻¹ UR w dkr i jest blisko drugiego poziomu limitu, gdyż wynosi 78,2 kg N·ha⁻¹ UR w dkr.

Punktem wyjściowym analizy mającej określić optimum, poprawnego salda bilansu azotu brutto było przyjęcie założenia, sformułowanego wcześniej przez Fotymę M. i in.⁴¹, że jego ilość odprowadzana z pola w zbiorach roślin powinna odpowiadać ilości N dopływającemu ze wszystkich źródeł w przeliczeniu na tzw. azot działający. Ilość azotu działającego (Ncdz) wyznaczono przez pomnożenie całkowitej ilości azotu z danego źródła przez równoważnik nawozowy azotu ($R_n \leq 1$)⁴¹. Ponieważ mówimy o saldzie bilansu brutto, dlatego też teoretyczne pożądane saldo zerowe „0” należy powiększyć o powstałą nieuniknioną w procesie produkcji rolniczej wielkość emisji azotu w związkach gazowych (Nem)⁴², a także wielkość depozytu atmosferycznego niezależnego od samej produkcji rolniczej (Natm)⁴³. Dodatkowo hipotetyczne saldo powinno uwzględniać także naddatek, który uwzględniałby niekorzystne warunki pogodowe (także od nas niezależne) ($GPR_{pmp} - GPR_{rz}$). Do oceny wpływu pogody na plonowanie głównych upraw w Polsce, wykorzystano tzw. indeksy pogodowe (IP) dla następujących roślin uprawnych: żyta, pszenicy ozimej i jarej, jęczmienia, owsa, pszenżyta, kukurydzy na ziarno, mieszanek zbożowych, rzepaku, ziemniaka i buraka cukrowego, dla lat 2019-2021, wyznaczone za pomocą aplikacji agrometeorologicznej „*Modele IPO*”^{44,45}. Wówczas możemy mówić o kryterium salda optymalnego (maksimum). Każda oszacowana nadwyżka ponad „optimum”, potencjalnie będzie ładunkiem, który niezaabsorbowany w glebie, może stanowić zagrożenie środowiskowe (dla wód i powietrza)^{46,47}. Jak wynika z badań prowadzonych przez Fotymę E. i wsp.⁴⁸ każde zwiększenie zasobów azotu mineralnego w glebie w profilu do 90 cm powoduje wzrost potencjalnych jego strat w wyniku wymywania w

⁴¹ Fotyma M., Jadczyżyn T., Pietruch Cz.: System wspierania decyzji w zakresie zrównoważonej gospodarki składnikami mineralnymi - Macrobil. Pam. Puł., 2001, 124: 81-97.

⁴² Poland's National Inventory Reports. Greenhouse Gas Inventory for 1988-2012, 2014. IOŚ, KOBiZE, Warszawa, ss. 417.

⁴³ GIOŚ: <http://www.gios.gov.pl/chemizm2010/index.html> (20.10.2014)

⁴⁴ Górski T., Demidowicz G., Deputat T., Doroszewski A., Górka K., Marcinkowska I., Spoz-Pač W., 1996. Metoda bieżącej oceny plonów pszenicy ozimej, żyta ziemniaka, buraka cukrowego i rzepaku na podstawie indeksów pogodowych. Sprawozdanie PBZ 73-02 „Metodyka bieżącej i długoterminowego prognozowania wielkości produkcji głównych ziemiopłodów w Polsce”. Puławy, ss. 40.

⁴⁵ Nieróbca A., Doroszewski A., Kozyra J., Mizak K., Borzecka-Walker M., Wróblewska E., Zaliwski A., 2012. Opracowanie stochastycznego modelu prognoz plonów pszenżyta ozimego. Sprawozdanie z realizacji tematu statutowego IUNG-PIB, Puławy, ss. 29.

⁴⁶ Hansen J., 2000. Nitrogen balances in Agriculture. Statistics in focus – environment and energy. Luxembourg, t 8 – XX/2000.

⁴⁷ Kopiński J., Tujaka A., 2009. Bilans azotu i fosforu w rolnictwie polskim. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, Falenty, 9, z. 4(28), 103-116.

⁴⁸ Fotyma E., Fotyma M., Pietruch Cz.: Zasobność gleb Polski w azot mineralny. Nawozy i nawożenie, 2005, 2(23): 41-48.

okresie jesienno-zimowym. Zwracają oni także uwagę na fakt, że Polska Zachodnia ma duży udział gleb lekkich o mniejszej pojemności wodnej, bardziej narażonych na procesy przemywania. Natomiast w Polsce południowej przeważają gleby zwięzłe, ale występuje tu większa niż średnia dla Polski przewaga opadów nad ewapotranspiracją. Dlatego też określenie zagrożeń ze strony związków azotu (na podstawie sald bilansu) jest dość utrudnione i możemy mówić zatem tylko o potencjalnych jego stratach i ewentualnych skutkach środowiskowych, a sam bilans jest tylko jednym z wielu wskaźników agro-środowiskowych⁴⁹.

Przyjmując powyższe założenia wyznaczono kryterium optymalnego salda azotu w poszczególnych województwach Polski w postaci następującego wzoru:

OSNB	Kryterium optimum saldo bilansu brutto azotu (N) $OSNB = S_{wyn} * (N_{cwn}/N_{cdz} - 1) + N_{em} * C_{kem} + N_{atm} + S_{wyn} * (GPR_{pmp}/GPR_{rz} - 1)$
-------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Objaśnienia skrótów:

OSNB – optimum salda bilansu azotu brutto

S_{wyn} – całkowite wnoszenie azotu w produkcji roślinnej (= $S_{wrt} + S_{wrp} + S_{zup}$)

N_{cwn} – całkowite wniesienie azotu ze wszystkich źródeł (= $S_{min} + S_{org} + N_{sym} + N_{atm} + S_{msi}$)

N_{cdz} – całkowite wniesienie azotu ze wszystkich źródeł w przeliczeniu na azot działający

N_{em} – całkowita emisja azotu w procesie produkcji rolniczej

C_{kem} – wskaźnik korekcyjny wielkości emisji związków azotu (= $S_{wyn} * (GPR_{pmp}/GPR_{rz}) / N_{cdz}$)

N_{atm} - azot w opadzie (depozycje) atmosferycznym

GPR_{pmp} – globalna produkcja roślinna potencjalnie możliwa w optymalnych (neutralnych) warunkach pogodowych

GPR_{rz} - rzeczywista produkcja roślinna w istniejących (niekorzystnych) warunkach pogodowych

Analiza optymalnych dopuszczalnych nadwyżek bilansu azotu brutto w odniesieniu do aktualnych sald wskazuje, że w poszczególnych województwach, jak i dla kraju, kształtują się one często na zupełnie innym poziomie. Średnio dla Polski, na podstawie danych z lat 2019-2021, saldo bilansu azotu brutto wynosiło 38,7 kg N·ha⁻¹ UR i było **mniejsze** aż o 20,2 kg N od wyliczonego hipotetycznego salda dopuszczalnego (optymalnego) (tab. 6).

W analizowanych latach w zdecydowanej większości województw salda bilansu azotu brutto były poniżej wyliczonych dla nich sald optymalnych, a także dolnego przedziału (-10%). Wynika to w znacznym stopniu ze słabszych wyników pogodowych dla upraw w tym okresie, które uniemożliwiają osiąganie wyższych plonów (zbiorów) wykorzystując tym samym

⁴⁹ Faber A.: Wskaźniki proponowane do badań równowagi rozwoju rolnictwa. Frag. Agronom., 2001, 1(69): 31-44.

niezbędne składniki nawozowe. Dla ostatnich lat wyższe od dopuszczalnego salda bilansu azotu notowane są w dwóch województwach, tj. kujawsko-pomorskim, pomorskim i o kilka kg N, przekraczają wyznaczone według zaproponowanej metodyki optima (tab. 3). W przypadku większości województw możemy mówić o pewnym, mniejszym lub większym „deficycie” bilansu azotu brutto (w stosunku do określonego optimum). Zdecydowanie najmniejsze salda bilansu azotu, nie przekraczające $5 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ UR}$ (mniejsze od ilości wnoszonych w opadzie atmosferycznym, bądź emitowanych do atmosfery), występują w ostatnich latach w województwach: małopolskim i podkarpackim. Utrzymywanie ich na tak niskim poziomie w dłuższej perspektywie prowadzić może do zubożenia gleb w ten składnik i do spadku żyzności, a w dalszej konsekwencji do ich degradacji. Taka perspektywa może rysować się dla coraz większych obszarów kraju, ze względu na postępującą ekstensyfikację produkcji.

Odnosząc się do **wyliczonych optymalnych dopuszczalnych nadwyżek bilansu azotu brutto** (tab. 6; kol. 11) uzasadnionymi założeniami metodologicznymi optima dopuszczalnych sald azotu mieszczą się w granicach **od $40,8 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ UR}$ w dkr w woj. pomorskim do $93,3 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ UR}$ w dkr w woj. podlaskim. Średnio dla Polski, na podstawie danych z lat 2019-2020, dopuszczalne saldo bilansu azotu brutto mogło wynosić ok. $61 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ UR}$ w dkr.** Dopuszczalna nadwyżka zależy od efektywności wykorzystania azotu, struktury przychodowej i rozchodowej strony bilansu, przyrodniczo-klimatycznych warunków gospodarowania, a przede wszystkim od czynników organizacyjnych takich jak: wiedza rolników, technika stosowania i przechowywania nawozów, stan agrochemiczny gleb, itp. Jednym z czynników ograniczających wykorzystanie potencjału plonotwórczego roślin jest także kwaśny odczyn gleb (pH)⁵⁰. W Polsce w latach 2018-2021, według danych z KSCh-R⁵¹, aż 42% gleb UR to gleby kwaśne i bardzo kwaśne, które wymagają wapnowania (pH<4,5 powoduje degradację gleb). Najwięcej takich gleb znajduje się w województwach: łódzkim, małopolskim, mazowieckim, podkarpackim i podlaskim.

⁵⁰ Ochal P., Kopiński J.: Wpływ zakwaszenia gleb na środowisko o produkcję roślinną. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2017 (w druku).

⁵¹ Ochrona Środowiska. GUS, Warszawa 2016.

Tabela 5. Bilans azotu brutto dla Polski i województw, średnia z lat 2019-2021 na tle lat 2011-2013

Województwo	Wartości elementów bilansu (kg N·ha ⁻¹ UR), lata 2019-2021				Zmiana salda w odniesieniu do stanu z lat 2011-2013 (kg)	Efektywność wykorzystania N (odpływ/dopływ) w latach 2019-2021	Zmiana efektywności N w odniesieniu do lat 2011-2013 (p.p.)	
	wnoszenie (dopływ)		wyniesienie (odpływ)	różnica (saldo)				
	ogółem (razem)	w tym nawożenie:						
		mineralne	naturalne					
Dolnośląskie	117,8	87,7	12,6	93,7	24,1	-16,0	79,5	9,3
Kujawsko-pomorskie	151,0	95,5	40,5	96,0	55,0	-22,9	63,6	11,4
Lubelskie	109,4	69,7	22,4	91,0	18,4	-20,8	83,2	10,3
Lubuskie	104,1	55,3	26,1	76,6	27,6	-19,0	73,5	19,3
Łódzkie	131,8	68,9	46,8	83,6	48,2	-16,9	63,4	14,6
Małopolskie	85,1	40,7	28,4	80,1	5,0	-7,9	94,2	10,1
Mazowieckie	126,7	60,7	51,7	82,1	44,6	-3,5	64,8	8,8
Opolskie	144,7	105,5	23,5	109,6	35,1	-20,2	75,8	4,1
Podkarpackie	72,9	41,4	15,4	78,6	-5,7	-17,2	107,8	9,6
Podlaskie	140,7	60,5	65,4	104,0	36,7	-6,2	73,9	22,9
Pomorskie	134,6	85,9	29,7	89,5	45,1	-11,6	66,5	6,4
Śląskie	119,6	68,0	34,5	84,4	35,2	-14,7	70,5	8,7
Świętokrzyskie	97,0	51,3	26,7	72,2	24,8	-16,0	74,4	9,5
Warmińsko-mazurskie	129,4	65,9	43,4	95,1	34,3	-12,3	73,5	12,9
Wielkopolskie	170,9	81,2	71,9	92,7	78,2	-6,7	54,3	8,9
Zachodniopomorskie	110,7	71,2	14,0	81,2	29,5	-25,2	73,3	3,6
Polska	127,9	70,8	39,6	89,2	38,7	-13,4	69,7	14,8

Źródło: Opracowanie własne wg metodologii „Nutrient Budgets” OECD/EUROSTAT na podstawie danych: GUS, IOŚ uzyskanych w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska oraz Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami

Tabela 6. Optimum salda bilans azotu brutto dla Polski i 16 województw (na podstawie danych z lat 2019-2021) w $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ UR w d. k.

Województwo	Wartość elementów bilansu azotu brutto						Wskaźnik:			Optimum dopuszczalnego salda (nadwyżki) azotu brutto OSNB (min – max)
	Całkowite wnoszenie azotu S_{wyn}	Całkowity dopływ azotu N_{cwn}	Dopływ azotu działającego N_{cdz}	Saldo bilansu azotu brutto S_{gNB}	Wielkość emisji azotu N_{em}	Depozycja azotu N_{atm}	naddatku azotu rzeczywistego $N_{\text{cwn}}/N_{\text{cdz}}$	naddatku produkcji rzeczywistej $GPR_{\text{pmp}}/GPR_{\text{rz}}$	korekcyjny emisji azotu C_{kem}	
1	2	3	4	5 (3-2)	6	7	8 (3/4*0,9)	9	10 (2*9/4)	11
Dolnośląskie	93,7	117,8	106,0	24,1	14,8	11,8	1,00	1,19	0,98	44,8 (40-49)
Kujawsko-pomorskie	96,0	151,0	120,8	55,0	24,0	7,5	1,12	1,11	0,83	50,8 (46-56)
Lubelskie	91,0	109,4	91,6	18,4	17,2	8,4	1,07	1,11	1,02	44,1 (40-48)
Lubuskie	76,6	104,1	83,3	27,6	15,0	10,2	1,13	1,29	1,11	59,8 (54-66)
Łódzkie	83,6	131,8	97,0	48,2	21,1	8,3	1,22	1,17	1,04	61,9 (56-68)
Małopolskie	80,1	85,1	62,8	5,0	12,5	9,4	1,22	1,20	1,52	61,7 (56-68)
Mazowieckie	82,1	126,7	88,6	44,6	20,6	7,7	1,29	1,16	1,07	66,4 (60-73)
Opolskie	109,6	144,7	125,7	35,1	20,3	10,5	1,04	1,29	1,07	69,7 (63-77)
Podkarpackie	78,6	72,9	59,8	-5,7	9,8	9,3	1,10	1,18	1,56	67,1 (60-74)
Podlaskie	104,0	140,7	92,9	36,7	27,3	8,2	1,36	1,12	1,33	93,3(84-103)
Pomorskie	89,5	134,6	112,0	45,1	21,2	7,3	1,08	1,09	0,99	40,8 (37-45)
Śląskie	84,4	119,6	92,9	35,2	17,3	10,4	1,16	1,23	1,13	62,2 (56-68)
Świętokrzyskie	72,2	97,0	76,3	24,8	13,9	7,8	1,14	1,15	1,09	44,3 (40-49)
Warmińsko-mazurskie	95,1	129,4	97,1	34,3	21,2	7,9	1,20	1,12	1,13	61,5 (55-68)
Wielkopolskie	92,7	170,9	118,1	78,2	27,3	10,0	1,30	1,21	0,86	83,6 (75-92)
Zachodnio-pomorskie	81,2	110,7	98,5	29,5	21,7	9,8	1,01	1,21	0,98	49,3 (44-54)
POLSKA	89,2	127,9	97,9	38,7	20,4	8,9	1,18	1,16	1,04	60,9 (55-67)

Saldo bilansu fosforu w Polsce

Bardzo ważnym składnikiem plonotwórczym niezbędnym do prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin jest, obok azotu, fosfor. Rezerwy fosforu w fosforytach są ograniczone, a jednocześnie jego związki, obok azotu, są głównymi składnikami biogenicznymi istotnie oddziałującymi na jakość wody^{52,53}. Fosfor, stosowany w dużych dawkach zwłaszcza w formie nawozów organicznych nagromadza się głównie w warstwie gleby, do której jest wprowadzany. Ze względu na małą mobilność związków fosforu, jest on mniej narażony na straty z produkcji rolniczej i w warunkach normalnego (zrównoważonego) gospodarowania straty tego składnika są znikome⁵⁴, to jednak w sytuacji przekroczenia pojemności sorpcyjnej gleby, czyli w warunkach bardzo wysokiej jego zawartości, następuje przemieszczanie związków fosforu w dół profilu glebowego i dochodzi do rozpraszania głównie w wyniku zmywu powierzchniowego lub rzadziej erozji wietrznej⁵⁵. Składnik ten wprowadzony do środowiska w nadmiarze może być usunięty tylko w procesie remediacji.

Z punktu widzenia oceny oddziaływania na środowisko saldo bilansu fosforu (SgPB), rozumianego jako różnica pomiędzy dopływem składników (Pcwn) na powierzchnię użytkowaną rolniczo, a jego rozchodem (TPwyn) w zbiorach roślin towarowych (Swrt), w zbiorach roślin zbieranych na pasze (Swrp) i w zbieranych plonach ubocznych roślin oraz poplonach (Szup), powinno uwzględniać stan zasobności gleby w przyswajalne formy tego składnika.

Poniżej przedstawiono równanie bilansu fosforu.

⁵² Fotyma M., Igras J., Kopiński J.: Produkcyjne i środowiskowe uwarunkowania gospodarki nawozowej w Polsce”. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2009, 14: 187-206.

GIOŚ. 2014. Stan środowiska w Polsce. Raport 2014. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa. s. 208.

⁵³ Læg Reid M., Bøckman O. Ch., Kaarstad O.: *Agriculture, fertilizers, and the environment*. Cambridge; CABI Publishing, Norsk Hydro ASA, 1999. s. 294.

⁵⁴ Pondel H., Ruskowska M., Sykut S., Terelak H.: Wymywanie składników nawozowych z gleb w świetle badań prowadzonych przez IUNG”. *Rocz. Gleb.*, 1991, 42(3/4): 97-106.

⁵⁵ Sapek A., Sapek B.: Obieg i bilans fosforu w łańcuch pokarmowym człowieka w Polsce. *Nawozy i nawożenie, PTN, IUNG, Puławy* 2002, 4(13): 105-123.

SgPB	Saldo bilansu fosforu (P) $SgPB = S_{org} + S_{min} + P_{atm} + S_{msi} - S_{wrt} - S_{wrp} - S_{zup}$
-------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Objaśnienia skrótów:

SgPB – saldo bilansu fosforu brutto

S_{min} – fosfor w nawozach mineralnych i osadach przemysłowych i komunalnych

S_{org} – fosfor w wydalanych odchodach przez zwierzęta gospodarskie

P_{atm} – fosfor w opadzie (depozycie) atmosferycznym

S_{msi} – fosfor w materiale siewnym i sadzeniakach

S_{wrt} – fosfor wynoszony w zbiorach roślin towarowych

S_{wrp} – fosfor wynoszony w zbiorach roślin zbieranych na pasze

S_{zup} – fosfor w zbieranych plonach ubocznych roślin oraz poplonach

Zestawione w tabeli 7 średnie wielkości głównych elementów bilansu fosforu (za lata 2019-2021) wykazują znaczne zróżnicowanie regionalne. Pod względem poziomu wnoszenia, różnice, pomiędzy poszczególnymi województwami, w poziomach wielkości są ponad dwukrotne. Obecnie tylko w połowie województwach występuje dodatni bilans fosforu. Największe saldo składnika, wynoszące ok. 9,3 kg P·ha⁻¹ UR w dkr, występuje w województwie wielkopolskim, pomimo zaobserwowanego jego spadku o 1,9 kg P·ha⁻¹ UR w dkr w porównaniu do lat 2011-2013 (tab. 4). Także w województwie łódzkim jest ono wysokie i przekracza 4 kg P·ha⁻¹ UR w dkr. Natomiast poza województwem podkarpackim, najniższe saldo poniżej -3,0 kg P·ha⁻¹ UR w dkr zaobserwowano w województwach charakteryzujących się bardzo wysoką produktywnością i efektywnością produkcji roślinnej, tj. w województwie dolnośląskim i opolskim.

Najwięcej fosforu w polskim rolnictwie wnosi się do gleb w postaci nawozów mineralnych, a nieco mniej w naturalnych. Największe wynoszenie (odpływ) następuje w zbiorach głównych roślin towarowych. Ilości te są na ogół ponad dwukrotnie większe niż wynoszenie w roślinach zbieranych na paszę i w plonach ubocznych roślin towarowych. Największym obrotem (przepływami) wynoszącymi ponad 40 kg P·ha⁻¹ UR w dkr w bilansie fosforu (P), czyli sumą ilości wnoszenia i wynoszenia, wyróżniają się województwa: wielkopolskie, opolskie i kujawsko-pomorskie. Natomiast mało intensywna gospodarka tym składnikiem (niski obrót) prowadzona jest w województwach Polski południowo-wschodniej (z ekstensywną produkcją rolniczą), ale także w województwie zachodniopomorskim i lubuskim (z ekstensywną organizacją produkcji).

Jako syntetyczny wskaźnik stanu zasobności gleb w fosfor, będącym jednocześnie wskaźnikiem potrzeb nawożenia tym składnikiem Fotyma⁵⁶proponuje posługiwanie się tzw. współczynnikiem bilansowym (RCBp). Określany jest on jako stosunek ilości fosforu, jaki należy dostarczyć w nawozach do gleby do ilości pobranej z plonami roślin. Jego wartość zależy, od stanu zasobności gleb w fosfor i od kategorii agronomicznej gleby (tab. 7).

Tabela 7. Współczynniki bilansowe dla fosforu.

Zawartość fosforu w glebie	Klasa agronomiczna gleb				Średni współczynnik bilansowy RCBp
	b. lekkie	lekkie	średnie	ciężkie	
Bardzo niska	2,20	2,00	1,89	1,82	1,94
Niska	1,67	1,54	1,43	1,33	1,54
Średnia	1,25	1,18	1,11	1,05	1,24
Wysoka	0,77	0,71	0,70	0,67	0,73
Bardzo wysoka	0,38	0,36	0,35	0,33	0,33

Źródło: Fotyma M.: Zrównoważona gospodarka fosforem w rolnictwie polskim. Nawozy i nawożenie, 2002, 4(13): 160-172.

⁵⁶ Fotyma M.: Zrównoważona gospodarka fosforem w rolnictwie polskim. Nawozy i nawożenie, 2002, 4(13): 160-172.

Do oceny poprawności salda bilansu fosforu brutto (ASgPB), obliczono tzw. saldo optymalne (OPGB) wykorzystując współczynniki bilansowe fosforu (RCBp). Poniżej przedstawiono równanie pozwalające wyznaczyć kryterium optymalnego salda fosforu brutto według wzoru:

OPGB	Kryterium optimum salda bilansu brutto fosforu (kg P•ha⁻¹ UR w d. k.) OPGB = TPwyn*(RCBp – 1) + Patm
-------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Objaśnienia skrótów:

OPGB – optimum salda bilansu fosforu brutto

TPwyn – całkowite wynoszenie fosforu/ (=TPwrt + TPwrrp + TPzup)

RCBp – zalecany współczynnik bilansowy fosforu

Patm - fosfor w opadzie (depozycje) atmosferycznym

Jak wynika z tabeli 9, zalecany współczynnik bilansowy (RCBp), wynikający ze stanu zasobności gleb w fosfor przyjmował w Polsce w latach 2018-2021 średnią wielkość 1,06 i był niższy od współczynnika aktualnego (1,09). Natomiast z tabeli 8 wynika, że zachodzące w ciągu analizowanych lat zmiany w produkcji rolniczej w skali kraju (NUTS-0) wpłynęły zasadniczo na zmiany salda bilansu fosforu brutto, które w latach 2019-2021 średnio wynosiło 1,5 kg P•ha⁻¹ UR w dkr i uległo zmniejszeniu o 2,8 kg P•ha⁻¹ UR w dkr w odniesieniu do średniej z lat 2011-2013.

Według tak przyjętych założeń optymalne (poprawne) saldo fosforu dla **Polski w ostatnich latach powinno wynosić 1,4 kg P•ha⁻¹ UR**. Oczywiście zarówno salda fosforu, jak i potrzeby nawozowe w stosunku do tego pierwiastka wykazują znaczne zróżnicowanie regionalne. Z przeprowadzonej analizy wynika, że optymalne salda tego składnika (tab. 9; kol. 8) kształtują się w zakresie **od –2,7 kg P•ha⁻¹ UR** w województwie kujawsko-pomorskim do aż **6,6 kg P•ha⁻¹ UR** dla województwa małopolskiego. To ostatnie województwo, razem z podkarpackim, wykazuje największy deficyt fosforu w rolnictwie, wynikający z niskiej zasobności gleb w ten składnik i niski poziom zbiorów roślin. Natomiast w Wielkopolsce nadmiernie wysokie saldo fosforu brutto w stosunku do wyliczonego optimum (o ok. **9 kg P•ha⁻¹ UR**), może wskazywać na możliwe zagrożenia z tytułu rozproszenia tego składnika poza system produkcji rolniczej, wynikające z wysokiego poziomu nawożenia pomimo faktu wysokiej zasobności gleb w fosfor przyswajalny (współczynnik RCBp = 0,97).

Z punktu widzenia poprawnej gospodarki fosforem, najbardziej zbliżone do optimum salda fosforu są w województwach podlaskim, pomorskim i śląskim. W większości województw

salda bilansowe fosforu są obecnie niższe od wyznaczonego optimum. Jedynie w województwach kujawsko-pomorski i wielkopolskim salda są wyższe od maksimum salda optymalnego. W tym względzie najmniej poprawna gospodarka tym składnikiem prowadzona jest w województwach: wielkopolskim (wysokie przekroczenie ponad optimum o 5 kg) oraz z drugiej strony w województwie dolnośląskim, małopolskim, podkarpackim i zachodniopomorskim, w których stwierdzić można zbyt duży niedobór fosforu w stosunku do optimum o ponad 4 kg).

Tabela 8. Bilans fosforu dla Polski i województw, średnia z lat 2019-2021 na tle lat 2011-2013

Województwo	Wartości elementów bilansu (kg P·ha ⁻¹ UR), lata 2019-2021				Zmiana salda w odniesieniu do stanu z lat 2011-2013 (kg)	Efektywność wykorzystania P (odpływ/dopływ) w latach 2019-2021	Zmiana efektywności P w odniesieniu do lat 2011-2013 (p.p.)	
	wnoszenie (dopływ)		wyniesienie (odpływ)	różnica (saldo)				
	ogółem (razem)	w tym nawożenie:						
		mineralne	naturalne					
Dolnośląskie	16,6	13,0	2,8	20,1	-3,5	-3,9	121,3	23,2
Kujawsko-pomorskie	21,3	13,2	7,4	20,8	0,5	-2,8	97,6	12,9
Lubelskie	18,3	13,6	4,0	18,2	0,1	-3,1	99,3	17,8
Lubuskie	14,0	6,6	6,7	14,9	-0,9	-7,2	106,5	38,9
Łódzkie	21,4	11,5	9,2	17,3	4,1	-4,0	80,7	16,2
Małopolskie	14,2	8,6	4,9	15,7	-1,5	-1,3	110,5	9,2
Mazowieckie	19,7	9,9	9,2	16,4	3,2	0,3	83,5	0,9
Opolskie	19,9	14,5	4,6	23,6	-3,7	-7,7	118,7	33,4
Podkarpackie	12,5	8,6	3,2	15,9	-3,4	-3,2	127,0	25,8
Podlaskie	21,0	11,3	9,1	17,6	3,4	-0,2	83,8	3,5
Pomorskie	16,4	9,6	6,0	16,7	-0,3	-4,6	101,8	25,1
Śląskie	19,2	11,5	6,9	16,9	2,3	-2,3	88,1	11,3
Świętokrzyskie	15,2	9,6	5,0	14,7	0,5	-4,8	96,9	25,7
Warmińsko-mazurskie	16,4	7,5	8,3	16,6	-0,2	-2,9	101,2	16,8
Wielkopolskie	28,5	11,8	15,9	19,3	9,3	-1,9	67,5	6,4
Zachodniopomorskie	13,2	9,1	3,2	15,6	-2,4	-6,1	118,4	38,8
Polska	19,2	10,9	7,6	17,7	1,5	-2,8	92,1	14,1

Źródło: Opracowanie własne wg metodologii „Nutrient Budgets” OECD/EUROSTAT na podstawie danych: GUS, IOŚ uzyskanych w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska oraz Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami

Tabela 9. Bilans fosforu dla Polski i 16 województw (średnia z lat 2019-2021) w kg P/ha UR

Województwo	Wartość elementów bilansu fosforu brutto				Wskaźnik:		Optimum dopuszczalnego salda (nadwyżki) fosforu brutto OSPB min - max	Różnica sald P
	Całkowite wynoszenie fosforu TP _{wyn}	Całkowity dopływ fosforu P _{cwn}	Saldo bilansu fosforu brutto SgPB	Depozycja fosforu P _{atm}	bilansowy fosforu dla przeciętnej jakości gleb (zalecany) RCB _P	bilansowy fosforu (aktualny) ARCB _P		
1	2	3	4 (3-2)	5	6	7 (3/2)	8	9 (4-8)
Dolnośląskie	20,1	16,6	-3,5	0,30	1,07	0,82	1,8 (0,3;3,3)	-5,3
Kujawsko-pomorskie	20,8	21,3	0,5	0,20	0,86	1,03	-2,7 (-4,2;-1,1)	3,2
Lubelskie	18,2	18,3	0,1	0,18	1,10	1,01	2,0 (0,5;3,5)	-1,8
Lubuskie	14,9	14,0	-0,9	0,20	1,02	0,94	0,5 (-1,0;2,0)	-1,4
Łódzkie	17,3	21,4	4,1	0,15	1,09	1,24	1,7 (0,2;3,2)	2,4
Małopolskie	15,7	14,2	-1,5	0,29	1,41	0,90	6,6 (5,1;8,1)	-8,1
Mazowieckie	16,4	19,7	3,2	0,18	1,06	1,20	1,2 (-0,3;2,7)	2,0
Opolskie	23,6	19,9	-3,7	0,22	0,95	0,84	-1,0 (-2,5;0,5)	-2,7
Podkarpackie	15,9	12,5	-3,4	0,31	1,33	0,79	5,5 (4,0;7,0)	-8,9
Podlaskie	17,6	21,0	3,4	0,23	1,23	1,19	4,4 (2,9;5,9)	-1,0
Pomorskie	16,7	16,4	-0,3	0,25	1,02	0,98	0,6 (-0,9;2,1)	-0,9
Śląskie	16,9	19,2	2,3	0,23	1,15	1,14	2,7 (1,2;4,2)	-0,4
Świętokrzyskie	14,7	15,2	0,5	0,20	1,21	1,03	3,3 (1,8;4,8)	-2,8
Warmińsko-mazurskie	16,6	16,4	-0,2	0,20	1,07	0,99	1,3 (-0,2;2,8)	-1,5
Wielkopolskie	19,3	28,5	9,3	0,31	0,97	1,48	-0,2 (-1,7;1,3)	9,5
Zachodnio-pomorskie	15,6	13,2	-2,4	0,27	1,09	0,84	1,6 (0,1;3,1)	-4,0
POLSKA	17,7	19,2	1,5	0,27	1,06	1,09	1,4 (-0,1;2,9)	0,1

4. Podsumowanie

W podsumowaniu należy podkreślić, że przyjęcie ścisłych i rygorystycznych dopuszczalnych kryteriów oceny sald bilansów makroskładników jest dość utrudnione, m.in. ze względu na różne metodyki bilansowania (bądź ich modyfikacje – pełne, uproszczone), dostępność danych oraz z uwagi na znaczną zmienność przestrzenną zawartości głównych makroskładników w glebach oraz zmienność czasową (która uwzględniałaby zmiany poziomu intensywności produkcji). Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że ocena poprawności sald głównych składników nawozowych dla poszczególnych województw, jak i innych wyodrębnionych jednostek terytorialnych, czy nawet poszczególnych gospodarstw, wymaga odniesienia do stanu zasobności gleb w te składniki (często z uwzględnieniem kategorii agronomicznych) oraz w przypadku azotu wielkość emisji jego związków do atmosfery (najbardziej kłopotliwą do ustalenia), a także wielkość dostarczaną w opadach atmosferycznych. Oczywiście pewna nadwyżka bilansowa może powstawać z uwagi na coraz częściej występujące niekorzystne (niesprzyjające) warunki pogodowe. Przy interpretacji wyników należy brać pod uwagę dużą dynamikę zmian poszczególnych elementów składowych bilansów.

Według wyliczonych optymalnych dopuszczalnych nadwyżek bilansu azotu brutto, na podstawie danych ostatnich lat 2019-2021 w Polsce uzasadnionymi produkcyjnie i środowiskowo **były salda bilansu: azotu w przedziale od 41 do nawet 93 kg N·ha⁻¹ UR, a średnie dopuszczalne saldo bilansu azotu brutto dla Polski mogłoby wynosić ok. 61 kg·ha⁻¹ UR w dkr, fosforu od -2,7 do 6,6 kg P·ha⁻¹ UR.**

W świetle konsekwencji przyjęcia krajowych bądź regionalnych limitów nadwyżek bilansu azotu brutto należy stwierdzić, że **o ile przeciętny poziom obecnego salda bilansu dla Polski mieści się poniżej proponowanych limitów, tj. 60 lub 80 kg N·ha⁻¹ UR w dkr, to w skali poszczególnych regionów (województw) ocena tej sytuacji może być nie tak jednoznaczna,** gdyż na poziomie regionalnym w województwie wielkopolskim saldo bilansu azotu przekraczało poziom 60 kg N·ha⁻¹ UR w dkr i jest blisko drugiego poziomu limitu, bo wynosiło 78,2 kg N·ha⁻¹ UR w dkr.

Saldo bilansu azotu brutto jest dodatnie we wszystkich analizowanych p.cz. UE z wyjątkiem Rumunii (śr. GNB -5,5 kg N/ha) i wykazuje ogromne zróżnicowanie, od ok - 27,4 kg N/ha w Rumunii do ponad 196 kg N/ha w Niderlandach. Nadwyżka brutto azotu w Polsce wykazuje stosunkowo niewielką zmienność i waha się od 44,1 do 61,8 kg N/ha.

W przeciętnym bilansie azotu brutto dla 27 p.cz. UE zaobserwowano nadwyżkę przekraczającą 60 kg N/ha, co jest istotnie wyższe niż średnia wartość bilansu azotu obserwowana w krajach HELCOM (38,9 kg N/ha). Ten fakt może sugerować, że gospodarka azotem w regionie Morza Bałtyckiego jest znacząco bardziej efektywna.

Wśród analizowanych Państw i regionów można zaobserwować zróżnicowane tendencje w wynikach bilansu fosforu brutto. Niektóre kraje prezentują nadmiar fosforu (największą nadwyżkę fosforu wśród analizowanych krajów wykazuje Dania - śr. 7,2 kg P/ha/rok, Finlandia – śr. 4,2 kg P/ha/rok oraz Niderlandy – śr. 4,1 kg P/ha/rok), podczas gdy inne kraje (Niemcy, Włochy, Węgry, Rumunia, Szwecja) mają ujemny bilans, co oznacza w skali globalnej, korzystanie z glebowych rezerw tego składnika. Szczególnie wyraźne deficyty fosforu obserwuje się w Niemczech i Rumunii, gdzie przekraczają one odpowiednio -2,7 i -3,2 kg P/ha/rok.

Zaprezentowane w ekspertyzie obliczenia uwzględniają aktualny stan wiedzy autorów dotyczący metodologicznego podejścia do zagadnienia bilansowania składników nawozowych azotu i fosforu w Polsce i w wybranych krajach europejskich.

Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia;

Zakład Systemów i Ekonomiki Produkcji Roślinnej,

Zakład Agrometeorologii i Zastosowań Informatyki,

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach

ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy,

tel. (081) 8863421, w. 359

e-mail: bjurga@iung.pulawy.pl; jkop@iung.pulawy.pl; szewc@iung.pulawy.pl