



Raport z realizacji projektu „Wasat - Innowacje satelitarne w nawożeniu i zmiennym wysiewie”

Warszawa, luty 2025

W przygotowaniu raportu brali udział:

Wasat Sp. z o. o.

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowy Instytut Badawczy

Instytut Nowoczesnego Rolnictwa Sp. z o. o.



Wstęp

1. Skład konsorcjum

2. Prace terenowe

- 2.1. Badania zasobności gleby w przyswajalne formy P, K, Mg oraz pH
- 2.2. Badania zawartości materii organicznej
- 2.3. Teledetekcyjna analiza upraw
- 2.4. Naziemny monitoring wskaźnika LAI
- 2.5. Badania przewodności elektrycznej gleby
- 2.6. Badania składu granulometrycznego gleby
- 2.7. Badania wielkości plonu
- 2.8. Badania składowych plonu ziarna i nasion
- 2.9. Badania zawartości fosforu w roślinach

3. Analiza reprezentatywnego zbioru danych pozyskanych w I sezonie badań

4. Prace w zakresie teledetekcji

- 4.1. Badania nad generowaniem map stref potencjału plonowania
- 4.2. Badania nad wyliczaniem indeksu żyzności gleby opartego o zmienne pH i zawartość materii organicznej
- 4.3. Badania nad generowaniem map stref potencjału glebowego uwzględniającego skład granulometryczny gleby
- 4.4. Badania nad syntezą danych (glebowych i teledetekcyjnych) w celu wyznaczenia obszarów zmiennego nawożenia i wysiewu
- 4.5. Badania nad obliczaniem potrzeb nawozowych roślin (nawożenie wgłębne fosforem)

5. Doświadczenia i wyniki uzyskane w II sezonie badań

- 5.1. Doświadczenia oceniające wpływ różnych gęstości siewu nasion na plonowanie oraz cechy struktury plonu pszenicy ozimej, rzepaku ozimego i pozostałych zbóż ozimych
- 5.2. Doświadczenia oceniające wpływ różnych dawek nawozów fosforowych na plonowanie pszenicy ozimej, rzepaku ozimego i pozostałych zbóż ozimych
- 5.3. Doświadczenia sprawdzające efektywność zmiennego wysiewu nasion zbóż ozimych i rzepaku ozimego w uprawie pasowej w zestawieniu z technologiami standardowymi stosowanymi w gospodarstwach biorących udział w projekcie
- 5.4. Doświadczenia porównujące technologie precyzyjnego nawożenia fosforem, obejmujące wykorzystanie rozsiewaczy rzutowych oraz zestawu do uprawy pasowej i siewu bezpośredniego z nawożeniem wgłębnym oraz technologiami standardowymi stosowanymi w gospodarstwach biorących udział w projekcie.

6. Prace koncepcyjne i informatyczne

- 6.1. Określenie wymagań
- 6.2. Implementacja algorytmów wypracowanych w części badawczej jako autonomicznego serwisu
- 6.3. Szczegóły interfejsu
- 6.4. Generowanie mapy nawożenia
- 6.5. Wdrożenie i integracja z graficznym interfejsem użytkownika
- 6.6. Wyniki
 - 6.6.1. Moduł do planowania i podsumowania zabiegu nawożenia wgłębnego fosforem - ulepszona innowacja technologiczna
 - 6.6.2. Moduł do tworzenia map zmiennego wysiewu materiału siewnego - ulepszona innowacja technologiczna
 - 6.6.3. System wyliczania oszczędności i planowania zabiegów nawożenia fosforem - innowacja organizacyjna



7. Podsumowanie



Wstęp

Współczesne rolnictwo stoi przed wyzwaniami związanymi z rosnącymi wymaganiami produkcyjnymi, presją ekonomiczną oraz koniecznością minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko. Jednym z kluczowych problemów w produkcji roślinnej jest efektywne zarządzanie nawożeniem fosforem – pierwiastkiem, który z jednej strony decyduje o wysokości i jakości plonów, a z drugiej wpływa na prawidłowe funkcjonowanie środowiska naturalnego. Tradycyjne metody nawożenia oparte na uśrednionych dawkach nawozowych i nieuwzględniające zmienności przestrzennej pola, prowadzą do spadku efektywności pobierania fosforu z gleby. W konsekwencji zwiększa się ryzyko jego wymywania do wód powierzchniowych i podziemnych, co negatywnie oddziałuje na ekosystemy wodne. Kolejnym wyzwaniem w rolnictwie jest optymalne wykorzystanie potencjału produkcyjnego pól, które cechują się dużą zmiennością glebową. Niedostosowanie norm wysiewu materiału siewnego do lokalnych warunków często skutkuje pogorszeniem wschodów, nieefektywnym zagospodarowaniem przestrzeni produkcyjnej i w efekcie obniżeniem plonów.

W tym kontekście rozwój rolnictwa precyzyjnego nabiera kluczowego znaczenia. Nowoczesne technologie, takie jak algorytmy analizy danych glebowych i teledetekcyjnych, w połączeniu z zaawansowanymi maszynami rolniczymi, w tym maszynami do uprawy pasowej, umożliwiają lepsze zarządzanie zasobami oraz minimalizację negatywnego wpływu fosforu na środowisko. Nowoczesne maszyny do nawożenia i siewu realizują już nie tylko cele agrotechniczne, ale stanowią platformy do precyzyjnego zarządzania etapami produkcji zbóż ozimych czy rzepaku. Poprzez korzystne tworzenie warunków uprawowych dla roślin w uprawie pasowej zwiększa się dynamikę i równomierność wschodów, a także efektywność pobierania fosforu z gleby przez rośliny. Nowoczesne terminale cyfrowe tych maszyn dają możliwość ciągłego zarządzania środkami produkcji na podstawie map aplikacyjnych decydując w czasie rzeczywistym o przestrzennym rozkładzie dawek nawozów fosforowych i materiału siewnego.

W niniejszym opracowaniu prezentowane są wyniki badań i rezultaty projektu „Innowacje technologiczne oraz organizacyjne w rolnictwie w zakresie precyzyjnego nawożenia oraz wysiewu nasion przy użyciu danych satelitarnych” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach działania „Współpraca” Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014-2020. Projekt realizowany był w okresie 01.01.2023 r. - 28.02.2025 r. przez grupę operacyjną „Wasat – Innowacje satelitarne w nawożeniu i zmiennym wysiewie” składającą się z rolników, podmiotu doradczego, jednostki naukowej oraz przedsiębiorstwa specjalizującego się w dostarczaniu innowacyjnych usług dla rolników oraz prowadzeniu zaawansowanych projektów badawczo-rozwojowych.

W ramach realizowanej operacji opracowano innowacyjne rozwiązania technologiczne i organizacyjne, które mają na celu zwiększenie opłacalności produkcji rolniczej, ochronę środowiska oraz łagodzenie skutków zmian klimatycznych. Kluczowe rezultaty operacji obejmują:

- opracowanie algorytmów do planowania i podsumowania zabiegów nawożenia fosforem, które uwzględniają zmienność przestrzenną potrzeb pokarmowych, zasobności gleby w fosfor oraz innych czynników glebowych warunkujących dostępność fosforu w glebie,



- stworzenie algorytmu do generowania map zmiennego wysiewu nasion, które pozwalają na lepsze wykorzystanie potencjału pól i minimalizację strat materiału siewnego,
- opracowanie systemu organizacyjnego do precyzyjnego podliczania i planowania nawożenia fosforem.

Celem głównym operacji było wytworzenie innowacji technologicznych i organizacyjnych związanych z precyzyjnym nawożeniem fosforem oraz stosowaniem zmiennej dawki wysiewu, które poprawią wyniki gospodarstw w zakresie opłacalności produkcji, ochrony środowiska oraz łagodzenia skutków zmian klimatu.

Wyniki badań przeprowadzonych w trakcie projektu potwierdzają, że zastosowanie opracowanych rozwiązań prowadzi do znaczącej poprawy efektywności wykorzystania nawozów fosforowych oraz materiału siewnego. Innowacje te umożliwiają zwiększenie plonów przy jednoczesnym ograniczeniu negatywnego wpływu na środowisko. Rezultaty projektu otwierają nowe perspektywy dla rozwoju rolnictwa precyzyjnego, które harmonijnie łączy efektywność produkcji z ochroną zasobów naturalnych.

1. Skład konsorcjum

W skład grupy operacyjnej „Wasat - Innowacje satelitarne w nawożeniu i zmiennym wysiewie” w ramach działania „Współpraca” wchodziły:

1. Lider - podmiot doradczy: Instytut Nowoczesnego Rolnictwa Sp. z o.o.
2. Przedsiębiorca MŚP: Wasat Sp. z o.o.
3. Jednostka naukowa: Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowy Instytut Badawczy
4. Rolnicy: Alina Chmielewska, Katarzyna Chmielewska, Zdzisław Chmielewski, Andrzej Stankiewicz i Łukasz Stankiewicz.

Kluczową rolę w realizacji operacji pełniła firma Wasat Sp. z o.o., która odpowiadała za planowanie doświadczeń polowych, zbieranie danych in situ, przetwarzanie danych satelitarnych i glebowych, opracowywanie algorytmów oraz tworzenie rozwiązań informatycznych. Wasat Sp. z o.o. to polska firma z siedzibą w Gdańsku i oddziałem w Warszawie, specjalizująca się w dostarczaniu innowacyjnych usług dla rolników opartych na wynikach zaawansowanych projektów badawczo-rozwojowych. Wszystkie oferowane przez firmę produkty bazują na danych satelitarnych, systemach GIS oraz technologiach IT. Zespół ekspertów Wasat w dziedzinie agronomii i teledetekcji opracowuje autorskie rozwiązania, które umożliwiają analizę i wykorzystanie informacji pozyskiwanych przez satelity, oferując zaawansowane usługi Rolnictwa 4.0. Flagowe produkty firmy, takie jak serwisy Fertisat i Irriget, wspierają rolników w podejmowaniu kluczowych decyzji agronomicznych dzięki nowoczesnym technologiom dostosowanym do zmieniających się warunków produkcji rolniczej.

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy (IUNG-PIB) dostarczył w operacji wiedzy eksperckiej w zakresie nawożenia fosforem zbóż ozimych i rzepaku, oceny zasobności gleby, projektowania algorytmów nawożenia oraz opracowywania rekomendacji dla zmiennego wysiewu nasion. Dzięki swojej długoletniej działalności naukowej IUNG-PIB pełnił rolę łącznika między środowiskiem naukowym a praktyką rolniczą, zapewniając wsparcie merytoryczne w realizacji projektu.



W ramach operacji rolnicy byli odpowiedzialni za prowadzenie zabiegów agrotechnicznych zgodnie z wytycznymi przygotowanymi przez Wasat Sp. z o.o. i IUNG-PIB. Wyżej wymienione gospodarstwa prowadzą produkcję zbóż ozimych i rzepaku przy wykorzystaniu nowoczesnych technologii oraz posiadają wieloletnie doświadczenie w zarządzaniu całością prac w gospodarstwie rolnym. Lokalizacja gospodarstw w różnych częściach Polski, tj. w miejscowościach Boleszkowice (województwo zachodniopomorskie) oraz Stary Dzierżoń (województwo pomorskie) zapewniła, że badania były realizowane na polach o zróżnicowanych warunkach glebowych i topograficznych. Dzięki merytorycznemu wsparciu rolników w zakresie produkcji rolnej oraz ich udziałowi w wywiadach fokusowych i indywidualnych, możliwe było przeprowadzenie badań uwzględniających praktyczne potrzeby i oczekiwania rolników. Wyniki tych badań stanowiły podstawę do opracowania innowacji, które w największym możliwym stopniu odpowiadają na realne wyzwania polskich gospodarstw rolnych.

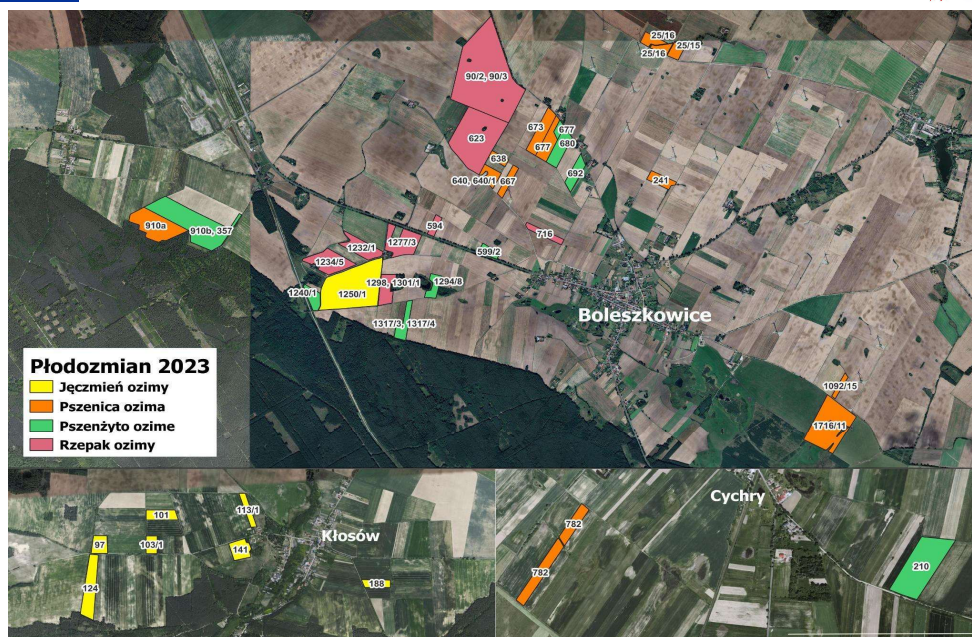
Całościowa koordynacja operacji była realizowana przez Instytut Nowoczesnego Rolnictwa Sp. z o.o., który organizował spotkania konsorcjalne, nadzorował współpracę, przygotowywał dokumentację projektową oraz wspierał partnerów w gromadzeniu i przetwarzaniu danych.

Współpraca wszystkich członków grupy operacyjnej umożliwiła opracowanie praktycznego rozwiązania cyfrowego, które będzie z powodzeniem wykorzystywane w gospodarstwach rolnych. Wypracowane innowacje uwzględniają wiedzę i doświadczenie wszystkich partnerów oraz odpowiadają na rzeczywiste potrzeby rolników.

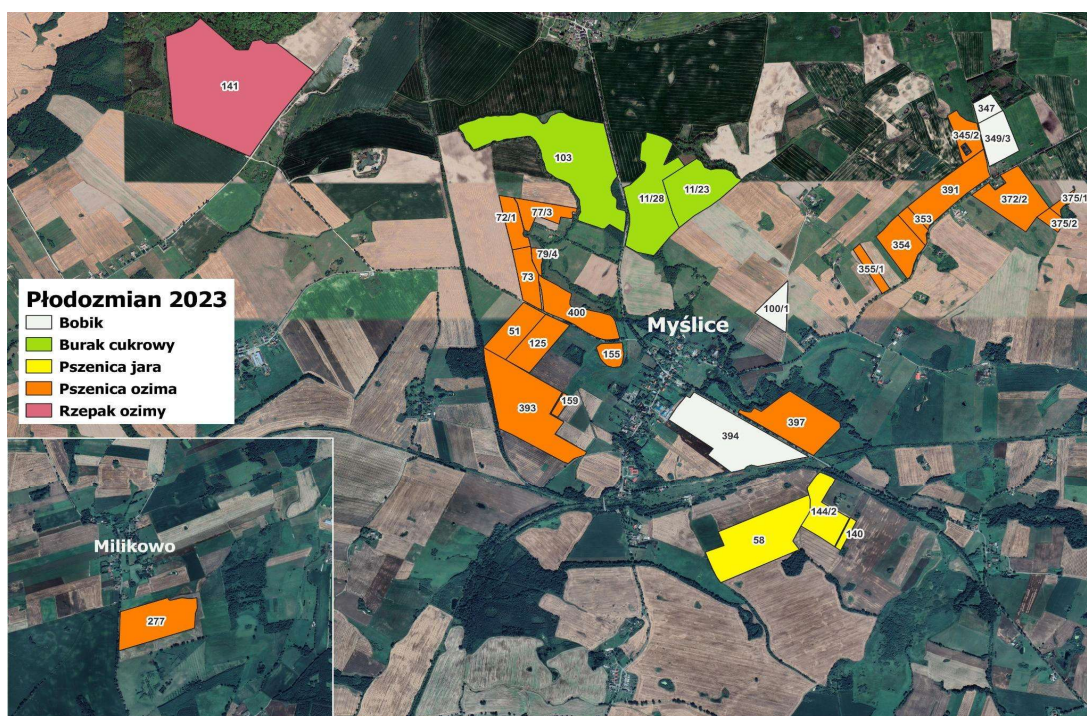
2. Prace terenowe

Celem badań terenowych było pozyskanie danych in situ niezbędnych do stworzenia bazy wartości parametryzujących i weryfikujących opracowywane algorytmy oraz oceny efektywności wypracowanych technologii optymalizujących nawożenie wgłębne fosforem i zmienny wysiew nasion w warunkach polowych. Dodatkowym celem była identyfikacja praktyk agrotechnicznych pozwalających na maksymalizację plonowania głównych roślin uprawnych w Polsce, takich jak pszenica ozima, pszenżyto ozime, rzepak ozimy i jęczmień ozimy.

Badania terenowe prowadzono w dwóch lokalizacjach: Boleszkowice (woj. zachodniopomorskie) oraz Myślice (woj. pomorskie), na łącznej powierzchni 547,6 ha, co pozwoliło na uzyskanie reprezentatywnych wyników w zróżnicowanych warunkach glebowych i klimatycznych. W Boleszkowicach badania realizowano na polach gospodarstw Andrzeja Stankiewicza i Łukasza Stankiewicza, które obejmowały obszar 227,9 ha. Dominują tam gleby płowe o klasach bonitacyjnych od IIIa do VI, tworzące kompleksy pszenno-buraczane oraz żytnie dobre i słabe. Natomiast w Myślicach na polach gospodarstw Aliny, Katarzyny i Zdzisława Chmielewskich o powierzchni 319,7 ha, przeważają gleby kategorii agronomicznej średniej, wytworzone na podłożu gliniastym, o klasach bonitacyjnych IIIa do V. Rozłóg pól przedstawiono poniżej wraz z płodozmianem w roku 2023, odpowiednio dla gospodarstw w Boleszkowicach (Rysunek 1) i Myślicach (Rysunek 2).



Rysunek 1. Rozłóg pól oraz płodozmian w roku 2023 w gospodarstwie w Boleszkowicach.



Rysunek 2. Rozłóg pól oraz płodozmian w roku 2023 w gospodarstwie w Myślicach.

2.1. Badania zasobności gleby w przyswajalne formy P, K, Mg oraz pH

Na terenie gospodarstw uczestniczących w projekcie w okresie poprzedzającym sezony uprawowe roślin ozimych w latach 2022, 2023 oraz 2024 przeprowadzono badania zasobności gleby w przyswajalne formy P, K, Mg oraz pH. W oparciu o dostarczone przez rolników historyczne badania



gleby wyznaczono obszary jednorodnych stref, w których wykonano próbkowanie. Próby glebowe zostały pobrane zgodnie z wytycznymi pobierania próbek glebowych PN-R-04031:1997 ze wszystkich pól produkcyjnych, jedna próba laboratoryjna reprezentowała obszar maksymalnie 4 ha. Materiał do badania został pobrany z wierzchniej warstwy gleby. Próby po pobraniu zostały dostarczone do laboratoriów analitycznych, gdzie zostały przebadane na zawartość makroelementów oraz kwasowość gleby. Przystawialne formy fosforu i potasu określono przy wykorzystaniu metody Egnera- Riehma DL. Przystawialne formy magnezu w glebie oznaczono zgodnie z metodą Schachtschabela. Wartość pH gleby zbadano metodą potencjometryczną w 1M roztworze KCl.

Celem przeprowadzenia badań chemicznych próbek glebowych było:

- waloryzacja przestrzennego zróżnicowania zawartości przyswajalnych form pierwiastków: fosforu, potasu i magnezu oraz określenie odczynu gleby na wszystkich polach doświadczalnych,
- prawidłowe określenie potrzeb nawozowych roślin na podstawie stanu zasobności gleby w przyswajalne formy składników pokarmowych oraz zaspokojenia potrzeb pokarmowych roślin testowych,
- określenie tempa zmian stanu zasobności gleby w przyswajalne formy składników pod wpływem zmiennych dawek składników pokarmowych, a szczególnie dynamiki zmian stanu zasobności gleby w przyswajalny fosfor, po zastosowaniu tradycyjnego (rzutowego) oraz wgłębnego (pasowego) sposobu aplikowania dawek nawozowych,
- określenie działania następczego zmiennych dawek fosforu zarówno przy aplikacji tradycyjnej oraz wgłębnej (pasowej).

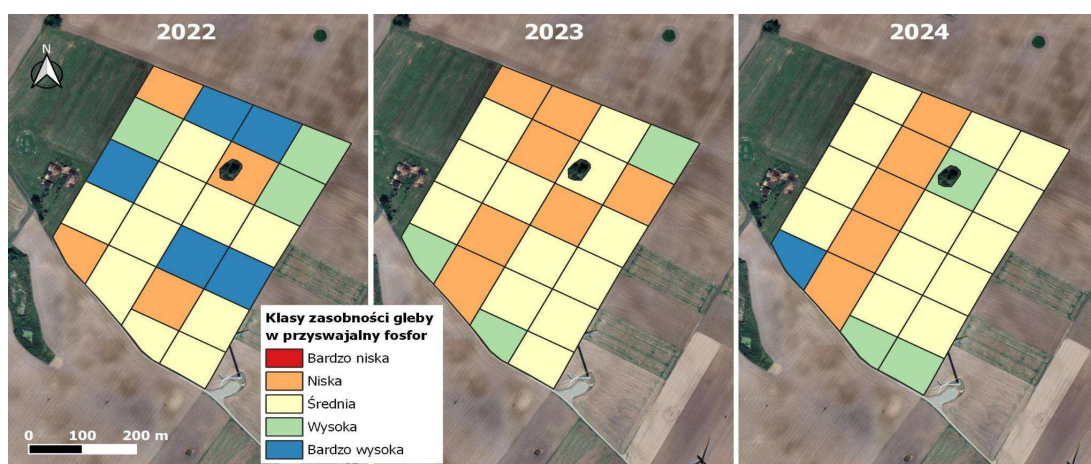
Tabela 1. Podsumowanie średnich wyników analiz zasobności formy P, K, Mg oraz pH podczas realizacji operacji w Boleszkowicach.

Przeprowadzenie testów glebowych umożliwiło opracowanie map zasobności gleby w przyswajalne formy składników pokarmowych, dzięki którym określone zostały potrzeby nawozowe dla rzepaku ozimego, pszenicy ozimej, pszenżyta ozimego i jęczmienia ozimego. Badanie zasobności gleby w przyswajalne formy makroskładników oraz wartości pH gleby pozwoliły na precyzyjne określenie zapotrzebowania gleby na makroelementy, co przyczyniło się do parametryzacji algorytmu do precyzyjnego nawożenia fosforem. Analiza zasobności oraz odczynu gleby była niezbędna do prowadzenia badań nad zaleceniami nawozowymi, bilansem fosforu oraz tworzeniem map aplikacyjnych umożliwiających zmienne nawożenie wgłębne fosforem w dużej rozdzielczości przestrzennej.



Lata	pH	Zawartość składników przyswajalnych (w mg na 100g gleby) - średnia kategoria agronomiczna gleby		
		P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
2022	6,38	11,70	23,54	5,16
2023	6,40	12,10	25,00	5,52
2024	6,43	11,11	20,83	5,34

Wyniki badań gleby przedstawione w Tabeli 1 wskazują, że na polach w miejscowości Boleszkowice panują korzystne warunki do prowadzenia produkcji roślinnej. Zasobności składników pokarmowych utrzymują się na średnim poziomie, a wartość pH jest odpowiednia dla większości upraw rolniczych. Na polach nie stosowano nawozów naturalnych ani organicznych, a zasobność składników pokarmowych uzupełniano głównie za pomocą sztucznych nawozów mineralnych oraz międzyplonów (zielonego nawozu). Poniżej, na mapach, przedstawiono zróżnicowanie przestrzenne zawartości fosforu (P₂O₅) w glebie (Rysunek 3) oraz klas odczynu (Rysunek 4) na polu 623 w gospodarstwie w Boleszkowicach.

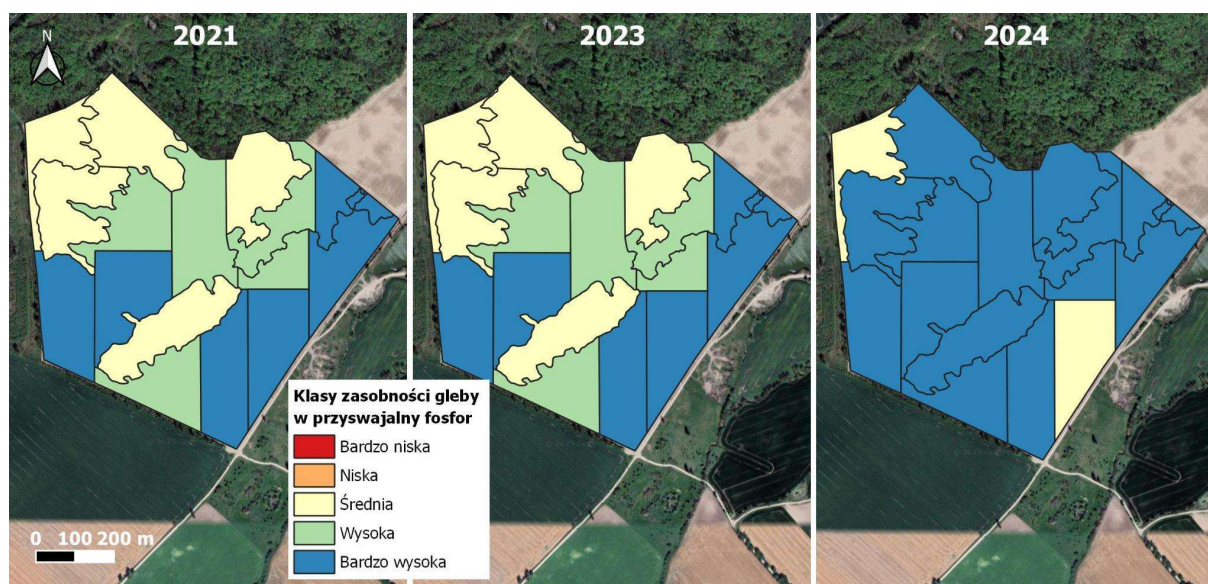


Rysunek 3. Wizualizacja klas zawartości gleby w fosfor na polu 623 w Boleszkowicach na przestrzeni lat 2022 - 2024.



Rysunek 4. Klasy odczynu gleby na polu 623 w Boleszkowicach na przestrzeni lat 2022 – 2024.

W gospodarstwie produkcyjnym w Myślicach pomiar zawartości fosforu w glebie w 2021 roku wykazał bardzo wysoką zasobność w 40 próbach, średnią zawartość w 30 próbach, niską zawartość w 26 próbach, wysoką zawartość w 24 próbach oraz bardzo niską w 3 próbach. Wyniki badań gleby na tych samych strefach w 2023 wykazały średnią zasobność w 37 próbach, wysoką zasobność w 31 próbach, bardzo wysoką w 24 próbach, niską zawartość w 9 próbach oraz bardzo niską w 2 próbach. W roku 2024 ilość stref z średnią zasobnością w fosfor utrzymywała się na zbliżonym poziomie co 2023 roku i wynosiła 35 prób. Nastąpił wzrost prób o bardzo wysokiej zasobności do 29 prób oraz zmniejszenie liczby prób o wysokiej zasobności do 20 prób. Niską zawartość wykazało 7 prób oraz bardzo niską jedna próba. Zmienność stref na polu 141 w Myślicach w latach 2021, 2023 oraz 2024, z których pobierane były próby do badań na zawartość fosforu w glebie przedstawia Rysunek 5.



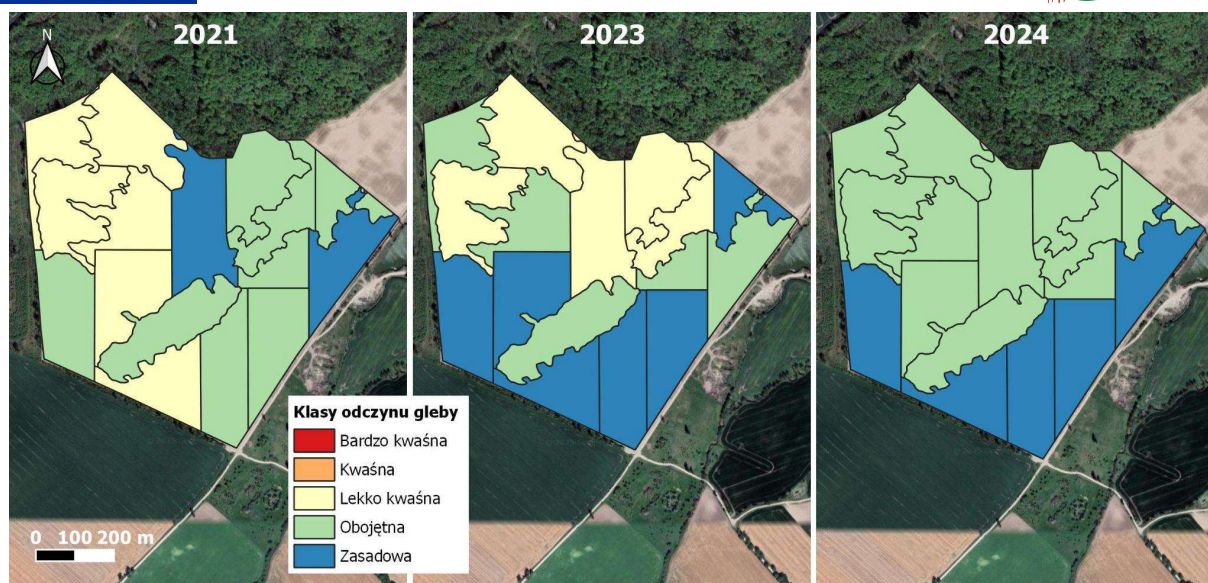
Rysunek 5. Wizualizacja zawartości gleby w fosfor na polu 141 w Myślicach w latach 2021, 2023 i 2024.



Próbki na zawartość potasu w glebie mierzone w 2021 roku uklasyfikowały się w ocenie średniej - 35 próbek, niskiej - 33 próbki, bardzo wysokiej - 25 próbek, wysokiej - 23 próbki, bardzo niskiej - 7 próbek. Badania przeprowadzone w 2023 wykazały, że najczęściej występującymi glebami były również gleby o średniej zawartości potasu - 63 próbki. Oceny pozostałych gleb wykazały wysoką zawartość - 23 próbki, bardzo wysoką zawartość - 8 próbek, niską zawartość - 8 próbek oraz bardzo niską zawartość dla jednej próbki. Kampania pomiarowa z 2024 wykazała utrzymanie wysokiej ilości stref o średniej zawartości potasu w glebie - 56 prób. Nastąpiło zmniejszenie ilości prób o wysokiej (11 prób) i bardzo wysokiej (2 próby) zawartości. Zwiększyła się liczba stref o niskiej zawartości, która wynosiła 21. Nie odnotowano stref o bardzo niskiej zawartości potasu.

Zawartości magnezu w glebie według badań z 2021 można ocenić od bardzo wysokiej do bardzo niskiej. Dominującą ilość próbek (55) sklasyfikowano jako próbki o średniej zawartości. Zawartość 31 próbek oceniono jako bardzo wysoką, 25 próbek jako wysoką, natomiast 22 próbki reprezentowały zawartość średnią oraz 3 próbki bardzo niską. Pomiar zawartości magnezu z 2023 roku również wskazał, że w gospodarstwie występuje najwięcej gleb o średniej zawartości magnezu (53 próbki). W 18 próbkach zawartość ocenioną jako niską, w 16 próbkach jako wysoką, a w 14 próbkach jako bardzo wysoką. 2 próbki charakteryzowały się bardzo niską zawartością magnezu. Badania z 2024 ponownie potwierdziły najliczniejszą zawartość magnezu na średnim poziomie, która została odnotowana w 47 strefach. Względem roku 2023 liczba prób o wysokiej i bardzo wysokiej zawartości utrzymywała się na zbliżonym poziomie i wynosiła kolejno 19 i 15 prób. Nastąpiła redukcja prób z wynikiem niskiej zawartości magnezu do 10 prób.

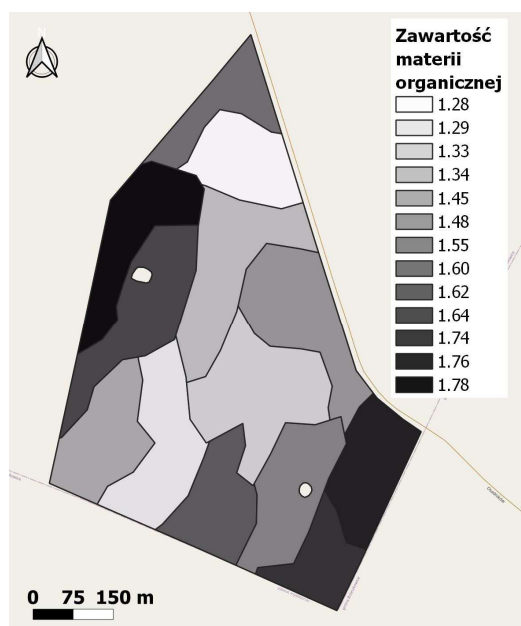
Według badań gleby wykonanych w 2021 roku odczyn gleby w większości wykonanych pomiarów został oceniony jako obojętny, o czym świadczyło 40 prób. Wyniki pozostałych pomiarów pozwoliły sklasyfikować glebę jako lekko kwaśną (27 prób), zasadową (27 prób), kwaśną (18 prób) oraz bardzo kwaśną (10 prób). Przeprowadzone badania w 2023 roku wskazały, że w gospodarstwie dominują gleby o odczynie zasadowym, które zostały oznaczone w 71 strefach. 23 strefy charakteryzowały się odczynem obojętnym, 6 stref lekko kwaśnym, 1 strefa kwaśnym oraz 2 strefy bardzo kwaśnym. Duża ilość stref zasadowych wynikała z przeprowadzenia na większości pól w gospodarstwie zabiegu późniejszego wapnowania gleby. Wykonane pomiary gleby w 2024 wykazały, że najliczniejsze są w gospodarstwie gleby lekko kwaśne (46 prób) oraz obojętne (29 prób). W mniejszym stopniu występowały gleby zasadowe (8 prób), kwaśne (6 prób) i bardzo kwaśne (3 próby). Przykład zmienności odczynu gleby w badanych latach na polu 141 w Myślicach został przedstawiony na Rysunku 6.



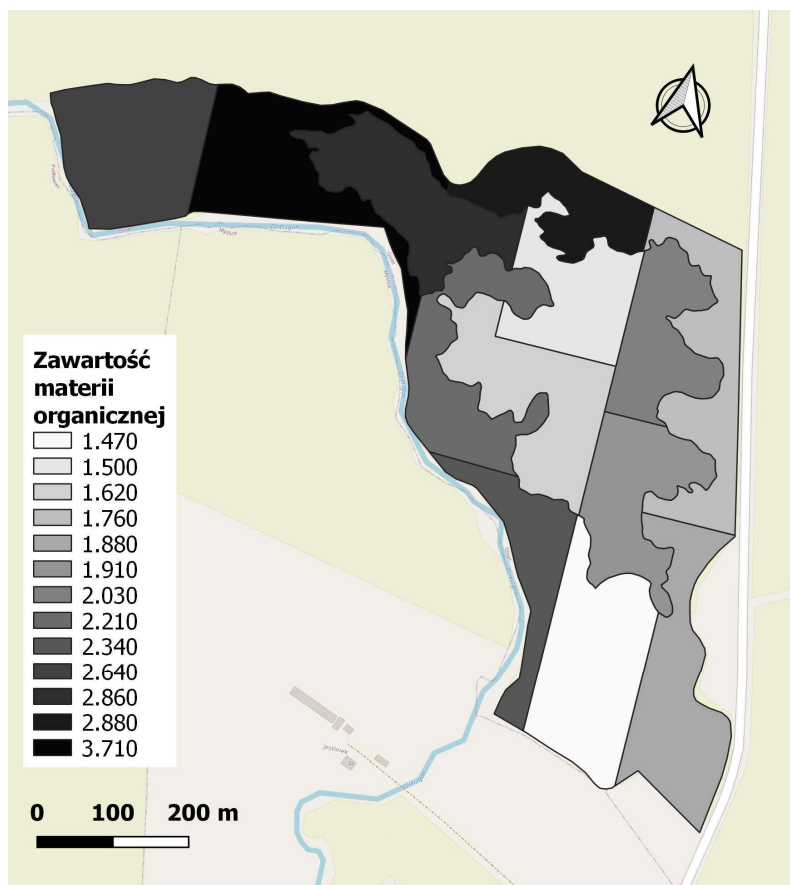
Rysunek 6. Klasy odczynu gleby na polu 141 w Myślicach w latach 2021, 2023 i 2024.

2.2. Badania zawartości materii organicznej

Przed pierwszym sezonem badań, po żniwach w 2022 roku, pobrano próby glebowe do analizy zawartości materii organicznej. Próby zostały pobrane w tych samych strefach pól przeznaczonych do realizacji operacji, w których wcześniej oceniano pH gleby oraz zawartość głównych składników pokarmowych. Zawartość materii organicznej określono metodą Tiurina. W celu zwiększenia rozdzielczości przestrzennej pomiarów, przeprowadzono dodatkowe badania przy użyciu urządzenia Veris z systemem Optic Mapper. System ten wyposażony jest w czujnik optyczny mierzący promieniowanie elektromagnetyczne odbite od gleby w dwóch zakresach długości fali: 660 nm oraz 940 nm, co pozwala na oznaczenie zawartości materii organicznej w glebie. Sensor umieszczono w płozie pracującej na głębokości kilku centymetrów. System mapowania materii organicznej został skalibrowany na podstawie laboratoryjnej analizy prób glebowych, a badania objęły powierzchnię 40 ha na wybranych polach w różnych lokalizacjach. Pomiar materii organicznej urządzeniem Veris w Myślicach przeprowadzono po żniwach w 2022 roku, natomiast ze względu na niską wilgotność gleby w Boleszkowicach po żniwach w 2022 roku i przyspieszony siew rzepaku ozimego, pomiar został wykonany po żniwach w 2023 roku. Wykonanie tych czynności było niezbędne do opracowania wskaźnika żyzności gleby, który stanowi jedną z kluczowych składowych przygotowywanych algorytmów. Średnia zawartość materii organicznej w glebie w Boleszkowicach wyniosła 1,55%, co odpowiada przeciętnej zawartości, natomiast w Myślicach wartość 2,55%. Zróżnicowanie przestrzenne wyników materii organicznej przedstawiono odpowiednio na Rysunkach 7 i 8 poniżej.



Rysunek 7. Rozkład materii organicznej na polu 90/2 i 90/3 w Boleszkowicach.



Rysunek 8. Rozkład materii organicznej na polu 103 w Myślicach.

2.3. Teledetekcyjna analiza upraw



W ramach operacji prowadzono badania mające na celu teledetekcyjną kontrolę stanu upraw. Na potrzeby monitoringu pól testowych we wszystkich sezonach wegetacyjnych korzystano z teledetekcji satelitarnej, bezałogowych statków powietrznych (BSP) oraz ręcznych urządzeń do oceny kondycji roślin (N-tester BT). W celu realizacji zadania, przez cały okres trwania projektu pozyskiwano na bieżąco wszystkie, spełniające minimalne wymagania, zobrazowania satelitarne dostępne w ramach programu Copernicus i odnoszące się do obszaru badań. Były to głównie dane z konstelacji Sentinel-2.

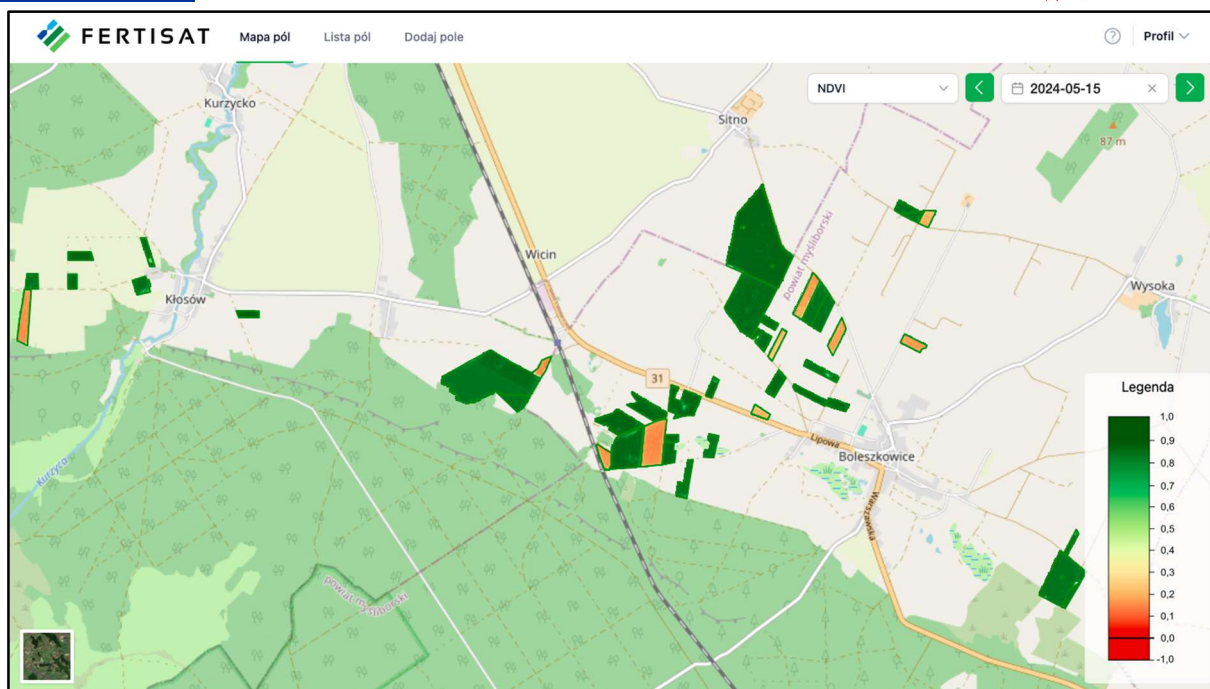
Dane z Sentinel-2 zapewniają wysoką rozdzielczość przestrzenną (10 i 20 m/px) oraz multispektralność (4 kanały w rozdzielczości 10 m/px i 6 kanałów w rozdzielczości 20 m/px). Zobrazowania te są dostępne co 3-5 dni. W badaniach wykorzystano produkty Level-2A, które zostały poddane korekcji atmosferycznej i zawierały maski chmur oraz cieni. Dane te były podstawą analiz stanu roślinności. Ich właściwości radiometryczne umożliwiły obliczenie wskaźników spektralnych, takich jak NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index) czy inne wskaźniki skorelowane z zawartością chlorofilu i poziomem stresu wodnego. Wskaźniki te zastosowano m.in. do wydzielenia homogenicznych stref na polach uprawnych oraz do regularnego monitoringu zmian w sezonie wegetacyjnym.

Uzupełniając, podczas długotrwałego braku dostępu do zobrazowań satelitarnych (koniec maja 2023 oraz czerwiec 2024), wykonywano naloty za pomocą BSP wyposażonych w kamery multispektralne rejestrujące pięć kanałów spektralnych. Rozdzielczość przestrzenna obrazów zależała od wysokości lotu i wynosiła zazwyczaj około 10 cm/px. Dane te pozyskiwano za pomocą wielowirnikowca DJI Phantom 4 z kamerą rejestrującą obrazy w tradycyjnych kanałach RGB, a także w kanałach NIR (near-infrared) i Red Edge.

Dodatkowo, do walidacji danych teledetekcyjnych wykorzystywano ręczne urządzenie referencyjne N-tester BT. Pomiary wykonywano w fazie BBCH 39 (pełne wykształcenie liścia flagowego) w uprawach pszenicy ozimej, jęczmienia ozimego oraz pszenżyta ozimego w latach 2023 i 2024. Pomiary były prowadzone w ramach ESU (jednostka próbkowania, elementarny sampling unit) wyznaczonych do mierzenia wskaźnika LAI, w ramach jednej ESU wykonywano 30 oznaczeń (zgodnie z zaleceniami producenta). N-tester BT umożliwia pomiar indeksów skorelowanych z kondycją i odżywianiem roślin, co pozwalało na ocenę ich bieżącego stanu.

Na podstawie danych teledetekcyjnych przeprowadzono wstępną ocenę efektywności nawożenia fosforem. Uzyskane informacje wykorzystano również do walidacji algorytmów zmiennego dawkowania nawozów fosforowych oraz zmiennego wysiewu materiału siewnego.

Rolnicy uczestniczący w projekcie na bieżąco mogli kontrolować kondycję swoich upraw poprzez platformę Fertisat i moduł monitoringu satelitarnego (Rysunek 9).



Rysunek 9. Widok modułu monitoringu satelitarnego w serwisie Fertisat.

2.3.1. Naziemny monitoring wskaźnika LAI

Wielkość powierzchni asymilacyjnej liści (LAI) oznaczano in situ za pomocą aparatu AccuPAR LP-80. Urządzenie AccuPAR LP-80 jest przenośnym przyrządem do liniowego pomiaru promieniowania PAR oraz obliczania współczynnika powierzchni liści (LAI). Kampania pomiarowa została przeprowadzona zgodnie z protokołem terenowym opracowanym w ramach projektu VALERI. Protokół ten opisuje strategię próbkowania wysokorozdzielczych przestrzennie danych satelitarnych, w której podstawowa powierzchnia badawcza (elementarna jednostka próbkowania, ESU) wynosi 20×20 m dla każdego pola pomiarowego. W każdym punkcie pomiarowym wykonywano trzy pomiary za pomocą ceptomietru.

W ramach kampanii pomiarowej w 2023 roku wyznaczono 30 jednostek próbkowania w wybranej uprawie i lokalizacji na polach testowych. Lokalizacje jednostek próbkowania wybrano na podstawie analizy danych glebowych, satelitarnych, historii zabiegów agrotechnicznych oraz rozmieszczenia czynników doświadczeń. Pomiary wykonano dwukrotnie: w fazie strzelania w źdźbło oraz kwitnienia w przypadku zbóż ozimych, a także podczas formowania i wzrostu pędu oraz kwitnienia w przypadku rzepaku ozimego. W 2024 roku zmodyfikowano metodykę pomiarów, a liczba pomiarów była zależna od liczby powtórzeń w obrębie prowadzonych doświadczeń, co szczegółowo opisano w dalszej części raportu.

Łącznie, do walidacji algorytmów zgromadzono dane z 120 jednostek próbkowania w rzepaku ozimym, 120 w pszenicy ozimej oraz 60 w jęczmieniu ozimym i pszenicy ozimym. Zebrane dane posłużyły do oceny i parametryzacji algorytmów zmiennego wysiewu nasion oraz do analizy wielkości produkowanej biomasy na jednostkę powierzchni w doświadczeniach dotyczących głębokiego stosowania nawozów fosforowych.



Rysunek 10. Instrument AccuPar używany do monitoringu wskaźnika LAI na polach projektowych.

2.4. Badania przewodności elektrycznej gleby

W gospodarstwach rolnych uczestniczących w projekcie przeprowadzono pomiary przewodności elektrycznej gleby na wybranych polach. Łączna powierzchnia przebadanych pól wynosiła w Boleszkowicach oraz w Myślicach 240 ha. Badania przewodności elektrycznej gleby (EC) wykonano po żniwach w 2022 roku, natomiast pola, na których uprawiano ziemniaki i buraki cukrowe przebadano po żniwach w 2023 roku.

Pomiary przeprowadzono przy użyciu mobilnej aparatury pomiarowej Veris oraz EM38-MK2. Urządzenie Veris, produkcji amerykańskiej, wykonuje pomiary wraz z rejestracją współrzędnych GPS podczas przejazdów równoległych w odległości nieprzekraczającej 15 metrów. Przewodność elektryczna gleby (mS/m) mierzona była na głębokości 0–30 cm na powierzchni 46 ha, zarówno w miejscowości Boleszkowice, jak i Myślice.

Pomiar przewodności elektrycznej (wyrażonej w mS/m) urządzeniem EM38-MK2 wykonano do głębokości 1,0 m, co pozwoliło ocenić przestrzenne zróżnicowanie warunków wilgotnościowych na badanym obszarze. Przed rozpoczęciem pomiarów przeprowadzono kalibrację urządzenia. Aparatura pracowała z prędkością 10–15 km/h, a pomiary wykonano w równoległych pasach oddalonych od siebie o 16 metrów. Rozdzielczość pomiarów wynosiła co najmniej 200 punktów na hektar. W trakcie przemieszczania urządzenia utworzono mapę pola, bazując na wyznaczonych punktach (z wykorzystaniem odbiornika GPS) oraz zarejestrowanych wartościach przewodności elektrycznej gleby.

Celem określenia przewodności elektrycznej w glebie było:

- wspieranie identyfikowania jednorodnych obszarów pola pod względem właściwości fizyko-chemicznych tj. uziarnienia gleby, pojemności wodnej, zasobności gleby,
- wspieranie tworzenia map glebowych o możliwie wysokiej jednorodności,

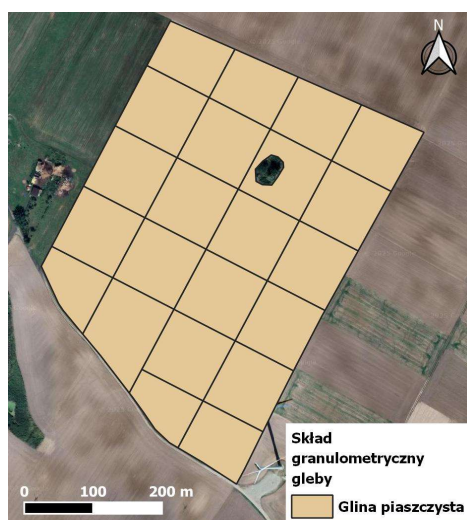


- wspierania algorytmów różnicujących dawki nawozów fosforowych oraz materiału siewnego.

- 2.5.** Średnia wartość przewodności elektrycznej gleby w Boleszkowicach wynosiła 16,78 mS/m, a w Myślicach 24.2 mS/m. Przykładowe wizualizacje map przewodności elektrycznej gleby przedstawiono na Rysunku 24. **Badania składu granulometrycznego gleby**

Punkty poboru prób gleby do oznaczenia składu granulometrycznego wyznaczono na podstawie regularnej siatki, przy czym gęstość poboru była większa niż standardowo stosowana (minimum 1 próba na hektar). Badania przeprowadzono na obszarze 40 ha w miejscowościach Boleszkowice i Myślice po żniwach w 2022 roku. Wyniki uzyskane z analiz posłużyły do opracowania i walidacji stref potencjału glebowego. Do badań pobrano próby z wyznaczonych obszarów pola, z głębokości do 25 cm, które następnie poddano szczegółowej analizie laboratoryjnej. Jedna próba ogólna składała się z 20 prób pierwotnych, pobranych zgodnie z normą PN-R-04031:1997. Dzięki zastosowaniu metody dyfrakcji laserowej określono zawartość frakcji zgodnych z klasyfikacją uziarnienia gleb według Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego.

Wyniki uzyskane z analiz posłużyły do opracowania i walidacji stref potencjału glebowego. Oznaczenie granulacji gleby posłużyło również do parametryzacji i walidacji algorytmu zmiennego wysiewu materiału siewnego. Na podstawie wyników badania składu granulometrycznego, glebę w Boleszkowicach jak i w Myślicach można zaklasyfikować do podgrupy glina piaszczysta (Rysunek 11).



Rysunek 11. Rozkład grup gleby na polu 623 w Boleszkowicach uzyskany na podstawie badania składu granulometrycznego gleby.

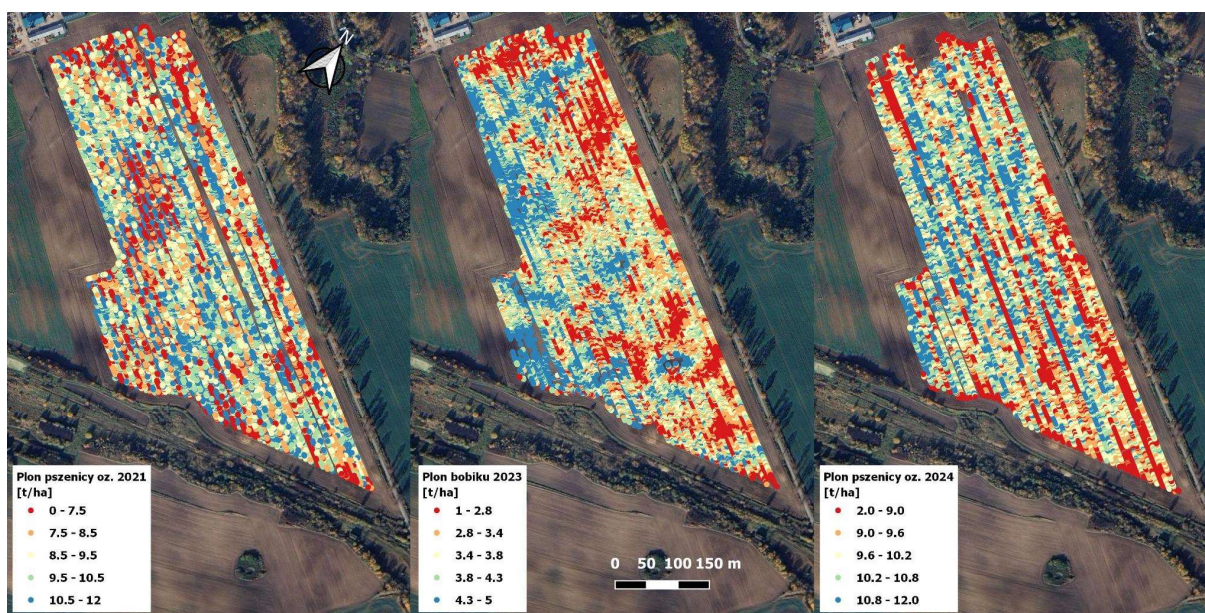
- 2.6. Badania wielkości plonu**



Ostatnim badaniem terenowym wykonywanym wraz z końcem sezonu wegetacyjnego był pomiar wielkości plonu. Pomiar ten został przeprowadzony dwiema metodami w zależności od zaawansowania technicznego gospodarstw. W gospodarstwie w Myślicach pomiaru dokonywał kombajn zbożowy wyposażony w miernik plonu z elektronicznym zapisem miejsca pomiaru (Rysunek 12). Przed przystąpieniem do zbioru płodów rolnych oraz danych, wykonano kalibrację czujników systemu pomiarowego. Odczytane pomiary stworzyły mapy ukazujące zmienność plonu w obrębie pola, które zostały poddane "czyszczeniu" poprzez odrzucenie pomiarów skrajnie zawyżonych i zaniżonych (Rysunek 13). Dodatkowo zostały usunięte pomiary u nawroci kombajnu, w pobliżu granic pola. Czynności te miały za zadanie wyeliminowanie pomiarów stanowiących błędy pomiarowe.



Rysunek 12. Zbiór pszenicy ozimej kombajnem wyposażonym w miernik plonu w Myślicach.



Rysunek 13. Przykład pomiaru plonu dla pszenicy ozimej oraz bobiku w latach 2021, 2023 i 2024 na polu 394 w Myślicach.

W gospodarstwie w Boleszkowicach badanie wielkości plonu odbyło się poprzez sprawdzanie wagi płodów rolnych z powierzchni pól i badanych obszarów. Wykorzystano w tym celu wagi rolnicze. Dodatkowo przed przystąpieniem do zbioru kombajnowego przeprowadzono pomiary kalibracyjne plonu przy użyciu kombajnu ręcznego (w wybranych punktach z rozdzielczością przestrzenną ok. 0,5 ha, z zarejestrowanymi współrzędnymi geograficznymi). Rozmieszczenie i ilość wykonanych pomiarów pozwoliła sprawdzić przestrzenną zmienność plonu.



Dane o wysokości plonu w czasie zbioru były traktowane jako informacje walidacyjne pozwalające zweryfikować efektywność stosowania zmiennej dawki nawozów fosforowych oraz zmiennej ilości wysiewu materiału siewnego w różnych warunkach środowiskowych (zróżnicowanie glebowe i klimatyczne).

2.7. Badania składowych plonu ziarna i nasion

Plon ziarna roślin zbożowych uzyskany z określonej powierzchni zależy bezpośrednio od liczby kłosów na 1 m^2 , liczby ziaren w kłosie i masy 1000 ziarniaków (Rysunek 16). Analogicznie, głównymi składowymi plonu rzepaku jest liczba łuszczyń na 1 m^2 , liczba nasion w łuszczyńce i masa 1000 nasion. W prowadzeniu obliczeń została zastosowana metodyka opisana w publikacji Państwowej Inspekcji Ochrony Roślin i Nasiennictwa pt., „Szacowanie plonów roślin rolniczych”.

W ramach planowanej kampanii pomiarowej wyznaczono 30 jednostek próbkowania w danej uprawie na polach testowych. W każdej jednostce próbkowania zostały losowo wybrane trzy miejsca oceny, gdzie na długości jednego metra bieżącego łanu roślin określono zagęszczenie kłosów. Przed zbiorem z miejsc oceny w trzech powtórzeniach pobrano kłosy w celu obliczenia liczby ziaren w kłosie i masy tysiąca ziarniaków. W przypadku rzepaku ozimego przed zbiorem w 60 jednostkach próbkowania została określona liczba roślin na 1 m^2 , liczba łuszczyń na roślinie, a także liczba nasion w łuszczyńce na podstawie pięciu kolejnych roślin w rzędzie i masa tysiąca nasion przy wykorzystaniu automatycznego licznika nasion.



Rys 14. Ocena struktury plonu rzepaku ozimego. Zbiór prób badawczych.

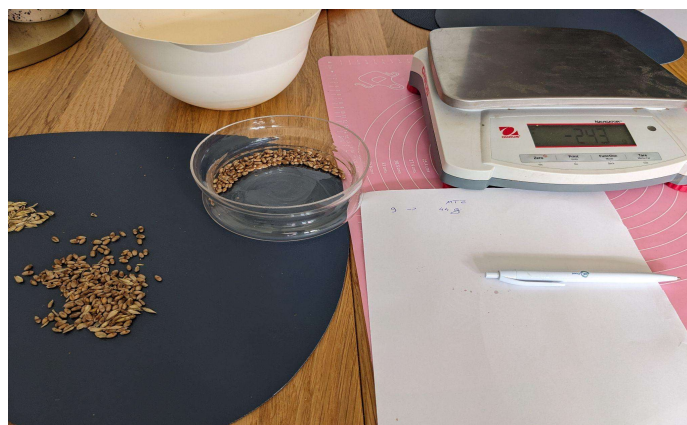


Dodatkowo jesienią zarówno na plantacjach zbóż ozimych oraz rzepaku ozimego określona została obsada roślin na 1 m² w celu sprawdzenia dokładności wysiewu i równomierności wschodów w przypadku założonych doświadczeń różnicujących stosowaną ilość materiału siewnego. Lokalizacja jednostek próbkowania została wybrana na podstawie analizy danych glebowych, satelitarnych, historii wykonywanych zabiegów agrotechnicznych oraz rozmieszczenia czynników doświadczeń.



Rys 15. Określenie obsady roślin na polach podczas jesiennej kampanii pomiarowej.

Określenie składowych plonu zbóż ozimych oraz rzepaku ozimego było niezbędne do oceny efektywności stosowania map zmiennego wysiewu. Różnicowanie obsady, a przez to reszty składowych plonu w różnych warunkach siedliska dało podstawy do oceny racjonalności optymalizacji wysiewu nasion oraz zrozumienia czynników wpływających na plon.



Rysunek 16. Pomiar masy tysiąca ziaren.



2.8. Badania fosforu w roślinach

Zawartość składników pokarmowych w materiale roślinnym określono w pierwszym i drugim sezonie wegetacyjnym. Próby roślinne pobierano w fazie pełnej dojrzałości roślin, a skład chemiczny analizowano zarówno w biomasie słomy, jak i ziarna. Miejsca poboru prób wyznaczono na podstawie oceny zasobności gleby w przyswajalny fosfor oraz rozmieszczenia czynników związanych z metodą aplikacji i zastosowaną dawką nawozów fosforowych.

W ramach kampanii pomiarowej pobrano próby z 30 jednostek próbkowania dla danej uprawy (w 2023 roku były to 24 jednostki próbkowania dla jęczmienia ozimego i pszenżyta ozimego) oraz lokalizacji na polach testowych. Lokalizację tych jednostek określono w oparciu o analizę danych glebowych, satelitarnych, historię wykonywanych zabiegów agrotechnicznych oraz rozmieszczenie czynników doświadczeń.

Łącznie, do walidacji algorytmów dostępne były dane z 30 jednostek próbkowania w rzepaku ozimym, 30 jednostek próbkowania w pszenicy ozimej oraz 30 jednostek próbkowania w innych zbożach ozimych w każdym roku badań. Fosfor w materiale roślinnym, po mineralizacji, oznaczano metodą kolorymetryczną w akredytowanych laboratoriach.

Tak oceniona zawartość pierwiastków w roślinach porównywano z wartościami referencyjnymi, co pozwoliło na wstępną ocenę efektywności nawożenia fosforem. Uzyskane informacje posłużyły również do walidacji algorytmów stosowania zmiennych dawek nawozów fosforowych oraz do optymalizacji parametrów tych algorytmów.



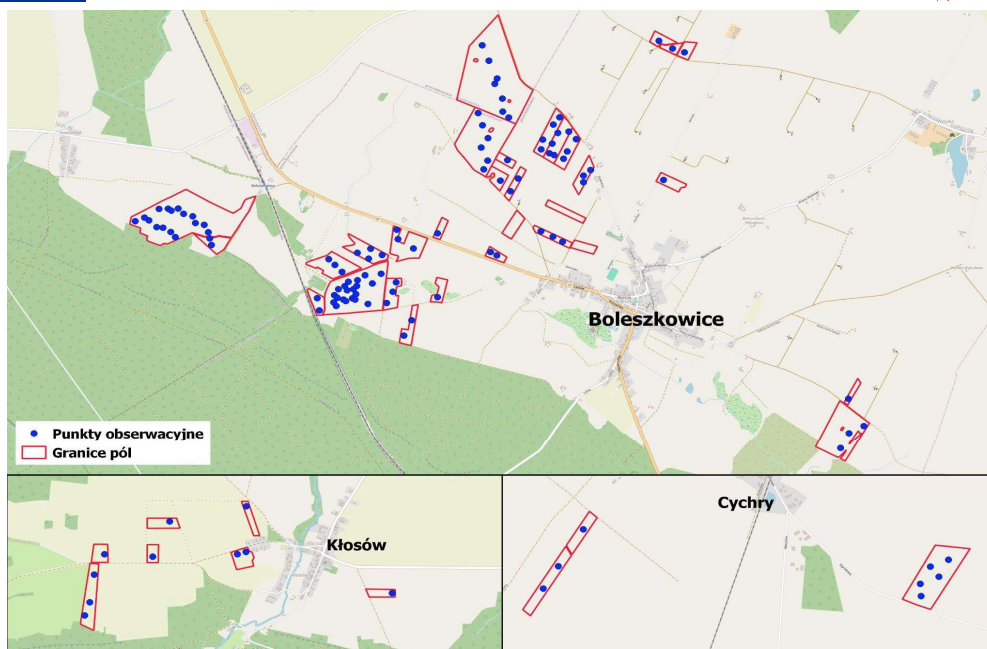
Rysunek 17. Pobór prób roślinnych w uprawie rzepaku ozimego.

2.9. Podsumowanie

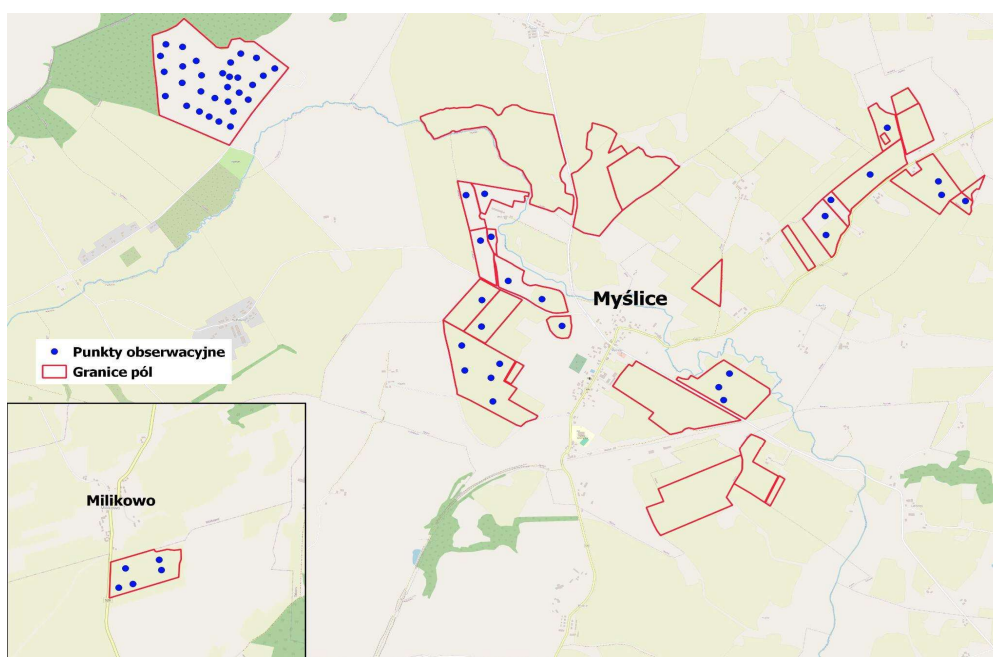
Badania terenowe stanowiły integralną część projektu, zapewniając podstawę dla opracowania i optymalizacji wypracowanych w operacji innowacyjnych rozwiązań wspierających precyzyjne zarządzanie nawożeniem fosforem i zmienny wysiew materiału siewnego w Polsce.

3. Analiza reprezentatywnego zbioru danych pozyskana w I sezonie badań

Badania prowadzone w pierwszym sezonie wegetacyjnym miały na celu pozyskanie danych do parametryzacji algorytmów oraz ocenę wpływu zmienności warunków glebowych i parametrów biofizycznych roślin na uzyskany plon oraz jego właściwości. Lokalizację jednostek próbkowania przedstawiono poniżej (Rysunek 18 i 19).



Rysunek 18. Rozmieszczenie jednostek próbkowania w gospodarstwach w okolicy Boleszkowic.



Rysunek 19. Rozmieszczenie jednostek próbkowania w gospodarstwach w okolicy miejscowości Myślice.

4.1.1 Analiza badań glebowych pozyskanych w I sezonie badań

Zgodnie z opisanymi pracami terenowymi, po zakończeniu pierwszego sezonu wegetacyjnego zbadano korelację pomiędzy najważniejszymi parametrami glebowymi, takimi jak wartość pH, zasobność gleby w przyswajalne formy fosforu, potasu i magnezu, średnia wartość przewodności elektrycznej gleby, zawartość węgla organicznego oraz materii organicznej, a plonem w poligonach, na których badano właściwości gleby. Wielowymiarowa analiza wykazała, że wartość pH gleby oraz zawartość ma-



terii organicznej miały ograniczony wpływ na zawartość fosforu w glebie. Nie stwierdzono również silnej korelacji między zasobnością gleby w przyswajalne formy fosforu a poziomem plonowania jęczmienia ozimego, pszenicy ozimej, rzepaku ozimego czy pszenżyta ozimego.

Wartość pH gleby jest kluczowym czynnikiem wpływającym na dostępność fosforu – przy zbyt niskim pH fosfor ulega uwstecznieniu w postaci fosforanów żelaza i glinu, natomiast przy zbyt wysokim pH tworzy trudno dostępne fosforany wapnia. Optymalny zakres pH dla dostępności fosforu mieści się w przedziale 6,0–7,5, a badania wykazały, że gleby w tym zakresie pH cechowały się wyższą zawartością przyswajalnego fosforu. Materia organiczna, poprzez mineralizację związków organicznych i wpływ na strukturę gleby, również zwiększa dostępność fosforu. Niemniej jednak, z analizy wynika, że te czynniki, choć ważne dla dynamiki fosforu w glebie, nie zawsze przekładają się na wyraźne różnice w jego zawartości w przyswajalnej formie.

Zasobność gleby w fosfor odgrywa kluczową rolę w zaopatrywaniu roślin w ten ważny składnik plonotwórczy, jednak analiza wskazuje, że nie jest to parametr silnie korelujący z plonem. Wyniki badań sugerują, że najwyższe plony w Boleszkowicach uzyskiwano przy zawartości fosforu określonej jako średnia, bliska poziomowi wyższemu. Wynik ten podkreśla, że efektywne nawożenie fosforem wymaga nie tylko odpowiedniego zarządzania jego ilością w glebie, ale także uwzględnienia większej liczby czynników. Ostatecznie, zwiększenie efektywności fosforu można osiągnąć przez przemyślane podejście do nawożenia w kontekście całego płodozmianu oraz dokładne wymieszanie nawozu z glebą.

4.1.2 Analiza danych in situ pozyskanych w trakcie wegetacji roślin w I sezonie badań

4.1.2.1 Jęczmień ozimy

Analizując Tabelę 2 można zauważyć, że pomiary biofizyczne (LAI i NDVI) wykazały różnice w rozwoju roślin w dwóch kluczowych momentach wegetacji. W fazie drugiego kolanka BBCH 32 (21.04.2023), wartość LAI wahała się od 2,02 do 3,70 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, ze średnią 3,07 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ i niskim odchyleniem standardowym ($\text{SD} = 0,36 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), co wskazuje na dużą jednorodność łanu. W tym samym terminie wartości NDVI (dane pozyskane z konstelacji Sentinel-2) były bardziej spójne, w zakresie 0,87–0,93, przy średniej 0,91 i bardzo niskim odchyleniu standardowym, co sugeruje wysoką równomierność w rozwoju roślin. W fazie pełni kwitnienia BBCH 65 (31.05.2023), LAI wzrosło do zakresu 2,38–4,57 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, ze średnią 3,76 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ i większym rozrzutem odchylenia standardowego ($\text{SD} = 0,56 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), co odzwierciedla różnice w intensywności wzrostu w miarę dojrzewania roślin. Wskaźnik NDVI w tym czasie zmniejszył się do przedziału 0,74–0,89, ze średnią 0,85 i nieco wyższą wartością odchylenia standardowego ($\text{SD} = 0,04$), co może wskazywać na różnice w kondycji roślin wynikające z przestrzennej zmienności czynników glebowych i środowiskowych.

Tabela 2. Statystyki pomiarów biofizycznych in situ wykonanych na jęczmieniu ozimym w Boleszkowicach 2022/2023.



	LAI [m ² ·m ⁻²]	NDVI - Sentinel-2	LAI [m ² ·m ⁻²]	NDVI - Sentinel-2
data pomiaru	21.04.2023 - BBCH 33	21.04.2023	22.06.2023- BBCH 67	24.06.2023
min	2,02	0,87	2,38	0,74
max	3,70	0,93	4,57	0,89
średnia	3,07	0,91	3,76	0,85
SD	0,36	0,01	0,56	0,04
#ESU	30	30	30	30

Statystyki pomiarów składowych plonu wykazały znaczną zmienność między jednostkami próbkowania (Tabela 3). Liczba roślin na m² miesiąc po siewie wynosiła od 200 do 272, przy średniej 245,6 i odchyleniu standardowym 20,04, co wskazuje na jednorodne wschody w większości badanych pól. Zagęszczenie kłosów charakteryzowało się dużym zróżnicowaniem, od 330 do 889 szt./m², ze średnią 667,4 szt./m² i wysokim odchyleniem standardowym (223,44 szt./m²). Tę zmienność można przypisać uprawie dwóch typów odmian jęczmienia ozimego na polach w Boleszkowicach podczas pierwszego sezonu badań: odmian dwurzędowych (20 jednostek próbkowania) oraz sześciurzędowych (10 jednostek próbkowania). Różnice między tymi odmianami wpłynęły nie tylko na liczbę kłosów na jednostce powierzchni, ale także na średnią liczbę ziaren w kłosie, która wynosiła od 22 do 54 sztuk. Masa tysiąca ziaren (MTZ) wahała się w przedziale od 41,90 do 54,20 g, przy średniej 48,11 g i niskim odchyleniu standardowym (3,49 g), co świadczy o względnie stabilnej jakości ziarna w badanych próbach.



Rysunek 20. Kondycja oraz równomierność wysiewu jęczmienia ozimego jesienią 2022 roku.



Tabela 3. Statystyki pomiarów składowych plonu wykonanych na jęczmieniu ozimym w Boleszkowicach 2022/2023.

	Liczba roślin na m ² miesiąc po siewie	Ocena zagęszczenia kłosów (szt./m ²)	Średnia liczba ziaren w kłosie (szt.)	MTZ (g)
min	200,00	330,00	22,00	41,90
max	272,00	889,00	54,00	54,20
średnia	245,60	667,40	33,20	48,11
SD	20,04	223,44	13,68	3,49
#ESU	30	30	30	30

Plon jęczmienia ozimego przy wilgotności 14% wahał się w zakresie od 6,40 do 10,53 t/ha, przy średniej 8,85 t/ha i umiarkowanym zróżnicowaniu (SD = 1,14 t/ha) (Tabela 4). Zawartość fosforu w suchej masie słomy i ziarna była stabilna, z bardzo niskim odchyleniem standardowym – odpowiednio 0,06–0,07% i 0,27–0,32%, co wskazuje na niewielkie różnice w składzie chemicznym pomiędzy badanymi próbkami.

Tabela 4. Statystyki plonu i jego właściwości określanych w jęczmieniu ozimym w Boleszkowicach 2022/2023

	Plon 14% wilg (t/ha)	Zawartość % P w s.m. słoma	Zawartość % P w s.m. ziarno
min	6,40	0,06	0,27
max	10,53	0,07	0,32
średnia	8,85	0,06	0,30
SD	1,14	0,00	0,02
#ESU	30	24	24

Analiza wyników pomiarów biofizycznych i składowych plonowania jęczmienia ozimego (Tabela 5) w Boleszkowicach w sezonie 2022/2023 wykazała, że plon był w dużej mierze zależny od zagęszczenia kłosów i liczby ziaren w kłosie, przy umiarkowanym wpływie LAI oraz MTZ. Średnia wartość LAI wzrosła z 3,07 w fazie BBCH 32 do 3,76 w fazie BBCH 65, wskazując na intensywny rozwój roślin, a umiarkowane



korelacje z plonem ($r=0,686$ i $r=0,697$) podkreślają znaczenie parametrów biofizycznych w ocenie potencjału plonotwórczego. Zagęszczenie kłosów (średnia 667,4 szt./m²) oraz liczba ziaren w kłosie (średnia 33,20 szt.) były kluczowymi czynnikami wpływającymi na ostateczny plon (średnia 8,85 t/ha), co potwierdzają wysokie korelacje z plonem ($r=0,717$ i $r=0,746$). Wyniki te sugerują, że przestrzenna zmienność warunków glebowych oraz środowiskowych miała istotny wpływ na różnice w potencjale plonotwórczym, a monitorowanie parametrów biofizycznych, takich jak LAI, w kluczowych fazach wzrostu może wspierać precyzyjne praktyki agrotechniczne, w tym optymalizację zagęszczenia łanu, nawożenia i ochrony roślin w celu maksymalizacji efektywności produkcji.

Tabela 5. Analiza korelacji pomiarów biofizycznych i składowych plonowania w uprawie jęczmienia ozimego w Boleszkowicach w sezonie 2022-2023.

	Norma wysiewu (szt./m ²)	Liczba roślin na m ² miesiąc po siewie	Ocena zagęszczenia kłosów (szt./m ²)	Średnia liczba ziaren w kłosie (szt.)	MTZ (g)	Plon 14% wilg (t/ha)	LAI 21.04.2023 (m ² ·m ⁻²)	LAI 31.05.2023 (m ² ·m ⁻²)
Norma wysiewu (szt./m ²)	1							
Liczba roślin na m ² miesiąc po siewie	0,546	1						
Ocena zagęszczenia kłosów (szt./m ²)	0,881	0,677	1					
Średnia liczba ziaren w kłosie (szt.)	0,862	0,700	0,968	1				
MTZ (g)	0,765	0,618	0,921	0,897	1			
Plon 14% wilg (t/ha)	0,555	0,372	0,717	0,537	0,746	1		
LAI 21.04.2023 (m ² ·m ⁻²)	0,337	0,040	0,368	0,221	0,462	0,686	1	
LAI 31.05.2023 (m ² ·m ⁻²)	0,532	0,054	0,487	0,341	0,473	0,697	0,851	1

4.1.2.2 Pszenica ozima

Pomiary i badania w pszenicy ozimej prowadzone były na polach produkcyjnych w gospodarstwach w Boleszkowicach i Myślicach. Wyniki statystyk biofizycznych wykazywały podobną dynamikę i równomierność zmian. Wyniki pomiarów dla Boleszkowic zostały przedstawione w Tabeli 6 oraz dla



Myślic w Tabeli 7. Wartość wskaźnika LAI w fazach pierwszego kolanka BBCH 31 oraz w fazach kwitnienia BBCH 61-69, wykazały istotny wzrost intensywności rozwoju roślin w trakcie sezonu wegetacyjnego, co było zgodne z wysokimi wartościami wskaźnika NDVI i wskazywało na równomierny rozwój łanu.

Tabela 6. Statystyki pomiarów biofizycznych in situ wykonanych na pszenicy ozimej w Boleszkowicach w sezonie 2022/2023.

	LAI [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$]	NDVI - Sentinel-2	LAI [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$]	NDVI - Sentinel-2
data pomiaru	22.04.2023 - BBCH 31	21.04.2023	22.06.2023 - BBCH 67	24.06.2023
min	2,18	0,85	3,02	0,84
max	3,62	0,93	4,82	0,93
średnia	2,88	0,89	4,01	0,89
SD	0,33	0,02	0,39	0,02
#ESU	30	30	30	30

Tabela 7. Statystyki pomiarów biofizycznych in situ wykonanych na pszenicy ozimej w Myślicach w sezonie 2022/2023.

	LAI [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$]	NDVI - Sentinel-2	LAI [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$]	NDVI - Sentinel-2
data pomiaru	25.04.2023 - BBCH 31	22.04.2023	22.06.2023 - BBCH 67	24.06.2023
min	0,45	0,4	1,39	0,39
max	2,28	0,91	6,25	0,88
średnia	1,39	0,72	3,51	0,72
SD	0,52	0,14	1,2	0,15
#ESU	30	30	30	30



Składowe plonowania, takie jak zagęszczenie kłosów, liczba ziaren w kłosie i MTZ, były stabilne, co przyczyniło się do uzyskania plonów o niskiej zmienności między jednostkami próbkowania (Tabela 8). Średni plon 7,88 t/ha potwierdza wysoki potencjał plonotwórczy pszenicy ozimej uprawianej w Boleszkowicach.

Mierzone składowe plonu w Myślicach (Tabela 8) cechowały się większą zmiennością w porównaniu z pomiarami w Boleszkowicach (Tabela 9). W znacznym stopniu spowodowane to było większą zmiennością glebową pól, na których była prowadzona uprawa pszenicy ozimej. W rezultacie duża zmienność glebowa przełożyła się również na duże wahania uzyskanego plonu.

Tabela 8. Statystyki pomiarów składowych plonu wykonanych na pszenicy ozimej w Boleszkowicach 2022/2023.

	Liczba roślin na m ² miesiąc po siewie	Ocena zagęszczenia kłosów (szt./m ²)	Średnia liczba ziaren w kłosie (szt.)	MTZ (g)
min	212	358	42,00	41,80
max	288	482	49,00	49,00
średnia	252,73	416,8	45,40	44,37
SD	23,25	30,73	2,45	1,60
#ESU	30	30	30	30

Tabela 9. Statystyki pomiarów składowych plonu wykonanych na pszenicy ozimej w Myślicach 2022/2023.

	Liczba roślin na m ² miesiąc po siewie	Ocena zagęszczenia kłosów (szt./m ²)	Średnia liczba ziaren w kłosie (szt.)	MTZ (g)
min	330	144	36,00	36,00
max	380	644	64,00	64,00
średnia	360,40	437,29	47,72	47,72
SD	13,79	125,51	7,09	7,09
#ESU	28	28	28	28



Pszenica ozima w Myślicach plonowała od 2,37 t/ha do 14,53 t/ha. Plon minimalny na niskim poziomie, może świadczyć o niesprzyjających warunkach środowiskowych do uprawy pszenicy ozimej na części pól na których odbywały się badania. Mimo tak dużej różnicy między plonami maksymalnymi i minimalnymi uzyskano wysoki średni plon na poziomie 8,63 t/ha.

Analiza wyników korelacji składowych plonowania i biofizycznych pszenicy ozimej w Boleszkowicach wykazała istotne zależności między różnymi cechami uprawy a osiąganym plonem. Norma wysiewu była umiarkowanie skorelowana z liczbą roślin na m² miesiąc po siewie ($r = 0,599$), co potwierdza wpływ ilości wysiewanego materiału na wschody, choć relacja ta nie jest idealnie liniowa i może być ograniczana przez warunki środowiskowe oraz jakość nasion. Korelacja normy wysiewu z plonem wynosiła 0,390, co sugeruje, że wyższa norma wysiewu nie zawsze przekłada się na istotny wzrost plonu. Wynik ten podkreśla potrzebę optymalizacji normy wysiewu, aby uniknąć zbytniego zagęszczenia roślin, które może prowadzić do zbyt dużej konkurencji między roślinami i zmniejszenia produktywności łanu.

Ostateczny plon przedstawiony w Tabeli 10 był natomiast umiarkowanie związany z zagęszczeniem kłosów ($r = 0,526$) oraz średnią liczbą ziaren w kłosie ($r = 0,458$), co potwierdza znaczenie późniejszych parametrów rozwoju łanu w kształtowaniu plonów. Wysokie zagęszczenie kłosów zwiększało potencjał plonotwórczy, a produktywność pojedynczego kłosa, mierzona liczbą ziaren, była kluczowym czynnikiem wpływającym na plon. Masa tysiąca ziaren (MTZ) wykazywała umiarkowaną korelację z plonem ($r = 0,431$).

Tabela 10. Statystyki pomiaru plonu pszenicy ozimej w badanych gospodarstwach w 2022/2023

	Plon 14% wilg (t/ha)	
	Boleszkowice	Myślice
min	6,82	2,37
max	9,27	14,53
średnia	7,88	8,63
SD	0,60	3,59
#ESU	30	28



Podsumowując, plon pszenicy ozimej był przede wszystkim zależny od późniejszych parametrów rozwoju łanu, takich jak zagęszczenie kłosów i liczba ziaren w kłosie. Parametry biofizyczne, szczególnie wskaźnik LAI w fazie początku kwitnienia BBCH 61, okazały się cennymi identyfikatorami potencjału plonotwórczego. Wyniki otrzymane w przypadku pszenicy ozimej, podobnie jak w jęczmieniu ozimym, podkreślają potrzebę optymalizacji normy wysiewu i monitorowania wskaźników biofizycznych w celu maksymalizacji produktywności łanu i efektywności produkcji.

4.1.2.3 Pszenżyto ozime

Analiza parametrów biofizycznych, składowych plonu i wyników plonowania pszenżyta ozimego w Boleszkowicach w sezonie 2022/2023 (Tabela 11), wskazała na istotne zależności między parametrami opisującymi rozwój roślin a osiąganymi plonami. W fazie drugiego kolanka BBCH 32 (23.04.2023) LAI wynosiło od 1,79 do 4,24 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ (średnia: 3,03, SD = 0,62 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), natomiast w fazie między początkiem a pełnią kwitnienia BBCH 63 (31.05.2023) wzrosło do 2,50–5,32 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ (średnia 3,90, SD = 0,66 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$). Wskaźnik NDVI w obu fazach charakteryzował się wysokimi, stabilnymi wartościami (średnia 0,89 w kwietniu i 0,93 w maju), co świadczy o niezakłóconym stanie wegetacji roślin. Silne korelacje między wskaźnikiem LAI a plonem ($r = 0,797$ w kwietniu, $r = 0,802$ w maju) wskazują na kluczowe znaczenie parametru określającego powierzchnię liści przy określaniu potencjału plonotwórczego pszenżyta ozimego.

Tabela 11. Statystyki pomiarów biofizycznych in situ wykonanych na pszenżycie ozimym w Boleszkowicach 2022/2023.

	LAI [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$]	NDVI - Sentinel-2	LAI [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$]	NDVI - Sentinel-2
data pomiaru	23.04.2023 - BBCH 32	21.04.2023	31.05.2023- BBCH 63	02.06.2023
min	1,79	0,84	2,50	0,90
max	4,24	0,92	5,32	0,95
średnia	3,03	0,89	3,90	0,93
SD	0,62	0,02	0,66	0,01
#ESU	30	30	30	30

Składowe plonu wykazały umiarkowaną zmienność między jednostkami próbkowania (Tabela 12). Liczba roślin na m^2 miesiąc po siewie była stabilna i wykazywała umiarkowaną korelację z plonem, co



sugeruje, że równomierne wschody są ważne, ale nie decydujące dla ostatecznej produktywności. Zagęszczenie kłosów wynosiło od 270 do 430 szt./m² i wykazywało umiarkowany wpływ na plon ($r = 0,529$). Średnia liczba ziaren w kłosie była stabilna (średnia 47,03 szt., SD = 2,30 szt.) i umiarkowanie skorelowana z plonem ($r = 0,439$), co wskazuje, że większa liczba ziaren w kłosie miała pozytywny, choć ograniczony wpływ na plon. Masa tysiąca ziaren (MTZ), która wynosiła od 42,30 do 52,00 g (średnia 47,52, SD = 2,81), wykazywała bardzo silną korelację z plonem ($r = 0,788$).

Tabela 12. Statystyki pomiarów składowych plonu wykonanych na pszenicy ozimym w Boleszkowicach 2022/2023.

	Liczba roślin na m ² miesiąc po siewie	Ocena zagęszczenia kłosów (szt./m ²)	Średnia liczba ziaren w kłosie (szt.)	MTZ (g)
min	220,00	270,00	43,00	42,30
max	260,00	430,00	50,00	52,00
średnia	243,40	362,07	47,03	47,52
SD	11,38	29,61	2,30	2,81
#ESU	30	30	30	30

Plon pszenżyta ozimego wahał się od 5,52 do 9,31 t/ha (średnia 7,76 t/ha, SD = 0,96 t/ha) (Tabela 13). Zawartość fosforu w suchej masie słomy (średnia 0,06%, SD = 0,01) oraz ziarna (średnia 0,34%, SD = 0,02) była porównywalna do wyników uzyskanych w przypadku jęczmienia ozimego. Wyniki korelacji wskazują, że kluczowe znaczenie dla plonu pszenżyta ozimego miały parametry, takie jak masa tysiąca ziaren MTZ, oraz intensywność rozwoju roślin wyrażona przez wskaźnik LAI, szczególnie mierzony w fazie BBCH 63 (Tabela 14).

Tabela 13. Statystyki plonu i jego właściwości określanych w pszenicy ozimym w Boleszkowicach 2022/2023.



	Plon 14% wilg (t/ha)	Zawartość % P w s.m. słoma	Zawartość % P w s.m. ziarno
min	5,52	0,06	0,28
max	9,31	0,09	0,40
średnia	7,76	0,06	0,34
SD	0,96	0,01	0,02
#ESU	30	24	24

Tabela 14. Analiza korelacji pomiarów biofizycznych i składowych plonowania w uprawie pszenżyta ozimego w Boleszkowicach w sezonie 2022-2023.

	Liczba roślin na m ² miesiąc po siewie	Ocena zagęszczenia kłosów (szt./m ²)	Średnia liczba ziaren w kłosie (szt.)	MTZ (g)	Plon 14% wilg (t/ha)	LAI 23.04.2023 (m ² ·m ⁻²)	LAI 31.05.2023 (m ² ·m ⁻²)
Liczba roślin na m2 miesiąc po siewie	1						
Ocena zagęszczenia kłosów (szt./m ²)	0,533	1					
Średnia liczba ziaren w kłosie	0,090	0,461	1				
MTZ (g)	0,238	0,015	0,660	1			
Plon 14% wilg (t/ha)	0,489	0,529	0,439	0,788	1		
LAI 23.04.2023 (m ² ·m ⁻²)	0,459	0,560	0,125	0,679	0,797	1	



LAI 31.05.2023 ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	0,402	0,592	0,127	0,622	0,802	0,951	1
---	-------	-------	-------	-------	-------	-------	---

Podsumowując, wyniki uzyskane w pierwszym sezonie badań w zbożach ozimych jednoznacznie wskazują na przydatność monitorowania wskaźnika LAI do określenia potencjału plonotwórczego zbóż. Równie istotna okazała się kluczowa rola składowych plonu, które mogą być kształtowane poprzez odpowiednie zabiegi agrotechniczne. Na wszystkich jednostkach próbkowania, oprócz wspomnianych parametrów, oceniono również odżywienie roślin i ich ogólną kondycję przy wykorzystaniu ręcznego miernika N-Tester. Wyniki wskazały, że wszystkie badane jednostki próbkowania charakteryzowały się optymalnym zaopatrzeniem roślin w azot, który nie był czynnikiem limitującym plonowanie. Ponadto, w niewrażliwych fazach wzrostu, istotnych dla zaopatrzenia roślin w fosfor, nie odnotowano objawów niedoborów tego pierwiastka

4.1.2.4 Rzepak ozimy

Wskaźnik powierzchni liści (LAI) oraz indeks wegetacji (NDVI) pozwoliły na precyzyjną ocenę stanu rzepaku ozimego w kluczowych fazach wzrostu (Tabela 15, Tabela 16). W Boleszkowicach dwukrotnie wykonano pomiary, w fazie końca formatowania i wzrostu pędu BBCH 39 (21.04.2023) wskaźnik LAI wynosił średnio $3,37 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, z umiarkowaną zmiennością między jednostkami próbkowania ($\text{SD} = 0,33 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$). W fazie prawie pełni kwitnienia BBCH 64 (11.05.2023) wartość tego wskaźnika wzrosła do $4,86 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ($\text{SD} = 0,50 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), co odzwierciedla intensywny rozwój roślin w okresie szczytu wegetacji. Korelacje między LAI a plonem wyniosły odpowiednio 0,717 i 0,822, co silnie wskazuje na liniową relację między ilością wyprodukowanej biomasy przez rośliny z plonem końcowym rzepaku ozimego.

Tabela 15. Statystyki pomiarów biofizycznych in situ wykonanych na rzepaku ozimym w Boleszkowicach 2022/2023.

	LAI [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$]	NDVI - Sentinel-2	LAI [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$]	NDVI - Sentinel-2
data pomiaru	21.04.2023 - BBCH 39	21.04.2023	11.05.2023 - BBCH 64	08.05.2023
min	2,60	0,86	3,10	0,72
max	3,98	0,89	5,88	0,83
średnia	3,37	0,88	4,86	0,77
SD	0,33	0,009	0,50	0,03
#ESU	30	30	30	30



W Myślicach pomiar LAI został przeprowadzony w dwóch terminach: 21 kwietnia 2023 roku w fazie rozwojowej żółtego pąka BBCH 59 oraz 9 maja 2023 roku w fazie pełni kwitnienia BBCH 65. Wyniki pomiarów zostały przedstawione w Tabeli 16. Do pomiaru wyznaczono 30 unikalnych punktów ESU. Wyniki przeprowadzonych pomiarów w dwóch terminach pozwoliło wskazać na gwałtowny przyrost powierzchni liści w przeciągu dwóch tygodni wzrostu uprawy. Wyniki uzyskane w późniejszej fazie rozwojowej (BBCH 65) cechowały się większym odchyleniem standardowym w porównaniu do wcześniejszych pomiarów co świadczy o większej zmienności wyników.



Rysunek 21. Wielkość biomasy rzepaku ozimego oraz rozkład pędów bocznych i pędu głównego podczas drugiego pomiaru LAI w sezonie 2023.

Tabela 16. Statystyki pomiarów biofizycznych in situ wykonanych na rzepaku ozimym w Myślicach 2022/2023.

	LAI [$\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$]	NDVI - Sentinel-2	LAI [$\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$]	NDVI - Sentinel-2
data pomiaru	21.04.2023 - BBCH 59	22.04.2023	09.05.2023 - BBCH 65	10.05.2023
min	1,99	0,73	3,71	0,77
max	4,04	0,91	7,82	0,86
średnia	3,11	0,88	6,43	0,81
SD	0,46	0,03	1,09	0,02



#ESU	30	30	30	30
------	----	----	----	----

Składowe plonowania, takie jak liczba roślin na m² po zimie, liczba łuszczyń na roślinie, liczba nasion w łuszczyńce oraz masa tysiąca nasion (MTN), ujawniły zróżnicowaną rolę w formowaniu końcowego plonu (Tabela 17). Liczba roślin na m² była stabilna, co świadczy o dobrym przezimowaniu rzepaku w I sezonie badań. Liczba łuszczyń na roślinie wynosiła średnio 140,53 i wykazywała umiarkowany związek z plonem ($r=0,505$). Średnia liczba nasion w łuszczyńce była bardziej wyrównana (średnia 17,30 szt., SD =0,86 szt.), lecz jej korelacja z plonem była słaba ($r = 0,160$). Najsilniejszy związek z plonem miała masa tysiąca nasiona ($r = 0,784$), co wskazuje, że jakość nasion odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu plonu rzepaku ozimego.

Tabela 17. Statystyki pomiarów składowych plonu wykonanych na rzepaku ozimym w Boleszkowicach 2022/2023.

	Liczba roślin na m ² po zimie	Liczba łuszczyń na roślinie (szt.)	Średnia liczba nasion w łuszczyńce (szt.)	MTN (g)
min	36,00	105,00	16,00	3,50
max	48,00	170,00	20,00	6,70
średnia	41,90	140,53	17,30	4,72
SD	2,73	13,97	0,86	0,70
#ESU	30	30	30	30

Plon rzepaku ozimego przy wilgotności 14% wahał się od 2,37 do 6,08 t/ha (średnia 4,51 t/ha, SD 0,88 t/ha) (Tabela 18), co wskazuje na umiarkowaną zmienność między jednostkami próbkowania. Wysoki potencjał plonotwórczy był osiągnięty dzięki stabilnym warunkom wegetacyjnym i skutecznym praktykom agrotechnicznym. Zawartość fosforu w suchej masie słomy (średnia 0,07%) oraz nasion (średnia 0,62%) była stabilna, co może świadczyć o optymalnym zaopatrzeniu roślin w ten kluczowy składnik pokarmowy.

Tabela 18. Statystyki plonu i jego właściwości określanych w rzepaku ozimym w Boleszkowicach 2022/2023.

	Plon 14% wilg (t/ha)	Zawartość % P w s.m. słoma	Zawartość % P w s.m. nasiona
min	2,37	0,06	0,42



max	6,08	0,07	0,66
średnia	4,51	0,07	0,62
SD	0,88	0,002	0,05
#ESU	30	18	18

Plon rzepaku ozimego w Boleszkowicach był przede wszystkim determinowany przez masę tysiąca nasion oraz wielkość biomasy na jednostce powierzchni, co potwierdzają wysokie korelacje LAI z plonem (Tabela 19). Liczba łuszczyń na roślinie i liczba nasion w łuszczyń, choć istotne, miały mniejsze znaczenie w porównaniu do parametrów związanych z jakością nasion. Monitorowanie parametrów biofizycznych jak LAI zwłaszcza w okresie kwitnienia (BBCH 64) okazało się kluczowe dla analiz wykonywanych, aby zrozumieć zmienność występujących plonów. Wyniki podkreślają znaczenie działań agrotechnicznych skupionych na zapewnieniu równomiernego rozwoju łanu i wysokiej jakości nasion w celu maksymalizacji produktywności. Skuteczne zarządzanie zasobami pokarmowymi, w tym fosforem, może stanowić istotny czynnik decydujący o stabilności plonu w analizowanym sezonie.

Tabela 19. Analiza korelacji pomiarów biofizycznych i składowych plonowania w uprawie rzepaku ozimego w Boleszkowicach w sezonie 2022-2023.

	Liczba roślin na m ² po ziemi (szt.)	Liczba łuszczyń na roślinie (szt.)	Średnia liczba nasion w łuszczyń (szt.)	MTN (g)	Plon 9% wilg (t/ha)	LAI 21.04.2023 (m ² ·m ⁻²)	LAI 11.05.2023 (m ² ·m ⁻²)
Liczba roślin na m ² po ziemi (szt.)	1						



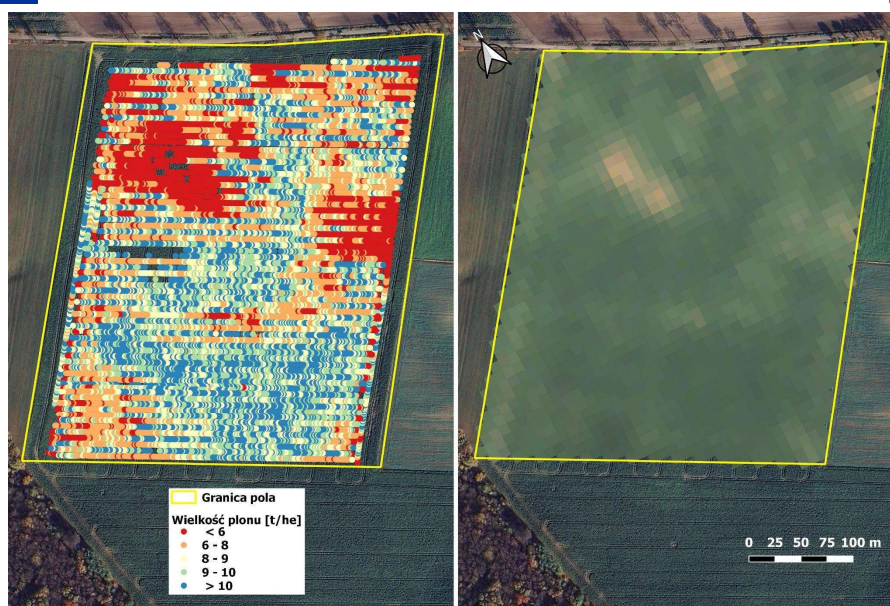
Liczba łuszczyń na roślinie (szt.)	0,185	1					
Średnia liczba nasion w łuszczy- nie (szt.)	0,257	0,045	1				
MTN (g)	0,069	0,017	0,030	1			
Plon 9% wilg (t/ha)	0,410	0,505	0,160	0,784	1		
LAI 21.04.2023 (m ² ·m ⁻²)	0,045	0,631	0,355	0,444	0,717	1	
LAI 11.05.2023 (m ² ·m ⁻²)	0,325	0,399	0,290	0,633	0,822	0,546	1

4. Prace w zakresie teledetekcji

4.1. Badania nad generowaniem map stref potencjału plonowania

Mapa stref potencjału plonowania jest jedną ze składowych używanych przy generowaniu mapy aplikacyjnej służącej do zmiennego, precyzyjnego nawożenia fosforem. Celem rozwoju metody generowania map potencjału plonowania jest dostarczenie przez nią informacji o zróżnicowaniu przestrzennym jego zdolności produkcyjnych w obrębie pola.

Dla zapewnienia operacyjności rozwijanego systemu mapa oparta została o dane satelitarne Sentinel-2, zapewniające regularny monitoring oraz wysoki poziom szczegółowości przestrzennej. Podstawą przeprowadzonych badań była analiza korelacji pomiędzy mapami plonów analizowanych pól, a wartościami spektralnymi obrazów satelitarnych. Mapy plonów, obrazujące wielkość i ich rozkład przestrzenny (dla różnych upraw), użyte zostały jako dane referencyjne, na podstawie których wypracowane zostały metody szacowania i różnicowania plonów. Dane użyte do wypracowania metodologii oraz ich weryfikacji pochodziły z zasobów współpracujących gospodarstw. Rysunek 22 ilustruje przykładową mapę plonów w uprawie pszenicy ozimej na polach projektowych (Myślice) wraz z fragmentem zobrazowania Sentinel-2, które posłużyło do analiz. Dla ułatwienia orientacji w terenie, poniższe mapy zostały zaprezentowane na podkładzie z ortofotomapy wykonanej przy pomocy zdjęć lotniczych w innym roku niż obserwowany sezon wegetacyjny.



Rysunek 22. Przykładowa mapa plonów pszenicy ozimej użyta w analizie korelacji z danymi spektralnymi (Sentinel-2) (lewa strona) oraz fragment zobrazowania Sentinel-2 dla tego samego pola (prawa strona).

Przeprowadzone badania opierały się na wykorzystaniu wieloczasowych danych satelitarnych (do kilku zobrazowań dla danego pola), które ukazują tendencję wzrostu uprawy w czasie sezonu wegetacyjnego. Na podstawie wybranych (bezchmurnych) obrazów obliczono dla każdego piksela zestaw biofizycznych wskaźników spektralnych potencjalnie skorelowanych z parametrami roślinności. Analizie podlegały wskaźniki opisane w Tabeli 20.

Tabela 20. Wykaz wskaźników spektralnych użytych w analizie wraz z objaśnieniem.

L.p.	Wskaźnik spektralny	Akronim	Wzór	Zastosowane kanały spektralne Sentinel-2 (wg. kolejności we wzorze)
1	Green Normalized Difference Vegetation Index	GNDVI	$(\text{NIR} - \text{Green}) / (\text{NIR} + \text{Green})$	B08, B03
2	Merris Terrestrial Chlorophyll Index 1	MTCI1	$(\text{NIR} - \text{Red-Edge}) / (\text{Red-Edge} - \text{Red})$	B08, B05, B04
3	Merris Terrestrial Chlorophyll Index 2	MTCI2	$(\text{NIR} - \text{Red-Edge}) / (\text{Red-Edge} - \text{Red})$	B06, B05, B04
4	Normalized Differential Red-Edge Index	NDRE	$(\text{NIR} - \text{Red-Edge}) / (\text{NIR} + \text{Red-Edge})$	B08, B05
5	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$	B08, B04
6	Normalized Difference Water Index	NDWI	$(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$	B08, B11
7	Normalized Difference Water Index 2	NDWI2	$(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$	B08, B12
8	NIR to NIR ratio	NIRNIR	NIR/NIR	B07, B06



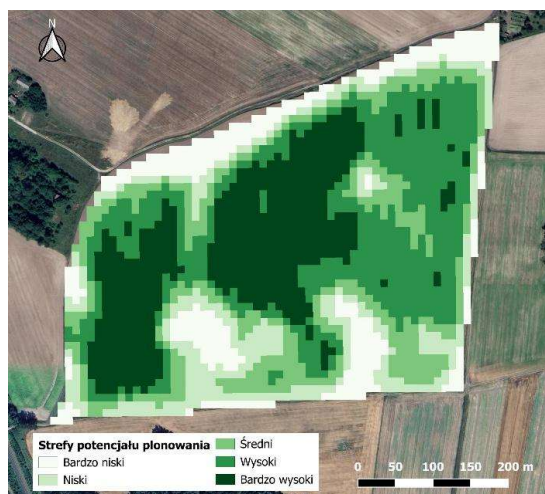
9	Visible Atmospherically Resistant Index	VARI	(Green – Red) / (Green + Red + Blue)	B03, B04, B02
---	---	------	--------------------------------------	---------------

Na podstawie wyliczonych wskaźników spektralnych oraz algorytmu klasteryzacji K-Means wykonano segmentację obszarów badanych pól. Algorytm K-Means, będący nienadzorowaną metodą uczenia maszynowego, doskonale nadaje się do wykorzystania w sytuacji braku dostępności dokładnych danych referencyjnych, dostarczających wzorca dla wytwarzanego wyniku/produktu. Segmentacja wykonana została w oparciu o wymienione wyżej wskaźniki spektralne oraz ich kombinację. Testy wykonane zostały dla każdej możliwej kombinacji danych wejściowych (wskaźników spektralnych). Po wykonanej segmentacji poszczególne klasy (3 lub 5) zostały uszeregowane na podstawie średniej wartości wskaźnika NDVI obliczonej z pikseli reprezentujących daną klasę. Dla tak uszeregowanych klas obliczono korelację Pearsona względem średniej wartości plonu (dane referencyjne) danej klasy. Poniższa tabela (Tabela 21) pokazuje wartości korelacji dla 30 najlepszych kombinacji wskaźników. Najlepszy wynik uzyskało połączenie wskaźników NDVI oraz MTCI2, jednak jako końcowe rozwiązanie wybrano pojedynczy wskaźnik MTCI2, który otrzymał drugi wynik, a występując pojedynczo zapewnia większą automatyzację, przyspiesza obliczenia w operacyjnym użyciu, a w konsekwencji redukuje koszty pobierania i procesowania danych satelitarnych.

Tabela 21. Wyniki analizy korelacji pomiędzy wielkością plonu a strefami pola.

L.p.	Kombinacja wskaźników spektralnych	Sumaryczna wartość współczynnika korelacji	L.p. c.d	Kombinacja wskaźników spektralnych c.d.	Sumaryczna wartość współczynnika korelacji c.d.	Numeracja wskaźników spektralnych	
1	(0, 8)	3.1670	16	(2, 4, 8)	3.0729	0	NDVI
2	(8.)	3.1603	17	(0, 2, 4, 8)	3.0705	1	NDRE
3	(4, 8)	3.1543	18	(1, 3, 8)	3.0695	2	NIR
4	(0, 1, 8)	3.1540	19	(1, 2, 7)	3.0695	3	GNDVI
5	(0, 4, 8)	3.1458	20	(0, 1, 3, 8)	3.0667	4	NDWI
6	(1, 8)	3.1286	21	(0, 1, 2, 8)	3.0667	5	NDWI2
7	(1, 2, 8)	3.1219	22	(0, 3, 4, 8)	3.0660	6	VARI
8	(0, 1)	3.1080	23	(0, 2, 3, 8)	3.0631	7	MTCI1
9	(1, 4, 8)	3.1079	24	(1, 3, 4, 8)	3.0628	8	MTCI2
10	(0, 1, 4, 8)	3.1011	25	(4, 7, 8)	3.0591	9	NIRNIR
11	(1.)	3.1011	26	(0, 4)	3.0553		
12	(0, 2, 8)	3.0900	27	(0, 1, 2)	3.0543		
13	(0, 1, 3, 4, 8)	3.0823	28	(0, 1, 4)	3.0514		
14	(0, 1, 2, 7)	3.0812	29	(0, 1, 2, 4, 8)	3.0504		
15	(0, 1, 7)	3.0744	30	(3, 8)	3.0503		

Rysunek 23 ilustruje mapę stref potencjału plonowania dla przykładowego pola w gospodarstwie w Boleszkowicach z podziałem na pięć klas. Końcowy produkt reprezentujący mapy stref potencjału plonowania przechowywany jest w formie rastrowej z wymaganą rozdzielczością przestrzenną (10 m).



Rysunek 23. Przykładowa mapa stref potencjału plonowania – Boleszkowice.

4.2. Badania nad wyliczaniem indeksu żyzności gleby opartego o zmienne pH i zawartość materii organicznej

Indeks żyzności gleby (nawożeniowy) to składowa zarówno mapy zmiennego dawkovania fosforu jak i zmiennego wysiewu nasion. Łączy w sobie informację o odczynie gleby (pH) oraz zawartości w glebie materii organicznej (MO), czynniki mające kluczowy wpływ na pobieranie i przyswajanie fosforu przez rośliny, a także wpływające na możliwości retencyjne gleby. Podstawą rozwoju indeksu żyzności były wcześniejsze badania przedstawione przez Andrews et al. (2004)¹ i Tsibart et al. (2021)². W badaniach projektowych wykorzystano podobne podejście dostosowując indeks żyzności do lokalnych warunków i dostępnych danych.

Informacja o odczynie gleby oraz zawartości materii organicznej pochodziła z prób glebowych pobranych na polach testowych. W kolejnym etapie analizy dane te zostały poddane interpolacji (metoda ważonej odwrotności odległości – Inverse Distance Weighting (IDW)) i zapisane w formacie rastrowym o spójnej rozdzielczości przestrzennej, zgodnej z rozdzielczością zdjęć satelitarnych Sentinel-2 (10 m).

W celu połączenia obu składowych indeksu w jeden produkt, wartości poszczególnych składowych zostały sprowadzone do wspólnej skali. Przeliczenie to pozwoliło zamienić wartości bezwzględne odczynu gleby oraz zawartości materii organicznej pochodzące z pomiarów in situ, na skalę w przedziale 0 – 100. Przeliczenia dokonano według poniższych wzorów:

$$\text{Wskaźnik pH} = a * \exp[-(pH - b)^2 / (2 * c^2)]$$

$$\text{Wskaźnik MO} = a * \exp[-(MO - b)^2 / (2 * c^2)],$$

¹ Andrews, S.S., Karlen, D.L., Cambardella, C.A., 2004. The Soil Management Assessment Framework. Soil Science Society of America Journal 68, 1945–1962.

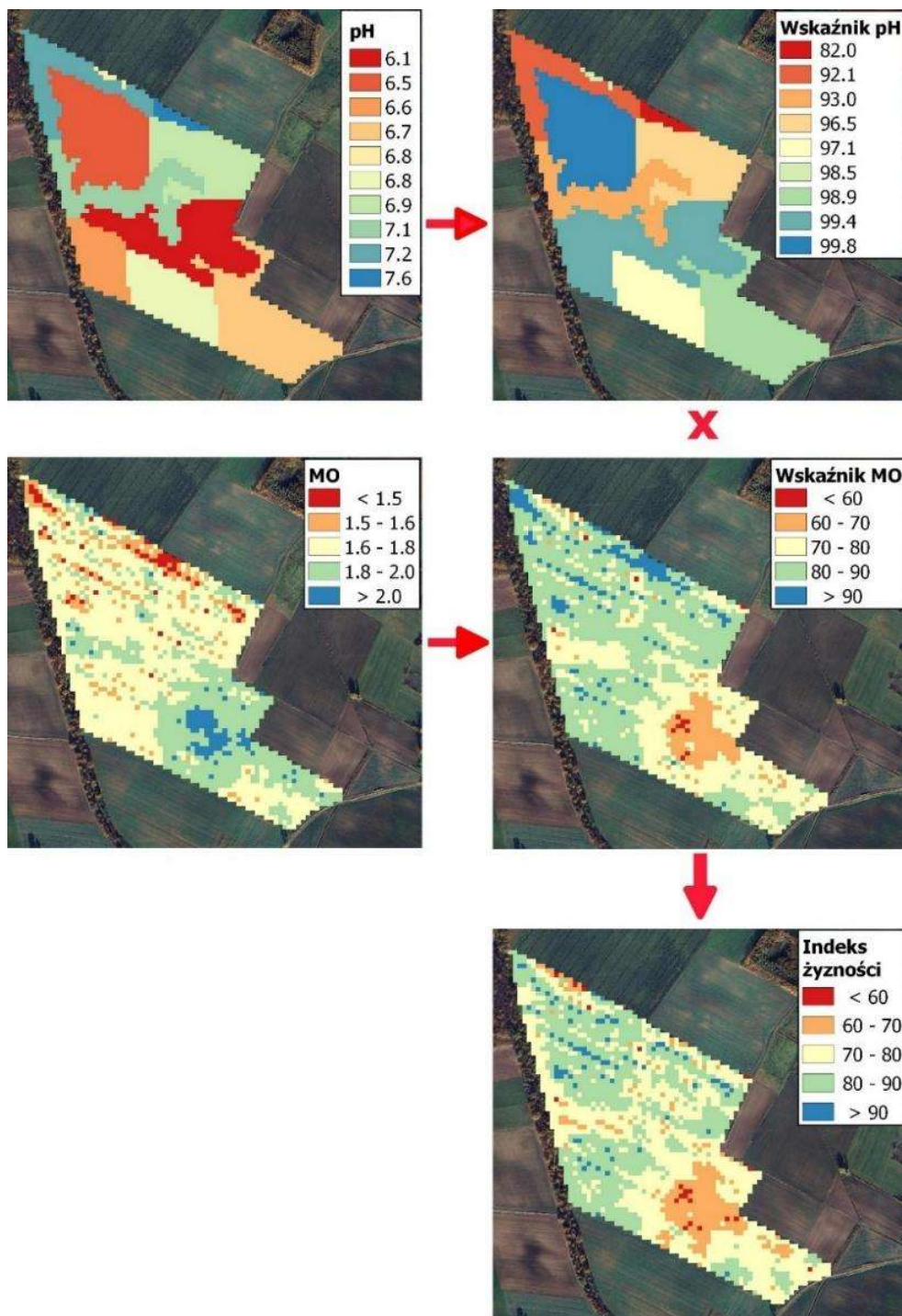
² Tsibart, A., Postelmans, A., Dillen, J., Elsen, A., Vandendriessche, H., Van De Ven, G., Saeys, W., 2021. Deriving application maps for precision fertilization from soil scans and historical NDVI maps, in: Precision Agriculture 21. Wageningen Academic Publishers, pp. 609–616.



gdzie:

a – 100 (stała), b – wartość parametru optymalna dla rozwoju uprawy, c – czynnik glebowy.

Końcowa wartość indeksu żyzności pochodzi z połączenia obu wskaźników, które zostały przez siebie przemnożone. Proces konstrukcji indeksu żyzności na przykładzie konkretnego pola ilustruje Rysunek 24 (lokalizacja Myślice).



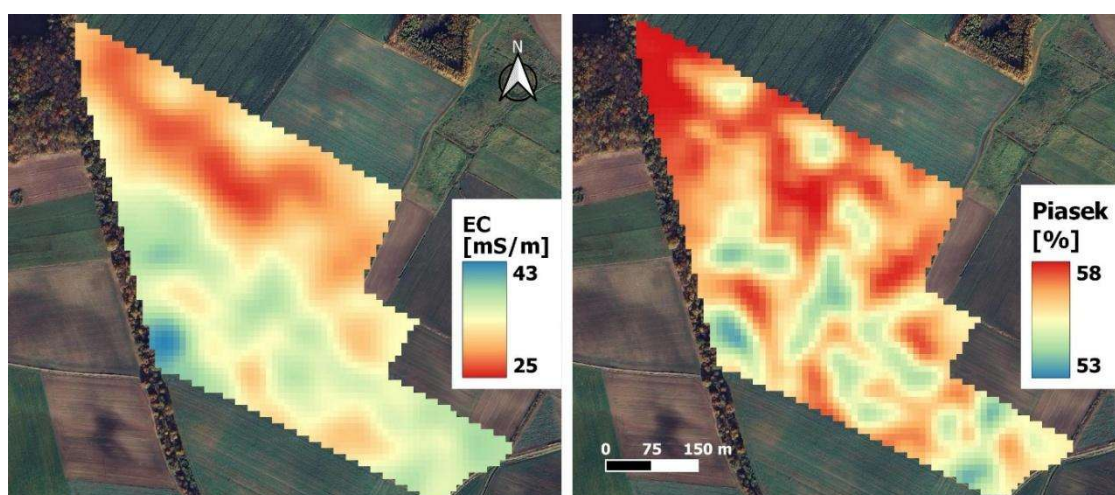
Rysunek 24. Proces wyznaczania indeksu żyzności na przykładowym polu – Myślice.



Mapy przedstawiające indeks żyzności tworzone są w formie rastrowej z wymaganą rozdzielczością przestrzenną (10 m).

4.3. Badania nad generowaniem map stref potencjału glebowego uwzględniającego skład granulometryczny gleby

Generowanie map stref potencjału glebowego opartych na informacji o składzie granulometrycznym gleby miało na celu dostarczenie informacji o charakterystyce gleby użytecznej w tworzeniu map aplikacyjnych zmiennego wysiewu nasion. Istotną informacją wynikającą ze znajomości składu granulometrycznego gleby jest informacja o występowaniu określonych frakcji gleby (jakość podłoża siewnego), które wpływają na przepływ wody w glebie. Badania na skład granulometryczny nie są jednak standardowym badaniem wykonywanym przez rolników, a do tego generują koszty i dostarczają informacji przestrzennej o niskiej rozdzielczości (mała ilość prób). Dlatego, chcąc wykorzystać informację o potencjale glebowym pola zostały wykonane analizy mające na celu zbadanie możliwości zastąpienia informacji o składzie granulometrycznym inną informacją o zbliżonej charakterystyce. W tym celu porównano dane o przewodnictwie elektrycznym (EC), które są wysoko skorelowane z teksturą gleby (Samborski et al., 2018)³. W przypadku badanych pól w miejscowości Myślice, korelacja pomiędzy wartościami EC oraz poszczególnymi frakcjami gleby (piasek, pył, il) wyniosła pomiędzy 0.988 a 0.994. Rysunek 25 przedstawia rozkład wartości EC oraz frakcji piasku dla tego samego pola. Podobieństwo rozkładu przestrzennego wartości jest bardzo wysokie i obrazuje, iż zmienność przestrzenna tekstury gleby jest odzwierciedlona wiernie przez przewodnictwo elektryczne gleby.



Rysunek 25. Porównanie rozkładu przestrzennego wartości przewodności elektrycznej gleby (EC) (lewa strona) z rozkładem przestrzennym frakcji piasku w glebie (prawa strona) – Myślice.

³ Samborski, S., Dobers, E., Gnatowski, T., Gozdowski, D., Jerzy, K., Elliot, S., Nieróbca, A., Rafał, P., Stępień, M., Szatyłowicz, J., 2018. Rolnictwo precyzyjne.



Biorąc pod uwagę zależność przedstawioną powyżej, mapy stref potencjału glebowego mogą opierać się na danych EC jako substytucie informacji o składzie granulometrycznym gleby. Natomiast aby zapewnić większą operacyjność serwisu oraz umożliwić rolnikom wygenerowanie mapy potencjału glebowego, w sytuacji, kiedy nie posiadają ani badań składu granulometrycznego ani badań przewodności elektrycznej gleby, wykonane zostały analizy zbieżności danych EC z wartościami wskaźników spektralnych wygenerowanych z wieloczasowych danych Sentinel-2 (Tabela 20). W tym celu przeprowadzono analizę korelacji Pearsona pomiędzy pomiarami przewodności elektrycznej z poszczególnych pól, a danymi reprezentującymi dane spektralne dla zobrazowań Sentinel-2 reprezentujące różne części sezonu. Poniższa tabela (Tabela 19) przedstawia sumaryczne wyniki korelacji pomiarów przewodności elektrycznej (procentowe) z danymi spektralnymi ze wszystkich analizowanych zobrazowań Sentinel-2 (wszystkie daty). Najwyższe korelacje uzyskano dla wskaźnika NDWI2, który nieznacznie wyprzedził ten sam wskaźnik, ale liczony na innych kanałach spektralnych - NDWI, odpowiednio 92,07 i 89,98. Wskaźniki te zdecydowanie wyprzedziły pozostałe analizowane dane spektralne o kilka do kilkunastu procent.

Tabela 22. Procentowe sumaryczne wyniki analizy korelacji pomiarów przewodności elektrycznej z użytymi wskaźnikami spektralnymi. Kolorami cieplejszymi oznaczono wyższe wartości korelacji.

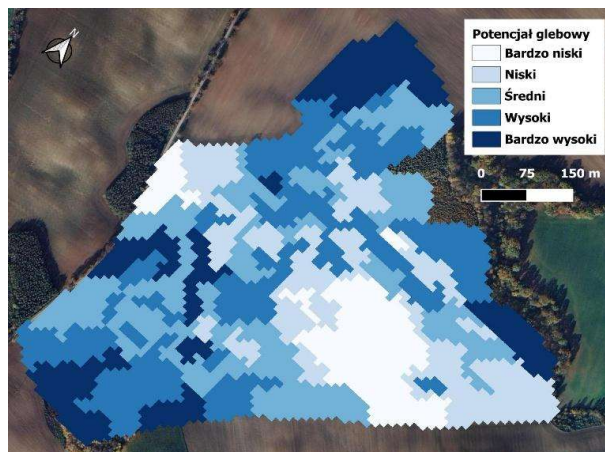
Pole	GNDVI	MTCI1	MTCI2	NDVI	NDWI	NDWI2	NIR	NIRNIR	NDRE	VARI
1	10.34	11.44	11	11.11	12.76	12.76	9.46	9.9	10.89	10.12
2	5.28	15.73	19.25	7.48	13.09	15.62	8.69	2.75	9.46	12.65
3	10.56	9.79	9.02	10.23	12.54	12.65	11.22	11.22	10.12	12.76
4	11.22	8.8	8.14	10.67	12.43	12.32	12.54	12.1	10.12	11.66
5	10.78	9.79	9.79	10.89	12.1	13.53	11.77	10.34	10.01	10.78
6	11.77	9.02	8.8	11.22	11.66	10.34	11.22	12.32	10.78	12.87
7	7.92	13.64	12.87	9.24	15.4	14.85	6.93	5.83	10.67	12.65
Suma	67.87	78.21	78.87	70.84	89.98	92.07	71.83	64.46	72.05	83.49

Bardziej szczegółowa analiza otrzymanych wyników wykazała, iż najwyższe korelacje dla wskaźnika NDWI2 uzyskano dla okresów, kiedy pole nie jest pokryte roślinnością (różne okresy w zależności od uprawy), nie ma na nim plonu głównego lub kiedy uprawa nie jest w pełni wegetacji, co zazwyczaj wiąże się z mniejszą pokrywą roślinną. Takie korelacje zauważalne są wczesną wiosną i na przełomie sierpnia i września dla upraw jarych oraz zimą i w okresie lipiec – sierpień dla upraw ozimych. Fakt wykorzystania terminów z odkrytą glebą zapewnia, że dane spektralne obrazują bezpośrednio charakterystyki gleby, a nie są jedynie mierzone poprzez korelację ze stanem pokrywającej ją roślinności. Korelacje te w jasny sposób obrazują, iż największa zgodność pomiarów przewodnictwa elektrycznego z danymi Sentinel-2 występują na zobrazowaniach bez pokrywy roślinnej i takie dane powinny zostać użyte do wyznaczania stref potencjału glebowego pola zgodnych z rozkładem przestrzennym pomiarów przewodnictwa elektrycznego.

W kolejnym kroku, spośród wieloletnich zobrazowań Sentinel-2 wybrano te, które reprezentują okresy bez pokrywy roślinnej, przy użyciu wskaźnika spektralnego odkrytej gleby - Bare Soil Index, który charakteryzuje się dodatnimi wartościami dla obszarów z odkrytą glebą: $BSI = ((Red+SWIR) - (NIR+Blue)) / ((Red+SWIR) + (NIR+Blue))$. Do segmentacji stref użyto zobrazowań Sentinel-2, wśród których uśredniona dla pola wartość wskaźnika BSI była większa niż 0.2. Następnie wykonano segmentację pól przy użyciu opisanego wcześniej algorytmu K-Means, na podstawie średniej wartości wskaźnika NDWI2 z danych wieloletnich. Rysunek 26 prezentuje podział pola na strefy potencjału glebowego wyznaczone na podstawie zobrazowania Sentinel-2 według opracowanej metody.



Końcowe mapy stref potencjału glebowego przechowywane są w postaci rastrowej o zadanej rozdzielczości przestrzennej (10 m).



Rysunek 26. Przykładowa mapa stref potencjału glebowego – Myślice.

4.4. Badania nad syntezą danych (glebowych i teledetekcyjnych) w celu wyznaczenia obszarów zmiennego nawożenia i wysiewu

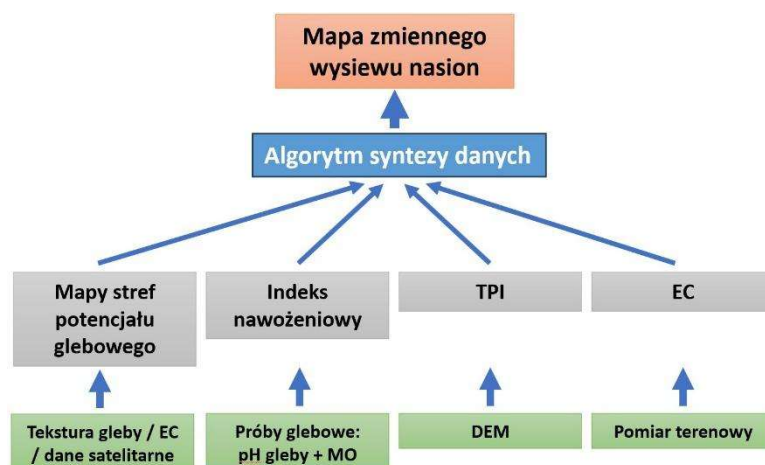
Głównym celem zadania było opracowaniem metody syntezy danych składowych, wchodzących w skład poszczególnych map aplikacyjnych. Proces opracowania metod oraz rodzaj danych składowych różni się pomiędzy zaplanowanymi zabiegami, a ich szczegóły zostały przedstawione poniżej.

Zmienny wysiew materiału siewnego

Na komponenty mapy zmiennego wysiewu materiału siewnego składają się zarówno dane pochodzące z pomiarów satelitarnych bądź lotniczych, jak i danych glebowych wynikających z pomiarów terenowych i obejmują:

- Mapa stref potencjału glebowego,
- Indeks nawożeniowy,
- Wskaźnik Położenia Topograficznego (Topographic Position Index – TPI),
- Przewodność elektryczna gleby (EC).

Ogólny schemat powstałej metody przedstawia Rysunek 27.

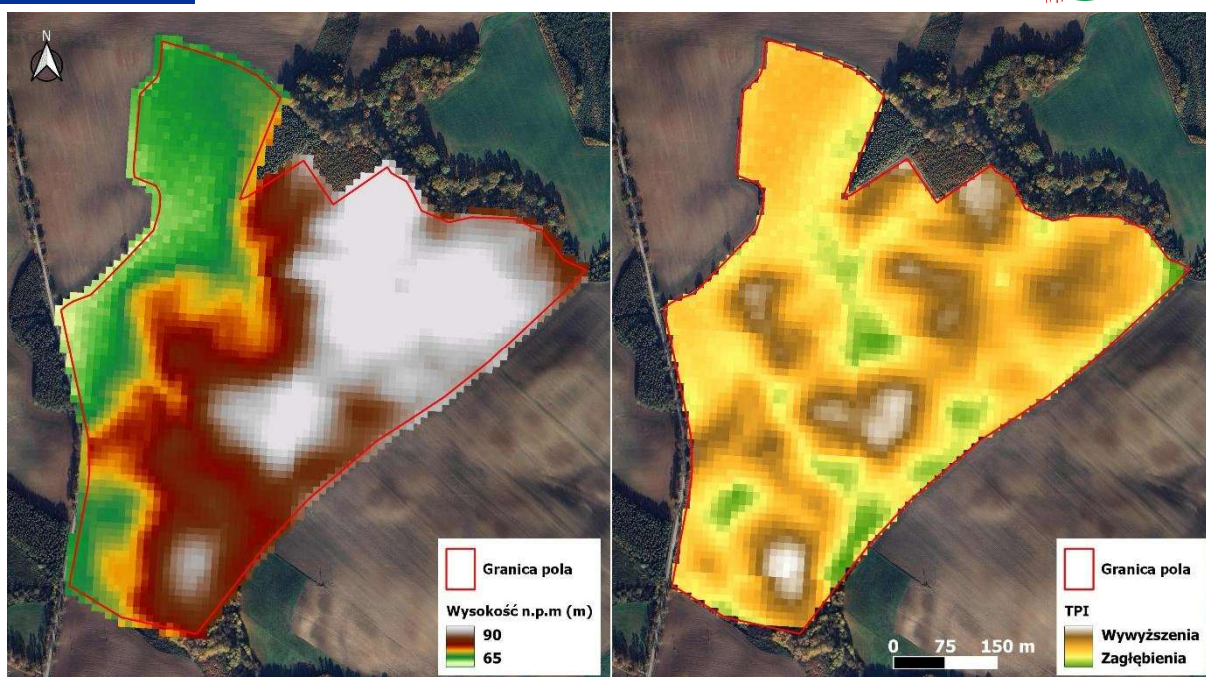


Rysunek 27. Schemat przedstawiający proces tworzenia mapy zmiennego wysiewu nasion oraz użytych danych źródłowych.

Mapa stref potencjału glebowego oraz indeks nawożeniowy zostały omówione w poprzednich rozdziałach. Dane o przewodnictwie elektrycznym gleby zostały poddane procesowi interpolacji i zapisane w rozdzielczości odpowiadającej pozostałym danym (10 m).

Oddzielnym krokiem była analiza możliwości użycia danych topograficznych w postaci numerycznego modelu terenu (NMT). Ukształtowanie terenu ma istotny wpływ na możliwości produkcyjne pola jak również na charakterystykę gleby. Dane wysokościowe użyte w projekcie zostały pozyskane z zasobów serwisu www.geoportal.gov.pl. Źródłem danych wysokościowych dla obszarów rolniczych w przeważającej mierze jest lotniczy skaning laserowy, a same dane są systematycznie aktualizowane w kilkuletnich kampaniach. Standardowy model wysokościowy dostępny jest nieodpłatnie, co ułatwia jego operacyjne użycie dla obszaru całego kraju, w formie rastrowej w siatce o rozdzielczości 1 m x 1 m. do celów projektowych NMT został przepróbkowany do docelowej rozdzielczości 10 m, odpowiadającej rozdzielczości przestrzennej danych satelitarnych Sentinel-2 oraz opracowywanych map aplikacyjnych. Analiza wizualna rozkładu wysokości terenu na poszczególnych polach w analizowanych gospodarstwach, jak również próba użycia tej informacji w procesie tworzenia map aplikacyjnych pokazała, iż informacja o wysokości bezwzględnej terenu na danym polu dostarcza jedynie ogólnej informacji o topografii pola. W celu uwypuklenia szczegółów oraz wyeksponowania zmian na poszczególnych polach testom poddany został Wskaźnik Położenia Topograficznego. Jest to wskaźnik geomorfologiczny używany do oceny położenia danego punktu w terenie względem jego otoczenia (De Reu et al., 2013)⁴. Pozwala on ocenić czy analizowany punkt znajduje się wyżej, niżej czy na tej samej wysokości co jego sąsiedztwo (sąsiednie punkty). Dzięki temu możliwe jest wychwycenie lokalnych (w skali danego pola) wzniesień lub zagłębień. Jak można zaobserwować na Rysunku 25, w porównaniu do NMT (obraz po lewej stronie), TPI wskazuje lokalne minima i maksima (obraz po prawej stronie) co w lepszy sposób pozwala oszacować sytuację topograficzną na polu. Porównanie obu zestawów danych (NMT ws. TPI) dla pól z obu miejscowości pozwoliło na wybranie TPI jako danych wejściowych w tworzeniu mapy aplikacyjnej zmiennego wysiewu nasion.

⁴ De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwervaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., Chu, W., Antrop, M., De Maeyer, P., Finke, P., Van Meirvenne, M., Verniers, J., Crombé, P., 2013. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology* 186, 39–49.



Rysunek 28. Porównanie numerycznego modelu terenu (lewa strona) i wskaźnika położenia topograficznego (prawa strona) dla wybranego pola – Myślice.

Wybór algorytmu K-Means jako metody służącej integracji danych, podyktowany został faktem, że jest to algorytm uczenia maszynowego metodą nienadzorowaną, pozwalający na segmentację danych, kiedy nie istnieją dane referencyjne reprezentujące wzorzec podziału zbioru danych. Dodatkowo, użycie algorytmu K-Means cechuje się względną prostotą stosowania oraz możliwością łączenia różnego rodzaju danych wejściowych, reprezentujących różne wartości i rozkłady.

Dane wejściowe przygotowane zostały poprzez odpowiednią ich konwersję do wspólnego formatu i rozdzielczości przestrzennej. W kolejnym kroku poddane zostają analizie algorytmem K-Means co pozwala na uzyskanie mapy aplikacyjnej z podziałem na odpowiednią liczbę klas (np. pięć) dla których przypisuje się zadaną wielkość (ilość) materiału siewnego do zastosowania podczas wysiewu. Końcowym krokiem jest zapisanie wyników map aplikacyjnych w formacie i standardzie pozwalającym na bezproblemowe zaimplementowanie ich w kontrolerach maszyn rolniczych.

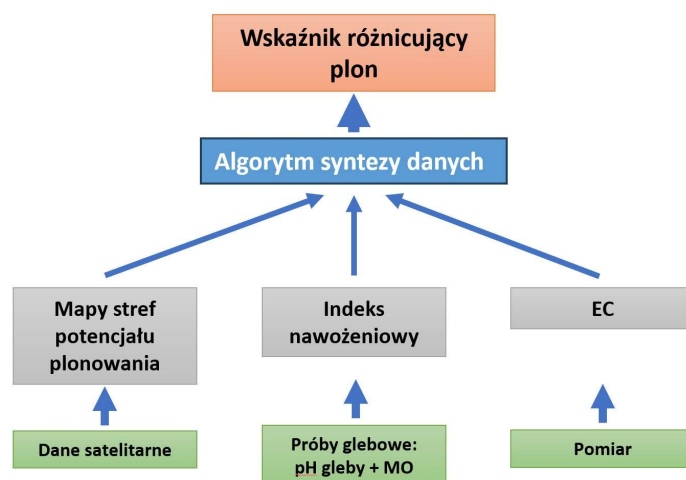
Mechanizm różnicowania nawożenia fosforem

System zmiennego nawożenia fosforem opiera się na połączeniu algorytmu różnicującego nawożenie przestrzennie oraz algorytmu wyliczającego potrzeby nawozowe roślin (rozdział 5.5). Mechanizm różnicujący nawożenie to wskaźnik różnicujący plon. Główne jego komponenty, podobnie jak w przypadku wysiewu nasion to dane z pomiarów satelitarnych i dane glebowe wynikające z pomiarów terenowych. Obejmują one:

- Mapę stref potencjału plonowania,
- Indeks nawożeniowy,
- Przewodność elektryczną gleby (EC).



Schemat ilustrujący proces tworzenia wskaźnika różnicującego plon przedstawia **Rysunek 29.**



Rysunek 29. Schemat tworzenia mapy wskaźnika różnicującego plon oraz użytych danych źródłowych.

Powyższe dane składowe zostały omówione w poprzednich częściach raportu. Na potrzeby tworzenia przestrzennie zmiennej mapy fosforu, mapy stref potencjału plonowania zostały przetworzone przy wykorzystaniu informacji o dodatkowych czynnikach warunkujących plon na polu, tj. wypracowanym w projekcie indeksem nawożeniowym oraz informacją o przewodności elektrycznej pola. Integracja tych danych nastąpiła poprzez użycie sprawdzonego wcześniej algorytmu K-Means. W ten sposób uzyskuje się mapę z zadaną liczbą klas (w zależności od potrzeby stopnia zróżnicowania), która pozwoli na zróżnicowanie potrzeb nawozowych uprawianych roślin w celu stworzenia mapy aplikacyjnej ze zróżnicowaną przestrzennie dawką fosforu.

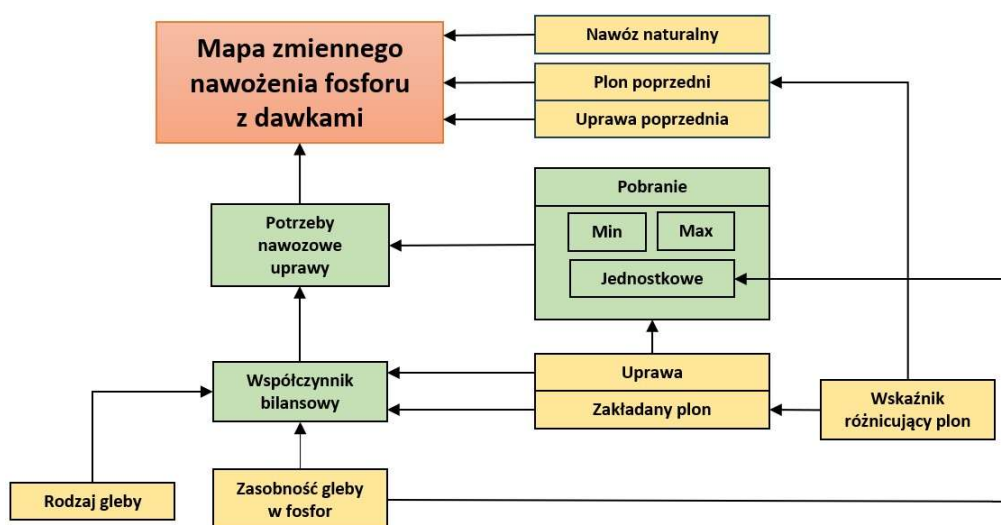
4.5. Badania nad obliczaniem potrzeb nawozowych roślin (nawożenie węgłne fosforem)

Podstawą tworzenia mapy aplikacyjnej zmiennego nawożenia fosforem jest obliczanie potrzeb nawozowych danej uprawy na danym polu zgodnym z prowadzonym płodozmianem. Wyliczanie potrzeb opiera się na działaniu kalkulatora dawki nawozu, który bazuje na połączeniu danych przestrzennych, zmiennych w skali pola oraz ogólnych ustalanych jako wartości stałe/przeciętne dla całego pola. Algorytm został przygotowany tak aby umożliwić podawanie każdej informacji liczbowej w dowolny sposób - punktowy lub ogólny, jednak w praktyce, tylko przy niektórych danych stosowana jest zmienność w skali pola.

Ogólną zasadę działania kalkulatora przedstawia schemat na Rysunku 27. Kluczowym elementem jest wynik laboratoryjnego badania gleby. Dostarcza on informacji przestrzennej reprezentującej zasobność gleby w fosfor. Wynik ten, wraz z informacją o rodzaju gleby oraz informacją o rodzaju uprawy prowadzonej w bieżącym sezonie wegetacyjnym służy do obliczenia współczynnika bilansowego. Jeśli chodzi o informację o bieżącej uprawie, podawane są przez użytkownika serwisu (np. rolnik) dwie podstawowe dane: rodzaj uprawy (pszenica ozima, rzepak ozimy, itp.) oraz szacowany średni plon z pola. Pomimo, iż szacowany plon podawany jest jako jedna, stała wartość dla całego pola (np. ilość ton/hektar), do kalkulatora przekazywane są wartości zmienne, które wynikają z użycia mapy wskaźnika różnicującego plon (opisany w rozdziale 5.4), która modyfikuje przestrzennie wartość plonu, tworząc syntetyczną mapę plonu danego pola.



Biorąc pod uwagę informację o rodzaju uprawy oraz zasobności gleby w fosfor wynikającej z badań gleby, ustalane są możliwe minimalne, maksymalne oraz jednostkowe pobrania tego mikroskładnika w bieżącym sezonie. Następnie na podstawie współczynnika bilansowego oraz wartości pobrania, obliczane są potrzeby nawozowe w każdej części pola, które warunkowane są ze względu na rodzaj uprawy. Końcowa dawka nawozu, wyliczana w kolejnym kroku, uwzględnia dodatkowo dane o uprawie i plonie z poprzedniego sezonu (także różnicowane przestrzennie poprzez wskaźnik różnicujący plon), a także o ewentualnym stosowaniu nawozu naturalnego. Wynikiem działania kalkulatora jest gotowa mapa aplikacyjna do zmiennej aplikacji nawozu fosforowego, dostarczająca informacji o wielkości dawki nawozowej dedykowanej niezależnie dla każdej indywidualnej jednostki przestrzennej z jakich zbudowana jest mapa (domyślnie obszar 10 m x 10 m). Mapa zapisywana jest w formacie i standardzie pozwalającym na bezpośrednie użycie w kontrolerach maszyn rolniczych.



Rysunek 30. Schemat działania kalkulatora dawki nawozu fosforowego.

5. Doświadczenia i wyniki

W wyniku prac terenowych i teledetekcyjnych zaplanowano przeprowadzenie doświadczeń polowych (Rysunki 31-32). Miały one na celu sprawdzenie i weryfikację powstałych na wcześniejszym etapie produktów.



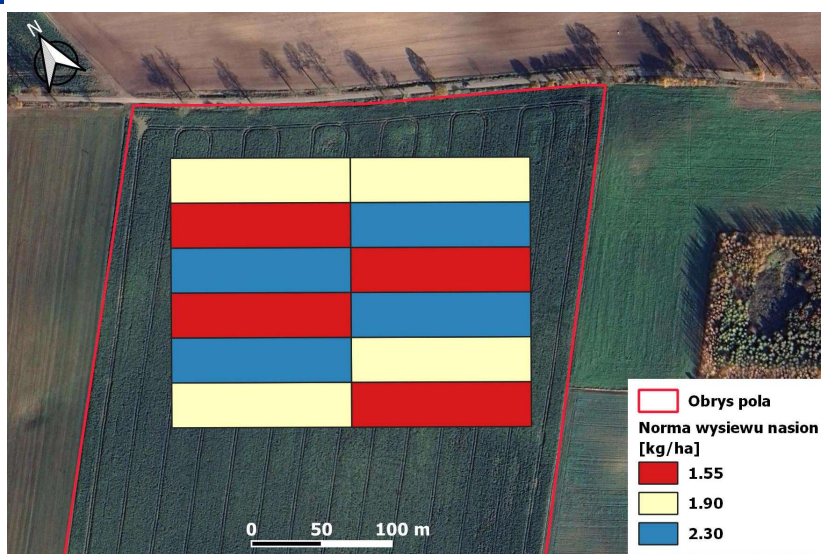
Rysunek 31. Założenie doświadczeń dotyczących gęstości siewu nasion oraz dawek nawozu fosforowego w Myślicach.



Rysunek 32. Założenie doświadczeń dotyczących gęstości siewu nasion oraz dawek nawozu fosforowego w Boleszkowicach.

5.1. Doświadczenia oceniające wpływ różnych gęstości siewu nasion na plonowanie oraz cechy struktury plonu pszenicy ozimej, rzepaku ozimego i pozostałych zbóż ozimych.

Doświadczenia wykonano w dwóch gospodarstwach, w różnych warunkach środowiskowych. Przed przystąpieniem do założenia doświadczenia została przeprowadzona analiza badań składu granulometrycznego, przewodności elektromagnetycznej gleby i map glebowo rolniczych IUNG. Miało to na celu umiejscowienie doświadczenia na obszarze cechującym się najmniejszą zmiennością glebową w obrębie pola. Badanym czynnikiem doświadczenia był uzyskany plon przy różnych gęstościach siewu nasion, których wielkość wynosiła: 80%, 100%, 120% względem zalecanej normy wysiewu przez producenta oraz stosowanej standardowo przez gospodarstwa. Wielkość i szerokość poletek doświadczalnych została dostosowana do ścieżek technologicznych pola, a ich minimalny rozmiar wynosił 25m x 80m (2000m²). Doświadczenia wykonywano w minimum trzech powtórzeniach. Termin siewu zbóż oraz rzepaku ozimego odbył się zgodnie z dobrą praktyką rolniczą. W trakcie sezonu wegetacyjnego wykonano badania terenowe zgodnie z metodyką pozyskiwania danych in situ do opracowania algorytmu, przedstawione wcześniej w dokumencie. Poniżej przedstawiono przykłady schematów doświadczeń wykonanych w rzepaku ozimym w Myślicach (Rysunek 33) oraz pszenicy ozimym w Boleszkowicach (Rysunek 34).



Rysunek 33. Schemat doświadczenia oceniającego wpływ różnych gęstości siewu nasion na plonowanie oraz cechy struktury plonu rzepaku ozimego w Myślicach.



Rysunek 34. Schemat doświadczenia oceniającego wpływ różnych gęstości siewu nasion na plonowanie oraz cechy struktury plonu pszenżyta ozimego w Boleszkowicach.

Przedstawione tabele (Tabela 23, Tabela 24, Tabela 25, Tabela 26) prezentują wyniki uzyskane w prowadzonych doświadczeniach oceniających wpływ różnych gęstości siewu nasion na plonowanie oraz cechy struktury plonu w Myślicach oraz Boleszkowicach.



Tabela 23. Porównanie średniego plonowania oraz składowych plonu w zależności od zastosowanej gęstości siewu pszenicy ozimej na doświadczeniu w Boleszkowicach oraz Myślicach.

	Poziom czyn- nika	Norma wy- siewu (kg/ha)	Liczba roślin na m2 mie- siąc po siewie (szt.)	Ocena zagęsz- czenia kłosów (szt./m2)	Średnia liczba ziaren w kło- sie (szt.)	MTZ (g)	Plon 14% wilg (t/ha)
Boleszkowice	80,00%	125,00	208,00	403,75	49,00	45,15	8,06
	100,00%	155,00	257,50	458,50	47,50	44,68	8,88
	120,00%	185,00	286,50	492,50	46,75	44,28	9,16
Myślice	80,00%	128,00	220,00	474,00	47,00	44,00	9,40
	100,00%	160,00	244,00	490,00	43,00	44,00	9,34
	120,00%	192,00	268,00	523,00	42,00	44,00	9,33

Tabela 24. Porównanie średniego plonowania oraz składowych plonu w zależności od zastosowanej gęstości siewu rzepaku ozimego na doświadczeniu w Boleszkowicach oraz Myślicach.

	Poziom czyn- nika	Norma wy- siewu (kg/ha)	Liczba roślin na m2 po zi- mie (szt.)	Liczba łusz- czyn na roślin- ie (szt.)	Średnia liczba nasion w łusz- czynie (szt.)	MTN (g)	Plon 9% wilg (t/ha)
Boleszkowice	80,00%	1,50	31,75	199,00	18,50	4,55	4,84
	100,00%	1,90	40,50	150,00	17,75	4,33	4,48
	120,00%	2,30	49,00	135,00	17,50	4,33	4,59
Myślice	80,00%	1,55	-	-	-	-	4,36
	100,00%	1,90	-	-	-	-	4,25



	120,00%	2,25	-	-	-	-	4,19
--	---------	------	---	---	---	---	------

Tabela 25. Porównanie średniego plonowania oraz składowych plonu w zależności od zastosowanej gęstości siewu jęczmienia ozimego na doświadczeniu w Boleszkowicach.

Poziom czynnik	Norma wysiewu (kg/ha)	Liczba roślin na m2 miesiąc po siewie (szt.)	Ocena zagęszczenia kłosów (szt./m2)	Średnia liczba ziaren w kłosie (szt.)	MTZ (g)	Plon 14% wilg (t/ha)
80,00%	115,00	200,63	742,63	23,88	51,26	8,63
100,00%	140,00	247,75	814,88	23,13	50,91	8,98
120,00%	160,00	291,75	857,50	21,88	50,65	8,98

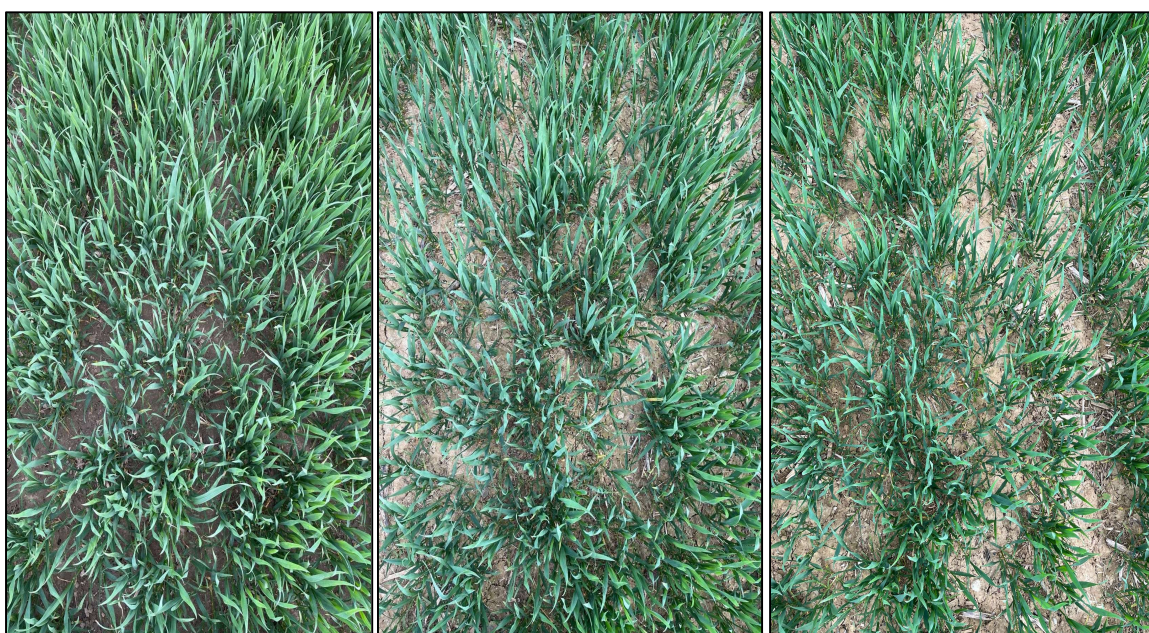
Tabela 26. Porównanie średniego plonowania oraz składowych plonu w zależności od zastosowanej gęstości siewu pszenżyta ozimego na doświadczeniu w Boleszkowicach.

Poziom czynnik	Norma wysiewu (kg/ha)	Liczba roślin na m2 miesiąc po siewie (szt.)	Ocena zagęszczenia kłosów (szt./m2)	Średnia liczba ziaren w kłosie (szt.)	MTZ (g)	Plon 14% wilg (t/ha)
80%	115,00	200,00	438,00	44,25	46,98	8,62
100%	140,00	247,75	467,50	43,75	45,95	8,86
120%	170,00	290,50	485,00	43,25	45,93	8,96

W przeprowadzonych doświadczeniach, którym czynnikiem badanym była gęstość siewu zbóż ozimych oraz rzepaku ozimego wykonano pomiar plonu oraz składowych plonu. W przypadku uzyskanych plonów w zbożach najwyższe plonowanie odnotowano w trzech doświadczeniach (plon 9,16 t/ha pszenicy ozimej, 8,98 t/ha jęczmienia ozimego oraz 8,96 t/ha pszenżyta ozimego w Boleszkowicach), przy normie wysiewu 120% zalecanej normy producenta. Zauważyć należy, że wielkość plonu w doświadczeniu



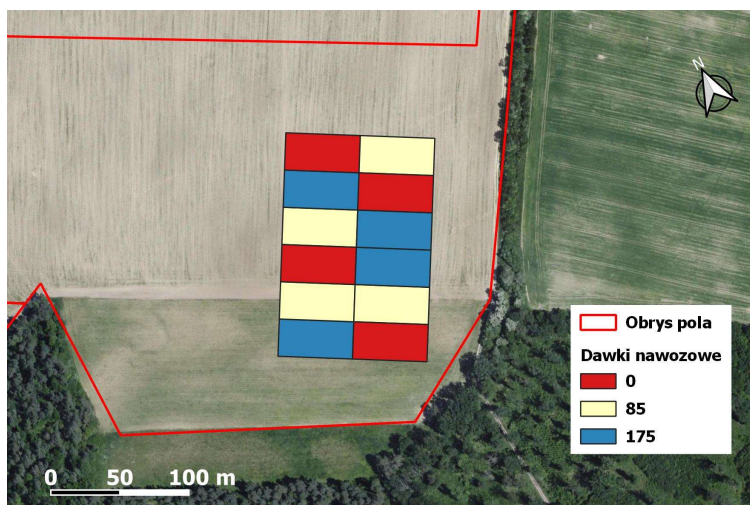
w jęczmieniu ozimym w Boleszkowicach przy dawce 120% była równa plonowi uzyskanemu przy zalecanej normie wysiewu. Wysokie plonowanie przekładało się bezpośrednio na składowe plonu, które cechowały się najwyższym zagęszczeniem kłosów na metrze kwadratowym, najniższą średnią liczbą ziaren w kłosie oraz najmniejszą wagą tysiąca ziaren. W doświadczeniu w pszenicy ozimej w Myślicach najwyższy plon uzyskano przy normie wysiewu 128 kg/ha, co stanowiło 80% zalecanej normy wysiewu. Pszenica ozima wówczas cechowała się najwyższą liczbą kłosów na metrze kwadratowym oraz średnią największą liczbą ziaren w kłosie. Podobne wyniki uzyskano w rzepaku ozimym, gdzie zarówno w Boleszkowicach, jak i Myślicach najwyższy plon (4,84 t/ha oraz 4,36 t/ha) otrzymano na poletkach z obniżoną normą wysiewu o 20%. Rzepak ozimy wówczas cechował się największymi parametrami składowych plonu tj. liczbą łuszczyń na metrze kwadratowym, średnią liczbą nasion w łuszczyńce oraz masą tysiąca nasion.



Rysunek 35. Zróżnicowanie pokrycia gleby przez pszenicę ozimą w zależności od normy wysiewu (120%, 100%, 80%).

5.2. Doświadczenia oceniające wpływu różnych dawek nawozów fosforowych na plonowanie pszenicy ozimej, rzepaku ozimego i pozostałych zbóż ozimych.

Doświadczenia przeprowadzono w dwóch gospodarstwach, w różnych warunkach środowiskowych. Aplikacja nawozu została poprzedzona poborem i badaniem zawartości fosforu w glebie. Wyniki badań stanowiły podstawę do wyliczenia rekomendowanych dawek nawożenia fosforowego zgodnych z zaleceniami nawozowymi IUNG. Badanym czynnikiem doświadczenia był uzyskany plon, przy różnych dawkach nawożenia fosforowego: 0%, 50%, 100% dawki rekomendowanej. Wielkość i szerokość poletek doświadczalnych została dostosowana do ścieżek technologicznych pola, a ich minimalny rozmiar wynosił 25m x 80m (2000m²). Doświadczenia przeprowadzono w minimum trzech powtórzeniach. Nawóz fosforowy został zaaplikowany włącznie w trakcie siewu pasowego zbóż i rzepaku ozimego. W założonych doświadczeniach prowadzone były badania terenowe zgodnie z metodyką pozyskiwania danych in situ do opracowania algorytmu, przedstawione wcześniej w dokumencie. Poniżej przedstawiono przykład schematu doświadczenia wykonanego w jęczmieniu ozimym w Boleszkowicach (Rysunek 36).



Rysunek 36. Schemat doświadczenia oceniającego wpływ różnych dawek nawozów fosforowych na plonowanie jęczmienia ozimego w Boleszkowicach.

Przedstawione tabele (Tabela 27, Tabela 28, Tabela 29, Tabela 30) prezentują wyniki uzyskane w wykonanych doświadczeniach oceniających wpływ różnych dawek nawozów fosforowych na plonowanie upraw w Myślicach oraz Boleszkowicach.

Tabela 27. Porównanie średnich wyników plonu oraz zawartości procentowej fosforu w suchej masie słomy i ziarna pszenicy ozimej w zależności od zastosowanej ilości nawozu fosforowego na doświadczeniu w Boleszkowicach oraz Myślicach.

	Poziom czynnika	Dawka nawozu 46% P ₂ O ₅ (kg/ha)	Plon 14% wilg (t/ha)	Zawartość % P w s.m. słoma	Zawartość % P w s.m. ziarno
Boleszkowice	0%	0	7,82	0,15	0,34
	50%	65	8,48	0,19	0,34
	100%	130	7,37	0,14	0,35
Myślice	0%	0	10,03	0,21	0,22
	50%	67	10,18	0,21	0,22



	100%	128	10,21	0,19	0,26
--	------	-----	-------	------	------

Tabela 28. Porównanie średnich wyników plonu oraz zawartości procentowej fosforu w suchej masie słomy i nasion rzepaku ozimego w zależności od zastosowanej ilości nawozu fosforowego na doświadczeniu w Boleszkowicach oraz Myślicach.

	Poziom czynnika	Dawka nawozu 46% P ₂ O ₅ (kg/ha)	Plon 9% wilg (t/ha)	Zawartość % P w s.m. słoma	Zawartość % P w s.m. ziarno
Boleszkowice	0%	0	4,38	0,17	0,57
	50%	85	4,57	0,11	0,57
	100%	175	4,66	0,11	0,56
Myślice	0%	0	4,69	0,31	0,66
	50%	85	4,69	0,29	0,67
	100%	175	4,54	0,28	0,65

Tabela 29. Porównanie średnich wyników plonu oraz zawartości procentowej fosforu w suchej masie słomy i ziarna jęczmienia ozimego w zależności od zastosowanej ilości nawozu fosforowego na doświadczeniu w Boleszkowicach.

Poziom czynnika	Dawka nawozu 46% P ₂ O ₅ (kg/ha)	Plon 14% wilg (t/ha)	Zawartość % P w s.m. słoma	Zawartość % P w s.m. ziarno



0%	0	9,267	0,11	0,30
50%	85	9,82	0,12	0,31
100%	175	9,89	0,12	0,31

Tabela 30. Porównanie średnich wyników plonu oraz zawartości procentowej fosforu w suchej masie słomy i ziarna pszenżyta ozimego w zależności od zastosowanej ilości nawozu fosforowego na doświadczeniu w Boleszkowicach.

Poziom czynnika	Dawka nawozu 46% P_2O_5 (kg/ha)	Plon 14% wilg (t/ha)	Zawartość % P w s.m. słoma	Zawartość % P w s.m. ziarno
0%	0	9,78	0,11	0,32
50%	75	9,67	0,11	0,31
100%	150	10,00	0,10	0,31

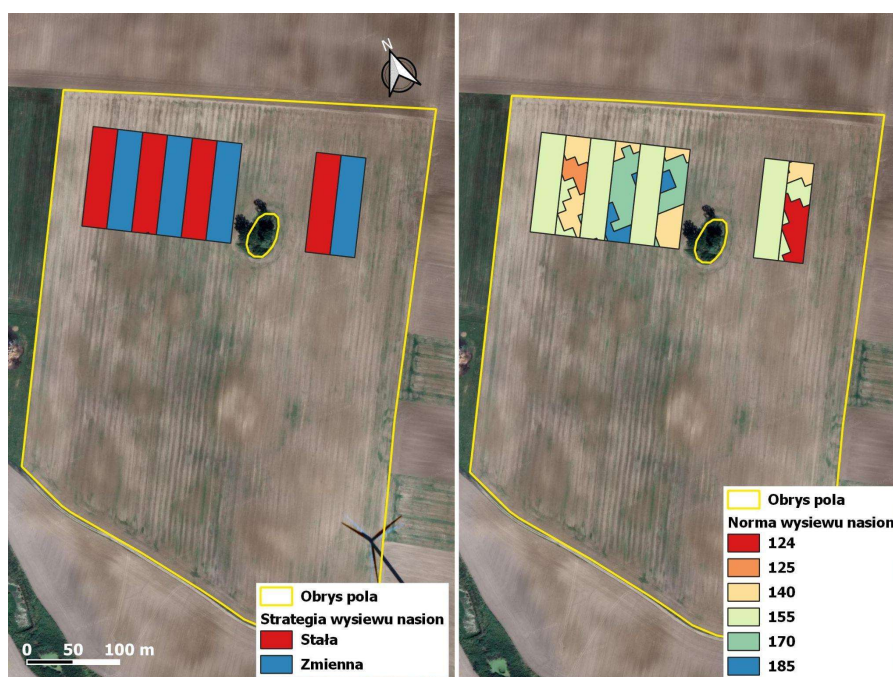
Wyniki plonowania zbóż ozimych oraz rzepaku ozimego w doświadczeniach sprawdzających uzyskany plon w zależności od dawkowania nawozów fosforowych wykazały, że w czterech z sześciu doświadczeń (pszenicy ozimej w Myślicach, rzepaku ozimego, jęczmieniu ozimego oraz pszenżyta ozimego w Boleszkowicach) najwyższy plon został uzyskany przy nawożeniu fosforem zgodnym z zaleceniami nawozowymi IUNG. W doświadczeniu w pszenicy ozimej w Boleszkowicach najwyższe plonowanie wykazało dawkowanie fosforu obniżone o 50%, natomiast w doświadczeniu w rzepaku ozimym w Myślicach brak nawożenia fosforowego oraz dawki na poziomie 50% względem zaleceń nawozowych IUNG uzyskały taki sam plon. Wyniki plonowania w doświadczeniach nie wykazały dużych obniżek plonu względem poletek z najwyższym plonowaniem i wynosiły maksymalnie 1,11 t/ha w zbożach ozimych oraz 0,28 t/ha w rzepaku ozimym.

Zróżnicowanie dawek nawożenia fosforowego nie miało bezpośredniego wpływu na zawartość % fosforu w ziarnie i słomie. Wyniki badań na zawartość fosforu w ziarnie i słomie cechowały się bardzo małą zmiennością w obrębie prowadzonych doświadczeń. Obniżenie ilości nawożenia fosforowego nie ograniczało dostępności tego makroskładnika dla roślin. Średnia oraz wysoka zasobność gleby w fosfor w miejscach prowadzenia doświadczeń oraz optymalny odczyn gleby i optymalna zawartość substancji organicznej umożliwiły uzyskanie wysokich plonów i zbliżoną akumulację fosforu w roślinach.



5.3. Doświadczenia sprawdzające efektywność zmiennego wysiewu nasion zbóż ozimych i rzepaku ozimego w uprawie pasowej w zestawieniu z technologiami standardowymi stosowanymi w gospodarstwach biorących udział w projekcie.

Doświadczenia założono w dwóch gospodarstwach, w różnych warunkach środowiskowych. Na polach produkcyjnych wyznaczono poletka doświadczalne dostosowane do ścieżek technologicznych pola. Minimalny rozmiar poletek wynosił 25m x 80m (2000m²), a ich ilość stanowiła minimum trzy powtórzenia. W ramach doświadczenia wykonano siew pasowy w technologii zmiennego dawkowania nasion. W tym celu wygenerowano mapę siewu opartą m.in. o wieloletnie zobrazowania satelitarne z wyznaczonymi strefami odzwierciedlającymi potencjał plonowania gleby. Na glebach o wyższym potencjale plonotwórczym nasiona zostały wysiane z większą gęstością, zaś na glebach o niższym potencjale plonotwórczym zastosowano niższą normę wysiewu. Wielkość norm wysiewu nasion została wyliczona na podstawie zaleceń producenta oraz wynosiła 80%, 90%, 100%, 110%, 120% zalecanej normy wysiewu. Uzyskane plony upraw na poletkach z zastosowanym zmiennie wysiewem nasion porównano z poletkami, z technologią stałej normy wysiewu. W założonych doświadczeniach prowadzone były badania terenowe zgodnie z metodyką pozyskiwania danych in situ do opracowania algorytmu, przedstawione wcześniej w dokumencie. Poniżej przedstawiono przykład schematu doświadczenia wykonanego w pszenicy ozimej w Myślicach (Rysunek 37).



Rysunek 37. Schemat doświadczenia sprawdzające efektywność zmiennego wysiewu nasion pszenicy ozimej w uprawie pasowej w zestawieniu z technologiami standardowymi stosowanymi w Boleszkowicach.

Przedstawione tabele (Tabela 31, Tabela 32, Tabela 33, Tabela 34, Tabela 35, Tabela 36) prezentują wyniki uzyskane w wykonanych doświadczeniach sprawdzających efektywność zmiennego wysiewu nasion zbóż ozimych i rzepaku ozimego w uprawie pasowej w zestawieniu z technologiami standardowymi stosowanymi w Myślicach oraz Boleszkowicach.

Tabela 31. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii siewu pszenicy ozimej na doświadczeniu w Boleszkowicach.



Strategia	Norma wysiewu (kg/ha)	Plon 14% wilg (t/ha)	LAI (m ² ·m ⁻²) 13.04.2024	LAI (m ² ·m ⁻²) 25.05.2024	NDVI 27.04.2024	NDVI 01.06.2024
Stała	155,00	8,25	2,44	3,98	0,85	0,86
Zmienna	151,06	8,68	2,79	4,36	0,86	0,88

Tabela 32. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii siewu pszenicy ozimej na doświadczeniu w Myślicach.

Strategia	Norma wysiewu (kg/ha)	Plon 14% wilg (t/ha)	LAI (m ² ·m ⁻²) 09.04.24	LAI (m ² ·m ⁻²) 08.05.24	LAI (m ² ·m ⁻²) 10.06.24	NDVI 27.03.2024	NDVI 09.05.2024	NDVI 05.06.2024
Stała	160,00	8,88	1,17	3,90	4,03	0,45	0,92	0,85
Zmienna	170,06	8,98	1,12	3,61	3,95	0,45	0,92	0,85

Tabela 33. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii siewu rzepaku ozimego na doświadczeniu w Boleszkowicach.

Strategia	Norma wysiewu (kg/ha)	Plon 9% wilg (t/ha)	LAI (m ² ·m ⁻²) 1.04.2024	LAI (m ² ·m ⁻²) 15.04.2024	NDVI 27.03.2024	NDVI 20.04.2024
Stała	1,90	4,65	3,67	5,03	0,81	0,72
Zmienna	1,79	4,87	3,62	5,09	0,81	0,72

Tabela 34. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii siewu rzepaku ozimego na doświadczeniu w Myślicach.



Strategia	Norma wysiewu (kg/ha)	Plon 9% wilg (t/ha)	LAI (m ² ·m ⁻²) 09.04.2024	LAI (m ² ·m ⁻²) 08.05.2024	NDVI 27.03.2024	NDVI 09.05.2024
Stała	1,90	4,17	2,76	7,13	0,66	0,66
Zmienna	1,99	4,52	3,22	7,30	0,74	0,67

Tabela 35. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii siewu jęczmienia ozimego na doświadczeniu w Boleszkowicach.

Strategia	Norma wysiewu (kg/ha)	Plon 14% wilg (t/ha)	LAI (m ² ·m ⁻²) 13.04.2024	LAI (m ² ·m ⁻²) 25.05.2024	NDVI 27.04.2024	NDVI 01.06.2024
Stała	140,00	9,34	3,65	5,52	0,92	0,92
Zmienna	135,06	9,83	3,52	5,53	0,93	0,93

Tabela 36. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii siewu pszenżyta ozimego na doświadczeniu w Boleszkowicach.

Strategia	Norma wysiewu (kg/ha)	Plon 14% wilg (t/ha)	LAI (m ² ·m ⁻²) 13.04.2024	LAI (m ² ·m ⁻²) 25.05.2024	NDVI 27.04.2024	NDVI 01.06.2024
Zmienna	142,15	8,56	3,12	4,28	0,83	0,89
Stała	155,00	8,64	3,13	4,31	0,84	0,89



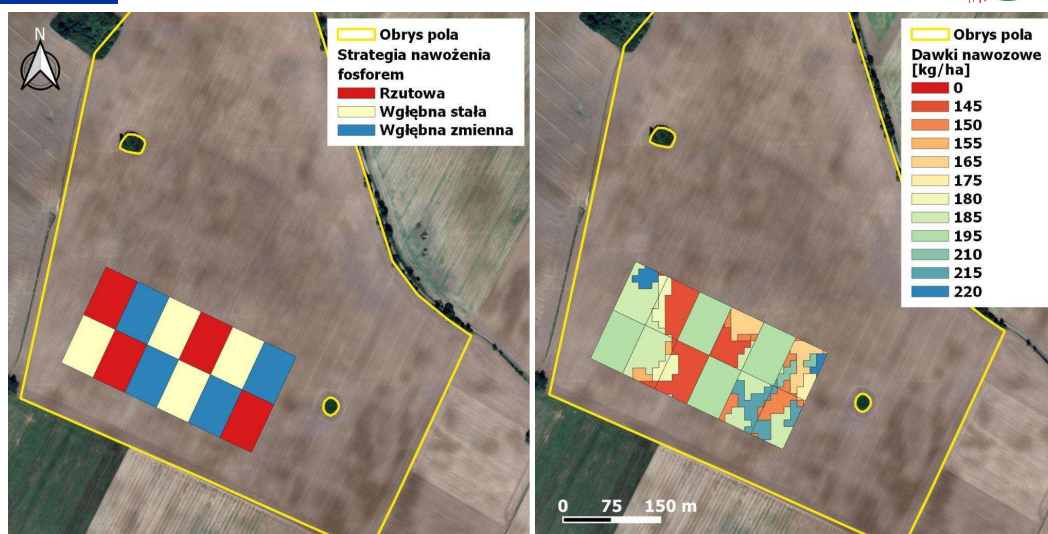
Wyniki przeprowadzonych doświadczeń przedstawiono w Tabelach 31 - 36. W czterech z sześciu doświadczeń zastosowanie technologii zmiennego dawkowania nasion pozwoliła na zaoszczędzenie materiału siewnego. Wyniki plonowania pięciu doświadczeń wykazały większe plonowanie badanych upraw w technologii zmiennego dawkowania nasion, w porównaniu ze stałym dawkowaniem. W przypadku zbóż ozimych odnotowano przyrost plonu od 0,1 t/ha do 0,49 t/ha. Rzepak ozimy w technologii zmiennego wysiewu nasion lepiej plonował o 0,35 t/ha oraz 0,22 t/ha. W doświadczeniu w pszenicy ozimym w Boleszkowicach odnotowano niewielki spadek plonu o 0,08 t/ha w strategii zmiennego wysiewu nasion.

5.4. Doświadczenia porównujące technologie precyzyjnego nawożenia fosforem, obejmujące wykorzystanie rozsiewaczy rzutowych oraz zestawu do uprawy pasowej i siewu bezpośredniego z nawożeniem wglębnym oraz technologiami standardowymi stosowanymi w gospodarstwach biorących udział w projekcie.

Przeprowadzono doświadczenia w dwóch gospodarstwach, w różnych warunkach środowiskowych. Na polach produkcyjnych wyznaczono poletka doświadczalne dostosowane do ścieżek technologicznych pola, których minimalny rozmiar wynosił 25m x 80m (2000m²). W doświadczeniu przetestowano trzy metody aplikacji nawozów fosforowych. Pierwszym jest zmienny rozsiew nawozów metodą rzutową przy wykorzystaniu rozsiewacza rzutowego. Rozsiew nawozów poprzedził siew nasion bezpośredni w pasach. Drugą metodą jest zmienny wysiew nawozów fosforowych wglębnie do gleby w trakcie siewu pasowego. W obu przypadkach zastosowano mapy wysiewu nawozu fosforowego oparte m.in. o wieloletnie zobrażenia satelitarne z wyznaczonymi zmiennymi strefami. Trzecią metodą aplikacji nawozu fosforowego była stała dawka wyznaczona na podstawie badań zawartości fosforu w glebie poprzedzających wysiew oraz zaleceń nawozowych IUNG. Wysiew nawozów wykonano wglębnie w trakcie siewu pasowego. Metod ta stanowiła kontrolę doświadczenia. Wszystkie metody zaaplikowano w minimum trzech powtórzeniach. W doświadczeniu poddano analizie uzyskany plon na wszystkich poletkach oraz prowadzone były badania terenowe opisane wcześniej w dokumencie. Poniżej przedstawiono przykłady schematów doświadczeń wykonanych w pszenicy ozimej w Myślicach (Rysunek 38) oraz jęczmieniu ozimym w Boleszkowicach (Rysunek 39).



Rysunek 38. Schemat doświadczenia porównującego technologie precyzyjnego nawożenia fosforem, obejmujące wykorzystanie rozsiewaczy rzutowych oraz zestawu do uprawy pasowej i siewu bezpośredniego z nawożeniem wglębnym oraz technologiami standardowymi stosowanymi w uprawie pszenicy ozimej w Myślicach.



Rysunek 39. Schemat doświadczenia porównującego technologie precyzyjnego nawożenia fosforem, obejmujące wykorzystanie rozsiewaczy rzutowych oraz zestawu do uprawy pasowej i siewu bezpośredniego z nawożeniem wgłębnym oraz technologiami standardowymi stosowanymi w uprawie jęczmienia ozimego w Boleszkowicach.

Przedstawione tabele (Tabela 37, Tabela 38, Tabela 39, Tabela 40, Tabela 41, Tabela 42) prezentują wyniki uzyskane w wykonanych doświadczeniach porównujących technologie precyzyjnego nawożenia fosforem, obejmujące wykorzystanie rozsiewaczy rzutowych, oraz zestawu do uprawy pasowej i siewu bezpośredniego z nawożeniem wgłębnym oraz technologiami standardowymi stosowanymi w Myślicach oraz Boleszkowicach.

Tabela 37. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii aplikacji nawozu fosforowego (46% P_2O_5) w pszenicy ozimej na doświadczeniu w Boleszkowicach.

	Strategia	Dawka P_2O_5 (kg/ha)	Plon 14% wilg (t/ha)	LAI ($m^2 \cdot m^{-2}$) 13.04.2024	LAI ($m^2 \cdot m^{-2}$) 25.05.2024	NDVI 27.04.2024	NDVI 01.06.2024
Boleszkowice	Zmienna wgłębnie	53,58	8,73	3,13	4,45	0,85	0,86
	Zmienna rozsiewacz	55,19	8,76	3,15	4,69	0,86	0,87
	Stała	64,40	8,85	3,19	4,73	0,85	0,87



Tabela 38. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii aplikacji nawozu fosforowego (46% P₂O₅) w pszenicy ozimej na doświadczeniu w Myślicach.

Strategia	Dawka P ₂ O ₅ (kg/ha)	Plon 14% wilg (t/ha)	LAI (m ² ·m ⁻²) 09.04.2024	LAI (m ² ·m ⁻²) 08.05.2024	LAI (m ² ·m ⁻²) 10.06.2024	NDVI 27.03.2024	NDVI 09.05.2024	NDVI 05.06.2024
Zmienna względnie	32,77	10,00	1,94	3,81	4,77	0,68	0,92	0,86
Zmienna rozsiewacz	39,07	9,94	1,96	4,15	5,62	0,70	0,92	0,86
Stała	29,9	9,86	1,73	3,71	4,41	0,65	0,91	0,84

Tabela 39. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii aplikacji nawozu fosforowego (46% P₂O₅) w rzepaku ozimym na doświadczeniu w Boleszkowicach.

Strategia	Dawka P ₂ O ₅ (kg/ha)	Plon 9% wilg (t/ha)	LAI (m ² ·m ⁻²) 01.04.2024	LAI (m ² ·m ⁻²) 15.04.2024	NDVI 27.03.2024	NDVI 20.04.2024
Zmienna względnie	64,12	5,17	3,72	5,18	0,82	0,72
Zmienna roz- siewacz	67,50	5,22	3,80	5,36	0,83	0,72
Stała	67,53	5,13	3,84	5,24	0,82	0,72

Tabela 40. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii aplikacji nawozu fosforowego (46% P₂O₅) w rzepaku ozimym na doświadczeniu w Myślicach.

Strategia						
-----------	--	--	--	--	--	--



	Dawka P ₂ O ₅ (kg/ha)	Plon 9% wilg (t/ha)	LAI (m ² ·m ⁻²) 09.04.2024	LAI (m ² ·m ⁻²) 08.05.2024	NDVI 27.03.2024	NDVI 09.05.2024
Zmienna wglębnie	37,77	4,21	2,99	7,31	0,74	0,69
Zmienna roz- siewacz	37,04	4,43	2,69	6,69	0,73	0,69
Stała	46	4,21	3,07	7,30	0,73	0,69

Tabela 41. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii aplikacji nawozu fosforowego (46% P₂O₅) w jęczmieniu ozimym na doświadczeniu w Boleszkowicach.

Strategia	Dawka P ₂ O ₅ (kg/ha)	Plon 14% wilg (t/ha)	NDVI 21.04.2023	NDVI 02.06.2023
Zmienna wglębnie	78,27	10,16	0,93	0,93
Zmienna rozsiewacz	81,52	10,12	0,93	0,93
Stała	89,70	10,27	0,93	0,93

Tabela 42. Porównanie średnich wartości plonu oraz parametrów biofizycznych w zależności od zastosowanej strategii aplikacji nawozu fosforowego (46% P₂O₅) w pszenicy ozimym na doświadczeniu w Boleszkowicach.

Strategia	Dawka P ₂ O ₅ (kg/ha)	Plon 14% wilg (t/ha)	NDVI 20.04.2024	NDVI 15.05.2024
Zmienna wglębnie	13,44	7,97	0,84	0,89
Zmienna rozsiewacz	12,70	8,21	0,84	0,92
Stała	36,80	7,98	0,83	0,90



Wyniki przeprowadzonych badań terenowych potwierdziły skuteczność zastosowania strategii precyzyjnego nawożenia fosforem oraz zmiennego wysiewu nasion w kontekście optymalizacji zużycia zasobów przy jednoczesnym utrzymaniu lub zwiększeniu poziomu plonowania.

Analiza wyników dla pszenicy ozimej wykazała, że strategia zmiennego nawożenia wglębnego umożliwiła redukcję dawki nawozu fosforowego o 16,8% przy utrzymaniu plonu na poziomie porównywalnym do strategii stałej w Boleszkowicach. W Myślicach najwyższy plon (10,00 t/ha) uzyskano w wariancie zmiennego nawożenia wglębnego przy dawce 32,77 kg P_2O_5 /ha, co przewyższało plonowanie w strategii nawożenia stałego (9,86 t/ha) oraz zmiennego nawożenia przy pomocy rozsiewacza (9,94 t/ha). Podobne tendencje zaobserwowano w przypadku rzepaku ozimego, gdzie aplikacja wglębna nawozu fosforowego pozwoliła na redukcję dawki od 5 do 18% przy zachowaniu podobnego poziomu plonowania.

Dalsze analizy dotyczące jęczmienia ozimego wykazały, że strategia zmiennego nawożenia wglębnego pozwoliła na zmniejszenie dawki nawozu fosforowego o 12,74%, przy utrzymaniu plonowania na poziomie porównywalnym do wariantu standardowego. W przypadku pszenżyta ozimego najlepsze rezultaty uzyskano w strategii zmiennego wysiewu nawozów przy pomocy rozsiewacza, gdzie plon wyniósł 8,21 t/ha, co oznaczało wzrost o 3% względem wariantu nawożenia stałego.

Otrzymane wyniki potwierdzają, że zastosowanie strategii precyzyjnego nawożenia fosforem pozwala na optymalizację gospodarki nawozowej poprzez ograniczenie zużycia nawozów bez negatywnego wpływu na plonowanie. Wykazano, że wglębna aplikacja nawozów o zmiennej dawce umożliwia osiągnięcie istotnych korzyści zarówno pod względem efektywności ekonomicznej, jak i ochrony środowiska. Wnioski z badań wskazują na wysoki potencjał wdrożeniowy opracowanych technologii w praktyce rolniczej, szczególnie w warunkach zmiennej zasobności gleb i zróżnicowanych warunków agrotechnicznych.

6. Prace koncepcyjne i informatyczne

Do realizacji celów projektu konieczne było przygotowanie odpowiedniego oprogramowania, które umożliwiło następnie zbieranie i przetwarzanie danych satelitarnych, pogodowych i agronomicznych, a także automatyzację obliczeń wraz z możliwością zmiany parametrów oraz ingerencji w algorytmy. Prace informatyczne prowadzone były przy wykorzystaniu serwerów wirtualnych na platformie chmurowej dysponującej bezpośrednim dostępem do danych satelitarnych (archiwalnych i aktualnych). Prototypowe rozwiązanie wdrożono na platformie satelitarno-internetowej Fertsat.com, gdzie wykonano elementy frontendu i implementowano interfejs agrirouter w celu przeprowadzenia testów z mapami aplikacyjnymi. Wypracowane, wdrożone i przetestowane funkcjonalności stanowią obecnie integralną część serwisu Fertisat i są włączone do komercyjnej oferty Wasat Sp. z o.o.

7.1 Określenie wymagań

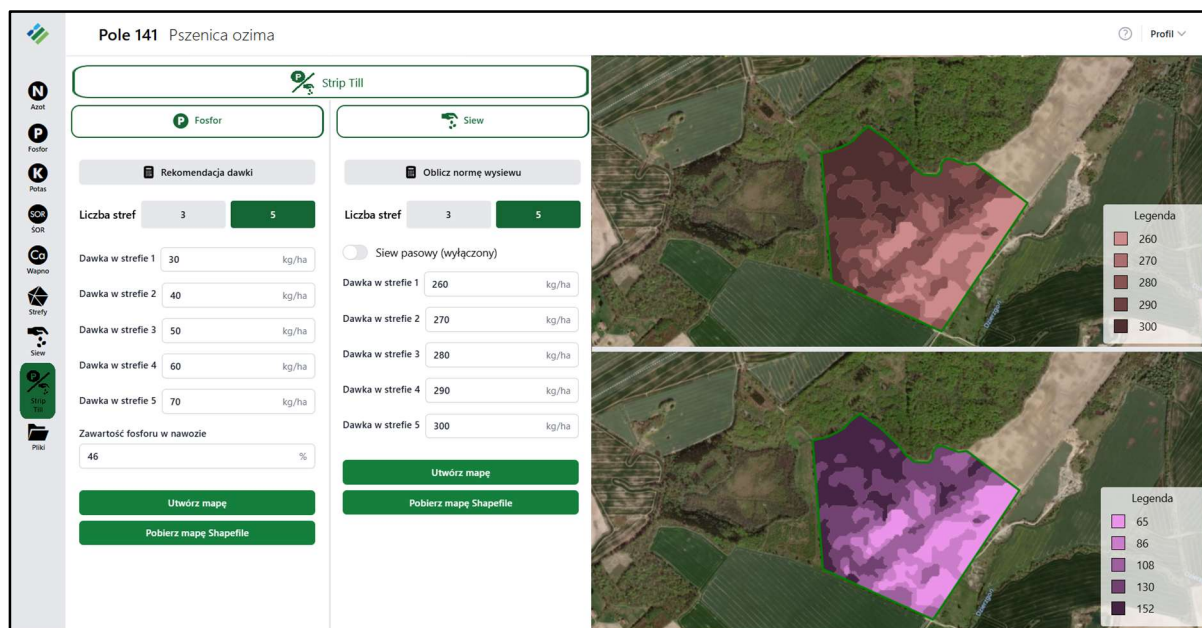
W ramach realizacji zadań przygotowania serwisu internetowego, który umożliwiłby spełnienie wszystkich wymagań projektowych oraz był użyteczny dla użytkownika prace rozpoczęto od określenia wymagań funkcjonalnych, technicznych oraz biznesowych, biorąc pod uwagę ok. 7-letnie doświadczenia firmy Wasat w rolnictwie precyzyjnym. Następnie przystąpiono do iteracyjnych rozmów z partnerami - właścicielami gospodarstw (Rysunek 40). Odpowiedzi uzyskane w czasie tych rozmów pozwoliły na przyjęcie roboczych założeń oraz określiły szereg wymagań użyteczności docelowego roz-

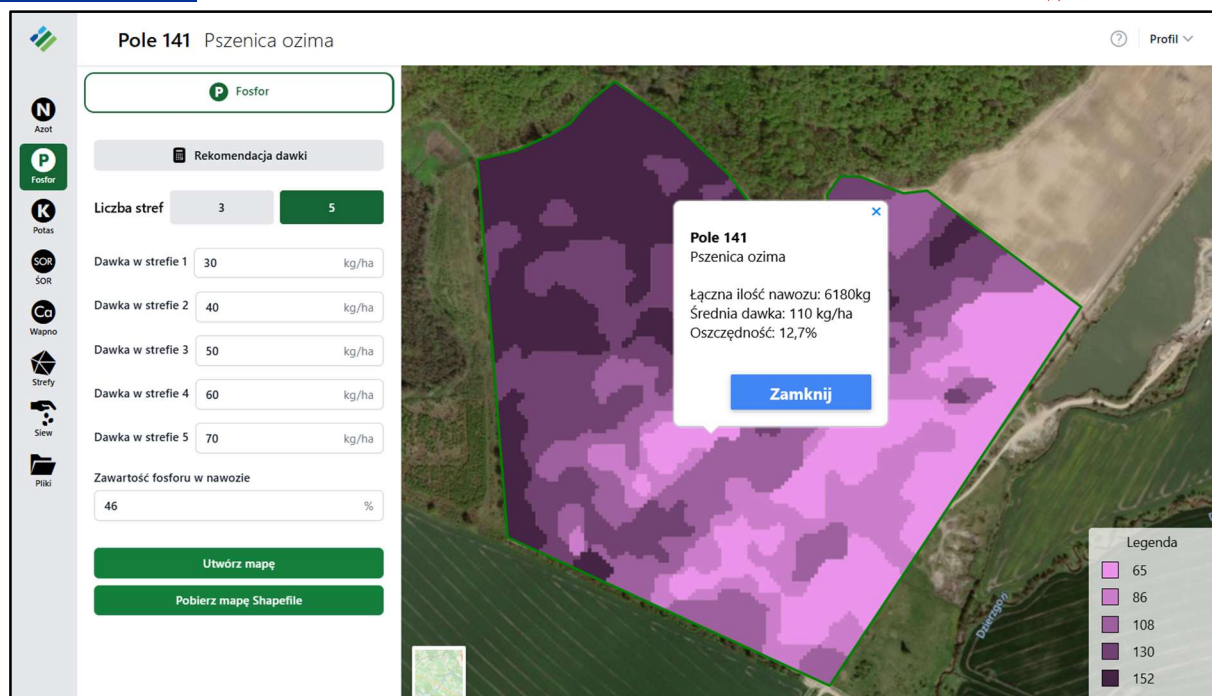


wiązania. W kolejnych etapach prac, a w szczególności przed i po kampaniach testów polowych, odbywały się kolejne rozmowy, a także przeprowadzane były ankiety w celu bardziej systematycznego doprecyzowania potrzeb rolników.

Podjęto działania mające na celu stworzenie narzędzi informatycznych wspierających odczyt i analizę danych oraz ich efektywne przetwarzanie. Proces ten rozpoczęto od zastosowania podejścia prototypowego, które pozwoliło na szybkie opracowanie i przetestowanie kluczowych koncepcji oraz algorytmów bez przygotowywania pełnej specyfikacji i bez tworzenia pełnego produktu. Dzięki temu możliwe było zweryfikowanie założeń projektowych, zidentyfikowanie potencjalnych problemów oraz dostosowanie funkcjonalności do realnych potrzeb użytkowników końcowych. Taki styl pracy dotyczył zarówno strony algorytmicznej jak i interfejsu użytkownika.

Prototypowanie umożliwiło przeprowadzenie licznych iteracji, które stanowiły podstawę do podejmowania decyzji projektowych. W wyniku tego etapu opracowano wersję demonstracyjną kodu, która posłużyła do testów funkcjonalnych i wydajnościowych. Na tej podstawie zebrano istotne doświadczenia i uwagi, które zostały uwzględnione przy projektowaniu końcowej wersji rozwiązania.





Rysunek 40. Propozycje widoków serwisu konsultowane z rolnikami w ramach grup fokusowych.

7.2 Implementacja algorytmów wypracowanych w części badawczej jako autonomicznego serwisu

Głównym językiem programowania, zarówno na etapie prac badawczych (prototypowania) jak i w czasie implementacji, był Python w wersji 3.9 z głównymi pakietami wymaganymi m.in. obsługi zapytań sieciowych (request), obliczeń macierzowych (numpy, pandas, scipy) oraz do obliczeń związanych z danymi geograficznymi i zdjęciami satelitarnymi (gdal, osr, ogr, geopandas, rasterio, pyproj, fiona), a także do uczenia maszynowego (sklearn). Całość była uruchamiana i testowana w sprawdzonym i stabilnym systemie Linux Ubuntu 18.04.4.

Stworzony w efekcie prac zoptymalizowany kod spełniał wewnętrzne wymagania zarówno pod względem wydajności, jak i skalowalności. Został on zaimplementowany w postaci interfejsu REST API, co pozwala na jego bezproblemową integrację z serwisami internetowymi.

REST API (ang. Representational State Transfer Application Programming Interface) to standard projektowania interfejsów komunikacyjnych, który opiera się na protokole HTTP. Dzięki wykorzystaniu tego podejścia, aplikacje mogą wymieniać dane w sposób prosty i zrozumiały, najczęściej za pomocą formatów takich jak JSON lub XML. REST API umożliwia obsługę różnorodnych informatycznych żądań, takich jak pobieranie, wysyłanie, aktualizowanie czy usuwanie danych, co czyni je uniwersalnym narzędziem integracji systemów.

Dzięki takiemu podejściu, rozwiązanie może być wykorzystywane jako niezależny moduł, który dostarcza funkcjonalności w ramach architektury mikroserwisów. REST API zapewnia elastyczność w komunikacji między komponentami systemu, umożliwiając jednocześnie łatwe rozszerzanie i adaptację rozwiązania do zmieniających się wymagań projektowych.



Ostateczne rozwiązanie zostało zoptymalizowane pod kątem:

- minimalizacji zużycia zasobów serwera,
- maksymalizacji wydajności przetwarzania dużej liczby zdjęć satelitarnych,
- skalowalności umożliwiającej obsługę rosnącej liczby użytkowników,
- łatwości integracji z zewnętrznymi serwisami,
- możliwości bezproblemowego korzystania z platformy chmurowej dysponującej bezpośrednim dostępem do danych satelitarnych.

7.3 Szczegóły interfejsu

Jak wspomniano wyżej, komunikacja z wytworzonym serwisem odbywa się przez API (Application Programming Interface), a dokładniej przez REST API. Poniżej przedstawiono funkcje udostępnione za pomocą tego interfejsu wraz z opisami.

Dodawanie wyników badań gleby

Endpoint: Add Soil Analysis Data

URL:

/api/soil-analysis

Method: POST

Opis:

Dodaje dane z analizy gleby do kalkulatora nawożenia.

Parametry wejściowe:

Nazwa	Typ	Wymagane	Opis
field_id	String	Tak	Identyfikator pola (WKT, MD5, nazwa, ścieżka do pliku wektorowego lub identyfikator pola w zintegrowanym serwisie).
file_path	String	Tak	Ścieżka do pliku w systemie plików z danymi analizy gleby (wcześniej inną metodą trzeba dodać plik).
ingestion_date	String	Nie	Data dodania danych w formacie YYYYMMDD.



Przykład żądania (JSON):

```
{  
  "field_id": "123",  
  "file_path": "path/to/soil/analysis/123_phosphorus.shp",  
  "ingestion_date": "20250122"  
}
```

Aby użyć wyniki badań gleby do przygotowania mapy zmiennego nawożenia, należy przesłać do serwisu pliki zawierające strefy lub punkty poboru próbek. Badania gleby muszą być w formacie Shapefile, spakowane do jednego pliku ZIP (bez hasła). Przesłany Shapefile musi posiadać georeferencje (współrzędne obiektów oraz informacje o układzie współrzędnych), a tabela atrybutów musi zawierać kolumny z odpowiednimi nazwami (dla fosforu dopuszczalne nazwy to: "p", "P2O5"). Przyjmuje się, że jednostki miary składników odżywczych zapisanych w tabeli to kg/ha. W przypadku braku podania parametru daty poboru prób glebowych, automatycznie wpisywana jest data dnia bieżącego. Taki schemat przygotowania danych został uzgodniony w pracach projektowych i był z powodzeniem stosowany na etapie badań gleby oraz doświadczeń polowych. Oprogramowanie nie jest jednak ograniczone do takiego sposobu postępowania. Gdyby zaistniała potrzeba korzystania z innego formatu danych, możliwa jest łatwa podmiana algorytmu wczytywania danych.

7.4 Generowanie mapy nawożenia

Endpoint: Calculate Fertilizer Amount for All Options

URL: `/api/calc_fert_amount_all_options`
Method: POST

Opis:

Oblicza ilość nawozu do zastosowania dla wszystkich możliwych opcji, generując mapę wynikową.



Parametry wejściowe:

Nazwa	Typ	Wymagane	Opis
field_id_or_name	String	Tak	Identyfikator pola: WKT (WGS84), MD5, nazwa lub ścieżka do pliku wektorowego.
nutrient	String	Tak	Rodzaj składnika odżywczego: 'Phosphorus'
nutrient_in_soil_kg_per_ha	String	Tak	Zawartość składnika odżywczego w glebie (kg/ha).
main_crop	String	Tak	Główna uprawa.
main_crop_yield	String	Tak	Oczekiwany plon głównej uprawy (tony/hektar).
zones	String	Nie	Strefy na polu (np. klasy gleby, klasy pól).
agronomic_soil_category	String	Nie	Kategoria agronomiczna gleby.
agronomic_suitability_complex	String	Nie	Kompleks przydatności rolniczej gleby.
pre_crop	String	Nie	Uprawa przedplonowa.
pre_crop_yield	String	Nie	Plon uprawy przedplonowej (tony/hektar).
organic_fertilizer_pre_crop	String	Nie	Rodzaj nawozu organicznego zastosowanego przy przedplonie.
organic_fertilize_dose_pre_crop	String	Nie	Dawka nawozu organicznego zastosowanego przy przedplonie.
organic_fertilizer_main_crop	String	Nie	Rodzaj nawozu organicznego dla głównej uprawy.



organic_fertilizer_dose_main_crop	String	Nie	Dawka nawozu organicznego dla głównej uprawy.
-----------------------------------	--------	-----	---

Przykład żądania (JSON):

```
{
  "field_id_or_name": "123",
  "nutrient": "Phosphorus",
  "nutrient_in_soil_kg_per_ha": "path/to/soil/analysis/123_phosphorus.shp",
  "main_crop": "Wheat",
  "main_crop_yield": "8",
  "zones": "path/to/generated/zones/123_zones.shp",
  "agronomic_soil_category": "4",
  "agronomic_suitability_complex": "4",
  "pre_crop": "Barley",
  "pre_crop_yield": "3.5"
}
```

W przypadku gdy nieobowiązkowe parametry nie zostaną określone, następuje wczytanie parametrów domyślnych. Przykładowo, domyślnie brak parametru nawozu naturalnego (organic_fertilizer_main_crop) oznacza, że nawóz nie był stosowany.

Generowanie mapy nawożenia - wersja uproszczona

Endpoint: Calculate Fertilizer Amount

URL:

/api/fertilizer-amount

Method: POST



Opis:

Specjalna funkcja będąca przykładem dostosowania możliwości API do większego serwisu, w którym jest uruchamiana. Funkcja ta faktycznie realizuje te same zadania co wyżej opisana `/api/calc_fert_amount_all_options`, jednak parametry są automatycznie pobierane z serwisu, w którym jest implementowana. Do działania rzeczywiście potrzebuje jedynie identyfikatora pola, a takie informacje jak rodzaj uprawy, obrys pola czy rodzaj gleby, pobierane są automatycznie za pomocą funkcji wewnętrznych.

Parametry wejściowe:

Nazwa	Typ	Wymagane	Opis
field_id	String	Tak	Identyfikator pola: WKT (WGS84), MD5, nazwa lub ścieżka do pliku wektorowego.
nutrient	String	Tak	Rodzaj składnika odżywczego: 'Phosphorus'

Przykład żądania (JSON):

```
{
  "field_id": "123",
  "nutrient": "Phosphorus"
}
```

Generowanie mapy zmiennego wysiewu

Endpoint: Calculate Field Management Zones

URL:

`/zones/management-zones`

Method: POST

**Opis:**

Oblicza strefy zarządzania polem na podstawie długoterminowych serii danych. Wynik jest zapisywany jako plik i dedykowany do optymalizacji procesu siewu.

Parametry wejściowe:

Nazwa	Typ	Wymagane	Domyślna wartość	Opis
wkt_or_md5_or_name	String	Tak	Brak	Identyfikator pola: WKT (WGS84), MD5, nazwa lub ścieżka do pliku wektorowego.
number_of_zones	Integer	Nie	3	Liczba stref: 3 lub 5. Domyślnie 3.
zones_type	String	Nie	"SEED"	Typ stref: "SEED".

Przykład żądania (JSON):

```
{  
  "wkt_or_md5_or_name": "123",  
  "number_of_zones": 3,  
}
```




```
"zones_type": "SEED"
```

```
}
```

Odpowiedzi interfejsu

Wszystkie zapytania REST API, oprócz wywołania określonych obliczeń na serwerze, zwracają odpowiedź zależną od powodzenia danej operacji. W przypadku REST API stosuje się kody statusu (wyrażane numerami) oraz odpowiedzi w dowolny ustalonym formacie. Możliwe generowane odpowiedzi pokazuje tabela:

Kod statusu	Znaczenie	Przykład Odpowiedzi (JSON)
200 OK	Mapa została pomyślnie wygenerowana.	{ wewnetrzna_sieczka_do_pliku_wynikowego.geojson }
400 Bad Request	Nieprawidłowe dane wejściowe.	{ "status": "error", "message": "Invalid input data." }
500 Internal Server Error	Wystąpił błąd serwera.	{ "status": "error", "message": "Internal server error." }

7.5 Wdrożenie i integracja z graficznym interfejsem użytkownika

Wdrożone REST API jest obecnie operacyjnie wykorzystywane w ramach serwisu satelitarno-internetowego Fertisat, który stanowi część komercyjnej oferty Wasat Sp. z o.o..

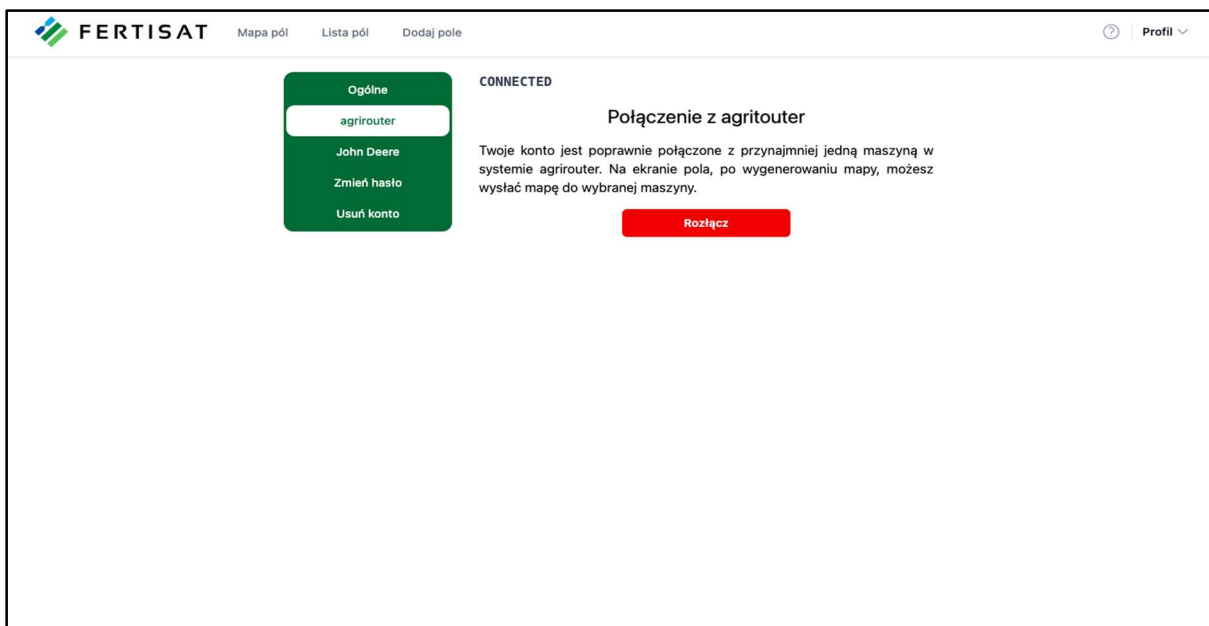
Fertisat.com to internetowy serwis rolniczy, który wykorzystuje dane satelitarne do wspierania precyzyjnego rolnictwa, umożliwiając optymalizację wykorzystania nawozów, nasion oraz środków ochrony roślin. Narzędzie to pozwala na tworzenie map zmiennego dawkowania, które precyzyjnie odwzorowują zróżnicowanie potrzeb upraw na polu. Dzięki analizie aktualnych danych, rolnicy mogą podejmować decyzje oparte na rzeczywistym stanie roślinności, co prowadzi do efektywniejszego wykorzystania zasobów i zmniejszenia kosztów produkcji.

Serwis jest w pełni zintegrowany z zaawansowanymi technologiami satelitarnymi, co pozwala na regularne aktualizowanie informacji o stanie upraw. Fertisat.com obsługuje różne formaty danych, umożliwiając dwukierunkową wymianę danych pomiędzy serwerem a kontrolerami maszyn rolniczych, co ułatwia automatyczne wdrażanie zaleceń na polu. W ramach projektu rozszerzono platformy o obsługę interfejsu agrirouter, co pozwoliło na implementację i wyświetlanie map aplikacyjnych bezpośrednio w terminalach maszyn rolniczych. Platforma Fertisat została dostosowana do formatu shpFile/GeoJSON, który pozwala na reprezentowanie obiektów przestrzennych, tj. w tym przypadku pól uprawnych, na których wykorzystuje się mapy aplikacyjne



Po wdrożeniu opisywanych wyżej rozwiązań serwis Fertisat oferuje przyjazny interfejs użytkownika, umożliwiający intuicyjną obsługę dla osób, które nie posiadają zaawansowanej wiedzy technicznej. Regularne aktualizacje i wsparcie techniczne zapewniają, że Fertisat.com spełnia wymagania użytkowników, odpowiadając na wyzwania związane z efektywnością oraz zrównoważonym rozwojem rolnictwa.

Dzięki swojej elastyczności i niezawodności serwis Fertisat.com zdobywa coraz większe uznanie wśród rolników w Polsce, przyczyniając się do wzrostu rentowności gospodarstw przy jednoczesnym ograniczaniu negatywnego wpływu zabiegów agrotechnicznych na środowisko naturalne.

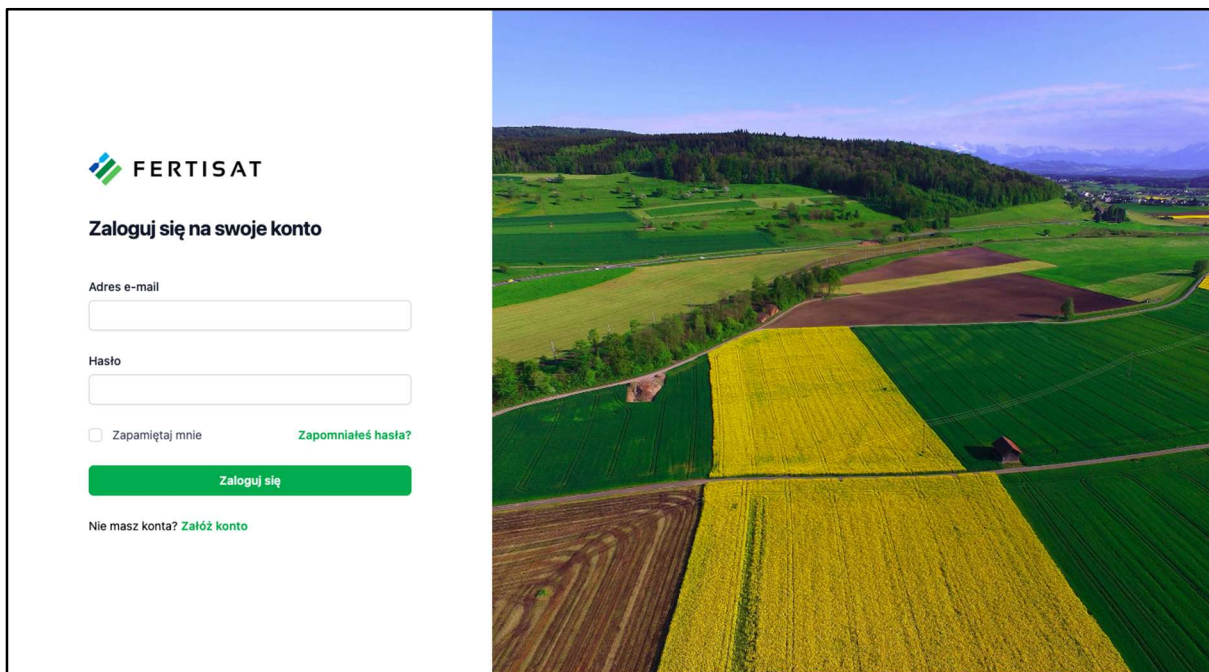


Rysunek 41. Widok panelu zarządzającego łącznością z platformą agrirouter.

7.6 Wyniki



W wyniku przeprowadzonych badań oraz prac programistycznych nad serwisem internetowym wspierającym zabiegi Rolnictwa 4.0 powstały nowe komponenty back-endowe, opisane wcześniej, oraz elementy front-endu – interfejsu użytkownika. Umożliwiają one korzystanie z nowych funkcji związanych z głębokim nawożeniem fosforem oraz zmiennym wysiewem materiału siewnego.

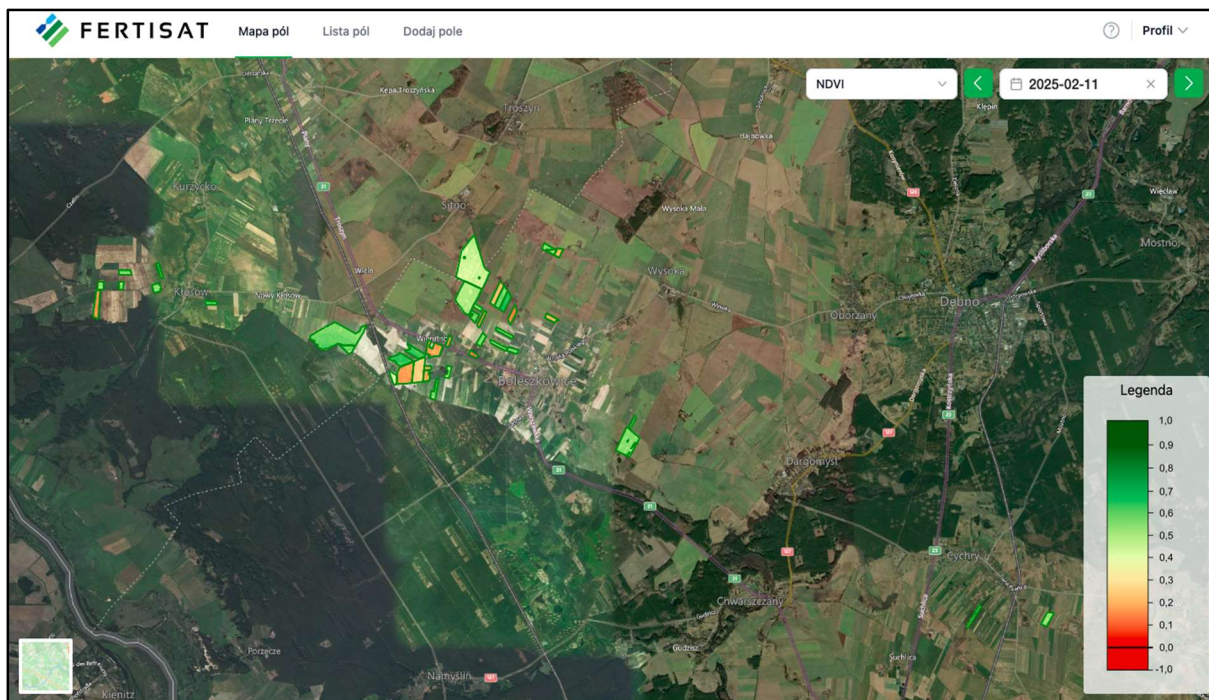


Rysunek 42. Panel logowania w serwisie Fertisat.

7.6.1 Moduł do planowania i podsumowania zabiegu nawożenia głębokiego fosforem - ulepszona innowacja technologiczna

Po przeprowadzonych badaniach polowych oraz konsultacjach z rolnikami opracowano moduł umożliwiający skuteczne planowanie i podsumowywanie zabiegu głębokiego nawożenia fosforem z wykorzystaniem map aplikacyjnych. Stworzone mapy stanowią innowacyjne rozwiązanie, obecnie niedostępne na rynku. System analizuje szeroki zakres parametrów, takich jak zasobność gleby w przyswajalne formy fosforu, odczyn gleby (pH), zawartość materii organicznej, przewodność elektryczna gleby (EC), ukształtowanie terenu, strefy potencjału plonowania określone na podstawie zdjęć satelitarnych, mapy plonowania z wcześniejszych zbiorów, system uprawy, przedplon oraz historię nawożenia.

Moduł, dostępny przez przeglądarkę internetową, umożliwia eksportowanie map do formatów kompatybilnych z cyfrowymi terminalami najpopularniejszych ciągników i maszyn rolniczych w Polsce. Dodatkowo rolnicy mogą przysyłać mapy zgodnie z wymogami Rolnictwa 4.0 wykorzystując dwukierunkową wymianę danych w ramach technologii agrirouter. Jak przedstawiają poniższe rysunki, moduł umożliwia optymalizację głębokiego nawożenia fosforem poprzez automatyczną analizę szeregu kluczowych danych. Dzięki temu możliwe jest precyzyjne obliczenie odpowiedniej dawki nawozu fosforowego oraz jego optymalne rozmieszczenie przestrzenne.



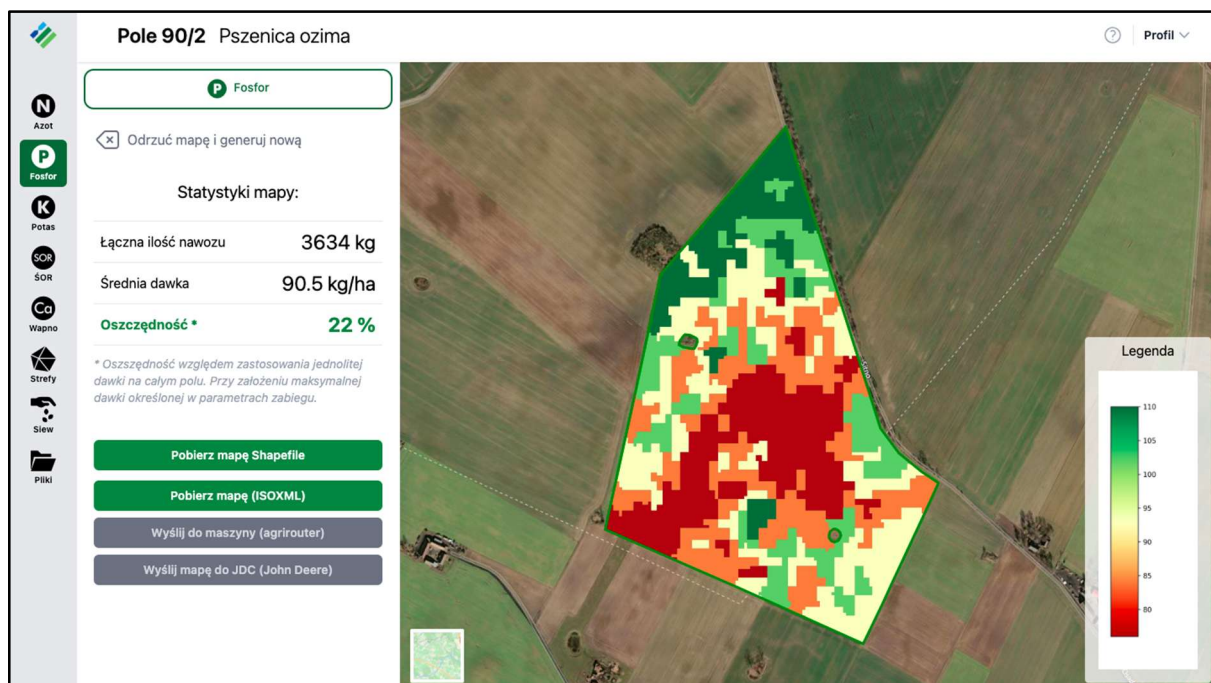
Rysunek 43. Widok mapy pól umożliwiający wybór działki do precyzyjnego wglębnego nawożenia fosforem.

Rysunek 44. Widok modułu do planowania i podsumowania zabiegu nawożenia fosforem.



Rysunek 45. Widok kalkulatora do obliczania dawki nawozu fosforowego.

Rysunek 46. Widok modułu do planowania i podsumowania zabiegu nawożenia wglębnego fosforem uwzględniającego dane posiadane przez gospodarstwo.



Rysunek 47. Widok podsumowania zabiegu nawożenia wglębnego fosforem.

Dzięki opracowanemu narzędziu przeprowadzono zaawansowane testy map aplikacyjnych na polach uczestniczących w operacji. Jesienią 2023 i 2024 testowano mapy aplikacyjne zmiennego, wglębnego nawożenia również poza polami, na których prowadzono doświadczenia weryfikujące opracowywaną technologię. Testy polowe pełniły rolę poligonu doświadczalnego – oprócz samego odczytywania map i dawek nawozów sprawdzano ich dopasowanie do pól o różnej powierzchni i kształcie. Dodatkowo, jesienią 2024 roku testowano jednocześnie podawanie dwóch nawozów – fosforowych i potasowych. Technologia pomyślnie przeszła wszystkie zaplanowane testy i jest przygotowana do optymalizacji zasobów, jakimi dysponują polskie gospodarstwa.

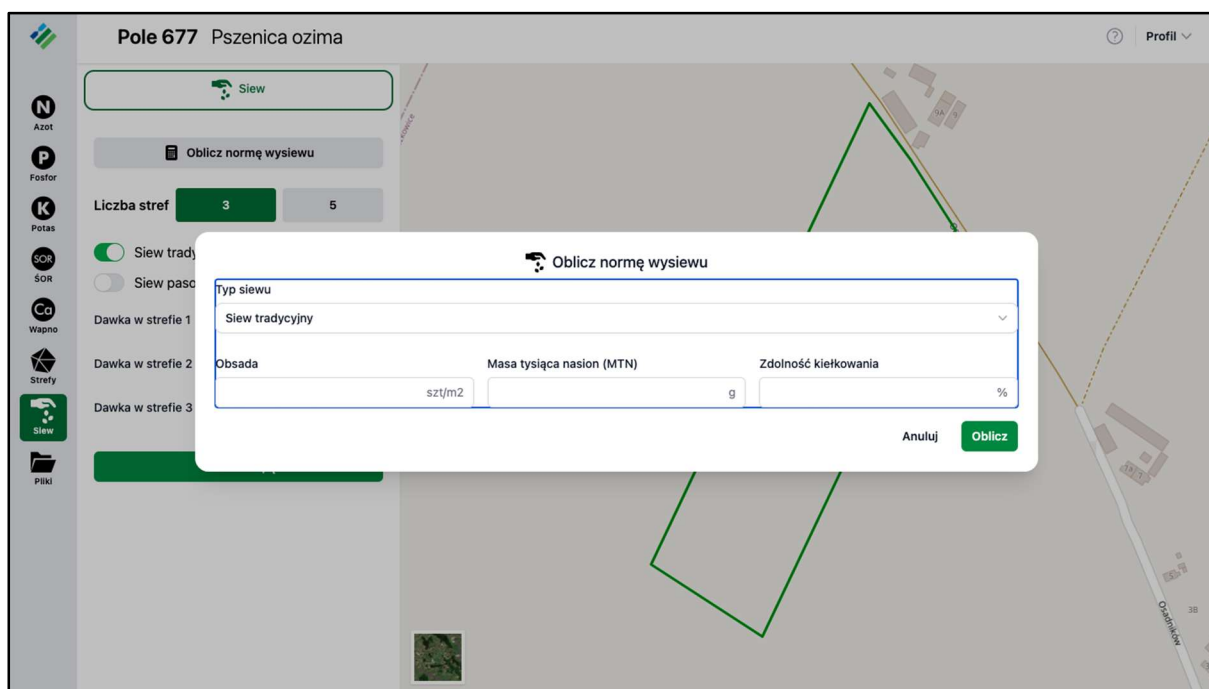
W ramach projektu opracowano i wdrożono moduł do planowania i podsumowania zabiegu wglębnego nawożenia fosforem, który w pełni realizuje założenia innowacji technologicznej określone w dokumentacji projektu. System ten integruje zaawansowaną analizę danych glebowych, satelitarnych i agronomicznych, umożliwiając rolnikom precyzyjne określenie optymalnych dawek nawozów fosforowych oraz ich rozmieszczenia przestrzennego. Opracowana technologia uwzględnia szereg kluczowych parametrów, takich jak zawartość przyswajalnych form fosforu w glebie, pH, przewodność elektryczna (EC), materia organiczna, ukształtowanie terenu, dane teledetekcyjne określające potencjał plonotwórczy, a także historyczne dane dotyczące plonowania i wcześniejszych zabiegów nawożenia. Moduł, dostępny poprzez przeglądarkę internetową, pozwala na generowanie map aplikacyjnych, które mogą być eksportowane w formatach zgodnych z cyfrowymi terminalami stosowanymi w ciągnikach i maszynach rolniczych, a także przesyłane w ramach dwukierunkowej wymiany danych w technologii agrirouter. Jesienią 2023 i 2024 przeprowadzono szereg testów terenowych, które potwierdziły skuteczność opracowanego systemu – zarówno w ramach doświadczeń weryfikujących, jak i w rzeczy-



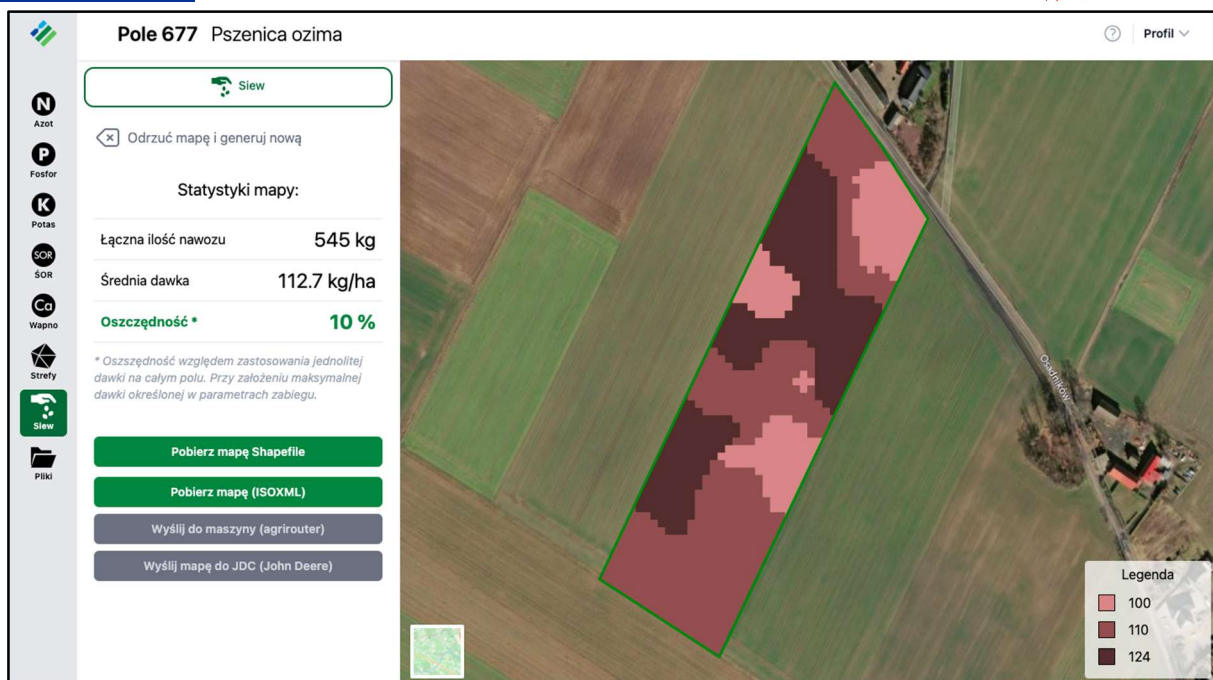
wistych warunkach gospodarstw produkcyjnych. Testowano dopasowanie map do pól o różnych powierzchniach i kształtach, sprawdzano dokładność aplikacji nawozów oraz weryfikowano funkcjonalność automatycznego kalkulatora dawek nawozowych. W 2024 roku dodatkowo testowano możliwość jednoczesnego podawania dwóch nawozów – fosforowych i potasowych, co poszerza zakres praktycznego zastosowania modułu w gospodarstwach. Opracowana technologia pomyślnie przeszła wszystkie testy, potwierdzając swoją skuteczność w optymalizacji gospodarowania nawozami oraz precyzyjnym planowaniu zabiegów. System ten nie tylko redukuje nadmierne zużycie fosforu, ale także pozwala na lepsze wykorzystanie potencjału glebowego w zależności od jego zmienności przestrzennej, spełniając wymogi nowoczesnego Rolnictwa 4.0. Innowacja ta stanowi istotny krok w kierunku cyfryzacji zarządzania nawożeniem, zapewniając rolnikom intuicyjne narzędzie do planowania, analizy oraz archiwizacji przeprowadzonych zabiegów, co znacząco zwiększa efektywność i opłacalność produkcji rolniczej.

7.6.2 Moduł do tworzenia map zmiennego wysiewu materiału siewnego - ulepszona innowacja technologiczna

Kolejnym opracowanym rozwiązaniem jest moduł do tworzenia map zmiennego wysiewu materiału siewnego. Ta udoskonalona innowacja oparta jest na integracji danych glebowych oraz satelitarnych (teledetekcyjnych). Zastosowanie technologii zmiennej ilości wysiewu pozwala na redukcję strat na obszarach o niskiej produktywności oraz maksymalizację plonów na terenach o wysokim potencjale plonowania. W zależności od odmiany, wymagań świetlnych oraz zdolności krzewienia, optymalna gęstość wysiewu może się różnić, co czyni moduł użytecznym narzędziem przy wykonywaniu siewu.



Rysunek 48. Widok modułu do obliczania i tworzenia map zmiennego wysiewu.



Rysunek 49. Gotowa wizualizacja rozmieszczenia zróżnicowanych dawek materiału siewnego pszenicy ozimej.

Podobnie jak w przypadku modułu fosforowego, mapy aplikacyjne zmiennego wysiewu materiału siewnego są przygotowane do eksportu w formatach kompatybilnych z cyfrowymi terminalami najpopularniejszych ciągników i maszyn rolniczych w Polsce. Dodatkowo rolnicy mogą przysyłać mapy zgodnie z wymogami Rolnictwa 4.0, wykorzystując dwukierunkową wymianę danych w ramach technologii agrirouter. Jesienią 2023 i 2024 roku, oprócz doświadczeń weryfikacyjnych, przeprowadzono testy map aplikacyjnych na polach produkcyjnych w celu sprawdzenia formatu zapisu danych o dawkach oraz ich dopasowania do pól o różnych kształtach i wielkościach. Opracowana technologia spełnia wymagania stawiane rozwiązaniom gotowym na erę Rolnictwa 4.0.



Rysunek 50. Stan plantacji rzepaku ozimego (06.09.2024 r.) i jęczmienia ozimego (15.10.2024 r.) wysianych na podstawie map aplikacyjnych jesienią 2024 w technologii opracowanej w ramach operacji.



Wdrożenie modułu do tworzenia map zmiennego wysiewu materiału siewnego stanowi jedno z kluczowych osiągnięć projektu, w pełni realizując założenia innowacyjne określone w opisie zadań i opinii o innowacyjności. Opracowane rozwiązanie integruje dane glebowe oraz satelitarne (teledetekcyjne), co pozwala na dostosowanie ilości wysiewu do przestrzennej zmienności warunków glebowych i potencjału plonotwórczego danego obszaru. Dzięki temu możliwe jest zminimalizowanie strat materiału siewnego na terenach o niższej produktywności oraz maksymalizacja plonów w obszarach o wysokim potencjale, co bezpośrednio przekłada się na poprawę efektywności gospodarowania zasobami.

Moduł uwzględnia istotne czynniki agronomiczne, takie jak odmiana uprawianych roślin, wymagania świetlne czy zdolność krzewienia, co pozwala na indywidualne dopasowanie norm wysiewu. Automatyczna analiza zmienności przestrzennej pól sprawia, że rolnicy mogą dostosować gęstość wysiewu do rzeczywistych warunków glebowych, unikając zarówno zbyt rzadkiego, jak i zbyt gęstego rozmieszczenia roślin, co ma kluczowe znaczenie dla optymalizacji ich wzrostu i plonowania.

Jednym z najważniejszych aspektów innowacyjności tego rozwiązania jest jego pełna kompatybilność z cyfrowymi systemami maszyn rolniczych. Mapy aplikacyjne zmiennego wysiewu zostały zaprojektowane tak, aby były w pełni zgodne z najpopularniejszymi terminalami stosowanymi w ciągnikach i siewnikach na rynku polskim. Dodatkowo opracowana technologia wspiera dwukierunkową wymianę danych w ramach platformy agrirouter, umożliwiając rolnikom łatwe przesyłanie i synchronizację map aplikacyjnych z maszynami rolniczymi.

Jesienią 2023 i 2024 roku przeprowadzono testy terenowe w gospodarstwach produkcyjnych, które miały na celu zweryfikowanie poprawności zapisanych danych, dopasowanie map do pól o różnych kształtach i wielkościach oraz sprawdzenie skuteczności systemu w rzeczywistych warunkach polowych. Wyniki badań jednoznacznie potwierdziły, że opracowany system działa zgodnie z założeniami, poprawiając precyzję wysiewu i zwiększając efektywność wykorzystania materiału siewnego.

Opracowany moduł zmiennego wysiewu spełnia założenia innowacyjności poprzez integrację danych satelitarnych i glebowych, optymalizację norm wysiewu i pełną kompatybilność z systemami cyfrowymi Rolnictwa 4.0. Jego wdrożenie umożliwia zmniejszenie zużycia materiału siewnego, zwiększenie potencjału plonotwórczego i poprawę efektywności gospodarowania zasobami, przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu rolnictwa na środowisko naturalne.

7.6.3 System wyliczania oszczędności i planowania zabiegów nawożenia fosforem - innowacja organizacyjna

Możliwość planowania zabiegów to jedna z kluczowych funkcji sugerowanych przez rolników w ramach grup fokusowych. W opracowanej innowacji użytkownicy mogą w prosty sposób, opierając się na współczynniku korekcyjnym, uzyskać informacje o wymaganej ilości nawozu oraz średniej dawce fosforu do zastosowania. Przygotowaną mapę aplikacyjną można zapisać w sekcji „Pliki”, co umożliwia zarówno dostęp do archiwalnych zabiegów, jak i planowanie przyszłych działań agrotechnicznych. Dodatkowo, dzięki wykorzystaniu funkcji agrirouter, po zastosowaniu mapy do sekcji „Pliki” wraca informacja z dokładnym podsumowaniem przeprowadzonego zabiegu nawożenia na danym polu. Stworzona innowacja przyczynia się do efektywniejszego zarządzania zasobami fosforu na poziomie gospodarstwa, co przekłada się na znaczące oszczędności oraz lepszą organizację logistyczną podczas aplikacji nawozów fosforowych. Dane przechowywane w formie cyfrowej są dostępne z dowolnego miejsca oraz łatwe do odtworzenia i analizy. W ramach rozwiązania użytkownik może precyzyjnie obliczyć zapotrzebowanie na nawóz zarówno dla całego gospodarstwa, jak i dla poszczególnych pól, w znacznie



dokładniejszy sposób niż przy wykorzystaniu standardowych kalkulatorów nawozowych, które zakładają jednorodną dawkę nawozu na całym obszarze pola. Innowacja pozwala na optymalne zaplanowanie czasu pracy oraz dokładne określenie ilości nawozu do zakupu.

Opracowany system wyliczania oszczędności i planowania zabiegów nawożenia fosforem w pełni realizuje założenia innowacji organizacyjnej, integrując precyzyjne planowanie dawek nawozów fosforowych z funkcjonalnością cyfrowej archiwizacji i automatycznej analizy danych agronomicznych. Kluczowym elementem rozwiązania jest możliwość wyliczenia optymalnej ilości nawozu na podstawie współczynnika korekcyjnego, co pozwala użytkownikowi na dopasowanie dawek nawożenia do specyficznych warunków glebowych w obrębie gospodarstwa. Zastosowanie algorytmu uwzględniającego zmienność przestrzenną pola stanowi znaczącą przewagę nad tradycyjnymi kalkulatorami nawozowymi, które zakładają jednorodną dawkę na całym obszarze uprawnym. Dzięki temu rolnicy mogą nie tylko minimalizować straty fosforu wynikające z jego nadmiernej aplikacji na wybranych fragmentach pola, ale także maksymalizować efektywność wykorzystania nawozu tam, gdzie jest on najbardziej potrzebny. Funkcjonalność zapisu map aplikacyjnych w sekcji „Pliki” umożliwia użytkownikom łatwy dostęp do archiwalnych i planowanych zabiegów, co pozwala na długoterminową analizę efektywności stosowanych metod nawożenia. Cyfrowa baza danych gwarantuje pełną transparentność i łatwość odтворzenia wszystkich wykonanych zabiegów, co ma kluczowe znaczenie zarówno dla optymalizacji przyszłych decyzji, jak i prowadzenia dokumentacji zgodnej z wymogami zrównoważonej produkcji rolnej. Dwukierunkowa transmisja danych poprzez agrirouter dodatkowo zwiększa funkcjonalność systemu, umożliwiając automatyczne zapisywanie wykonanych zabiegów i generowanie podsumowań dotyczących ilości zastosowanego nawozu na poszczególnych polach. Wdrożone rozwiązanie pozwala na znaczące oszczędności ekonomiczne i lepsze zarządzanie zasobami, ponieważ rolnicy mogą w precyzyjny sposób planować zakup nawozów oraz optymalizować harmonogram ich aplikacji, co przekłada się na oszczędność czasu i redukcję kosztów logistycznych. Dodatkowo system stanowi istotny krok w kierunku pełnej cyfryzacji gospodarstw rolnych, zapewniając stały dostęp do danych z dowolnego miejsca i umożliwiając ich łatwą analizę oraz dalsze przetwarzanie. Dzięki przeprowadzonym testom terenowym w gospodarstwach uczestniczących w projekcie potwierdzono, że technologia ta pozwala na dokładniejsze gospodarowanie fosforem, poprawę bilansu składników odżywczych oraz zwiększenie efektywności nawożenia w skali całego gospodarstwa, co wpisuje się w priorytety Rolnictwa 4.0 oraz założenia związane z optymalizacją stosowania nawozów w nowoczesnym rolnictwie precyzyjnym.



7. Podsumowanie

Realizacja projektu potwierdziła kluczową rolę grup operacyjnych jako platformy współpracy pomiędzy rolnikami, jednostkami badawczymi i sektorem technologicznym. Model ten, oparty na podejściu „bottom-up”, pozwala na tworzenie innowacji dostosowanych do rzeczywistych potrzeb gospodarstw rolnych, zapewniając ścisłą interakcję między użytkownikami technologii a jej twórcami. Taka współpraca sprzyja nie tylko efektywnemu wdrażaniu innowacji, ale także ich stałemu doskonaleniu w oparciu o bieżące potrzeby rolników i zmieniające się warunki gospodarowania.

W ramach projektu skupiono się na opracowaniu i walidacji nowych metod precyzyjnego nawożenia fosforem oraz zmiennego wysiewu materiału siewnego, uwzględniając zróżnicowanie warunków glebowych oraz potencjału plonowania. Kluczową rolę odegrało tutaj wykorzystanie nowoczesnych technologii analizy i przetwarzania danych glebowych oraz satelitarnych, co pozwoliło na opracowanie dynamicznych map zmienności gleby oraz precyzyjnych rekomendacji dotyczących nawożenia i norm wysiewu. Zaangażowanie gospodarstw rolnych w proces badawczo-rozwojowy umożliwiło weryfikację założeń projektu w rzeczywistych warunkach produkcyjnych, co stanowiło istotny element optymalizacji algorytmów i dostosowania ich do praktycznych wymagań rolników.

W efekcie powstały narzędzia wspierające precyzyjne planowanie nawożenia i wysiewu, co znacząco poprawia efektywność produkcji oraz sprzyja zrównoważonemu gospodarowaniu zasobami. Opracowane rozwiązania obejmują zaawansowane modele analizy przestrzennej oraz integrację wyników badań glebowych z danymi teledetekcyjnymi, co umożliwia rolnikom podejmowanie decyzji opartych na rzetelnych i aktualnych informacjach o warunkach polowych. System został opracowany w taki sposób, aby mógł być łatwo zintegrowany z istniejącymi narzędziami stosowanymi w nowoczesnych maszynach rolniczych, a także aby wspierać cyfrową wymianę danych w ramach ekosystemu technologii rolnictwa precyzyjnego (np. agrirouter).

Jednym z kluczowych osiągnięć projektu jest wdrożenie opracowanych innowacji na platformie Fertisat, która od kilku lat stanowi podstawowe narzędzie dla rolników w zakresie zarządzania nawożeniem azotu. Dzięki projektowi funkcjonalność tej platformy została rozszerzona o moduły umożliwiające optymalizację nawożenia fosforem oraz precyzyjne dostosowanie norm wysiewu, co znacząco zwiększa jej użyteczność. Rolnicy mogą teraz uwzględniać nowe formy uprawy gleby, takie jak siew pasowy, oraz lepiej dopasowywać strategię nawożenia do zmieniających się warunków środowiskowych.

Opracowana technologia pozwala na podejmowanie decyzji na podstawie rzeczywistych danych, co przekłada się na większą precyzję w aplikacji nawozów i wysiewie nasion, minimalizację strat składników odżywczych oraz efektywniejsze gospodarowanie zasobami. W praktyce oznacza to oszczędności dla rolników poprzez zmniejszenie zużycia nawozów i optymalne wykorzystanie potencjału gleby. Ponadto, ograniczenie nadmiernej aplikacji nawozów wpisuje się w unijne cele związane z ochroną środowiska oraz redukcją emisji gazów cieplarnianych z sektora rolnictwa.

Projekt stanowi również ważny krok w kierunku realizacji strategii Rolnictwa 4.0, w którym kluczową rolę odgrywają automatyzacja, cyfryzacja oraz optymalizacja procesów agrotechnicznych. Integracja narzędzi analitycznych i teledetekcyjnych z systemami rolniczymi umożliwia wdrażanie inteligentnych technologii wspierających zarządzanie produkcją w czasie rzeczywistym. Zastosowanie precyzyjnego



monitorowania i analizy danych glebowych daje rolnikom nie tylko możliwość zwiększenia plonów, ale również lepszego dostosowania praktyk agrotechnicznych do specyficznych warunków lokalnych.

Dzięki przeprowadzonym badaniom terenowym oraz testom w warunkach produkcyjnych potwierdzono skuteczność opracowanych metod w różnych regionach uprawnych, co wskazuje na możliwość szerokiego zastosowania technologii w skali krajowej. Współpraca z rolnikami pozwoliła na uwzględnienie ich doświadczeń i uwag, co zwiększa szanse na powszechne wdrożenie opracowanych innowacji. Wnioski z projektu potwierdzają, że adaptacja nowych technologii w rolnictwie wymaga nie tylko rozwoju narzędzi analitycznych, ale także budowania świadomości i kompetencji użytkowników końcowych.

Podsumowując, wypracowana technologia oraz narzędzia analityczne stanowią istotny postęp w precyzyjnym zarządzaniu nawożeniem i wysiewem, dostarczając rolnikom praktycznych rozwiązań opartych na danych. Wdrożenie opracowanych metod nie tylko zwiększa rentowność gospodarstw, ale także sprzyja realizacji długoterminowych celów związanych z ochroną środowiska, efektywnością produkcji i nowoczesnym zarządzaniem rolnictwem w oparciu o innowacyjne technologie.