

dr inż. Remigiusz Łukowiak

Katedra Chemii Rolnej i Biogeochemii Środowiska

Uniwersytet przyrodniczy w Poznaniu

Autoreferat

w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego,
dziedzinie nauk rolniczych, dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo.



Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 28
60-637 Poznań
remigiusz.lukowiak@up.poznan.pl

Poznań 2021

1. **Imię i nazwisko:** Remigiusz Piotr Łukowiak
2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.**

2014	Uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk rolniczych
	w dyscyplinie ochrona i kształtowanie środowiska Wydział Rolnictwa i Bioinżynierii Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Rozprawa doktorska:	<i>Rozpoznanie i bilans azotu i fosforu w glebach uprawnych, jako narzędzie ochrony środowiska na przykładzie Gospodarstwa rolnego w Górznie</i>
Promotor:	prof. dr hab. Witold Grzebisz
Recenzenci:	prof. dr hab. Wiera Sądej, prof. dr hab. Jean Bernard Diatta
	Praca wyróżniona, stopień nadany uchwałą Rady Wydziału Rolnictwa i Bioinżynierii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, z dnia 14 listopada 2014 roku
2005	Uzyskanie tytułu magistra inżyniera ochrony środowiska
	Specjalizacja Biogeochemia środowiska Katedra Chemii Rolnej Wydział Rolniczy Akademia Rolnicza im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu
Praca magisterska:	<i>Bilans azotu mineralnego w wielkoobszarowym gospodarstwie rolnym</i>
Promotor:	prof. dr hab. Witold Grzebisz
Recenzent:	prof. dr hab. Marcei Andrzejewski
2008	Studia podyplomowe „Wykorzystanie biomasy na cele energetyczne”
	Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
Temat pracy:	<i>„Możliwości uprawy traw energetycznych w zależności od warunków siedliskowych z uwzględnieniem możliwości późniejszego przetwarzania”</i>
Promotor:	dr hab. Marek Wróbel

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

- 2014- obecnie** adiunkt w Katedrze Chemii Rolnej i Biogeochemii Środowiska na wydziale Rolnictwa i Bioinżynierii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu
- 2007-2014** asystent w katedrze Chemii Rolnej i Biogeochemii Środowiska na wydziale Rolnictwa i Bioinżynierii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu
- 2005-2007** st. referent techniczny w Katedrze Chemii Rolnej, wydziału Rolniczego Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020r. poz 85 z późn. zm.)

Tytuł osiągnięcia naukowego - jednotematycznego cyklu publikacji pod wspólnym tytułem

Wskaźniki gospodarki azotem jako narzędzie zrównoważonego zarządzania produkcją roślinną na polu w sezonie wegetacyjnym

Wykaz publikacji (P) wchodzących w skład osiągnięcia naukowego:

- P1** Barłóg, P.; **Łukowiak, R.** Potassium and Elemental Sulfur as Factors Determining Nitrogen Management Indices of Soil and Faba Bean (*Vicia faba* L.). *Agronomy* 2021, 11, 1137. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061137>

Mój udział polegał na: współudziale w opracowaniu koncepcji badawczej, prowadzeniu doświadczenia, wykonaniu analiz laboratoryjnych, interpretacji wyników wraz z ich graficznym i tabelarycznym przedstawieniem, zebraniem materiału literaturowego, a także napisaniu oryginalnego manuskryptu zgodnie z wykazem zamieszczonym poniżej.

Author Contributions: Conceptualization, P.B. and R.Ł.; methodology, P.B.; validation, R.Ł.; formal analysis, R.Ł.; investigation, P.B. and R.Ł.; resources, P.B.; data curation, R.Ł.; writing—original draft preparation, R.Ł.; writing—review and editing, P.B. and R.Ł.; visualization, R.Ł.; project administration, P.B.

IF₂₀₂₁:**2,603**; Punkty wg MNiSW₂₀₂₁:**100**

- P2** **Łukowiak, R.**; Grzebisz, W. Effect of Site Specific Nitrogen Management on Seed Nitrogen—A Driving Factor of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.) Yield. *Agronomy* 2020, 10, 1364. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091364>

Mój udział polegał na: współudziale w opracowaniu koncepcji badawczej, opracowaniu metodologii badań, prowadzeniu doświadczenia, przygotowaniu bibliografii, wykonaniu analiz laboratoryjnych, obsługi programów wraz z interpretacją i analizą wyników a także napisaniu oryginalnego manuskryptu zgodnie z wykazem zamieszczonym poniżej.

Author Contributions: Conceptualization, R.Ł. and W.G.; methodology, R.Ł.; software, R.Ł.; validation, W.G.; formal analysis, W.G.; investigation, R.Ł.; resources, R.Ł.; data curation, W.G.; writing—original draft preparation, R.Ł.; writing—review and editing W.G.; visualization, R.Ł.; supervision, W.G.; project administration, R.Ł.

IF₂₀₂₀:**2,603**; Punkty wg MNiSW₂₀₂₀:**100**

- P3** **Łukowiak, R.**; Grzebisz, W.; Ceglarek, J.; Podolski, A.; Kaźmierowski, C.; Piekarczyk, J. Spatial Variability of Yield and Nitrogen Indicators - A Crop Rotation Approach. *Agronomy* 2020, 10, 1959. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121959>

Mój udział polegał na: współudziale w opracowaniu koncepcji badawczej, opracowaniu metodologii badań, prowadzeniu doświadczenia, wykonaniu analiz laboratoryjnych, obsłudze programów wraz z interpretacją i analiza wyników, zebraniu materiału literaturowego, a także napisaniu oryginalnego manuskryptu zgodnie z wykazem zamieszczonym poniżej.

Author Contributions: Conceptualization, R.Ł., W.G., and C.K.; methodology, R.Ł. and J.C.; software, J.C. and J.P.; validation, W.G. and C.K.; formal analysis, W.G. and J.C.; investigation, R.Ł. and A.P.; resources, A.P. and J.P.; data curation, W.G. and J.C.; writing original draft preparation, R.Ł. and C.K.; writing—review and editing, W.G.; visualization, J.C.; supervision, J.P.; project administration, R.Ł.

IF₂₀₂₀:**2,603**; Punkty wg MNiSW₂₀₂₀:**100**

- P4** Grzebisz, W.; **Łukowiak, R.** Nitrogen Gap Amelioration is a Core for Sustainable Intensification of Agriculture—A Concept. *Agronomy* 2021, 11, 419. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030419>

Mój udział polegał na: współudziale w opracowaniu koncepcji badawczej, prowadzeniu doświadczenia, wykonaniu analiz laboratoryjnych, zebraniem materiału literaturowego, obsłudze programów wraz z interpretacją i analizą wyników wraz z ich graficznym przedstawieniem, a także napisaniu oryginalnego manuskryptu zgodnie z wykazem zamieszczonym poniżej.

Author Contributions: Conceptualization, W.G. and R.Ł.; methodology, W.G.; software, R.Ł.; validation, R.Ł.; formal analysis, W.G.; investigation, R.Ł.; resources, W.G.; data curation, R.Ł.; writing—original draft preparation, R.Ł.; writing—review and editing, W.G.; visualization, R.Ł.; supervision, W.G.; project administration, R.Ł.

IF₂₀₂₁:**2,603**; Punkty wg MNiSW₂₀₂₁:**100**

Łącznie dla wyżej wymienionego cyklu publikacji:

Suma punktów MNiSW prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego: **400**

Suma punktów IF prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego: **10,412**

Wykaz i kopie monotematycznego cyklu publikacji stanowiące osiągnięcie naukowe

wraz z oświadczeniami współautorów określające indywidualny wkład każdego z nich zamieszczono w załącznikach 5 i 6.

Szczegółowe omówienie osiągnięcia naukowego, które zostało opisane w ww. pracach.**Wprowadzenie - założenia efektywnego gospodarowania azotem**

Wzrost liczby ludności świata do około 9,7 mld w 2050 spowoduje wzrost zapotrzebowania na żywność, której wielkość eksperci szacują w zakresie 25% do 110% w 2010. Rozwiązania w zakresie redukcji wielkości luki żywnościowej opierają się na dwóch założeniach, dotyczących wzrostu plonów lub/i powierzchni gleb ornych. Obie strategie będą musiały być wykorzystane w przyszłości, gdyż przyrost plonów głównych upraw, takich, jak kukurydza, pszenica, ryż, soja kształtuje się poniżej wymaganych 2,4% w skali rocznej. Drugie rozwiązanie wymaga dużych nakładach na podniesienie poziomu żyzności gleb potencjalnie włączonych do grupy gleb ornych. **(Berners-Lee i in., Hunter i in., 2017; Smith i in., 2010; Tilman i in., 2011).**

Wzrost produkcji żywności w najbliższych 30 latach będzie zależał od dwóch grup czynników, warunkujących także obecne rozwiązania technologiczne w rolnictwie. Pierwsza strategia, odpowiedzialna w $\frac{3}{4}$ za wzrost produkcji żywności w ostatnich 85 latach, polegała i polega w dalszym ciągu na intensyfikacji produkcji, ukierunkowanej na wykorzystanie potencjału plonotwórczego odmian. Podstawowe zabiegi to intensywne nawożenie mineralne, głównie azotowe i ochrona roślin. Pozostałą część wzrostu produkcji zapewnił w tym okresie wzrost powierzchni gruntów ornych. Pierwsza strategia wzrostu produkcji żywności spowodowała szereg negatywnych skutków, głównie środowiskowych, Najważniejszemu jej minusem jest bardzo duże rozproszenie azotu w środowisku, zakłócające funkcjonowanie ekosystemów sąsiadujących z polami uprawnymi, w tym atmosferę **(Bodirsky i in., 2014; Conijn i in., 2018; Mogollon i in., 2018)**. Pokrycie zapotrzebowania na żywność w 2050 nie obędzie się jednakże bez wzrostu zużycia środków produkcji, w tym nawozów mineralnych. Prognozy wzrostu zużycia nawozów mineralnych w stosunku do stanu w roku 2010 wahają się od 45-75% dla azotu, 22-73% dla fosforu i od 30% do 300% dla potasu **(Pradhan i in., 2015)**. Wzrost zużycia w rolnictwie nawozów azotowych spowoduje, jak prognozuje **Conijn i in. (2018)** także jednoczesny wzrost emisji związków reaktywnych azotu do środowiska, która autorzy tego opracowania prognozują w zakresie 102-156% w stosunku do 2010 roku.

Produkcja rolna w XX wieku, prowadząc zgodnie z założeniami, do wzrostu produkcji żywności, wywołała niekontrolowany wpływ na środowisko. Już w latach 80-tych XX w USA i Europie Zachodniej pojawiła się presja społeczna na rzecz ograniczenia emisji azotu, czego przykładem jest Dyrektywa Azotanowa **(EU Commission, 1991; Erisman i in., 2018)**. Konieczność spełnienia obu warunków, a zwłaszcza zmniejszenia presji rolnictwa na środowiska, stała się przyczyną do sformułowania koncepcji nowego systemu produkcji, określonego terminem Rolnictwo Zrównoważone (ang. Sustainable Agriculture). W swej skrajnej wersji koncepcja ta zakładała całkowitą eliminację nawozów azotowych i środków ochrony roślin w produkcji rolniczej **(Conway, 1997; Rockström i in., 2009)**. Utopijny charakter takich założeń jako nierealny uległ modyfikacji. Nowa wersja tej systemu produkcji znana jest pod nazwą zrównoważona intensyfikacja rolnictwa (ang. Sustainable Intensification of Agriculture). Głównym założeniem tego systemu produkcji rolnej jest stabilizacja

globalnego ekosystemu poprzez efektywne gospodarowanie środkami produkcji i eliminacji presji czynników produkcyjna środowisko (Smith, 2010,2013; Godfray i Garnett, 2014; Rockström i in., 2017).

W rzeczywistych realiach produkcji rolnej głównymi czynnikami ograniczającymi wielkość plonów są woda i azot (Rabbinge, 1993). Oba te czynniki produkcji (a także węgiel i temperatura) zostały określone na bazie stopnia reakcji rośliny, jako istotnie kształtujące rozdział asymilatów między części rośliny w okresie wegetacji, nadrzędnymi czynnikami produkcji, (Rubio i in., 2003). Grafton i in. (2015), analizując reakcję roślin uprawnych na stosowanie wody i azotu, stwierdzili na podstawie analizy wielu doświadczeń ścisłych, że wzrost dawek wody bez jednoczesnego stosowania azotu nie prowadzi samoistnie do wzrostu plonów. Autorzy tego opracowania wskazali na poprawę gospodarki azotem jako główny czynnik wzrostu plonów.

W kontekście przedstawionego stanu rzeczy pojawia się pytanie o sposób zarządzania azotem w produkcji rolnej, w taki sposób, aby spełnić założenia koncepcji zrównoważonej intensyfikacji rolnictwa (ZIR). Podstawowym wyzwaniem jest zatem opracowanie zróżnicowanego zestawu narzędzi diagnostycznych, niezbędnych do dokonania skutecznej oceny stanu czynników produkcji, warunkujących efektywność azotu, zarówno w ujęciu potencjalnym, jak i aktualnym, czyli w czasie rzeczywistym. Opracowane narzędzia diagnostyczne winny umożliwić korektę stanu odżywienia uprawianej rośliny, wynikającą ze stanem rozwoju w okresie wegetacji, ze szczególnym uwzględnieniem krytycznych faz formowania plonu, jak i zmienności przestrzennej pola ujętego w aspekcie zapotrzebowania ładu/plantacji na ten składnik.

Hipoteza osiągnięcia naukowego

Zróżnicowanie plonów roślin uprawnych między polami, nawet w tym samym gospodarstwie, a także w ramach tego samego pola zależy nie tylko od właściwości biologicznych, fizycznych i agrochemicznych gleby i jej genezy, warunkującej naturalną żyzność, lecz także od czynników kształtujących obecny stan potencjału produkcyjnego części pola. Porównanie plonów z różnych pól, czy między częściami pola jest możliwe pod warunkiem wskazania takiego zestawu cech lub takiego zestawu wskaźników, który spełnią kryterium wiarygodnej predykcji plonów, niezależnie od lokalizacji pola, zmienności wewnętrznej, czy warunków pogodowych, w których przeprowadzono badania (R^2 , P). Azot jest podstawowym czynnikiem plonotwórczym, a więc kolejnym zadaniem jest powiązanie wskaźnika – predyktora plonu z najbardziej wiarygodnym wskaźnikiem gospodarki azotem.

Hipoteza osiągnięcia naukowego opiera się na założeniu, że pole jest podstawową jednostką produkcyjną w rolnictwie. Doprowadzenie i utrzymanie systemu produkcji polu w stanie zrównoważenia celów produkcyjnych i środowiskowych wymaga opracowania zestawu wskaźników – narzędzi diagnostycznych gospodarki azotem w łanie/plantacji. Wartość diagnostyczną wskaźnika określa jego wiarygodność i stałość jako kryterium podziału pola na jednolite części pod względem produktywności. Jest to warunek konieczny do zmniejszenia wielkości luki azotowej, opracowania efektywnych metod stosowania azotu, a tym samym redukcji presji rolnictwa na środowisko.

Hipotezy szczegółowe i cele badań przedstawiono w poszczególnych pracach/rozdziałach osiągnięcia naukowego.

P.1. Gospodarka azotowa roślin bobowatych w okresie wegetacji na przykładzie bobu

Rośliny z rodziny bobowatych (*Fabaceae*) odegrały w przeszłości kluczową rolę nie tylko jako źródło białka dla człowieka, lecz także jako istotny czynnik formowania potencjału plonotwórczego gleb uprawnych (Taiz, 2013). System zmianowania roślin uprawnych, znany jako płodozmian norfolki, opierał się na obecności w zmianowaniu roślin z rodziny bobowatych i oborniku, stosowanym pod okopowe (Knox i in., 2011). Obecność tych dwóch podstawowych składowych w pełni wpisuje się we współczesne założenia systemu zrównoważonej produkcji rolnej (Hunter i in., 2017; Siddique i in., 2012).

W skali globalnej ilość N_2 związanego przez rośliny uprawne szacuje się na 60 mln t, co stanowi 50% N masy wyprodukowanych nawozów azotowych (Fowler i in., 2013). Całkowitą wartość N_2 związanego przez rośliny bobowate grubonasienne waha się w zakresie 20-22 mln t rok⁻¹. Z tej masy 70-80% zawarta jest w nasionach i podlega wyniesieniu z pola uprawnego. Pozostała część traktowana jest jako pasza dla inwentarza żywego lub zostaje na polu, celem zwiększenia poziomu żyzności gleby (Herridge i in., 2008; Gogoi i in., 2018). Jak podaje Herridge et al. (2008) uprawa bobowatych grubonasiennych zapewnia 20% światowego zapotrzebowania zbóż i oleistych na azot.

Poziom plonowania roślin z rodziny bobowatych jest bardzo zróżnicowany, a główną przyczyną jest wrażliwość roślin w fazach formowania kwiatów, zawiązywania i formowania strąków na stresy wywołane zarówno niedoborem wody, jak i składników mineralnych (Nadeem i in., 2019). Bób jest gatunkiem o szczególnie dużej wrażliwości na zapatrzenie w wodę, co wynika ze słabo wykształconego systemu korzeniowego. Istotnym są więc zabiegi, w tym nawozowe, zmniejszające poziom stresu. Taką funkcję pełni potas (Lopez-Bellido et al. 2005; Zörb et al. 2014). Wzrost ilości związanego N_2 przez bobowate zależy od odżywienia roślin fosforem, potasem, mikroelementami (Fe, Mo), a szczególną rolę w tym procesie odgrywa siarka (Scherer et al., 2006).

Hipoteza badawcza pracy P1 opiera się na założeniu, że optymalizacja dawki siarki elementarnej w nawożeniu bobu istotnie kształtuje ilość związanego i przetworzonego azotu w plon nasion, lecz wydajność tego procesu zależy od poziomu zawartości przyswajalnego potasu w glebie.

Walidację postawionej hipotezy badawczej przeprowadzono w trzech sezonach wegetacyjnych uprawy rzepaku ozimego (2012, 2013 i 2014) w warunkach doświadczenia statycznego, założonego w 1990 roku. W pierwszych 10 latach funkcjonowały dwa obiekty zróżnicowane poziomem nawożenia potasem (-K; +K). W roku 2001 każdy z obiektów podzielono na dwie części i nawożono K w dawkach 25, 50% i 100% całkowitego zapotrzebowania kolejno uprawianych roślin na ten składnik. W rezultacie takiego postępowania otrzymano 4 obiekty nawozowe o znacznym zróżnicowaniu zasobności warstwy ornej i podglebia w przyswajalny K. Czynnikiem I-

rzędu w doświadczeniu z bobem była zawartość K w glebie (K1, K2, K3, K4) oraz bieżące dawki tego składnika:

- K1 – kontrola potasowa; obiekt nienawożony potasem od 1990 roku;
- K2 – 33.3 kg K ha⁻¹ (= 25% pełnej dawki K),
- K3 – 66.5 kg K ha⁻¹ (= 50% pełnej dawki K),
- K4 – 133.0 kg K ha⁻¹ (= 100% zapotrzebowania pokarmowego bobu).

Czynnik 2-go rzędu stanowiły trzy poziomy nawożenia S elementarną (S⁰): 0, 25, 50 kg ha⁻¹.

Zasoby azotu mineralnego (N_{min}) w glebie określano przed wiosennym ruszeniem vegetacji i po zbiorze bobu w warstwie 0-90 cm (co 30 cm). Plon, strukturę plonu bobu, zawartość i masę azotu w nasionach i częściach wegetatywnych rośliny określono w stadium BBCH 89.

W prezentowanym, rozszerzonym streszczeniu uwagę skupiono na trzech elementach gospodarki azotowej bobu jako reprezentanta rodziny bobowatych:

- 1) ilości związanego N;
- 2) predykcji plonu nasion;
- 3) wskaźnikach gospodarki azotem w okresie vegetacji.

Wyżej wymienione obszary reakcji bobu na nawożenie siarką omówiono na tle zróżnicowanej zasobności gleby w przyswajalny potas/dawki potasu.

Odpowiedź na pierwszy problem badawczy jest ściśle związana z rolą obu czynników doświadczalnych w ilości związanego przez bób N₂ (Symbiotic Nitrogen Fixation, SNF). Wartości SNF wyliczono w oparciu o model regresyjny opracowany przez **Reininga'a (2005)** dla bobu. Istotnym dla prowadzonej analizy jest to, że oba czynniki doświadczone wykazały współdziałanie, właśnie dla tej cechy (ryc. 4.1). Ten sam trend reakcji na oba czynniki odnotowano dla masy N w resztkach poźniowych (RN) i masy całkowitej N zakumulowaną przez bób w okresie vegetacji (TN). Nie uzyskano współdziałania obu czynników dla plonu nasion (GY), który istotnie zależał od SNF (R² = 0,79 dla p ≤ 0,001). Układ synergistyczny dla K i S odnotowano dla kontroli potasowej (K1) i obiektu K3. Oba te obiekty cechowała średnio najmniejsza zawartość przyswajalnego K, wynosząca w warstwie 0-30 cm, odpowiednio 89,3 i 115 mg kg⁻¹ s.m. gleby. Zasobność gleby na obiekcie K4 była wyższa o klasę. Analogiczny trend odnotowano w warstwie 30-60 cm. Rolę K w wiązaniu N₂ tłumaczą dwa fakty:

i) niedobór K zmniejsza produkcję asymilatów w liściach rośliny a następnie ich transport do korzeni i brodawek korzeniowych, dostarczając niedostateczną ilość związków energetycznych i elektronów, niezbędnych do redukcji N₂ ii) optymalne odżywienie rośliny żywicielskiej K jest konieczne ze względu na sprawność funkcjonowania procesów odpowiedzialnych za odprowadzenie związków azotowych z brodawek korzeniowych do aktywnych części rośliny, zwiększając w ten sposób ich wydajność (**Thomas i Hungria, 1988**). Innym wyjaśnieniem obserwowanego zjawiska jest depresja aktywności nitrogenazy w warunkach niedostatecznego zaopatrzenia rośliny żywicielskiej w potas (**Divito i Sadras, 2014**). Konkludując uzyskaną zależność, można stwierdzić, że efektywne wiązanie N₂ przez rośliny z rodziny bobowatych wymaga odpowiedniego, wysokiego poziomu zasobności gleby w potas, co

odnotowano na obiekcie K2, lecz pod warunkiem zastosowania siarki w dawce 50 kg ha⁻¹ oraz K4, lecz bez siarki.

Przyczynę wzrostu, a także braku lub spadku wartości SNF, odpowiednio na obiektach K1 i K3 oraz K2 i K4 w reakcji na wzrastające dawki S⁰ trzeba rozpatrywać w aspekcie nośnika siarki oraz statusu N_{min} w glebie przed siewem bobu. Zawartość N_{min} w każdym roku badań była bardzo duża, wahając się od 132 do 138 w 2012, 65 do 91 w 2013 i 104 do 134 kg ha⁻¹ w 2014. W każdym roku w całym profilu gleby dominowała forma N-NO₃. Siarka elementarna w glebie podlega utlenieniu, a produktami reakcji poza S-SO₄ są także protony (H⁺) (Fuentes-Lara i in., 2019). Proces ten prowadzi do lokalnego wzrostu koncentracji H⁺, co w glebie naturalnie zasobnej w potas, może aktywować zjawisko wymiany jonowej, uwalniając kationy K⁺ do roztworu glebowego, (Goulding, 2016). Możliwa jest też aktywacja bakterii rozpuszczających związki potasu w glebie (Etesami i in., 2017). W takim właśnie stanowisku prowadzono badania, a więc wzrost dawki S⁰, progresywnie zwiększał uwalnianie K⁺, tworząc w roztworze glebowym zasób składnika, który następnie podlegał pobieraniu przez roślinę (Marschner, 2012). Przyczynę spadku wartości SNF na obiekcie K4 w następstwie stosowania wzrastających dawek S⁰ tłumaczy odnotowany spadek wartości N_{gain}, którego wartość można odnieść do mineralizacji organicznego N w glebie. Drugą przyczyną było intensywne pobieranie i transport azotu w następstwie luksusowego zaopatrzenia w K i S do części nadziemnych (White, 2010). Skutkiem tego zjawiska było zakłócenie procesów formowania struktury plonu przez bób. Stan ten wynikał ze wzrostu masy azotu w resztkach poźniwnych (RN), prowadząc jednocześnie do spadku wartości indeksu żniwnego.

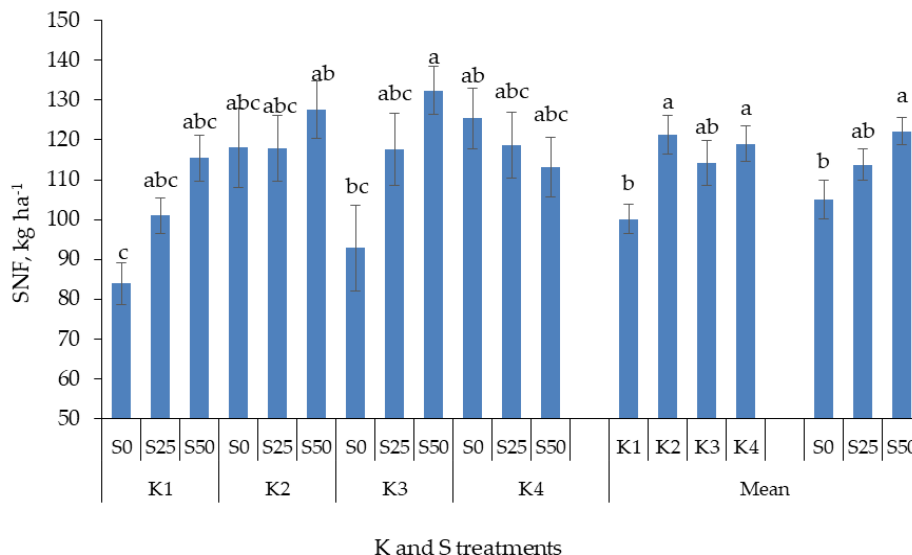


Fig. 4.1. Effect of K treatments and S application on symbiotic N fixation (SNF). K1, K2, K3, and K4 refer to levels of soil K availability and fertilization; S0, S25, and S50 refer to sulfur application at rates of 0, 25, and 50 kg S ha⁻¹, respectively. Letters indicate significant differences between treatments ($p < 0.05$). Hatched bars represent $2 \times$ standard error (SE) ranges.

Drugi obszar rozważań w ramach niniejszego podrozdziału dotyczy predykcji plonu nasion bobu. Ogólnie dominuje pogląd, że głównym predykatorem plonu nasion bobu jest liczba strąków lub liczba nasion wyprodukowana przez pojedynczą roślinę (Alharbi i Adhikari, 2020). W odniesieniu do plonu z powierzchni danej uprawy wymienione składowe plonu należy przemnożyć przez liczbę roślin na jednostce powierzchni (m^2). Zagregowanym wskaźnikiem plonu jest zatem liczba nasion/ziarniaków na jednostce powierzchni (GD, grain density). Otrzymany wskaźnik w omawianym doświadczeniu wykazał, za wyjątkiem indeksu żniwnego (HI), największy, dodatni związek korelacyjny z plonem nasion. Oznacza to że, że gęstość nasion była istotnym czynnikiem warunkującym plon nasion ($r = 0,68^{***}$), a więc może być uznany za predyktor plonu. Wskaźnik ten był dodatnio skorelowany ze składowymi podstawowymi (liczbą strąków na roślinie – PP, liczbą strąków na m^2), w tym w największym stopniu z liczbą nasion w strąku ($r = 0,88^{***}$), co jest zgodne z wynikami Pilbeam'a i in. 1991). Indeks żniwny bobu, wykazując nieco większą wartość współczynnika korelacji ($r = 0,74^{***}$), potwierdził tym samym istotny wpływ czynników doświadczalnych na rozdział asymilatów między nasiona a części vegetatywne.

Istotnym predykatorem plonu nie była jednakże gęstość nasion (GD), lecz masa N zgromadzona w plonie nasion w stadium dojrzałości fizjologicznej (GN). Wartość współczynnika korelacji dla tej cechy z plonem wyniosła $0,98^{***}$. Wskaźnik ten wykazał istotny związek z SNF ($r = 0,92^{***}$). Jednocześnie zawartość azotu w nasionach wykazała istotną reakcję na współdziałanie czynników doświadczalnych w latach ($Y \times K \times S$). Zawartość azotu w nasionach, za wyjątkiem kontroli potasowej (K1) wykazała trend wzrostowy w reakcji na stosowanie siarki, zwłaszcza na kombinacji z 50 kg S ha^{-1} . Największy, średni, wzrost odnotowano na obiektach K2 i K3. Większa akumulacja N w nasionach wynikała więc ze współdziałania dwóch składowych: i) wzrostu gęstości nasion - GD, ii) koncentracji N w nasionach. Wzrost gęstości nasion był więc następstwem lepszego zaopatrzenia rosnących nasion w asymilaty w okresie formowania się strąków, co potwierdza wartość indeksu żniwnego (HI). Mniejsze wartości tego wskaźnika na kombinacjach K4 z siarką wynikały z zakłócenia równowagi między wzrostem strąków a pędami vegetatywnymi, co z potwierdzają wyniki analizy akumulacji azotu w częściach vegetatywnych bobu (RN), która była nadmierna zwłaszcza na obiekcie K4. Zakłócenie formowania struktury plonu roślin bobowatych w okresie początku kwitnienia jest dobrze rozpoznane dla szeregu gatunków z tej rodziny, przykładowo łubinu wąskolistnego (Wu i in., 2020; Reinprecht i in., 2020).

Odnotowane zjawisko, związane z gospodarką azotową na plantacji rośliny bobowatej grubonasiennej, wskazuje na konieczność kontroli nie tylko ilości azotu w momencie siewu, lecz także czynników warunkujących dostępność azotu w okresie wegetacji. Tym czynnikiem okazało się stosowanie siarki w formie S^0 , która była konieczna na obiektach o niskiej, czy średniej zasobności w przyswajalny potas, lecz zbędna, gdy poziom zasobności gleby w potas był wysoki.

Ocenę gospodarki azotowej bobowatych grubonasiennych opracowano na podstawie szeregu wskaźników, kwantyfikujących, zachodzące procesy, w okresie

wegetacji. Dla oceny krążenia N w środowisku ważne jest, że wielkość N wprowadzona do systemu gleba-roślina, będąca sumą N_{mins} oraz SNF, zależała istotnie od współdziałania czynników doświadczalnych. Wartość ta wykazała progresywny wzrost w reakcji na dawki S^0 , lecz tylko na obiektach o niższym poziomie zasobności w przyswajalnych potas (K1 i K3).

Przeprowadzone doświadczenia potwierdzają decydujący wpływ czynnika sezonowego na bilans netto azotu (N_b), który wahał się od 153 do 219 kg N ha⁻¹. W procedurze obliczeniowej po stronie przychodów uwzględniono N_{mins} oraz SNF, a po stronie rozchodów masę azotu wyniesioną z plonem nasion (GN). Uzyskane wyniki mieszczą się w zakresie cytowanym w literaturze (**Turpin i in., 2002, 2003; Allito i in., 2020**). Bilans ten może być ujemny, gdy z pola usuwane są poza nasionami także części wegetatywne roślin (tzw. słoma), co może doprowadzić do wyczerpania gleby z azotu (**Rochester i in., 1998**). Istotnej informacji w tym zakresie dostarcza wskaźnik N_{gain} , będący różnicą między N_{minH} , czyli zawartością N_{min} w glebie po zbiorze bobu, a N_b . Wartości te były dodatnie, niezależnie od wariantu doświadczalnego. W stosunku do obiektu K1 wzrost wartości wskaźnika na obiekcie K2 wyniósł 20%, na K3 osiągnął 31%, lecz na K4 odnotowano depresję, wynoszącą -4%. Nie można jednak wskazać bezpośredniego powodu wzrostu/spadku tego wskaźnika, gdyż nie stosowano badań izotopowych z azotem. Wartość wskaźnika N_{gain} odzwierciedla prawdopodobnie saldo mineralizacji resztek organicznych w warunkach stosowania S elementarnej. W odniesieniu do przyrostu N netto w glebie (N_{gainT}) zaznaczył się zbliżony trend jak dla N_{inT} . Wynikało to bezpośrednio z wpływu K and S na masę resztek pozostawionych na polu. Największe N_{gainT} odnotowano dla obiektów o średniej zasobności w przyswajalny K i jednocześnie nawożonych dawkami K w zakresie 25-50% pełnego zapotrzebowania pokarmowego bobu na K oraz S w dawkach 25 lub 50 kg S ha⁻¹, odpowiednio dla systemu K2 i K3. W porównaniu do wariantu bez nawozów (K1 / S_0) przyrost N w glebie wynosił 51,7 i 54,0 kg N/ha.

Wpływ nawożenia siarka elementarną na plon bobu zależał od poziomu zasobności gleby w przyswajalnych K_i bieżącego nawożenia tym składnikiem. Współdziałanie obu czynników doświadczalnych istotnie kształtowało ilość związanego N_2 (SFN) oraz całkowity przychód N w okresie wegetacji bobu. Uzyskane wyniki wskazują na konieczność optymalizacji poziomu zasobności gleby w przyswajalny K i dostosowanie do tego poziomu dawki S^0 . Warunek ten spełniał obiekty o średnim poziomie zawartości przyswajalnego K w glebie.

Przeprowadzone badania wykazały niezbędność obu składników pokarmowych w uprawie bobu. Zbilansowane stosowanie K:S relacji, jak 1:0.75 gwarantuje nie tylko wysoki poziom plonowania, ale także poprawę jakości gleby odniesioną do wzrostu potencjału zaopatrzenia roślin następczych w N_{min} . Odpowiednie dawki K and S, dostosowane do ich zawartości przyswajalnego K w glebie, pozwalają zwiększyć dopływ N do gleby nawet o około 50 kg ha⁻¹, redukując tym samym zużycie nawozów azotowych w płodozmianie. Omówione wyniki wskazują na możliwość istotnej, niskonakładowej korekty gospodarki azotowej w produkcji roślinnej, uwzględniając nie tylko roślinę z rodziny bobowatych, lecz składniki warunkujące efektywność azotu, obecnego w systemie gleba-roślina.

P2. Gospodarka azotowa rzepaku w okresie wegetacji - predykatory plonu

Rzepak jest jedną z głównych roślin oleistych w świecie, mając 14-15% udział w światowej produkcji nasion roślin oleistych (Carre i Pouzet, 2014; Zając i in., 2016). Światowa produkcja rzepaku w latach 2015-2019 wahała się od około 68 mln t w 2016 do 77 mln t w 2017. Średnie plony w tym okresie kształtowały się na poziomie 2 t ha⁻¹ (FAOSTAT, 2021). Wzrost światowej produkcji rzepaku w świecie ostatnim 25-leciu wynikał głównie ze wzrostu powierzchni uprawy w Kanadzie, a plonów w Unii Europejskiej. Europa, ujmując EU, wyprodukowała w latach 2019 i 2017, odpowiednio 15,3 do 19,8 mln t rocznie. Liderami na rynku europejskim są Francja (27% udziału w 2017), Niemcy (16% udziału w produkcji) i Polska (14%) (FAOSTAT, 2021; Woźniak i in., 2019). Wielkość produkcji w pierwszych dwóch krajach wynika nie tylko z większej powierzchni zasiewów, lecz także większych plonów. W latach 2015-2019 plony we Francji wahały się w zakresie 3,059 t ha⁻¹ w 2016 do 3,394 t ha⁻¹ w 2017. W Polsce plony były zdecydowanie mniejsze, wahając się od 2,196 t ha⁻¹ w ekstremalnie suchym 2018 do 2,950 t ha⁻¹ w optymalnym pogodowo 2017 (FAOSTAT, 2021). W ostatniej dekadzie obserwuje się stagnację plonów w Europie (FAOSTAT, 2021). *Stan ten wskazuje, że potencjał głównych czynników wzrostu plonów, obejmujący nawożenie i ochronę roślin uległ wyczerpaniu.*

Główną przyczyną zmienności plonów rzepaku są warunki pogodowe w okresie wegetacji, zwłaszcza w okresie formowania kwiatostanów, co wpływa na liczbę kwiatów, a w konsekwencji na liczbę nasion na jednostce powierzchni (Wang i in., 2011; Weymann i in., 2015;). Drugą przyczyną zmienności plonów jest nieefektywna gospodarka azotowa na plantacji rzepaku w okresie wegetacji, wskazując także na fazę formowania kwiatostanu jako krytyczną (Habekotte, 1993; Szczepaniak, 2014; Szczepaniak i in., 2015; Grzebisz i in., 2020).

Głównym problemem badawczym w pracy P2 było określenie najbardziej wiarygodnego predyktora plonu nasion, wskaźnika, niezależnego od warunków pogodowych, a jednocześnie wiarygodnego w analizie porównawczej stanowisk o różnym potencjale produkcyjnym. W pszenicy takim wskaźnikiem jest liczba ziarniaków na m² (Bindraban i in., 1998; Bancal, 2008).

Hipoteza badawcza pracy P2 zakłada, że gospodarka azotem w rzepaku ozimym, ujmując azot mineralny (N_{min}), jak i nawozowy (N_f) jest krytycznym czynnikiem dla optymalizacji liczby nasion na m² (gęstość nasion, SD), akumulacji azotu w nasionach (N_{se}), a tym samym dla plonu.

Walidację postawionej hipotezy badawczej przeprowadzono w trzech sezonach wegetacyjnych (2008/2009, 2009/2010 i 2010/2011) dla dwóch różnych stanowisk w każdym sezonie (lokalizacja doświadczenia). Czynniki doświadczalnymi były trzy dawki azotu, połączone z równoważną dawką siarki, w relacji jak 6,4:1 (80 + 12,5, 120 + 18,75 i 160 + 25 kg ha⁻¹) plus kontrola azotowo-siarkowa. Zasoby N_{min} w glebie oznaczano przed wiosennym ruszeniem wegetacji i po zbiorze rzepaku w warstwie 0-90 cm. Plon, strukturę plonu rzepaku, zawartość i masę azotu w nasionach i częściach rośliny określono w stadium BBCH 89.

Wyznaczenie najbardziej wiarygodnego roślinnego wskaźnika plonu rzepaku i jego związku ze wskaźnikami gospodarki azotem oparto o trzy kluczowe kryteria oceny zmienności plonów w układzie lata/lokalizacja:

1. Liczbę nasion na m² (gęstość nasion, SD);
2. Masę N w nasionach i biomase rzepaku w stadium BBCH 89 (N_{se}, TN);
3. Źródła azotu:
 - a. N_{min} w glebie przed wiosennym ruszeniem wegetacji, N_{mins},
 - b. dawka azotu w nawozie, N_f,
 - c. azot uwolniony z zasobów organicznych w okresie wiosennej wegetacji, N_{gain},
 - d. masa azotu w systemie gleba/roślina w okresie wiosennej wegetacji, N_{in} (=N_{mins} + N_f); N_{int} (= N_{mins} + N_f + N_{gain}).

Reakcja trzech podstawowych cech rzepaku, to znaczy plonu, SD, plonu i N_{se} na wzrastające dawki N_f wykazała przebieg zgodny z dwoma modelami matematycznymi: i) liniowym, ii) kwadratowym. Pierwszy model, odnotowany dla dwóch stanowisk i dwóch różnych lat, wskazuje na zbyt małe dawki N_f w stosunku do potencjału plonotwórczego rzepaku. Model kwadratowy wskazuje natomiast na stan wysycenia zapotrzebowania rzepaku na N_f, co wyraźnie określa dawka optymalna N_f i odpowiadający tej dawce plon maksymalny nasion. Relację między głównym komponentem plonu, czyli SD a plonem nasion opisuje równanie:

$$Y = 0,042SD + 0,704 \text{ dla } n = 24, R^2 = 0,71 \text{ i } P \leq 0,001.$$

Gęstość nasion (SD) nie była jednak głównym predykatorem plonu. Zgodnie z wynikami analizy głównych składowych (PCA) największe i dodatnie ładunki tworzyły szereg: Y (0,95) = N_{se} (0,95) = TN (0,95) > SD (0,83). Zmienność reakcji N_{se} na czynniki doświadczalne, lokalizację stanowiska i warunki pogodowe w latach badań, wskazała na tą cechę jako najbardziej wiarygodny predyktor plonu rzepaku:

$$Y = 0,0238N_{se} + 0,61 \text{ dla } n = 24, R^2 = 0,93 \text{ i } P \leq 0,001$$

Prawidłowość walidowanej hipotezy potwierdziła analiza własna przeprowadzona na bazie wyników **Hoffmann i in. (2015)**:

$$Y = 0,038N_{se} + 0,948 \text{ dla } n = 16, R^2 = 0,95 \text{ i } P \leq 0,001$$

Celem wyjaśnienia istotnie większej wiarygodności N_{se} jako predyktora plonu nasion rzepaku postawiono dwa pytania:

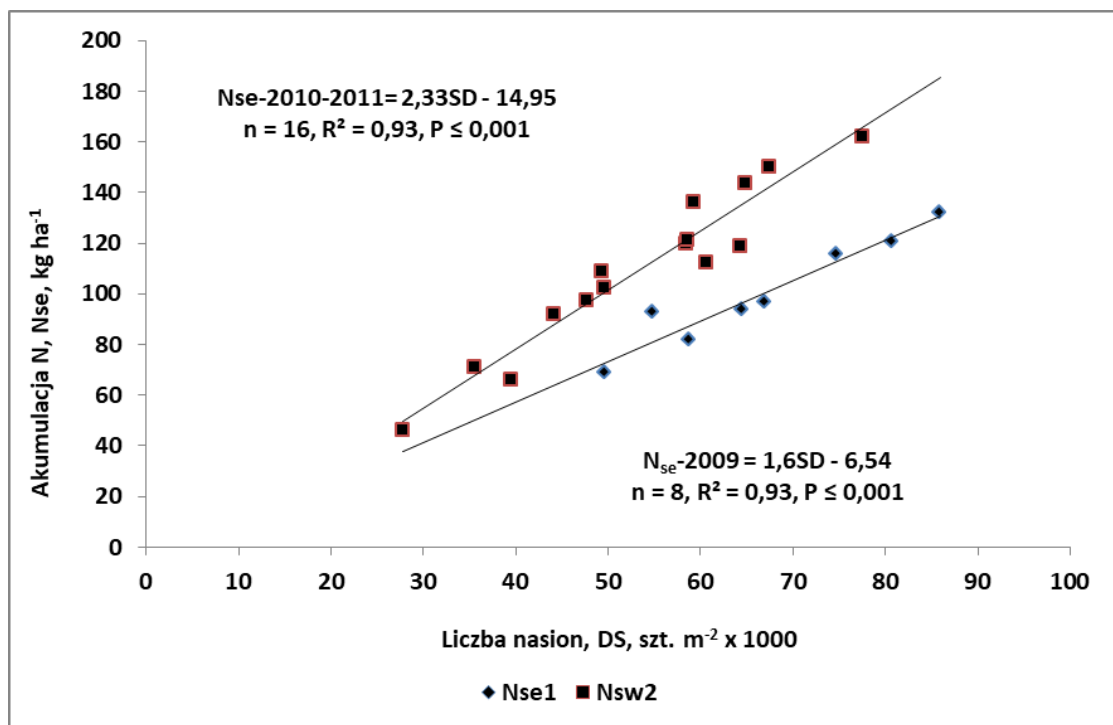
- 1) dlaczego SD okazał się mniej wiarygodnym wskaźnikiem, niż N_{se}?
- 2) Jak wyjaśnić większą wiarygodność N_{se} jako predyktora plonu nasion rzepaku?

Odpowiedź na pierwsze z pytań przedstawiono na ryc. 4.2. Z analizy ryciny jednoznacznie wynika, że nasiona rzepaku w roku 2009 dla tej samej wartości SD akumulowały istotnie mniej azotu, niż w pozostałych latach. Odpowiedź na pytanie drugie wynika z dwóch udokumentowanych procesów. Pierwszym jest to, że w latach 2010 i 2011 zawartość N w nasionach wzrastała w reakcji na nawożenie azotem. Po drugie w okresie wzrostu łuszczyń i nalewania nasion stwierdzono netto wzrost N_{se} w

stosunku do wartości cechy określonej na podstawie ilości N w systemie na początku wegetacji (N_{in}):

$$Do (+9.5) > Ve (+7.8) > Ko (+3.9) > Bu (-1.2) > Go (-3.2) Wi (-8.8 \text{ kg ha}^{-1}).$$

Odnotowany netto wzrost N_{se} mógł wynikać jedynie z uwolnienia N_{min} z zasobów N organicznego gleby w okresie po kwitnieniu. Wzrost ilości N w systemie gleba/roślina o $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$ skutkował przyrostem plonu o $37,5 \text{ kg ha}^{-1}$ powyżej wartości dla N_{min} zbilansowanego i wynoszącego $3,72 \text{ t ha}^{-1}$. Pierwsze i trzecie stanowisko charakteryzowały się optymalną dla rzepaku zawartością przyswajalnego potasu i magnezu w glebie, tworząc optymalne warunki do dużej produktywności N_f brutto (PFP_N , odpowiednio 32 i $35 \text{ kg nasion kg}^{-1} N_f$). Oba składniki są krytyczne dla formowania plonu nasion, począwszy od fazy formowania kwiatostanu aż do dojrzałości fizjologicznej (Szczepaniak i in., 2015; Wang i in., 2015; Pan i in., 2017). Drugie stanowisko wykazało dużą wartość PFP_N ($34 \text{ kg nasion kg}^{-1} N_f$) i najwyższą wartość wykorzystania N z nawozu (79%). Brak rezerw N_{min} w w/w okresach wegetacji rzepaku spowodował stagnację plonów w trzech z sześciu stanowisk. Wyniki te potwierdzają hipotezę postawioną przez Grzebisza i in. (2020a), którzy stwierdzili, że niedobór N w okresie formowania łuszczyzny i nalewania nasion prowadzi do redukcji SD, a w konsekwencji plonu nasion. Stagnacja plonu jest następstwem niedoboru azotu w roślinie w stadium BBCH 71 (Barlóg i Grzebisz, 2004).



Ryc. 4.2. Wpływ gęstości nasion na modele liniowe akumulacji N w nasionach rzepaku w latach badań

Z przedstawionej walidacji predyktorów plonu nasion rzepaki wynika, że stan krytyczny odżywienia rzepaku azotem rozciąga się od okresu tuż przed kwitnieniem po stadium BBCH 71. Maksymalny plon rzepaku można uzyskać pod warunkiem dostatecznie dobrego zaopatrzenia rzepaku w azot właśnie w wymienionym okresie, gdyż jest podstawowym warunkiem podtrzymania aktywności fotosyntetycznej liści, a zwłaszcza łuszczyń (Wang i in., 2011). Przedstawiona analiza jest zgodna z hipotezą Körner'a (2015), która zakłada, że w grupie roślin ziarnkowych czynnikiem determinującym plon jest wielkość akceptora a nie donora asymilatów. W rzepaku zależność ta nie jest jednoznaczna. Pojemność fizjologiczną akceptora, czyli gęstość nasion (SD) warunkuje zawartość azotu w nasionach, zgodnie z regułą, że *im większa zawartość w nasionach, tym większa ich przeżywalność, a tym samym większy plon nasion*.

W kolejnym kroku walidacji gospodarki azotem w rzepaku określono wskaźniki glebowe istotnie kształtujące wartość predyktora plonu nasion, czyli N_{se} . Źródłami azotu dla rzepaku w okresie wegetacji były: i) zasoby N_{min} w glebie wiosną (N_{mins}), ii) dawka N nawozowego (N_f), iii) N_{min} uwolniony z zasobów glebowych w okresie wegetacji (N_{gain}). Plon nasion nie zależał od inicjalnej zawartości N_{mins} w glebie, pomimo istotnej roli zasobów tego składnika dla rzepaku (Li i in. 2015). Nie należy jednak pomijać tej cechy gospodarki azotem, gdyż jest niezbędna do wyznaczenia nawozowej dawki składnika (Olfs i in., 2005). Istotny związek z plonem odnotowano dla sumy N_{mins} i N_f , czyli N_{in} :

$$Y = -0.000034N_{in}^2 + 0.0178N_{in} + 1.324 \text{ for } n = 24, R^2 = 0.48, P \leq 0.05$$

Z otrzymanego równania wynika, że maksymalny plon nasion, wynoszący $3,654 \text{ kg ha}^{-1}$ uzyskano dla optymalnej wartości N_{in} równej $261,8 \text{ kg ha}^{-1}$. Uzyskany model, wskazujący stan wysycenia rzepaku azotem, jednoznacznie potwierdza obecność czynników ograniczających formowanie wartości predyktora plonu, czyli N_{se} . Pozorny nadmiar azotu dostępnego w glebie wynikał prawdopodobnie ze zbyt małej gęstości nasion (SD), będącej skutkiem niedoboru azotu w okresie formowania struktury plonu. Pobieranie N z gleby, zwłaszcza $N\text{-NO}_3$ w okresie największego zapotrzebowania, czyli formowania pędu, a także formowania kwiatostanu istotnie zależy od zasobów innych składników w strefie ukorzenia rośliny, głównie potasu, magnezu, a także wapnia (Barraclough 1989, Grzebisz i in., 2020b).

Zdecydowanie większą wiarygodność prognozy plonu uzyskano dla N_{int} , w którego skład wchodzi N_{in} oraz N_{gain} :

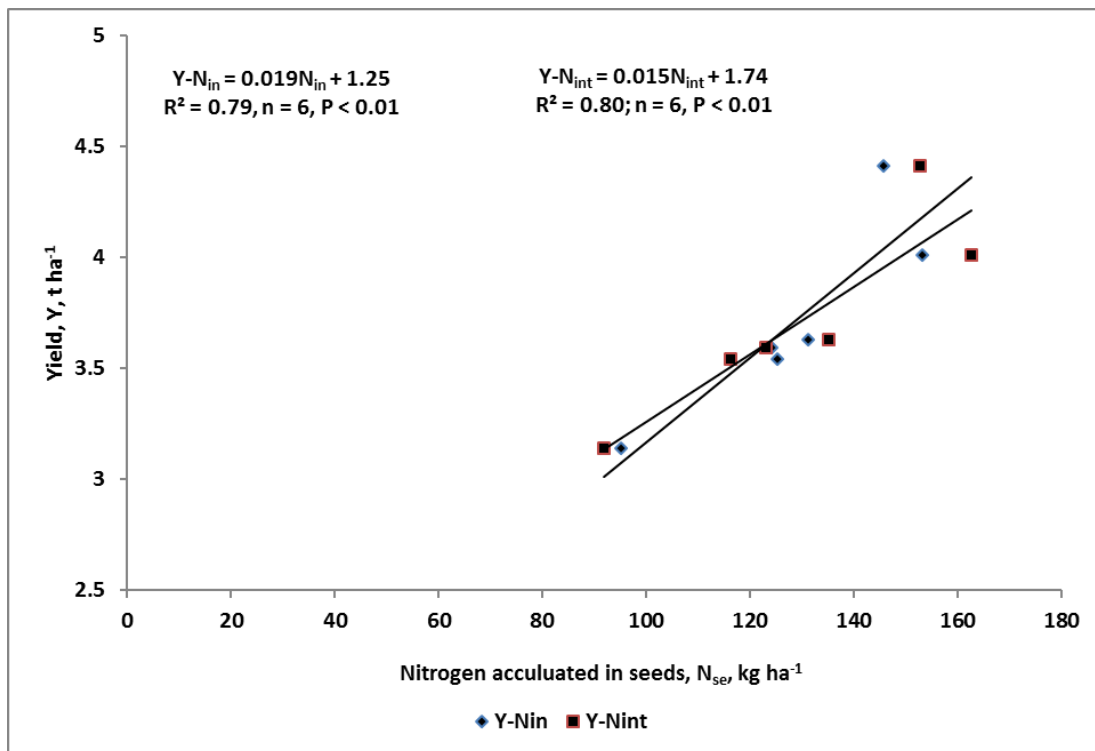
$$Y = 0.009N_{int} + 0.592 \text{ for } n = 24, R^2 = 0.61, P \leq 0.001$$

Otrzymane równanie liniowe jednoznacznie podkreśla znaczenie produkcyjne N_{min} , uwolnionego z zasobów glebowych w okresie wegetacji rzepaku. Wielkość tych zasobów wahała się skali 10-krotnej ($17,5\text{-}176 \text{ kg ha}^{-1}$). Jednakże to właśnie masa N_{min} uwolniona w okresie całej wegetacji, a zwłaszcza w fazach wzrostu łuszczyń i nalewania nasion, okazała się decydującym czynnikiem, warunkującym wielkość akumulacji N w nasionach (ryc. 4.3). Wiarygodność prognostyczna obu wskaźników gospodarki azotem w okresie wegetacji rzepaku, jak wynika z wartości R^2 i P

kształtowała się na takim samym poziomie. Analizy danych przedstawionych na ryc. 4.3 pozwala pogrupować stanowiska w trzy grupy ze względu na N_{semaks} :

- 1) nisko-plonujące (stanowisko w Gostyniu); wskaźniki niska efektywność N_{in} i N_{int} , wynosząca 46% i 37%);
- 2) umiarkowanie-plonujące (Kołaczkowo, Buszewo, Wieszczyżyn); wysoka efektywność N_{in} (60-70%), lecz niska N_{int} (32-38%);
- 3) wysokoplonujące (Wenecja, Donatowo); efektywność N_{in} , odpowiednio 58% i 74%; efektywność N_{int} , odpowiednio 40 i 44%.

O plonie nasion w najlepiej plonujących stanowiskach decydowała komplementarność zasobów N_{min} , warunkująca utrzymanie żywotności nasion rzepaku poprzez dobre zaopatrzenie roślin w azot w okresie wzrostu łuszczyń i formowania masy nasion.



Ryc. 4.3. Prognoza plonu rzepaku na podstawie akumulacji N w nasionach wyznaczona na podstawie zasobów N_{min} na początku masy składnika w okresie wegetacji

P.3. Gospodarka azotem w zmianowaniu - wskaźniki przestrzennej zmienności produktywności azotu na polu

Efektywne zarządzanie azotem w produkcji roślinnej wymaga wiedzy rolnika nie tylko o wpływie tego składnika na formowanie elementów struktury plonu, lecz także o czynnikach warunkujących efektywność. Wykorzystanie N z nawozów mineralnych w praktyce szacuje się w zakresie 30-50% (Cassman i in., 2002). Pozostała część składnika ulega rozproszeniu w środowisku, zakłócając funkcjonowanie ekosystemów sąsiadujących z polami uprawnymi (Erisman i in., 2018; Lassaletta i in., 2016). Zagrożenie środowiska, wynikające z nieefektywnej gospodarki azotem, stało się podstawą do szeregu ograniczeń prawnych związanych z gospodarką tym składnikiem

w rolnictwie, czego przykładem jest Dyrektywa Azotanowa (**Komisja Europejska, 1991; Musacchio i in., 2020**).

Efektywność azotu w produkcji rolniczej można zwiększyć w trzech obszarach: i) postępu hodowlanego, ii) usprawnień w agrotechnice uprawy danej rośliny, poprawy zarządzania azotem (**Sharma i Bali, 2017**). Pierwszy obszar wykazuje progres, lecz efekty przyrostu plonów są niewystarczające w stosunku do zapotrzebowania na żywność w 2050 (**Cormier i in., 2016; Ray i in., 2012 i 2013**). Drugim obszarem, istotnie kształtującym efektywność azotu jest agrotechnika. W zakresie nawożenia wzrost efektywności stosowanych nawozów warunkują tzw. cztery reguły nawożenia: i) prawidłowy dobór składnika pokarmowego, ii) prawidłowe wyznaczenie dawki nawozu, iii) optymalny termin aplikacji, iv) optymalizacja sposobu aplikacji nawozu (**Johnston i Bruulsema, 2014**). Trzecia reguła w istocie rzeczy dotyczy azotu i zakłada synchronizację dawki i formy nawozu z potrzebami aktualnie uprawianej rośliny. Synchronizacja obu składowych winna opierać się na założeniu efektywnego wpływu terminu aplikacji azotu na wykształcenie elementów struktury plonu (**Grzebisz i in., 2020**). Wyznaczenie optymalnej dawki azotu wymaga uwzględnienia zasobów azotu mineralnego (N_{\min}) w glebie przed siewem roślin jarych, na początku wznowienia wegetacji roślin ozimych, a także w okresie wegetacji, jak praktykuje się w USA w kukurydzy (**Luce i in., 2011; Olf i in., 2005**). Czwarty punkt reguł nawożenia trzeba powiązać z zarządzaniem azotem i odnieść przestrzennego zróżnicowania zapotrzebowania rośliny na ten składnik na polu. Efektywne zarządzanie azotem w układzie przestrzennym pola jest nie tylko wskazówką do modyfikacji dawki azotu, lecz także prowadzi do eliminacji przenażowania, a tym zmniejszenia zagrożenia wymyciem składnika z miejsc o mniejszej produktywności, (**Cao i in., 2012; Córdova i in., 2018; Del Pilar Muschietti-Piana i in., 2018**).

Głównym problemem badawczym w pracy P3 było określenie wiarygodnego wskaźnika gospodarki azotem, zakładając zmienność przestrzenną produktywności pola w ogniwie zmianowania rzepak ozimy → pszenżyto ozime.

Hipoteza badawcza pracy P3 opierała się na i) określeniu przestrzennej zmienności plonów rzepaku i pszenżyta ozimego, ii) identyfikacji wielkości luki azotowej i jej przestrzennego rozmieszczenia w układzie horyzontalnym pola, iii) selekcji wskaźników gospodarki azotem, celem wyboru takiego, który umożliwi podział pola na strefy istotnie różniące się produktywnością.

Walidację postawionej hipotezy badawczej przeprowadzono w dwóch sezonach wegetacyjnych, w którym w 2016/2017 uprawiano rzepak ozimy, a w 2018/2018 pszenżyto ozime. Zasoby N_{\min} w glebie określano przed wiosennym ruszeniem wegetacji i po zbiorze obu roślin w warstwie 0-90 cm. Plon użytkowy (Y), masę resztek poźniwnych, zawartość i masę azotu w nasionach i częściach roślin określono w stadium BBCH 89. Wskaźniki roślinne obejmowały: i) akumulację N w nasionach/ziarniakach (N_{se}), ii) całkowitą zawartość N w masie roślin w stadium BBCH 89 (TN), iii) indeks żniwny azotu (NHI), iv) jednostkowe nagromadzenie N (UNA), v) jednostkową produktywność azotu (UNP). Zestaw cech gospodarki N w glebie zawierał: i) przychód N w systemie gleba-roślina (N_{in}), obejmując zawartość N_{\min} wiosną przed ruszeniem wegetacji (N_{mins}) + N zastosowany w nawozach (N_f), ii)

zawartość N_{\min} wiosną po zbiorze roślin ($N_{\min r}$). Zestaw wskaźników gospodarki azotem w układzie gleba/roślina był następujący:

1. Bilans N: $N_b = N_{in} - TN$ (kg ha^{-1});
2. Przychów netto N: $N_{\text{gain}} = N_{\min r} - N_b$ (kg ha^{-1});
3. Przychód całkowity N: $N_{\text{int}} = N_{in} + N_{\text{gain}}$ (kg ha^{-1});
4. Efektywność N_{in} : $NE_{in} = N_{se}/N_{in} \cdot 100\%$;
5. Efektywność N_{int} : $NE_{\text{int}} = N_{se}/N_{\text{int}} \cdot 100\%$.

Lukę azotową wyliczono z podanego poniżej zestawu algorytmów:

1. Produktywność N_{in} brutto: $PF_{N_{in}} = Y/N_{in}$ ($\text{kg nasion/ziarna kg}^{-1} N_{N_{in}}$);
2. Maksymalny, osiągalny plon: $Y_{\text{att}} = cPF_{N_{in}} \cdot N_{in}$ (t, kg ha^{-1});
3. Luka plonu: $YG = Y_{\text{att}} - Y$
4. Luka azotowa: $NG = YG/cPF_{N_{in}}$

Gdzie: $cPF_{N_{in}}$, produktywność N_{in} dla 3-go kwartyłu ciągu rosnącego $PF_{N_{in}}$.

Ocenę statystyczną otrzymanych wyników przeprowadzono z zastosowaniem trzech grup metod: i) statystyka opisowa, ii) analiza głównych składowych (PCA), iii) metody interpolacyjne - geostatystyczne (semiwariogramy empiryczne; parametry oceny semiwariogramów – nugget (C_0), sill ($C + C_0$), odległość – A_0 ; ; mapowanie z użyciem krigingu i wskaźniki oceny modeli).

Plon nasion rzepaku i ziarna pszenżyta okazał się jedną z głównych zmiennych, wyznaczonych z użyciem metody PCA, zarówno dla wskaźników roślinnych, jak glebowych. Plony, luka plonu, jak i maksymalny plon osiągalny (Y_{att}), analizowane z przeliczeniem na jednostki zbożowych, były zdecydowanie większe dla rzepaku, wynosząc w porównaniu do pszenżyta odpowiednio +38%, +95%, +55%. Stan ten wynikał w warunków pogodowych, odpowiednio w 2017 i 2018, co istotnie kształtowało gospodarkę azotową obu roślin i formowanie elementów struktury plonu (Luce i in., 2011; Weymann i in., 2015; Szczepaniak i in., 2015). Opady na poziomie 300 mm w okresie pąkowania rzepaku do dojrzałości fizjologicznej są czynnikiem, warunkującym wykorzystanie potencjału plonotwórczego tej rośliny (Berry i Spink, 2010). Takie właśnie warunki wystąpiły w 2017.

Spośród roślinnych wskaźników gospodarki azotem, najmniejszą wartość współczynnika zmienności (CV) stwierdzono dla indeksu żniwnego azot (NHI) i to niezależnie od rośliny ($CV < 15\%$). Tak niska wartość wskaźnika, określającego strukturę rozdziału azotu między części generatywne i wegetatywne testowanych roślin w stadium dojrzałości fizjologicznej, określa stan dwóch istotnych czynników, warunkujących plon. Po pierwsze odzwierciedla przestrzenne zróżnicowanie zasobów N_{\min} w fazie poprzedzającej kwitnienie. Po drugie informuje o przestrzennym zróżnicowaniu kluczowego czynnika plonotwórczego, jakim jest wielkość akceptora fizjologicznego, czyli gęstości nasion (SD) dla rzepaku i ziarniaków dla pszenżyta, warunkując stabilność rozdziału azotu między części rośliny w okresie po kwitnieniu w każdej części pola (Slafer i Sadra, 2014; Grzebisz i in., 2020).

Plon maksymalny rośliny uprawianej na danym polu wynika ze współdziałania, trzech grup czynników: i) zaopatrzenia w wodę, ii) zaopatrzenia w azot,

iii) stanu pozostałych czynników produkcyjnych, odpowiedzialnych za efektywność dwóch głównych (Agnus i Herwaarden, 2001; Bicego i in., 2019; Grzebisz i in., 2013). Plon maksymalny rzepaku uzyskany z powierzchni 1% pola, wyniósł w przeliczeniu na jednostki zbożowe (CU) 9,858 t ha⁻¹, a luka plonu 4,084 t ha⁻¹. Plon średni, wynoszący 6,909 t ha⁻¹, uzyskano z powierzchni 51% pola. Symulacja wzrostu plonu rzepaku, zakładając zmniejszenie luki azotowej o 50 kg N ha⁻¹, wykazała możliwość wzrostu plonu średniego o 1,45 t ha⁻¹ (8,168 t ha⁻¹), co spowodowałoby zmniejszenie luki plonu o 36%. Analogiczna analiza przeprowadzona dla pszenżyta wykazała plon maksymalny, także uzyskany z powierzchni < 1% pola, na poziomie 6,514 t ha⁻¹, a luka plonu wyniosła 2,096 t ha⁻¹. Plon średni uzyskano na powierzchni 49% powierzchni pola. Efektywne zagospodarowanie luki azotowej w ilości 50 kg N ha⁻¹, spowodowałoby wzrost średniego plonu o 1,37 t ha⁻¹ (7,884 t ha⁻¹), a luka plonu zostałaby zmniejszona o w 65%.

Racjonalne zarządzanie azotem w łanie/plantacji roślin uprawnych opiera się na dwóch grupach informacji: i) założonym plonie użytkowym, ii) zasobach N_{min} w glebie. Na tej podstawie wyznacza się dawkę nawozową azotu (N_f) (Olfs i in., 2005; Grzebisz i in., 2018). W ujęciu bilansowym, pierwsza składowa, czyli masa N zakumulowana w plonie w stadium BBCH 89 (TN), jest równoznaczna z wielkością rozchodu a suma N_{mins} i N_f z wielkością przychodu azotu (N_{in}) w okresie wegetacji. Plon obu roślin nie wykazał istotnych zależności z N_{mins} oraz N_{in}, lecz z wielkością luki azotowej (NG):

- 1) Rzepak: $Y\text{-OSR-CUs} = 0,029NG + 9,858$ dla $n = 55$, $R^2 = 0,90$ i $P \leq 0,001$;
- 2) Pszenżyto: $Y\text{-TRI-CUs} = 0,027NG + 6,514$ dla $n = 52$, $R^2 = 0,68$ i $P \leq 0,001$;

Zgodnie z otrzymanymi diagramami każdorazowy wzrost wartości luki azotowej (wyrażony w wartościach ujemnych) prowadzi do spadku plonu w stosunku wielkości plonu maksymalnego na polu i uprawianej rośliny. Otrzymane zależności jednoznacznie wskazują, że w masa N_{min} w systemie gleba/roślina w okresie wegetacji, niezależnie od warunków pogodowych w danym sezonie wegetacyjnym, była zbyt duża. Przeprowadzona symulacja redukcji N_f o 50 kg ha⁻¹ spowodowałaby wzrost produktywności azotu brutto o 20% (102 vs. 82 kg ziarna CUs kg⁻¹ N_f). Strategia ta może być efektywna, lecz pod warunkiem uwzględnienia zmienności pola (Córdova i in., 2018). Przeprowadzona analiza wykazała, że opcja redukcji dawki N_f może być efektywna, lecz tylko w strefach pola o niskiej produktywności. Rozwiązaniem komplementarnym jest zróżnicowanie przestrzenne akceptora fizjologicznego, czyli gęstości nasion (SD). Ten element struktury plonu jest kluczowy dla maksymalizacji plonu zbóż, jak i rzepaku (Fisher, 2008; Kong i in., 2016; Grzebisz i in., 2020a; Łukowiak i Grzebisz, 2020). Postawiony pogląd jest zgodny z wynikami Yanga' i in. (2014), którzy wykazali, że zróżnicowanie SD w rzepaku typu Canola, zgodnie z potencjałem produkcyjnym pola, pozwoliło zwiększyć plony o 32% w strefach o niskim i o 20% w strefach o wysokim potencjale produkcyjnym pola.

Głównym predykatorem plonu obu upraw, spośród wskaźników gospodarki azotem, wykazującym największą wartość ładunku wg metody PCA, okazał się bilans

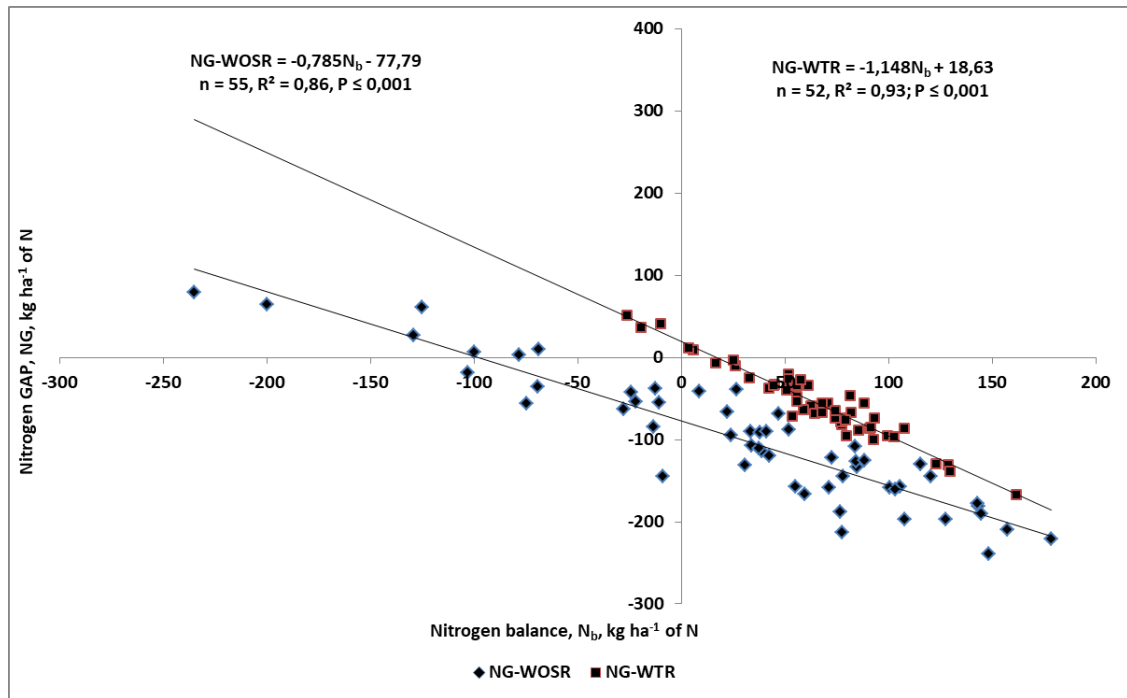
azotu (N_b). Analiza zależności korelacyjnych między N_b a plonem nasion/ziarna (Y) jednoznacznie wykazała wzrost plonu wraz ze spadkiem wartości wskaźnika:

- 1) WOSR: $Y = -0.025N_b + 7.690$ for $n = 55$, $R^2 = 0.85$, and $P \leq 0.001$
- 2) WTR: $Y = -0.031N_b + 7.005$ for $n = 52$, $R^2 = 0.62$, and $P \leq 0.001$

Największe plony obu upraw uzyskano na niewielkich powierzchniach, wynoszących 0,27 ha dla rzepaku i 0,04 ha dla pszenżyta. Wartości ujemne N_b , zgodne z plonami większymi od Y_{att} (plon maksymalny), informują o wyczerpania gleby z N_{min} (ang. soil N mining). Największe plony były następstwem mineralizacji zasobów azotu organicznego, który zwiększając pulę składnika, jednocześnie zmniejszał wartość salda bilansowego azotu w okresie wegetacji obu upraw.

Istotnym elementem prowadzonych rozważań okazał się związek między wskaźnikami N_b i luką azotową (NG), które wyliczono na podstawie odrębnych procedur. Ujemne wartości NG wskazują są wskaźnikiem niewyeksplotowanych przez uprawiane rośliny zasobów N_{min} w okresie wegetacji. Analiza zależności między obu wskaźnikami gospodarki azotem w okresie wegetacji mimo tego samego trendu wykazała swoiste odrębności (ryc. 4.4). W rzepaku niewykorzystane zasoby N_{min} (ujemne wartości NG) pojawiły się dopiero dla N_b , wynoszącego $-99,1 \text{ kg N ha}^{-1}$, co oznacza, że do tej wartości salda bilansowego w glebie nie pojawił się N_{min} rezydualny. Dla pszenżyta N_{min} rezydualny ujawnił się już dla N_b , wynoszącego $+16,2 \text{ kg ha}^{-1}$. Porównanie tych dwóch wartości jednoznacznie wskazuje na bardziej efektywną gospodarkę azotem w rzepaku azotem, niż w pszenżycie, co przejawiało się znacznie większym plonem, pomimo większej luki azotowej. Wielkość luki azotowej dla rzepaku wynikała głównie z mineralizacji N organicznego (**Grzebisz i in., 2018; Villar i in., 2019**). W przypadku pszenżyta powodem pojawienia się luki azotowej była prawdopodobnie redukcja pobierania azotu przez roślinę z powodu suszy w okresie formowania struktury plonu (**Sinclair i Rufty, 2012**).

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że strategia zarządzania produkcją rzepaku, czy też zbóż winna opierać się na maksymalizacji produkcji w strefach pola o dużym naturalnym potencjale plonotwórczym. Warunkiem podstawowym efektywnej produkcji jest celowe różnicowanie wielkości akceptora fizjologicznego, czyli gęstości nasion/ziarniaków (SD) (**Grzebisz i in., 2020; Łukowiak i Grzebisz, 2020; Yang i in., 2014**). Warunkiem koniecznym jest oczywiście gospodarka azotem, a dostatecznym zasobność całej strefy ukorzenienia się aktualnie uprawianej rośliny w składniki warunkujące efektywne pobieranie i przetworzenie pobranego azotu w plon. W podstawowym zestawie składników, warunkujących efektywność gospodarki azotem znajduje się wapń, potas, magnez, fosfor (**Barlóg i in., 2017; Grzebisz i in., 2020b**). Parametry geostatystyczne dla salda bilansowego azotu (N_b), takie, jak stosunek efektu nuggetowego do efektu progowego, zasięg zmienności przestrzennej oraz średni dystans mieściły się w zbliżonym zakresie dla obu roślin uprawnych ($\leq 0.2-0,17$; 94-100 m; 28 m, odpowiednio dla WOSR i WTR), potwierdzając przydatność tego wskaźnika do wydzielenia stref pola istotnie różniących się potencjałem produkcyjnym.



Ryc. 4.4. Zależność między saldem bilansowym azotu w okresie wegetacji a wielkością luki azotowej

P4. Zrównoważona intensyfikacja rolnictwa – koncepcja kontroli luki azotowej

P4.1. Plon potencjalny - luka plonu

Niedostateczna efektywności wody i azotu w produkcji roślinnej, będących głównymi czynnikami ograniczającymi plon uprawianych roślin prowadzi do powstania luki plonu (Van Ittersum i in., 2013). Luka plonu jest to różnica między plonem maksymalnym w danych warunkach środowiskowych i agrotechnicznych wzrostu uprawianej rośliny a plonem rzeczywistym. W systemach naturalnych zasoby wody w glebie i woda opadowa są naturalnym, pierwotnym czynnikiem produkcji, gdyż decydują o zaopatrzeniu rośliny w ten składnik w krytycznych fazach formowania plonu. Plon jest funkcją jednostkowej produktywności wody (Liu i in., 2007):

$$WUE = Y_a / ET_a$$

gdzie: WUE - jednostkowa produktywność wody, kg plonu mm⁻¹ lub m⁻³ wody;

Y_a - plon rzeczywisty, kg lub t ha⁻¹;

ET_a - water use (transpired and evaporated water), mm, m³.

Na podstawie powyższego założenia Agnus i Herwaarden (2001) opracowali koncepcję plonu ograniczonego wodą (ang. Water-Limited Yield, WLY lub Y_w), czyli plonu maksymalnego dla danego siedliska. Wartość WLY wylicza się z równania:

$$WLY = TE (R - \Sigma E_s) + WR$$

gdzie: TE – efektywność transpiracji; TE ($TE = k/VPD$; k – stała produkcji biomasy na jednostkę wody; VPD – niedobór prężności pary wodnej; R – suma opadów w okresie wegetacji; E_s – ewaporacja z gleby, wynosząca 110 mm, WR – rezerwy wody w strefie gleby przerośniętej korzeniami.

Autorzy koncepcji WLY przyjęli założenie, że wartość TE kształtuje się na poziomie 20 kg ziarna pszenicy na 1 mm dostępnej wody. **Passioura (2006)** stwierdził, że w idealnych warunkach środowiska wzrostu pszenicy wartość ta może wynosić 30 kg ziarna mm^{-1} wody. **Grzebisz i in., (2013)** wykazali, że wartość współczynnika TE wykazuje dużą wrażliwość na współdziałanie ilości dostępnej wody i poziomu zasobności gleby w składniki pokarmowe, głównie w potas. Autorzy tej pracy wykazali, że dla pszenicy jarego wartość TE wahała się od 14 do 39 ziarna mm^{-1} wody.

W praktyce wyznaczenie wartości plonu maksymalnego, a w konsekwencji luki plonu, powinno opierać się o dominujący typ warunków klimatycznych w danym regionie świata. Na podstawie tego założenia **Licker i in., (2010)** zaproponowali wskaźnik klimatyczny do określenia potencjału plonowania roślin uprawnych (ang. Climatic Potential Yield, CPY). Źródłem danych w danym regionie, czy podregionie klimatycznym może być plon wzorca odmianowego dla danego gatunku. Lukę plonu, jak i niedobór względny plonu można wyliczyć z algorytmów:

$$LP = PP - P_a$$

$$PP_w = 1 - (P_a/PP)$$

gdzie: LP – luka plonu, $t\ ha^{-1}$;

PP – plon potencjalny, $t\ ha^{-1}$ (plon wzorca dla pszenicy w danym roku, COBORU);

P_a – plon rzeczywisty, $t\ ha^{-1}$ (plony wg danych GUS dla danego roku)

PP_w - niedobór względny plonu; wartość niemianowana od 0,0 do 1,0.

Im wartość PP_w jest tym mniejsza, tym uzyskany plon jest bardziej zbliżony do potencjału plonowania gatunku w danych warunkach glebowo-klimatycznych i odwrotnie. Przykładowo PP_w dla pszenicy w Polsce kształtuje się w zakresie 50-60% wzorca odmianowego. Małe plony pszenicy odzwierciedlają wartość stanowisk, które cechuje niedostateczny żywności w stosunku do wymagań pokarmowych i środowiskowych pszenicy (**Iwańska i in., 2020**). Dla buraka cukrowego w Polsce wartość PP_w waha się w wąskim zakresie 25-30%, co wynika z uprawy tej rośliny w stanowiskach żyznych (**Studnicki i in., 2019**).

P4.1. Produktywność azotu - luka azotowa

Luka plonu jest wskaźnikiem wielkości utraconego plonu w stosunku do plonu ograniczonego wodą lub potencjału plonowania klimatycznego uprawianej rośliny. Nie daje jednak odpowiedzi o przyczynę utraty plonu. Ta główną przyczyną jest niedostateczne zaopatrzenie roślin uprawnych w azot w krytycznych fazach formowania plonu. Koncepcja luki azotowej została sformułowana w trakcie prac nad oceną przyczyn zapaści produkcji rolnej w Europie Środkowej po transformacji

politycznej (**Grzebisz i Diatta, 2012**). W kolejnych etapie została zastosowana do porównania produktywności pól uprawnych w ramach tego samego przedsiębiorstwa rolnego (**Grzebisz i in., 2018**). W 2020 została poddana walidacji do oceny zmienności gospodarki azotem w ramach jednego pola (**Łukowiak i in., 2020**). *Luka azotowa określa ilość azotu dostępnego w sezonie wegetacyjnym uprawianej aktualnie rośliny, lecz nie została przetworzona w plon użytkowy*. Koncepcja luki azotowej zakłada:

- 1) Kwantyfikację ilości niewykorzystanego azotu;
- 2) Określenie czynników odpowiedzialnych za nieefektywność azotu w ściśle zdefiniowanych warunkach produkcyjnych;
- 3) Opracowanie i wdrożenie metod podniesienia efektywności azotu.

Lukę azotową wyliczono z podanego poniżej zestawu algorytmów:

1. Produktywność N_{in} brutto: $PF\text{P}_N = Y_r/N$ (kg nasiona/ziarno/bulwy/korzenie $\text{kg}^{-1} N_{Nin}$);
2. Plon maksymalny: $Y_{maks} = cPF\text{P}_N \cdot N$;
3. Luka plonu: $Y\text{G} = Y_{maks} - Y_r$;
4. Luka azotowa: $NG = Y\text{G}/cPF\text{P}_N$.

Gdzie: $PF\text{P}_N$ - produktywność jednostkowa N nawozowego brutto, t, kg ha^{-1} ;

$cPF\text{P}_N$ - średnia wartość $PF\text{P}_N$ dla III-kwartylu ciągu rosnącego wskaźnika,

Y_a - plon rzeczywisty, kg, t ha^{-1} ;

N - dawka N w nawozie, kg ha^{-1} ;

$Y_{maks, att}$ - plon maksymalny, kg, t ha^{-1} ;

$Y\text{G}$ - luka plonu, kg, t ha^{-1} ;

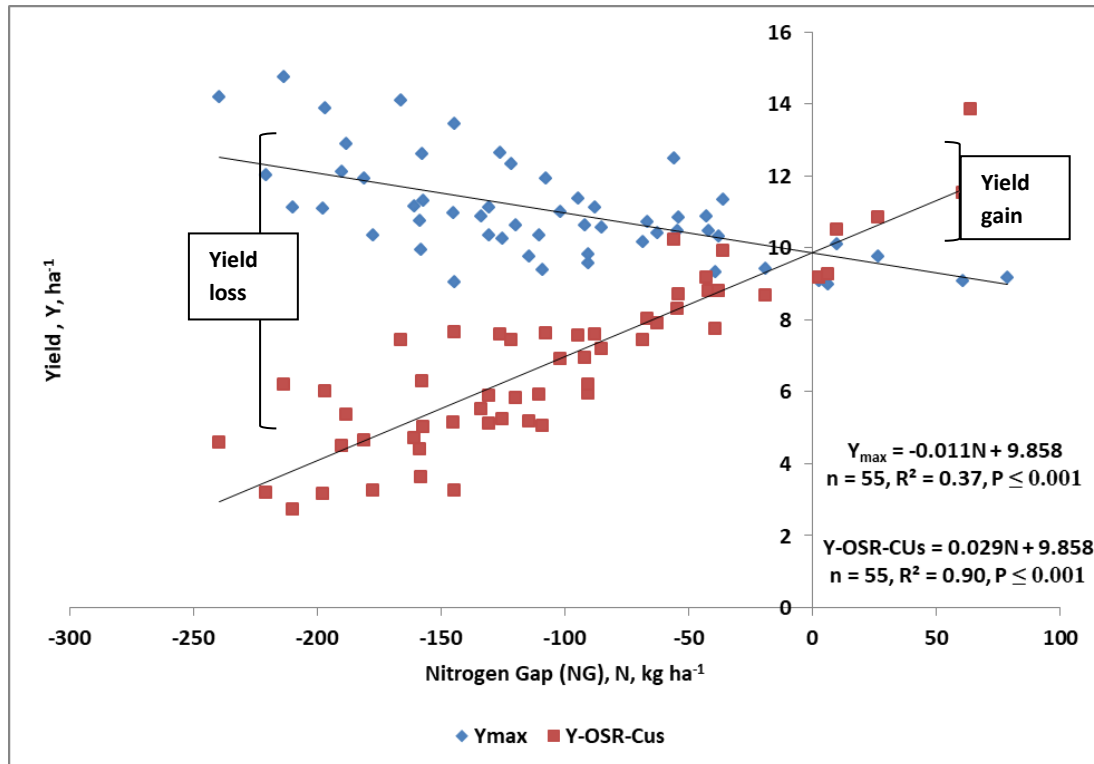
NG - luka azotowa, N, kg ha^{-1} .

Luka azotowa jest narzędziem do opracowania diagramu stanu plonu rzeczywistego i maksymalnego w odniesieniu do wartości niezagospodarowanego azotu w okresie wegetacji uprawianej rośliny, tzw. *niepracujący azot* (ang. unworkable nitrogen; **Grzebisz i in., 2018**). Na ryc. 4.5 przedstawiono rzeczywistą wielkość luki azotowej, uwzględniając całość zasobów N_{min} dostępnych dla rzepaku w okresie wiosennej wegetacji (**Łukowiak i in., 2020**).

P4.3. Czynniki ograniczające efektywność azotu – diagnoza stanu

Liczba czynników kształtujących formowanie elementów struktury plonu roślin uprawnych, a tym samym plon wynosi ponad 60. Czynniki te **Wallace i Wallace (2003)** ujęli w siedem grup: i) właściwości gleby - 5 grup, ii) warunki atmosferyczne, kształtujące warunki wodne w glebie, iii) zarządzanie produkcją roślinną. Siła oddziaływania danego czynnika produkcji na roślinę, zgodnie z koncepcją **Wallace i Wallace (2003)**, zmniejsza się wraz ze wzrostem jego efektywności ($E \rightarrow 0,0$ do 1,0). Oznacza to, że plon rzeczywisty (Y_r) jest funkcją plony maksymalnego w danych warunkach klimatycznych (CPY) i iloczynu frakcyjnego czynników produkcji:

$$Y_a = \text{CPY} \cdot (E_1 \cdot E_2 \cdot E_3 \cdot \dots \cdot E_{n-1} \cdot E_n)$$



Ryc. 4.5. Diagram zmienności plonu rzeczywistego i maksymalnego rzepaku ozimego na polu o powierzchni 32 ha na tle wartości luki azotowa (Łukowiak i in., 2020)
 Legenda: $Y\text{-OSR-CUs}$, Y_{\max} – realny i maksymalny plon rzepaku ozimego wyrażony w jednostkach zbożowych (CUs – cereals units).

Rozpoznanie czynników kształtujących wielkość luki azotowej w pierwszym etapie wymaga opracowania efektywnych narzędzi diagnostycznych. Podstawową jednostką produkcyjną jest pole uprawne. Rozpatrując gospodarkę azotem na polu, plon rośliny trzeba rozważać kompleksowo, to znaczy w trzech skalach zmienności: i) czasowej - rozwój rośliny w okresie wegetacji – potrzeby pokarmowe – zapotrzebowanie na azot, wynikające ze stadium rozwojowego, ii) horyzontalnej – przestrzenna zmienność potencjału pola do zaopatrzenia uprawianej aktualnie rośliny w azot, iii) wertykalnej – zmienności zasobów N_{\min} w profilu pionowym gleby. Ocena siły wpływu czynników produkcyjnych na formowanie elementów struktury plonu uprawianej rośliny w danych warunkach lokalizacji pola (klimat, gleba) (CPY) wymaga rozpoznania pięciu grup czynników: i) zapotrzebowania uprawianej rośliny na azot w całym okresie wegetacji, zwłaszcza w fazach krytycznych formowania plonu; ii) zasobów wody dostępnej dla rośliny w okresie wegetacji, iii) zasobów N_{\min} w okresie wegetacji, zawartości składników mineralnych, warunkujących pobieranie N_{\min} z gleby, iv) czynników warunkujących wzrost systemu korzeniowego, a tym samym dostępu rośliny do wymienionych zasobów czynników wzrostu (Barracough, 1989; Haberle i Svoboda, 2015; Smucker i Aiken, 1992; Ruiz Herrera i in., 2015).

Próchnica, a zasoby wody

Istotnym czynnikiem, moderującym warunki wzrostu uprawianej rośliny poprzez istotny wpływ na gospodarkę wodą, w tym akumulację w profilu glebowym, jak i dostępnością dla rośliny w okresie wegetacji, jest próchnica. **Lovelland i Webb (2003)** stwierdzili, że w glebach wytworzonych z utworów piaszczystych minimalna zawartość próchnicy wynosi 1,7% a dla gleb powstałych z utworów gliniastych kształtuje się na poziomie 4%. Próchnica stanowi istotny czynnik warunkujący wielkość glebowego kompleksu sorpcyjnego, jak i poprzez wpływ na strukturę gleby chroni gleby uprawne przed erozją, w tym stratami składników mineralnych, takich, jak fosfor (**Pieri, 1989; Baldock i Skjemstad, 2000**). Każdy typ gleby cechuje określona masa próchnicy którą szacuje się w warstwie 0-30 cm i 0-100 cm (**Batjes, 2002**). Krytyczną zawartość próchnicy w glebie można określić dla każdego pola, czy miejsca na polu, korzystając z algorytmu opracowanego przez **Pieri'go (1989)**, przyjmując wartość wskaźnika degradacji S jako 9 (brak degradacji gleby) i znając sumę zawartości w glebie cząstek mineralnych < 0,02 mm (Si + C) oraz aktualną zawartość próchnicy:

$$S = (H/Si + C) \cdot 100$$

Na podstawie stanu niedoboru próchnicy w glebie (luki próchnicy, HSG) można wyliczyć wielkość luki plonu (**Bauer i Black, 1994**):

$$YG = HSG \cdot 15,6$$

Rozpoznanie zmienności przestrzennej zawartości cząstek ilastych i pylistych, decydujących o podstawowych właściwościach fizycznych, chemicznych i biologicznych, warunkujących żyzność gleby przeprowadza, stosując standardowe metody gleboznawcze, chemiczne i biologiczne (**Margesin i Schinner, 2005**). Tej grupy narzędzi diagnostycznych nie można pominąć, gdyż jest to kluczowy zestaw do określenia wszystkich grup zasobów (woda, N_{min} , składniki mineralne w formie dostępne, czy też przyswajalnej) w strefie ukorzeniania się uprawianej rośliny. Określenie zasobów N_{min} w glebie, zależnie od gatunku uprawianej rośliny, przeprowadza się w warstwach od 0-30 do 0-90 cm (**Luce i in., 2011; Olf i in., 2005**). Mapy plonów, czy też mapy spektralne pola w pełni wegetacji mogą, a raczej winny posłużyć jako narzędzie optymalizacji wyznaczenia stanowisk do poboru próbek gleby (**Cabrera i in., 2011; Chen i in., 2019**). Wykorzystując ten sam wyciąg glebowy można jednocześnie określić zawartość dostępnych form pozostałych składników mineralnych w glebie (**Łukowiak i in., 2017**). Składniki te istotnie kształtują pobieranie i efektywność N_{min} zawartego w strefie ukorzeniania się rośliny, co wykazał **Grzebisz i in. (2020b)** na przykładzie rzepaku ozimego. Wstępne rozpoznanie stanu zróżnicowania tekstury gleby, zawartości próchnicy można wykonać, korzystając z metod teledetekcyjnych (pomiarów spektralnych z użyciem dronów, samolotów, czy też satelity) (**Gulser i in., 2016**). Sporządzone na tej podstawie mapy są ważnym narzędziem do bezpośredniego wykorzystania celem podziału pola na strefy o jednorodnym potencjale produkcyjnym lub do podjęcia dalszych badań, wymagających użycia metod standardowych (**Dento i in., 2017; Vasu i in., 2017**).

P4.4. Gospodarka azotem → synchronizacja potrzeb rośliny i zaopatrzenia w składniki

O plonie rośliny decyduje ilość azotu dostępnego dla rośliny w krytycznych fazach formowania plonu użytkowego (Kukurydza → **Subedi i Ma, 2005; Nigon i in., 2020; rzepak ozimy → Szczepaniak i in., 2015**). Naturalne zasoby glebowe azotu obecnie w glebie na początku wegetacji, jak i uruchomione z zasobów organicznych w okresie wegetacji nie wystarczają do pokrycia potrzeb wysokoplonujących roślin właśnie w trakcie formowania struktury plonu. W praktyce uzupełnia się je, stosując nawozy azotowe. Celem stosowania azotu w nawozach jest zarówno regulacja, jak i optymalizacja stanu odżywienia uprawianej rośliny, czyli synchronizacja potrzeb i zaopatrzenia (**Malhi i in., 2006**).

Gospodarka azotem w okresie wegetacji aktualnie uprawianej rośliny obejmuje trzy kluczowe etapy: i) wyznaczenie dawki całkowitej, ii) podział dawki całkowitej na części w pełnej synchronizacji z aktualnymi potrzebami rośliny, iii) przestrzenne zróżnicowanie dawki azotu, uwzględniając zmienność potencjału produkcyjnego każdej części pola. W pierwszym etapie należy wyznaczyć całkowite zapotrzebowanie łanu/plantacji na azot. Oznaczenie to opiera się o równanie:

$$D-N = (Y_{CPY} \cdot G_{Nc})/NHI$$

gdzie:

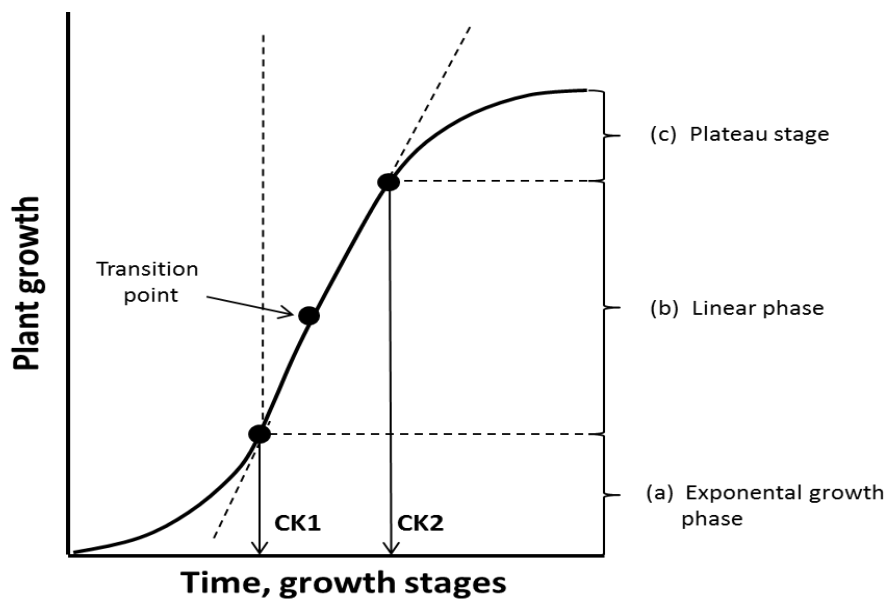
D-N - dawka azotu, kg ha^{-1} ;

Y_{CPY} - plon maksymalny uprawianej odmiany, kg ha^{-1} ;

G_{Nse} - koncentracja azotu w ziarnie/nasionach, kg t^{-1} ;

NHI - indeks żniwny azotu, wartość niemianowana, 0,3-0,9, zależnie od gatunku rośliny

Drugi etap gospodarki azotem wymaga ścisłej znajomości praw rządzących wzrostem, rozdziałem asymilatów i azotu w okresie wegetacji między części rośliny (**Yin i in., 2003**). Najbardziej charakterystycznymi elementami krzywej wzrostu są trzy wyraźnie się zaznaczające fazy akumulacji suchej masy: i) wykładnicza, zachodząca w okresie od wschodów do końca krzewienia, ii) liniowa, obejmująca okres od strzelania w źdźbło do początku kwitnienia, iii) kwadratowa, pokrywająca się fazą reprodukcyjną rośliny ziarnkowej (ryc. 4.6). Największa dynamika akumulacji azotu przykładowo w zbożach zachodzi w fazie strzelania w źdźbło. Ilość składnika nagromadzona w tym okresie ma istotny wpływ na plon ziarna, lecz jednocześnie nie wpływa na indeks żniwny ziarna, jak i azotu (**Masoni i in., 2007; Meng i in., 2013**). Nagromadzenie N w fazach poprzedzających kwitnienie kształtuje podstawowy determinant plonu, jaki jest liczna nasion/ziarniaków na m^2 (SD). Przetawione w poprzednich rozdziałach wskaźniki plonu, jakim było nagromadzenie N w ziarnie/nasionach ($N_{na/se}$) było w głównej mierze pochodną wzrostu SD w następstwie lepszego zaopatrzenia roślin w ten składnik. Lepsze odżywienie rośliny w fazie intensywnego wzrostu nasion/ziarniaków przekłada się na większą żywotność nasion/ziarniaków (**Barlóg i Łukowiak, 2021; Łukowiak i Grzebisz, 2020; Łukowiak in., 2020**).



Ryc. 4.6. Mega-fazy rozwoju rośliny ziarnkowej ze wskazaniem faz kardynalnych (źródło: Grzebisz i Łukowiak, 2021).

Ocenę gospodarki azotem w okresie formowania i realizacji plonu dokonuje się *in situ* w fazach poprzedzających kwitnienie oraz w okresie od kwitnienia do dojrzałości fizjologicznej rośliny. Ocena ta ma jednak charakter analizy *ex-post* i pozwala tylko na określenie źródeł składnika niezbędnych w okresie wzrostu i nalewania nasion/ziarniaków (Barraclough i in., 2014; Gaju i in., 2014).

W pełni wegetacji uprawianej aktualnie rośliny niezbędne są narzędzia diagnostyczne dostarczające informacji w tzw. czasie rzeczywistym, gdyż tylko dysponując taką informacją można skorygować bieżący stan jej odżywienia. Narzędzia standardowe, nawet takie, jak N-tester mają charakter punktowy (Panek i in., 2020). Informacja uzyskana w ramach standardowego poboru próbek roślin i po wykonaniu analiz laboratoryjnych nie spełnia wymagań dla zmienności gospodarki N zarówno wg kryterium rozwojowego, jak i przestrzennego, gdyż jest spóźniona. Tego typu pomiary najczęściej wykorzystywane są do prognozy plonu, przykładowo liść podkolbowy w kukurydzy (Subedi i ma, 2005; Kovacs i Vyn, 2017). Obecnie podstawowym narzędziem pomiaru stanu odżywienia roślin N w pełni wegetacji są narzędzia spektralne, zamontowane na narzędziach roboczych takich, jak drony, samoloty, czy satelity. Największą zaletą tych narzędzi są mapy konstruowane w czasie rzeczywistym, zawierające niezbędne informacje o przestrzennej zmienności biomasy i zawartości azotu rośliny (Cammarano i in., 2020; Li i in., 2020; Prey i Schmidhalter, 2019). Ocena powierzchni asymilacyjnej, biomasy łanu/plantacji i zawartości azotu wykonana przed okresem krytycznym formowania gęstości nasion/ziarniaków (SD) pozwala na precyzyjną ocenę stanu odżywienia łanu. W tym celu wyznacza się krzywe koncentracji azotu, a na tej podstawie określa się indeks odżywienia azotem (Feng i in., 2019; Lemaire i in., 2008; Song i in., 2020):

- 1) Krytyczna koncentracja azotu w łanie, N_c (% lub g N kg⁻¹s.m.):

$$N_c = aW^{-b}$$

- 2) Indeks odżywienia azotem, (wartość niemianowana):

$$NNI = N_a/N_c$$

gdzie: W – biomasa rośliny, t ha⁻¹; a and b – parametry równania.

Uzyskany indeks stanu odżywienia odnosi się do klasy odżywienia, co stanowi podstawę do wykonania zabiegów korekcyjnych (azot) lub wspomagających efektywność azotu (inne składniki pokarmowe stasowane dolistnie) w warunkach nadmiaru azotu (Chen i in., 2019). Uzyskana informacja o stanie odżywienia pozwala na precyzyjne zróżnicowanie dawki azotu na polu, stosując techniki zmiennego dawkowania nawozu (Stamatiadis i in., 2018; Larson i in., 2020).

Podsumowanie osiągnięcia naukowego

System produkcji rolnej, jakim jest, a w zasadzie ma być zrównoważona intensyfikacja rolnictwa, zakłada realizację celów, pozornie sprzecznych. Pierwszym jest produkcja żywności na poziomie likwidującym lukę żywnościową w 2050 roku. Drugim celem jest eliminacja negatywnego wpływu produkcji żywności na środowisko, w którym żyjemy, czyli na globalny ekosystem. Istotnym problemem do rozwiązania jest likwidacja, a racjonalnie ujmując to zagadnienie, minimalizacji strat azotu do środowiska. Całkowite wyeliminowanie strat azotu nie jest możliwe, gdyż szereg procesów ma charakter naturalny (mineralizacja, nityfikacja, denityfikacja). Rolnik może jednak efektywnie kontrolować wielkość strat azotu do środowiska poprzez kontrolę wielkości luku azotowej, czyli części N_{min} w glebie, który nie został przetworzony w plon użytkowy, z powodu zakłócenia działania innych czynników, warunkujących pobieranie N z gleby. Kontrola gospodarki azotem, jak przedstawiono w zamieszczonych pracach, winna w pierwszej kolejności opierać się na dobre rozpoznanie potencjału produkcyjnego pól wyznaczonego w znacznej mierze przez tzw. klimatyczny potencjał plonowania. Kluczowym czynnikiem, warunkującym kontrolę gospodarki azotem w łanie/plantacji, jest rozpoznanie zmienności potencjału produkcyjnego pola, włącznie z jego podziałem na części. Gospodarka azotem w łanie/plantacji musi uwzględniać czynnik rozwojowy aktualnie uprawianej rośliny, warunkujący zapotrzebowanie rośliny na azot w krytycznych fazach formowania plonu użytkowego (nasiona/ziarno). Rozpoznanie każdej z wymienionych kategorii zmienności wymaga efektywnych narzędzi diagnostycznych, w pierwszej kolejności wskazujących na roślinne predykatory plonu, a w drugiej na glebowe wskaźniki gospodarki azotem. Uzyskane i opublikowane wyniki badań wskazały, że głównym predykatorem plonu jest liczba nasion/ziarniaków na jednostce powierzchni (gęstość nasion/ziarniaków, SD). Jednakże o wielkości tego predykatora plonu decyduje stan odżywienia rośliny azotem w okresie wzrostu i nalewania nasion ziarniaków, czyli masa N zgromadzona w plonie użytkowy (N_a). Głównym predykatorem glebowym w odniesieniu do gospodarki azotem okazał się bilans azotu (N_b), którego istotnymi składowymi są i) zawartość N_{min} w glebie na początku sezonu wegetacyjnego, ii) N_{min} uwolniony z zasobów

glebowych w okresie wegetacji, iii) dawka zastosowanego azotu. O wartości salda bilansowego N decyduje ilość składnika w plonie i N_{\min} w glebie po zbiorze rośliny (rezydualny N_{\min}). Przeprowadzone badania wykazały, że im masa N nagromadzonego w plonie użytkowym jest większa, tym saldo bilansowe N maleje, co oznacza że zwiększyła się ilość N_{\min} zakumulowana w roślinie, co jest jednoznaczne ze spadkiem wielkości luki azotowej i wzrostem plonu użytkowego. Narzędzia diagnostyczne do kompleksowej oceny potencjału produkcyjnego pola, jak i stanu odżywienia uprawianej rośliny w okresie wegetacji muszą być tak dobrane, aby wiarygodnie określić wszystkie kategorie zmienności występujące na polu. Nie można pominąć gleboznawczych i agrochemicznych metod standardowych, gdyż są niezbędne do określenia zmienności właściwości gleby w profilu ukorzenienia się uprawianej rośliny. Metody teledetekcyjne umożliwiają wyznaczenie punktów pomiarowych do poboru próbek glebowych, co tym samym oznacza zmniejszenie nakładów pracy na wyznaczenie stref pola o różnej produktywności. W okresie wegetacji narzędzia pomiarowa, opierające się o pomiary spektralne roślin, umożliwiają ocenę stanu odżywienia aktualnie uprawianej rośliny w czasie rzeczywisty, co będzie w najbliższej przyszłości podstawą do korekty dawek azotu uwzględniając zarówno stan rozwoju rośliny, jak i zmienność przestrzenną pola.

Cytowana literatura:

1. Agnus, J.F.; van Herwaarden, A.F. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat. *Agron. J.* 2001, 93, 290–298.
2. Alharbi Najeeb H., Adhikari Kedar N. (2020) Factors of yield determination in faba bean (*Vicia faba*). *Crop and Pasture Science* 71, 305-321.
3. Allito, B.B., Ewusi-Mensah, N., Logah, V. Legume-Rhizobium Strain Specificity Enhances Nutrition and Nitrogen Fixation in Faba Bean (*Vicia faba* L.). *Agronomy* 2020, 10, 826.
4. Baldock, J.A.; Skjemstad, J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Chem.* 2000, 31, 697–710.
5. Bancal, P. 2008. Positive contribution of stem growth to grain number per spike in wheat. *Field Crops Res.* 105, 27-39 (2008).
6. Barłóg, P., Grzebisz, W. Effect of timing and nitrogen fertilizer application on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). II. Nitrogen uptake dynamics and fertilizer efficiency. *J Agron Crop Sci.* 2004, 190, 314-323.
7. Barłóg, P.; Łukowiak, R. Potassium and Elemental Sulfur as Factors Determining Nitrogen Management Indices of Soil and Faba Bean (*Vicia faba* L.). *Agronomy* 2021, 11, 1137. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061137>
8. Barłóg, P.; Łukowiak, R.; Grzebisz, W. Predicting the content of soil mineral nitrogen based on the content of calcium chloride-extractable nutrients. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2017, 180, 624–635.
9. Barraclough, P.B. Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop. *Plant Soil* 1989, 119, 59–70.
10. Barraclough, P.B.; Lopez-Bellido, R.; Hawkesford, M. Genotypic variation in the uptake, partitioning and remobilization of nitrogen during grain-filling in wheat. *Field Crops Res.* 2014, 156, 242–248.
11. Batjes, N.H. carbon and nitrogen stocks in the soils of Central and Eastern Europe. *Soil Use Manag.* 2002, 18, 324–329.

12. Bauer, A.; Black, A.L. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1994, 58, 185–193.
13. Berners-Lee, M.; Kennelly, C.; Watson, R.; Hewitt, C.N. Current global food production is sufficient to meet human nutritional needs in 2050 provided there is radical societal adaptation. *Elem. Sci. Anth.* 2018, 5, 52.
14. Berry, P.M.; Spink, J.; Foulkes, M.J.; White, P.J. The physiological basis of genotypic differences in nitrogen use efficiency in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Res.* 2010, 119, 365–373.
15. Bicego, B.; Sapkota, A.; Torrion, J.A. Differential nitrogen and water impacts on yield and quality of wheat class. *Agron. J.* 2019, 111, 2792–2803.
16. Bindraban, P. S., Sayre, K. D., Solismoya, E. 1998. Identifying factors that determine kernel number in wheat. *Field Crops Res.* 58, 223–234.
17. Bodirsky, B.L.; Popp, A.; Lotze-Campen, H.; Dietrich, J.Ph.; Rolinski, S.; Weindl, I.; Smitz, Ch.; Müller, Ch.; Bonsch, M.; Humpenöder, F.; Biewald, A.; Stevanovic, M. Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution. *Nat. Commun.* 2014, 5, 3858.
18. Cabrera-Bosquet, L.; Molero, G.; Stellacci, A.M; Bort, J.; Nogués, S., Araus, J.L. NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions. *Cereal Res. Comm.* 2011, 39, 147–159.
19. Cammarano, D.; Zha, H.; Wilson, L.; Li, Y.; Batchelor, W.D.; Miao, Y. A remote sensing–based approach to management zone delineation in small scale farming systems. *Agronomy* 2020, 10, 1767.
20. Cao, Q.; Cui, Z.; Chen, X.; Khosla, R.; Dao, T.H.; Miao, Y. Quantifying spatial variability of indigenous nitrogen supply for precision nitrogen management in small scale farming. *Precision Agric.* 2012, 13, 45–61.
21. Carre, P., Pouzet, A. Rapeseed market, worldwide and in Europe. *OCL* 2014, 21(1) D102.
22. Cassman, G.; Dobermann, A.; Walters, D. Agro-ecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen Management. *Ambio* 2002, 31(2), 132–140.
23. Chen, Z.; Miao, Y.; Lu, J.; Zhou, L.; Li, Y.; Zhang, H.; Lou, W.; Zhang, Z.; Kusnierek, K.; Liu, Ch. In-season diagnosis of winter wheat nitrogen status in smallholder farmer fields across a village using unmanned aerial vehicle-based remote sensing. *Agronomy* 2019, 9, 619.
24. Conijn, J.G.; Bindraban, P.S.; Schröder, J.J.; Jongschaap, R.E.E. Can our global food system meet food demand within planetary boundries? *Agric. Ecosys. Environ.* 2018, 251, 244–256.
25. Conway, G. *The Doubly Green Revolution: Food for All in the Twenty-First Century*; Penguin Books: London, UK, 1997.
26. Córdova, C.; Barrera, J.A.; Magna, C. Spatial variation in nitrogen mineralization as a guide for variable application of nitrogen fertilizer to cereal crops. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2018, 110, 83–88.
27. Cormier, F.; Foulkes, J.; Hirel, B.; Gouche, D.; Moenne-Loccoz, Y.; Le Gouis, J. Breeding for increased nitrogen-use efficiency: a review for wheat. *Plant Breed.* 2016, 135, 255–278.
28. Del Pilar Muschietti-Piana, M.; Cipriotti, P.A.; Urricariet, S.; Peralta, N.R.; Niborski, M. Using site-specific nitrogen management in rainfed corn to reduce the risk of nitrate leaching. *Agric. Water Manag.* 2018, 199, 61–70.
29. Denton, O.A.; Aduramigba-Modupe, V.O.; Ojo, A.O.; Adeoyolanu, O.D.; Are, K.S.; Adelana, A.; Oyedele, A.O.; Adetayo, A.O.; Olubukola, O.A. Assessment of spatial variability and mapping of soil properties for sustainable agricultural production using geographic information system techniques (GIS). *Cogent Food Agric.* 2017, 3, 1279366.

30. Erisman, J.W.; Leach, A.L.; Bleeker, A.; Atwell, B.; Cattaneo, L.; Galloway, J. An integrated approach to a nitrogen use efficiency (NUE) indicator for the food production-consumption chain. *Sustainability* 2018, 10, 925.
31. Etesami, H., Emami, S., & Alikhani, H. A. (2017). Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects - A review. *Journal of soil science and plant nutrition*, 17(4), 897-911.
32. EU Commission. 1991. Directive 91/676/EEC. Council Directive of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. *Official Journal of European Community* L375: 1–8.
33. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>. Available online, accessed 2021-04-25.
34. Feng, W.; Wu, Y.; He, L.; Ren, X.; Wang, Y.; Hou, G.; Wang, Y.; Liu, W.; Guo, T.; . An optimized non-linear vegetation index for estimating leaf area index in winter wheat. *Precision Agric.* 2019, 29, 1157–1176.
35. Fisher, R.A. 2008. The importance of grain or kernel number in wheat: A reply to Sinclair and Jamieson. *Field Crops Res.* 105, 15-21.
36. Fowler David, Coyle Mhairi, Skiba Ute, Sutton Mark A., Cape J. Neil, Reis Stefan, Sheppard Lucy J., Jenkins Alan, Grizzetti Bruna, Galloway James N., Vitousek Peter, Leach Allison, Bouwman Alexander F., Butterbach-Bahl Klaus, Dentener Frank, Stevenson David, Amann Marcus and Voss Maren 2013 The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Phil. Trans. R. Soc. B* 368: 2013016420130164
37. Fuentes-Lara, L. O., Medrano-Macías, J., Pérez-Labrada, F., Rivas-Martínez, E. N., García-Enciso, E. L., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A., Rincón-Sánchez, F., & Benavides-Mendoza, A. (2019). From Elemental Sulfur to Hydrogen Sulfide in Agricultural Soils and Plants. *Molecules* (Basel, Switzerland), 24(12), 2282.
38. Gaju, O.; Allard, V.; Martre, P.; Le Gouis, J.; Moreau, D.; Bogard, M.; Hubbart, S.; Foulkes, M.J. Nitrogen partitioning and remobilization to leaf senescence, grain yield and grain nitrogen concentration in wheat cultivars. *Field Crops Res.* 2014, 155, 213–223.
39. Godfray, H.C.; Garnett, T. Food security and sustainable intensification. *Phil. Trans. R. Soc. B* 2014, 369, 20120273.
40. Gogoi, N., Baruah, K.K., Meena, R.S. 2018. Grain legumes: impact on soil health and agroecosystem. W. (red. R.S. Meena) *Legumes for soil health and sustainable management*. Springer nature Singapore Pte Ltd.
41. Goulding, K.W.T. (2016). Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use Manage*, 32: 390-399.
42. Grafton, R.Q., Williams, J.; Jiang, Q. Food and water gaps to 2050: Preliminary results from the global food and water systems (GFWS) platform. *Food Sec.* 2015, 7, 209–220.
43. Grzebisz, W., Diatta, J. Constraints and solutions to maintain soil productivity, a case study from Central Europe. In *Soil Fertility Improvement and Integrated Nutrient Management—A Global Perspective*, Whalen J., Ed.; InTech: London, UK, 2012; pp. 159–183; ISBN, 978-953-307-945-5.
44. Grzebisz, W.; Gransee, A.; Szczepaniak, W.; Diatta, J. The effects of K fertilization on water-use efficiency in crop plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2013, 176, 355–374.
45. Grzebisz, W.; Łukowiak, R. Nitrogen Gap Amelioration is a Core for Sustainable Intensification of Agriculture—A Concept. *Agronomy* 2021, 11, 419. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030419>
46. Grzebisz, W.; Łukowiak, R.; Kotnis, K. Evaluation of nitrogen fertilization systems based on the in-season variability in the nitrogenous growth factor and soil fertility factors—a case of winter oilseed rape (*Brassica napus* L). *Agronomy* 2020b, 10, 1701.
47. Grzebisz, W.; Łukowiak, R.; Sassenrath, G. Virtual nitrogen as a tool for assessment of nitrogen at the field scale. *Field Crops Res.* 2018, 218, 182–184.
48. Grzebisz, W.; Szczepaniak, W.; Grześ, S. 2020a. Sources of nutrients for high-yielding winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) during post-flowering growth. *Agronomy*, 10, 626.

49. Guillermo A. Divito, Victor O. Sadras. How do phosphorus, potassium and sulphur affect plant growth and biological nitrogen fixation in crop and pasture legumes? A meta-analysis, *Field Crops Research*, Vol. 156, 2014, Pages 161-171, ISSN 0378-4290
50. Gulser, C.; Ekberli, I.; Candemier, F.; Demir, Z. Spatial variability of soil physical properties in a cultivated field. *Eurasian J. Soil Sci.* 2016, 5, 192–200.
51. Habekotté, B. Quantitative analysis of pod formation, seed set and seed filling in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) under field conditions. *Field Crops Res.* 1993, 35, 21–33.
52. Haberle, J.; Svoboda, P. Calculation of available water supply in crop root zone and the water balance of crops. *Contrib. Geophys. Geod.* 2015, 45/4, 285-298.
53. Herridge, D.F., Peoples, M.B. & Boddey, R.M. 2008. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant Soil* 311, 1–18.
54. Hoffmann, M.P., Jacobs, A., Whitbread, A.M. Crop modeling based analysis of site-specific production limitations of winter oilseed rape in northern Germany. *Field Crops Res.* 2015, 178, 49-62.
55. Hunter, M.C.; Smith, R.G.; Schipanski, M.E.; Atwood, L.W.; Mortensen, D.A. Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification. *BioScience* 2017, 67, 386–391.
56. Iwańska, M.; Paderewski, J.; Stępień, M.; Rodrigues, P.C. Adaptation of winter wheat cultivars to different environments: A case study in Poland. *Agronomy* 2020, 10, 632.
57. Johnston, A.M.; Bruulsema, T.W. 4R nutrient stewardship for improved nutrient use efficiency. *Procedia Engin.* 2014, 83, 365-370.
58. Knox, Oliver G. G. , Leake, Alastair R. , Walker, Robin L. , Edwards, Anthony C. and Watson, Christine A.(2011) 'Revisiting the Multiple Benefits of Historical Crop Rotations within Contemporary UK Agricultural Systems'. *J. Sustainable Agric.*, 35: 2, 163 — 179
59. Kong, L. G., Xie, Y., Hu, L., Feng, B., Li, S. D. 2016. Remobilization of vegetative nitrogen to developing grain in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Res.* 196, 134-144.
60. Körner, Ch. Paradigm shift in plant growth control. *Curr. Opin. Plant Biol.* 2015, 25, 107-114.
61. Kovacs, P.; Vyn, T.J. Relationships between ear-leaf nutrient concentration at silking and corn biomass and grain yield at maturity. *Agron. J.* 2017, 109, 2898–2906.
62. Larson, J.A.; Stefanini, M.; Yin, X.; Boyer, C.N.; Lambert, D.M.; Zhou, X.V.; Tubaña, B.S.; Scharf, P.; Varco, J.J.; Dunn, D.J.; et al. Effects of landscape, soils, and weather on yields, nitrogen use, and profitability with sensor-based variable rate nitrogen management in cotton. *Agronomy* 2020, 10, 1858.
63. Lassaletta, L.; Billen, G.; Garnier, J.; Bouwman, L.; Velazquez, E.; Muleller, N.D.; Gerber, J.S. Nitrogen use in the global system: past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand. *Environ. Res. Letters* 2016, 11, 095007.
64. Lemaire, G.; Jeuffroy, M.-H.; fstal, F. Diagnosis toll for plant an crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *Eur. J. Agron.* 2008, 28, 181–190.
65. Li, H.; Cong, R.; Ren, T.; Li, X.; Ma, C.; Zheng, L.; Zhang, Z.; Lu, J. Yield response to n fertilizer and optimumN rate of winter oilseed rape under di_erent soil indigenous N supplies. *Field Crops Res.* 2015, 181, 52–59.
66. Li, H.; Zhang, Y.; lei, Y.; Antoniuk, V.; Hu, Ch. Evaluating different non-destructive estimation methods for winter wheat (*Triticum aestivum* L.) nitrogen status based on canopy spectrum. *Remote Sens.* 2020, 12, 95.
67. Licker, R.; Johnston, M.; Foley, J.A.; Barford, C.; Kucharik, Ch.J.; Monfreda, Ch.; Ramankutty, N.. Mind the gap: How do climate and agricultural management explain the „yield gap” of croplands around the world? *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2010, 19, 769-782.
68. Liu, J.; Williams, J.R.; Zehnder, A.J.B.; Yang, H. GEPIC—modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. *Agric. Syst.* 2007, 94, 478–493.

69. López-Bellido, F.J., López-Bellido, L., López-Bellido, R.J. Competition, growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.). *European Journal of Agronomy*, Vol. 23, Issue 4, 2005, Pages 359-378.
70. Lovelland, P.; Webb, J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: A review. *Soil Tillage Res.* 2003, 70, 1–18.
71. Luce, M.St.; Whalen, J.K.; Ziadi, N.; Zebarth, B.J. Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. *Adv. Agron.* 2011, 112, 55-102.
72. Łukowiak, R.; Barłóg, P.; Grzebisz, W. Soil mineral nitrogen and the rating of CaCl₂ extractable nutrients. *Plant Soil Environ.* 2017, 63, 177–183.
73. Łukowiak, R.; Grzebisz, W. Effect of Site Specific Nitrogen Management on Seed Nitrogen—A Driving Factor of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.) Yield. *Agronomy* 2020, 10, 1364.
74. Łukowiak, R.; Grzebisz, W.; Ceglarek, J.; Podolski, A.; Kaźmierowski, C.; Piekarczyk, J. Spatial variability of yield and nitrogen indicators—a crop rotation approach. *Agronomy* 2020, 10, 1959.
75. Malhi, S.S.; Johnston, A.M.; Schoenaou, J.J.; Wang, Z.H.; Vera, C.L. Seasonal biomass accumulation and nutrient uptake of wheat, barley, and oak on a Black Chernozem soil in Saskatchewan. *Can. J. Plant Sci.* 2006, 86, 1005–1014.
76. Margesin, R., Schinner, F. (2005). *Manual for Soil Analysis – Monitoring and Assessing Soil Bioremediation*. Soil biology chapter. Springer. ISSN 1613-3382
77. Marschner, P. (Ed). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, 3rd ed.; Academic Press: London, UK, 2012; p. 672.
78. Masoni, A., Ercoli, L., Mariotti, M., Arduini, I. Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type, *European Journal of Agronomy*, Volume 26, Issue 3, 2007, Pages 179-186.
79. Meng Q, Yue S, Chen X, Cui Z, Ye Y, et al. (2013) Understanding Dry Matter and Nitrogen Accumulation with Time-Course for High-Yielding Wheat Production in China. *PLOS ONE* 8(7): e68783.
80. Mogollón, J.M.; Lasalletta, L.; Beusen, A.H.W.; van Grinsven, H.J.M.; Westhoek, H.; Bouwman, A.F.. Assessing future reactive nitrogen inputs into global croplands based on the shared socioeconomic pathways. *Environ. Res. Lett.* 2018, 13, 044008.
81. Musacchio A., Re, V., Mas-Pla, J., Sacchi, E. 2020. EU Nitrate Directive, from theory to practices: environmental effectiveness and influence of regional governance on its performance. *Ambio* 49, 504-516.
82. Nadeem, M., Li, J., Yahya, M., Sher, A., Ma, C., Wang, X., & Qiu, L. (2019). Research Progress and Perspective on Drought Stress in Legumes: A Review. *International journal of molecular sciences*, 20(10), 2541.
83. Nigon, T.J.; Yang, C.; Paiao, G.D; Mulla, D.J.; Knight, J.F.; Fernández, F.G. Prediction of early season nitrogen uptake by maize using high-resolution aerial hyperspectral imagery. *Remote Sens.* 2020, 12, 1234.
84. Olf, H-W.; Blankenau, K.; Brentrup, F.; Jasper, J.; Link, A.; Lammel, J. Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2005, 168, 414-431.
85. Pan, Y., Lu, Z., Lu., J., li, X., Cong, R. Effects of low sink demand on leaf photosynthesis under potassium deficiency. *Plant physiol. Bioch.* 2017, 113, 110-121.
86. Panek, E.; Gozdowski, D.; Stępień, M.; Samborski, S.; Ruciński, D.; Buszke, B. Within-field relationships between satellite-derived vegetation indices, grain yield and spike number of winter wheat and triticale. *Agronomy* 2020, 10, 1842.
87. Passioura, J. Increasing crop productivity when water is scarce—from breeding to field management. *Agric. Water Manage.* 2006, 80, 176–196.

88. Piéri, C. Fertilité des Terres de Savanes. Bilan de trente années de recherches et de développement agricole au sud du Sahara; Ministère de la Coopération et du Développement, CIRAD: Paris, France, 1989; p. 444.
89. Pilbeam C, Hebblethwaite P, Ricketts H, Nyongesa T (1991) Effects of plant population density on determinate and indeterminate forms of winter field beans (*Vicia faba*) 1. Yield and yield components. *The J. Agric. Sci.* 116, 375–383.
90. Pradhan, P.; Fischer, G.; van Velthuisen, H.; Reusser, D.E.; Kropp, J.P. Closing yield gaps: How sustainable can we be? *PLoS ONE* 2015, 10, e0129487.
91. Prey, L.; Schmidhalter, U. Sensitivity of vegetation indices for estimating vegetative N status in winter wheat. *Sensors* 2019, 19, 3712.
92. Rabbinge, R. The ecological background of food production. In *Crop Production and Sustainable Agriculture*, Rabbinge, R., Ed.; John Wiley and Sons, New York, NY, USA, 1993; pp. 2–29.
93. Ray, D. K., Ramankutty, N., Mueller N. D., West, P. C., Foley, J. A. 2012 . Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nat. Commun.* 3, 1-7.
94. Ray, D.K.; Mueller, N.D.; West, P.C.; Foley, J.A. 2013. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS ONE* 8(6), e66428.
95. Reining, E. Assessment tool for biological nitrogen fixation of *Vicia faba* cultivated as spring main crop, *European Journal of Agronomy*, Vol. 23, Issue 4, 2005, Pages 392-400.
96. Reinprecht, Y., Schram, L., Marsolais, F., Smith, T. H., Hill, B., & Pauls, K. P. (2020). Effects of Nitrogen Application on Nitrogen Fixation in Common Bean Production. *Frontiers in plant science*, 11, 1172.
97. Rochester, I. J., Peoples, M. B., Gault, R. R., & Constable, G. A. (1998). Implications of accounting for below-ground N on the calculations of residual returns of fixed N for commercial faba bean crops. In *Proceedings of the 9th Australian Agronomy Conference*. Wagga Wagga (pp. 493-496).
98. Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475.
99. Rockström, J.; Williams, J.; Daily, G.; Noble, A.; Matthews, N.; Gordon, L.; Wetterstrand, H.; DeClerck F.; Shah, M.; Steduto, P.; de Fraiture, Ch.; Hatibu, N.; Unver, O.; Bird J.; Sibanda, L.; Smith, J. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio* 2017, 46, 4–17.
100. Rubio, G.; Zhu, J.; Lynch, J. A critical test of the prevailing theories of plant response to nutrient availability. *Am. J. Botany* 2003, 90-91, 143-152.
101. Ruiz Herrera, L.F.; Shane, M.W.; López-Bucio, J. Nutritional regulation of root development. *WIREs Dev. Biol.* 2015, 4, 431–443.
102. Scherer H.W. (2008) Impact of Sulfur on N₂ Fixation of Legumes. In: Khan N.A., Singh S., Umar S. (eds) *Sulfur Assimilation and Abiotic Stress in Plants*. Springer, Berlin, Heidelberg.
103. Sharma, L.K.; Bali, S.K. 2017. A review of methods to improve nitrogen use efficiency in agriculture. *Sustainability* 2018, 10, 51.
104. Siddique, K.H.M., Johansen, C., Turner, N.C. et al. (2012). Innovations in agronomy for food legumes. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 45–64.
105. Sinclair, T.R.; Rufty, T.W. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Glob. Food Secur.* 2012, 1, 94–98.
106. Slafer, G. A., Savin, R., Sadras, V.O. 2014 . Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crop Res.* 157, 71-83.
107. Smith. P. Delivering food security without increasing pressure on land. *Global Food Sec.* 2013, 2, 18–23.

108. Smith, P.; Gregory, P.J.; van Vuuren, D. Obersteiner, M.; Havlik, P.; Rounsevell, M.; Woods, J.; Stehfest, E.; Bellarby, J. Competition for land. *Phil. Trans. R. Soc. B* 2010, 365, 2941–2957.
109. Smucker, A.J.M.; Aiken, R.M. Dynamic root responses to water deficits. *Soil Sci.* 1992, 154, 281–289.
110. Song, L.; Wang, S.; Ye, W. Establishment and application of critical nitrogen dilution curves for rice based on leaf dry matter. *Agronomy* 2020, 10, 367.
111. Stamatiadis, S.; Schepers, J.S.; Evangelou, E.; Tsadilas, C.; Glampedakis, M.; Dercas, N.; Spyropoulos, N.; Dalezios, N.R.; Eskridge, K. Variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat under high spatial resolution. *Precision Agric.* 2018, 19, 570–587.
112. Studnicki, M.; Lenartowicz, M.; Noras, K.; Wójcik-Gront, W.; Wyszyński Z. Assessment of stability and adaptation patterns of white sugar yield from sugar beet cultivars in temperate climate environments. *Agronomy* 2019, 9, 405.
113. Subedi, K.; Ma, B. Nitrogen uptake and partitioning in stay-green and leafy maize hybrids. *Crops Sci.* 2005, 45, 740–747.
114. Szczepaniak, W. A mineral profile of winter oilseed rape in critical stages of growth – nitrogen. *J. Elem.* 2014, 19(1), 759-778.
115. Szczepaniak, W., Grzebisz, W., Potarzycki, J., Łukowiak, R., Przygocka-Cyna, K. Nutritional status of winter oilseed rape in cardinal stages of growth as yield indicator. *Plant, Soil Environ.* 2015, 61(7), 291-296.
116. Szczepaniak, W.; Grzebisz, W.; Potarzycki, J.; Łukowiak, R.; Przygocka-Cyna, K. Nutritional status of winter oilseed rape in cardinal stages of growth as yield indicator. *Plant Soil Environ.* 2015, 61, 291–296.
117. Taiz, L. 2013. Agriculture, plant physiology, and human population growth: past, present, and future. *Theor. Exp. Plant Physiol.* 25(3), 167-181.
118. Thomas, R.J., Hungria, M. (1988) Effect of potassium on nitrogen fixation, nitrogen transport, and nitrogen harvest index of bean, *Journal of Plant Nutrition*, 11:2, 175-188
119. Tilman, D.; Balzer, Ch.; Hill, J.; Befort, B.L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *PNAS* 2011, 108, 50.
120. Turpin J. E. , Robertson M. J. , Haire C. , Bellotti W. D. , Moore A. D. Rose I. (2003) Simulating fababean development, growth, and yield in Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 54, 39-52.
121. Turpin J. E. , Robertson M. J. , Hillcoat N. S. Herridge D. F. (2002) Fababean (*Vicia faba*) in Australia's northern grains belt: canopy development, biomass, and nitrogen accumulation and partitioning. *Australian Journal of Agricultural Research* 53, 227-237.
122. Van Ittersum, M.K.; Cassman, K.G.; Grassini, P.; Wolf, J.; Tittonell, P.; Hochman, Z. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Res.* 2013, 143, 4–17.
123. Vasu, D.; Singh, S.K.; Sahu, N.; Tiwary, P.; Chandran, P.; Duraisami, V.P.; Ramamurthy, V.; Lalitha, M.; Kaliselvi, B. Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical techniques for farm level nutrient management. *Soil Tillage Res.* 2017, 169, 25–34.
124. Villar, N.; Aranguren, M; Castellon, A; Besga, G.; Aizpurua, A. Soil nitrogen dynamics during an oilseed rape (*Brassica napus* L.) growing cycle in a humid Mediterranean climate. *Scientific Rep.* 2019, 9, 13864.
125. Wallace, A.; Wallace, G.A. Closing the Crop-Yield Gap through Better Soil and Better Management; Wallace Laboratories: Los Angeles, CA, USA, 2003; p. 162.
126. Wang, X., Mathieu, A., Cournede, P-H., Allirand, J-M., Jullien, A., de Reffye, Ph., Zhang, B.G. Variability and regulation of the number of ovules, seeds, and pods according to assimilate availability in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Res.* 2011, 122, 60-69.

127. Wang, Y., Liu, T., Li, X., Ren, T., Cong, R., Lu J. Nutrient deficiency limits population development, yield formation and nutrient uptake of direct sown winter oilseed rape. *J. Integr. Agric.* 2015, 14(4), 670-680.
128. Weymann, W., Böttcher, U., Sieling, K., Kage, H. Effects of weather conditions during different growth phases on yield formation of winter oilseed rape. *Field Crops Res.* 2015, 173, 41-48.
129. White, P.J.; Brown. P.H. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Ann. Bot.* 2010, 105, 1073–1080.
130. Woźniak, E., Waszkowska, E., Zimny, T., Sowa, S., Twardowski, T. 2019. The rapessed potential in pPoland and germany in the context of production, legislation and intelektual propret rights. *Front. Plant Sci.* 10:1423.
131. Wu, L., Misselbrook, TH., Feng, L., Wu, L. Assessment of Nitrogen Uptake and Biological Nitrogen Fixation Responses of Soybean to Nitrogen Fertiliser with SPACSYS. *Sustainability.* 2020; 12(15):5921. <https://doi.org/10.3390/su12155921>
132. Yang, C.; Gan, Y.; Harker, N.; Kutcher, H.R.; Gulden, R.; Irvine, B.; May, W.E. Up to 32% yield increase with optimized spatial patterns of canola plant establishment in western Canada. *Agron. Sustain. Dev.* 2014, 34, 793–801.
133. Yin, X.; Goudriaan, J.; Lantinga, E.A.; Vos, J.; Spiertz, H. A flexible sigmoid function of determinate growth. *Ann. Bot.* 2003, 91, 361–371.
134. Zając, T., Klimek-Kopyra, A., Oleksy, A., Lorenc-Kozik, A., Ratajczak, K. Analysis of yield and plant traits of oilseed rape (*Brassica napus* L.) cultivated in temperate region in light of the possibilities of sowing in arid areas. *Acta Agrobot.* 2016, 69(4), 1696.
135. Zörb, C., Senbayram, M., Peiter, E. Potassium in agriculture--status and perspectives. *J Plant Physiol.* 2014 May 15;171(9):656-69.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

W Katedrze Chemii Rolnej i Biogeochemii środowiska należącej do ówczesnej Akademii Rolniczej, a obecnie Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu jestem zatrudniony od 2005 roku. Problematyka naukowa, którą realizuję w swoich doświadczeniach znajduje się w obszarze biogeochemii środowiska, żywienia roślin, a także bilansowania składników pokarmowych zarówno od strony zwiększenia efektywności wykorzystania składników pokarmowych przez rośliny jak i ograniczania zagrożeń środowiskowych powodowanych przez ich nadmierne rozproszenie w ekosystemie w ujęciu czasowym jak i przestrzennym.

Moją działalność naukową rozpocząłem po studiach w okresie asystentury będąc jednym z wykonawców tematu **508-06-03/S**: „*Kompleksowy bilans składników pokarmowych w gospodarstwie rolnym, a zagrożenia środowiska*” finansowanego przez Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi. Celem podjętej tematyki badawczej było zwiększenie efektywności nawożenia azotem, któremu służyło rozpoznanie takich zadań jak: identyfikację źródeł azotu, oznaczenie zasobów N mineralnego w glebie w okresie przed ruszeniem wegetacji, przeprowadzenie bilansu składników pokarmowych, ocena efektywności nawożenia oraz wyznaczenie metody ustalania optymalnych dawek azotu. Umiejętności zdobyte podczas prowadzenia tematu oraz badań zarówno podczas przygotowywania pracy magisterskiej jak i badań w trakcie realizacji przewodu doktorskiego umożliwiły mi współpracę z Katedrą Agronomii Uniwersytetu Stanowego w Kansas (Southeast Research and Extension Center, Department of Agronomy, Kansas State University). Dzięki tej współpracy, a także jej efektów, prowadzono dalsze badania w omawianym zakresie badawczy. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę do publikacji następujących osiągnięć:

1. **Łukowiak R.**, Grzebisz W., Sassenrath G. 2016. New insights into phosphorus management in agriculture – A crop rotation approach. *Science of the Total Environment* 542, 1062-1077.
2. Grzebisz, W., **Łukowiak, R.**, Sassenrath, G. 2018. Virtual nitrogen as a tool for assessment of nitrogen management at the field scale: A crop rotation approach. *Field Crops Research*. Vol. 218, 1 April 2018, Pages 182-194.
3. **Łukowiak, R.**, Grzebisz, W., Barłóg, P. Magnesium management in the soil-crop system - A crop rotation approach. *Plant Soil Environ.*, Vol. 62, 2016, No. 9: 395–401.
4. **Łukowiak R.**, Grzebisz W., Barłóg P., Potarzycki J., Kotnis K. (2018). The effect of two diverse group of cropping sequences in a production farm on potassium management. *Fragmenta Agronomica* 34(3): 76-87. 2017.
5. Grzebisz W., Szczepaniak W., Potarzycki J., **Łukowiak R.** 2012: Sustainable Management of Soil Potassium – A Crop Rotation Oriented Concept. In: *Soil Fertility*. Roland Nuhu Issaka (Ed.), s. 135-172. *Janeza Trdine* 9, 51000 Rijeka, Croatia. ISBN: 978-953-51-0873-3, InTech.

Współpraca z Zakładem Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb Instytutu Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu skupiała się wokół zagadnień związanych z wykorzystaniem rozproszonego odbicia spektralnego i danych z obrazów satelitarnych WorldView-2 do przewidywania dostępnych dla roślin form składników odżywczych z powierzchni gleby. Badania prowadzone były w ramach projektu: MACROPSIM pt.: „Zrównoważone zarządzanie produktywnością upraw rolniczych z wykorzystaniem zobrazowań satelitarnych, w oparciu o personalizowane usługi GIS udostępniane w dedykowanym portalu”. Umowa o dofinansowanie nr POIR.04.01.02-00-0110/17-00 z dnia 29.11.2018 r., w którym byłem jednym z wykonawców. Dzięki tej współpracy powstały poniższe osiągnięcia:

1. **Łukowiak, R.**; Grzebisz, W.; Ceglarek, J.; Podolski, A.; Kaźmierowski, C.; Piekarczyk, J. Spatial Variability of Yield and Nitrogen Indicators—A Crop Rotation Approach. *Agronomy* 2020, 10, 1959. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121959>
2. Kaźmierowski C., Królewicz S., **Łukowiak R.**, Piekarczyk J., Mammedov E., Grzebisz W., Wyczałek I. 2016. - „Using of the diffuse spectral reflectance and WorldView-2 satellite image data to predict plant available forms of nutrients in soil surface horizon” 15-18.06.2016, Cluj Napoca, Rumunia. Conference: EUROPEAN SOCIETY FOR SOIL CONSERVATION INTERNATIONAL CONFERENCE "SOIL - OUR COMMON FUTURE". Affiliation: BABEȘ-BOLYAI UNIVERSITY CLUJ-NAPOCA, UNIVERSITY OF AGRICULTURAL SCIENCES AND VETERINARY MEDICINE CLUJ-NAPOCA, OFFICE FOR PEDOLOGIC AND AGROCHEMICAL STUDIES CLUJ-NAPOCA Project: Sustainable management of the productivity of agricultural crops using satellite images, based on personalized GIS systems available at a dedicated portal. – **poster**.
3. Kaźmierowski C., Królewicz S., **Łukowiak R.**, Piekarczyk J., Mammadov E., Grzebisz W., Wyczałek I. 2016. The use of the diffuse spectral reflectance and Worldview-2 satellite data to predict plant available forms of nutrients in soil surface horizon. Abstracts of European Society for Soil Conservation (ESSC) International Conference "Soil - our common future", Cluj Nappoca, 15-18.06.2016. Har N., Bedelea H. (ed). Presa Universitara Clujeana. p. 34. – **streszczenie**.

Doświadczenie zdobyte podczas studiów podyplomowych pt.: „Wykorzystanie biomasy na cele energetyczne” prowadzonych przez Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie oraz stażu EU Marie Curie Project Training Course II 2007, „Agricultural Technologies for Sustainable and Efficient Production, Processing and Use of Biomass” Leibniz Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim (ATB), November 19-23, part of the EU Marie Curie Project “Modern Agriculture in Central and Eastern Europe: Tools for the Analysis and Management of Rural Change

(MACE), 2006-2009, pozwoliły mi zdobyć cenne doświadczenie, które było niezwykle pomocne w realizacji badań jako wykonawca w konsorcjum projektu, GEKON pt.: „Proekologiczne wytwarzanie nawozów organiczno-mineralnych na bazie odpadów ubocznych produktów spalania i biogazyfikacji biomasy”. Termin realizacji: 2015-2017. Finansowanie w ramach projektu GEKON przez NCBiR oraz NFOŚiGW umowa Nr R/40/03/15, GEKON1/05/214543/38/2015. Uczestnictwo w projekcie skutkowało zestawem poniższych osiągnięć:

1. Grzebisz, W., Przygocka-Cyna, K., **Łukowiak, R.** 2009. Rolnicze zagospodarowanie odpadu pofermentacyjnego z biogazowni rolniczej – ograniczenia i skutki, [w]: Kucharska B., Odnawialne źródła energii nowym wyzwaniem dla obszarów wiejskich w Polsce, Fundacja Programów Pomocy dla Rolnictwa FAPA, Opole 2009, 21 – 29. ISBN 978-83-62282-00-5
2. Przygocka-Cyna, K., Grzebisz, W., **Łukowiak, R.** 2018. Effect of biofertilizer amendments on agrochemical properties of soil cropped with vegetables. *Journal of Elementology.*, 23(1)2018: 163-177. DOI: 10.5601/jelem.2017.22.3.1476
3. Przygocka-Cyna, K., Grzebisz, W., **Łukowiak, R.**, Biber, M. 2018. Biomass ash and biogas digestate bio-fertilizers as a source of nutrients for light acid soil – an exhaustion lettuce test. *Journal of. Elementology.*, 23(2)2018: 413-428. DOI: 10.5601/jelem.2017.22.3.1492.

W trakcie pracy naukowej na UPP podjąłem również współpracę z Instytutem Dendrologii Państwowej Akademii Nauk w Kórniku oraz wcześniej wspomnianym z Zakładem Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb Instytutu Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu w zakresie analizy wpływu zbiorowisk roślinnych sztucznie introdukowanych na hałdach pokopalnianych w okolicach Bełchatowa, na funkcjonowanie roślinności drzewiastej i ziołowej na tle procesów geochemicznych gleby. Efektem współpracy, która jest kontynuowana także obecnie, było powstanie dwóch prac:

1. Rawlik, M., Kasproicz, M., Jagodziński A.M., Kaźmierowski, C., **Łukowiak, R.**, Grzebisz, W. 2018. Canopy tree species determine herb layer biomass and species composition on a reclaimed mine spoil heap. *Science of The Total Environment* Vol. 635 (2018) :1205-1214.
2. Rawlik M, Kasproicz M, Jagodziński A.M., Kaźmierowski C., **Łukowiak R**, Grzebisz W. Tree species have a greater influence on species composition of the herb layer than soil texture on a forested post-mining area. *Land Degradation and Development.* 2021;1–12.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego.

- 1° Promotor pomocniczy w zakończonym przewodzie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Karola Kotnisa. Tytuł rozprawy: „Ocena plonotwórczej wartości azotu z pofermentu w uprawie rzepaku ozimego (*Brassica napus L.*)” Promotor: prof. dr hab. Witold Grzebisz. Promotor pomocniczy dr inż. Remigiusz Łukowiak Obrona publiczna w trybie online 11 lutego 2021r. o godz. 10:30.
- 2° Promotor pomocniczy (od dnia 23.12.2021r. zgodnie z uchwałą nr 5 Komisji Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo), w trwającym przewodzie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Aleksandry Grzyb pt. „Przestrzenne i czasowe zróżnicowanie biomasy i aktywności drobnoustrojów glebowych w glebie i relacja z zasobami azotu w okresie wegetacji”. Promotor prof. UPP dr hab. Agnieszka Wolna-Maruwka. Promotor pomocniczy dr inż. Remigiusz Łukowiak.

Czynny udział w organizacji i prowadzeniu wykładów i ćwiczeń w ramach projektów Unijnych.

- 1° Projekt pod tytułem „Przyroda od A do Z. Pozaszkolne zajęcia edukacyjne w ramach Uniwersytetu Młodych Przyrodników” o numerze POWR.03.01.00-00-U134/1, realizowany w ramach POWER, Oś Priorytetowa III Szkolnictwo wyższe dla gospodarki i rozwoju, Działanie 3.1 Kompetencje w szkolnictwie wyższym, na podstawie umowy nr UDA-POWR.03.01.00-00-U100/17-00 zawartej z Instytucją Pośredniczącą w dniu 14.08.2018r. Okres realizacji projektu: od 2018-09-01 do 2020-08-31, - aktywny udział w tworzeniu programu, organizowaniu i prowadzeniu zajęć dla młodzieży ze szkół podstawowych oraz opracowanie konspektów dla nauczycieli.

Inne osiągnięcia dydaktyczne.

- 1° Będąc nauczycielem akademickim na Uniwersytecie Przyrodniczym w Poznaniu opracowałem lub byłem współautorem programów nauczania oraz prowadziłem ćwiczenia z następujących przedmiotów: Chemia Rolna (kierunek Rolnictwo – stacjonarne i niestacjonarne), Analiza instrumentalna (kierunek Rolnictwo – stacjonarne i niestacjonarne), Rolnicze obciążenia środowiskowe (kierunek Rolnictwo – stacjonarne), Testowanie gleb i roślin (kierunek Rolnictwo – stacjonarne), Przyrodnicze podstawy i skutki nawożenia (kierunek Ochrona środowiska – stacjonarne), Biogeochemia środowiska (kierunek Ochrona środowiska – stacjonarne), Techniki laboratoryjne (kierunek Ochrona środowiska – stacjonarne), Remediacja Środowiska (kierunek Ochrona środowiska – stacjonarne), Chemia ogólna (kierunek Rolnictwo – stacjonarne i

niestacjonarnie, kierunek Ochrona środowiska – stacjonarnie), Podstawy chemii (kierunek Inżynieria rolnicza – stacjonarnie i niestacjonarnie, kierunek Informatyka stosowana – stacjonarnie), Instrumental analysis zajęcia anglojęzyczne (kierunek Agronomy – stacjonarnie).

- 2° Udział w organizacji cyklu „Wagary z Przyrodą” na Wydziale Rolnictwa, Ogrodnictwa i Bioinżynierii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Temat „*Nawóz na glebę i co dalej?*”, promocja uczelni, cykl prezentacji dotyczących nawozów oraz ich wpływu na środowisko naturalne, zajęć praktycznych w zakresie diagnostyki odżywienia roślin skierowane dla młodzieży ponadpodstawowej, potencjalnych kandydatów na studia lata 21.03.2017, 21.03.2018, 21.03.2019.
- 3° Współpraca z Okręgową Stacją Chemiczno-Rolniczą w Poznaniu oraz Ośrodkami Doradztwa Rolniczego w zakresie edukacji rolniczej studentów, która pozwala na wymianie poglądów, najnowszych trendów oraz opracowaniu badań umożliwiających rozwój metod laboratoryjnych i polowych. Wraz z dyrekcją i zespołem OSCHR w Poznaniu od 2003 roku prowadzimy wykłady i szkolenia dla studentów kierunku Rolnictwo poruszające zagadnienia związane z analizą gleb, roślin, płodów rolnych i leśnych, nawozów, osadów ściekowych, podłoży ogrodniczych w zakresie diagnostyki takich parametrów jak: pH, makro- i mikroelementy, zasolenie, metale ciężkie etc.). Poruszamy tematy planów nawożenia, bilansu N, P, K oraz prawidłowego stosowania nawozów w zakresie zrównoważonego zarządzania składnikami pokarmowymi w gospodarstwach rolnych jako nieodłącznej części agro-ekosystemu.
- 4° Szeroka współpraca z firmą Luvena S.A. w zakresie edukacji studentów. Organizowane wraz z dyrekcją i pracownikami firmy, prelekcje, wykłady, szkolenia, zajęcia terenowe w zakładzie dla studentów kierunku Rolnictwo poruszają zagadnienia związane z historią i funkcjonowaniem zakładu produkującego nawozy, zapoznaniem z procesem technologicznym i funkcjonowaniem laboratorium trzymającego pieczę nad procesem jakościowym. Studenci poznają sprzęt laboratoryjny służący do analityki otrzymanych nawozów w zakresie zawartości podstawowych składników pokarmowych jak i progów granicznych zawartości składników niepożądanych.
- 5° Administrator platformy E-learningowej przy ambasadzie Holenderskiej w Polsce „E-learning Gleba”. Przy ambasadzie Holenderskiej. AgriHolland B.V./AHA Leermiddelenbouwers Nieuwe Kanaal 9D-3 6709 PA Wageningen (Netherlands). Administrowanie platformą E-learningową w zakresie edukacji nauk rolniczych. W ramach platformy uczestnicy (studenci, uczniowie, producenci rolni) mają możliwość rozwijania swojej wiedzy (rolniczo-środowiskowej) poprzez korzystanie z cyklu wykładów z zakresu praktyki rolniczej, oraz sprawdzania pozyskanej wiedzy podczas rozwiązywania testów sprawdzających ich postępy.

Opieka naukowa nad studentami w toku specjalizacji.

Promotor prac magisterskich:

- 1° Krzysztof Pokładecki 2016 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Ocena przydatności rolniczej osadu ściekowego jako substratu do produkcji nawozów”.
- 2° Radzimir Kramm 2016 r.: studia stacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Wpływ popiołu na stan odżywienia i plonowanie kukurydzy”.
- 3° Mariusz Tobała 2016 r.: studia niestacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Optymalizacja dolistnego stosowania saletry potasowej w uprawie jęczmienia jarego”.
- 4° Marta Szuszkiewicz 2017 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Określenie stanu geochemicznego gleb w strefie postindustrialnej Ostrowa Wielkopolskiego”.
- 5° Aleksandra Zawidzka 2017 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Remediacja gleb strefy postindustrialnej Ostrowa Wielkopolskiego”.
- 6° Kacper Broniszewski 2017 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Ocena fitotoksyczności popiołów z biomasy dla warzyw korzeniowych”.
- 7° Patryk Śpiączka 2017 r.: studia niestacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Ocena wartości odkwaszającej i żywieniowej popiołu z biomasy w uprawie kukurydzy”.
- 8° Anna Baranowska 2018 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Przestrzenne zróżnicowanie rozmieszczenia azotu mineralnego w glebie”.
- 9° Natalia Drzewiecka 2018 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Fitotoksyczność rezydualna pierwiastków śladowych w warunkach intensywnej produkcji rolnej”.
- 10° Dominika Matczak 2018 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Wrażliwość odmian pszenicy na dostępność pierwiastków śladowych”.
- 11° Bartosz Wielebski 2018 r.: studia stacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Reakcja plonotwórcza pszenicy jarej na współdziałanie wieloletniego nawożenia potasem i bieżącego magnezem”.
- 12° Angelina Seraszek 2019 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Wrażliwość odmian pszenicy na dostępność mikroskładników w glebie”.

- 13° Zuzanna Szymańska 2019 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Ocena zagrożenia wymywaniem związkami biogennymi w warunkach intensywnej produkcji rolnej.”
- 14° Jacek Jakubek 2020 r.: studia stacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Zmienność przestrzenna odżywienia rzepaku ozimego azotem w krytycznych fazach formowania plonu - lokalizacja Nakło nad Notecią”
- 15° Wojciech Olejnik 2020 r.: studia stacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Zmienność przestrzenna odżywienia rzepaku ozimego azotem w krytycznych fazach formowania plonu - lokalizacja Karmin”
- 16° Dominik Skrzypczak 2021 r.: studia niestacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Zmienność stanu odżywienia pszenicy ozimej w kardynalnych fazach formowania plonu w warunkach zróżnicowanych właściwości agrochemicznych gleby.”

Promotor prac inżynierskich:

- 1° Kaja Altmark 2016 r.: studia stacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w gospodarstwach rolnych o różnych systemach produkcji zlokalizowanych w powiecie waleckim”.
- 2° Kacper Broniszewski 2016 r.: - studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Ocena wskaźnikowa emisji metanu z gospodarstw rolnych Wielkopolski”.
- 3° Marta Szuszkiewicz 2016 r.: - studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Ocena wskaźnikowa emisji amoniaku z gospodarstw rolnych Wielkopolski”..
- 4° Natalia Drzewiecka 2017 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Ocena stopnia zagrożenia związkami azotu mineralnego jeziora Skrzyneckie małe z uwzględnieniem form użytkowania terenu”.
- 5° Anna Baranowska 2017 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Ocena stopnia zagrożenia związkami azotu mineralnego Jeziora Biezdruchowo z uwzględnieniem formy użytkowania terenu”.
- 6° Bartosz Wielebski 2017 r.: studia stacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w gospodarstwach rolnych o różnych systemach produkcji zlokalizowanych w powiecie Krotoszyn”.
- 7° Kamil Michalewicz 2017 r.: studia stacjonarne, Rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w gospodarstwach rolnych o różnych systemach produkcji, zlokalizowanych w powiecie Wolsztyn”.
- 8° Julia Matysiak 2018 r.: studia stacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w dwóch gospodarstwach rolnych z produkcją zwierzęcą - lokalizacja powiat wrzesiński”.

- 9° Krzysztof Lach 2018 r.: studia stacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w dwóch gospodarstwach rolnych z produkcją roślinną - lokalizacja powiat gryfiński”.
- 10° Jakub Łech 2018 r.: studia niestacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w gospodarstwach rolnych - produkcja zwierzęca i roślinna”.
- 11° Dawid Perski 2018 r.: studia niestacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w dwóch gospodarstwach rolnych z produkcją zwierzęcą zlokalizowanych w powiecie włocławskim”.
- 12° Angelina Seraszek 2018 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Ocena zagrożenia skażeniem gleb metalami ciężkimi na terenach przemysłowych miasta Koźmina Wielkopolskiego”.
- 13° Zuzanna Szymańska 2018 r.: studia stacjonarne, Ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Ocena stopnia zagrożenia związkami azotu mineralnego Jeziora Lusowskiego z uwzględnieniem formy użytkowania terenu”.
- 14° Dominik Skrzypczak 2019 r.: studia niestacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w dwóch gospodarstwach o mieszanym profilu produkcji zlokalizowanych w powiecie Gostyńskim”.
- 15° Łukasz Milczyński 2019 r.: studia niestacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w dwóch gospodarstwach rolnych o mieszanym profilu produkcji zlokalizowanych w powiecie Międzychodzkiem”.
- 16° Paulina Szymańska 2019 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Ocena zagrożenia eutrofizacją Jeziora Skrzyneckie Duże na podstawie zawartości związków biogenych z uwzględnieniem formy użytkowania terenu”.
- 17° Adrian Ginter 2020 r.: studia stacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w dwóch gospodarstwach rolnych o roślinnym kierunku produkcji w powiecie Człuchowskim”.
- 18° Aleksander Cysarz 2020 r.: studia niestacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w dwóch gospodarstwach rolnych o różnym profilu produkcji zlokalizowanych w powiecie Pilskim”.
- 19° Alicja Gamrat 2021 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Bilans azotu jako narzędzie ochrony środowiska na przykładzie gospodarstwa rolnego zlokalizowanego w powiecie pleszewskim”.
- 20° Paulina Pruchniewicz 2021 r.: studia stacjonarne, ochrona środowiska
Tytuł pracy: „Bilans azotu jako narzędzie ochrony środowiska na przykładzie gospodarstwa rolnego zlokalizowanego w powiecie nakielskim”.

- 21° Julia Pszonka 2021 r.: studia stacjonarne, rolnictwo
Tytuł pracy: „Bilans składników mineralnych w dwóch gospodarstwach rolnych zróżnicowanym systemie uprawy w powiecie wąbrzeskim.”

Odbyte szkolenia

- 1° Szkolenie Programu Agro-Net w ramach zintegrowanego systemu rolnictwa precyzyjnego, Agrocom, Kamień Śląski 24.01.2008.
- 2° Szkolenie okresowe z zakresy BHP i ppoż. Dla kierowników i osób kierujących pracownikami, nauczycieli akademickich, pracowników niebędących nauczycielami oraz pracowników naukowo-technicznych zatrudnionych na stanowiskach zagrożonych czynnikami szkodliwymi dla zdrowia, uciążliwymi i niebezpiecznymi. Inspektorat BHP i OP Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu 14 października 2016r.
- 3° Szkolenie z zakresu administracji platformą E-learningową „E-learning Gleba”, dnia 28 stycznia 2021 godz 9:00, przy ambasadzie Holenderskiej w Polsce. AgriHolland B.V. / AHA Leermiddelenbouwers Nieuwe Kanaal 9D-3 6709 PA Wageningen – online.
- 4° Szkolenia Centrum Innowacji i Transferu Technologii Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu: „Ochrona własności intelektualnej w działalności naukowej pracowników uczelni” oraz „Ochrona „nowości” wyników B+R w postępowaniach awansowych studentów i doktorantów”, w ramach projektu pt. „Wielkopolska Regionalna Inicjatywa Doskonałości w obszarze nauk o życiu Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu”. Projekt nr 005/RID/2018/19 finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (obecnie Ministra Edukacji i Nauki) w latach 2019-2022. Dnia 28.04.2021 godz. 11 - online
- 5° Szkolenie: „Analiza pierwiastkowa za pomocą spektrometrów ICP-MS firmy Analytik Jena” Czwartek, 29 Kwietnia 2021, 10:00 Europe/Warsaw [GMT 2] ID 628765698. MS SPEKTRUM, ul. Lubomira 4 04-002 Warszawa - online
- 6° Szkolenie: „Dane badawcze w naukach społecznych. Prezentacja Repozytorium Danych Społecznych”, organizowane przez ICM UW, ISS UW oraz IFiS PAN w ramach projektu Dziedziny Repozytoria Otwartych Danych Badawczych. Warszawa, 31 maja 2021r. - online

Działalność organizacyjna: w organach uczelni i jej komisjach.

- 1° Członek Wydziałowej Komisji do spraw Kadr powołanej dnia 15 grudnia 2020 roku przez Radę Naukową Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo w związku z paragrafem 4 ust. 7.
- 2° Członek Komisji Konkursowej na stanowisko adiunkta w Instytucie Inżynierii Biosystemów Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Grudzień 2016 r.

Prace organizacyjne na rzecz samodzielnych jednostek organizacyjnych UPP (Katedra Chemii Rolnej i Biogeochemii Środowiska).

- 1° Obsługa w jednostce naukowej Katedrze Chemii Rolnej i Biogeochemii Środowiska modułu EHMS, modułu organizacji godzinowego rozkładu zajęć oraz sprawozdawczości z godzin dydaktycznych realizowanych przez Katedrę.
- 2° Udział w komisjach przetargowych.
- 3° Udział w komisjach likwidacyjnych ds. aparatury.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Otrzymane nagrody i wyróżnienia.

- 1° Nagroda Rektora Zespołowa III stopnia za osiągnięcia naukowe udokumentowane publikacjami – Listopad 2017
- 2° Nagroda Rektora Zespołowa III stopnia za osiągnięcia naukowe udokumentowane publikacjami – Listopad 2018
- 3° Nagroda Rektora Zespołowa II stopnia za osiągnięcia naukowe udokumentowane publikacjami – Listopad 2019
- 4° Nagroda RID za publikację: Łukowiak, R., Grzebisz, W. “Effect of Site Specific Nitrogen Management on Seed Nitrogen—A Driving Factor of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus L.*) Yield”. *Agronomy*, 2020, 10(9), 1364. Projekt numer 005/RID/2018/19 pn. „Wielkopolska Regionalna Inicjatywa Doskonałości w obszarze nauk o życiu Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu” Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa w latach 2019-2022.

Mój dotychczasowy dorobek naukowy obejmuje **38** oryginalnych prac twórczych, **9** streszczeń i posterów, **2** referaty, **4** współautorstwa w monografii oraz **3** w rozdziale monografii, a także **6** prac popularno-naukowych.

Na mój opublikowany dorobek naukowy składa się **38** prac współautorskich, z czego w **8** jestem autorem wiodącym lub korespondencyjnym. Spośród **48** oryginalnych prac twórczych, **33** zostały wydane w języku angielskim w tym **23** w czasopismach z „Listy Filadelfijskiej”. Łączna suma uzyskanych przeze mnie punktów zgodnie z listą czasopism MNiSW z uwzględnieniem osiągnięcia naukowego wynosi **1511**.

W okresie przed uzyskaniem stopnia doktora na mój dorobek składało się **8** oryginalnych prac twórczych. Znaczne zwiększenie dorobku naukowo-badawczego miało miejsce po uzyskaniu stopnia doktora.

Sumaryczny Impact Factor moich publikacji według listy Journal Citation Reports (JCR) wynosi **51,968**.



(podpis wnioskodawcy)