Wyniki badań i rezultaty projektu “Kontrola zróżnicowania łanu i czasu dojrzewania poprzez precyzyjną aplikację regulatora wzrostu w powiązaniu z bieżącym monitoringiem satelitarnym reakcji uprawy”

Spis treści

1. Wstęp 3
2. Skład konsorcjum 6
3. Harmonogram realizacji projektu 9
4. Prace Terenowe 12
   4.1 Metodyka badań terenowych 12
      4.1.1 Precyzyjne zabiegi skracania 12
      4.1.2 Pomiary w terenie 23
      4.1.3 Naloty dronami 29
5. Wyniki 30
6. Prace konceptualne i informatyczne 35
   6.1 Metodyka badań konceptualnych i informatycznych 35
      6.1.1 Indeksy roślinności 35
      6.1.2 Interfejs wspomagający prowadzenie i ocenę eksperymentów terenowych 36
   6.2 Wyniki 36
      6.2.1 Indeksy roślinności 36
      6.2.2 Interfejs wspomagający prowadzenie i ocenę doświadczeń terenowych 41
7. Innowacyjność operacji 47
8. Konkluzje 56
9. Rekomendacje dalszych działań 59

1. Wstęp

Realizacja operacji odpowiada na aktualne potrzeby rolnictwa w zakresie ograniczenia stosowania regulatorów wzrostu przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego poziomu plonowania. Współczesne uwarunkowania – zarówno środowiskowe, jak i rynkowe – coraz częściej skłaniają do redukcji substancji chemicznych stosowanych w produkcji roślinnej. Dotyczy to nie tylko wymogów wynikających z polityk publicznych, w tym strategicznych kierunków Unii Europejskiej, ale również oczekiwań konsumenckich w zakresie bezpieczeństwa żywności i troski o środowisko. Ograniczenie pozostałości regulatorów wzrostu w produktach spożywczych oraz ich emisji do środowiska jest zatem procesem nie tylko pożądanym społecznie, ale także wpisanym w założenia transformacji branży rolno-spożywczej. Jednocześnie mniejsze, ale racjonalne wykorzystanie tych środków, poprzez dostosowanie dawek do warunków polowych, może pozytywnie wpływać na rentowność produkcji.

Celem głównym operacji było opracowanie i wdrożenie ulepszonych metod kontroli rozwoju łanu pszenicy ozimej oraz rzepaku ozimego, poprzez precyzyjne dawkowanie regulatorów wzrostu, prowadzące do redukcji strat wynikających z jego nierównomiernego rozwoju. W toku prac projektowych wytworzone zostały **ulepszone innowacje technologiczne i organizacyjne**, które umożliwiły dokładniejsze rozpoznanie zróżnicowania łanu przed wykonaniem zabiegu (w oparciu o monitoring satelitarny), lepsze dostosowanie dawek regulatorów, a także przeprowadzenie zdalnej oceny skutków działania regulatora w skali całego pola – na podstawie interfejsu udostępniającego **ulepszony indeks roślinności** obliczony z danych satelitarnych. Istotnym uzupełnieniem powyższych działań było wdrożenie **innowacji organizacyjnej** w postaci narzędzia cyfrowego – modułu w platformie internetowej dedykowanej rolnictwu precyzyjnemu, który wspierał planowanie i realizację wielkoobszarowego eksperymentu terenowego oraz obiektywną ocenę jego wyników (w tym wariantów dawkowania), z możliwością porównywania produktywności upraw w różnych warunkach polowych.

W szerszym ujęciu, wdrożone rozwiązania przyniosły wymierne korzyści w trzech kluczowych obszarach: zwiększenia opłacalności produkcji, zmniejszenia presji środowiskowej oraz poprawy odporności rolnictwa na skutki zmian klimatycznych.

Wytworzenie ulepszonej innowacji technologicznej, tj. opracowanie nowych wskaźników roślinności, dostosowanych do wymagań oceny zasadności stosowania regulatorów wzrostu. Przeprowadzona analiza wykazała, że dotychczas stosowany indeks NDVI, choć powszechny, wykazuje istotne ograniczenia diagnostyczne w warunkach pełnego pokrycia gleby – ze względu na tzw. efekt saturacji. W ramach operacji opracowano alternatywne wskaźniki – oparte na zobrazowaniach z satelitów Sentinel-2 oraz Super Dove – które pozwoliły na lepsze odseparowanie wpływu struktury łanu od rzeczywistej kondycji uprawy. Ich skuteczność została potwierdzona poprzez porównanie map kondycji uprawy opartych na klasycznym NDVI i wskaźnikach nowej generacji.

Wytworzenie algorytmu zmiennego dawkowania regulatorów wzrostu stanowiło kolejny komponent **ulepszonej innowacji technologicznej**. Algorytm, oparty na danych satelitarnych i wyżej opisanych wskaźnikach, umożliwiał wygenerowanie map aplikacyjnych z przestrzennym zróżnicowaniem dawek w obrębie pola. W toku eksperymentów terenowych potwierdzono, że zastosowanie zmiennych dawek – zależnych od fazy rozwojowej i poziomu biomasy – było możliwe i technicznie wykonalne. Algorytm był elastyczny, co umożliwiało jego dostosowanie do lokalnych warunków glebowych i odmianowych. Weryfikacja jakościowa została przeprowadzona m.in. poprzez wgranie map do maszyn rolniczych z funkcją zmiennego dawkowania.

Wytworzenie ulepszonej innowacji organizacyjnej obejmowało stworzenie dedykowanego modułu internetowego do planowania i oceny wielkoskalowych eksperymentów terenowych, zintegrowanego z systemem do realizacji zabiegów precyzyjnych. Moduł umożliwiał graficzne wyznaczenie przestrzennych układów doświadczalnych (z podziałem na warianty i kontrole), przypisanie im charakterystyk oraz wykorzystanie danych satelitarnych do analizy wyników. Rozwiązanie to pozwalało nie tylko na prowadzenie doświadczeń w warunkach rzeczywistej produkcji, ale również na

wygenerowanie automatycznych raportów i wizualizacji danych. Dzięki konsultacjom z użytkownikami końcowymi (rolnikami i doradcami), moduł uzyskał intuicyjną i funkcjonalną formę. Kolejnym komponentem była **ulepszona innowacja organizacyjna** w zakresie opracowania interfejsu umożliwiającego szybką ocenę skutków zastosowania regulatora wzrostu. Interfejs ten, oparty na danych z dwóch terminów obrazowania, umożliwiał analizę zmian parametrów łanu w czasie – zarówno wskutek wzrostu naturalnego, jak i działania regulatora. W warunkach ograniczonej dostępności chmurowych dni, wykorzystanie danych z satelitów niekomercyjnych i komercyjnych (w tym floty Planet Labs) zapewniło odpowiednią częstotliwość zobrazowań. W opracowanym interfejsie użytkownik otrzymywał syntetyczną informację o zmianie stanu uprawy – zamiast przetwarzać surowy materiał obrazowy. Potwierdzenie zmiany jakościowej uzyskano poprzez możliwość generowania map porównawczych oraz ich wykorzystanie w dalszym podejmowaniu decyzji agrotechnicznych.

Zrealizowane cele i wdrożone rozwiązania dowiodły, że precyzyjne i obiektywne podejście do stosowania regulatorów wzrostu jest nie tylko możliwe, ale także pożądane z punktu widzenia efektywności ekonomicznej i środowiskowej gospodarstw rolnych. Opracowane innowacje technologiczne i organizacyjne posiadają realny potencjał upowszechnienia i adaptacji w różnych warunkach produkcyjnych. Dzięki operacji możliwe stało się wprowadzenie nowej jakości w zarządzaniu łanem ozimin, z jednoczesnym ograniczeniem chemizacji i wzmocnieniem podstaw decyzyjnych w gospodarstwie.

2. Skład konsorcjum

Projekt realizowany jest przez grupę operacyjną składającą się z gospodarstw rolnych, podmiotów doradczych, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego oraz SatAgro. Liderem grupy jest podmiot doradczy Instytut Nowoczesnego Rolnictwa.

Realizacja przedsięwzięcia została powierzona grupie operacyjnej o charakterze interdyscyplinarnym, składającej się z podmiotów reprezentujących różne segmenty sektora rolniczego: gospodarstw rolnych, uczelni oraz partnera technologicznego– SatAgro sp. z o.o. Liderem konsorcjum, odpowiedzialnym za koordynację działań i zapewnienie spójności merytorycznej i organizacyjnej, był podmiot Instytut Nowoczesnego Rolnictwa wraz z zespołem, który od lat zaangażowany w transfer innowacji oraz wdrażanie rozwiązań z zakresu rolnictwa precyzyjnego.

Szeroka reprezentacja interesariuszy – obejmująca zarówno praktyków produkcji rolnej, jak i ekspertów technologicznych oraz konsultantów – umożliwiła stworzenie zintegrowanej struktury projektowej, której siłą napędową była komplementarność doświadczeń, wiedzy praktycznej oraz kompetencji badawczo-wdrożeniowych. Zróżnicowanie członków konsorcjum przełożyło się na zdolność efektywnej adaptacji zaawansowanych narzędzi cyfrowych do realiów funkcjonowania gospodarstw rolnych, z uwzględnieniem ich potrzeb, ograniczeń oraz zróżnicowanych uwarunkowań środowiskowych i organizacyjnych.

Szczególnie istotną rolę w procesie realizacji projektu pełniło przedsiębiorstwo SatAgro sp. z o.o.. Firma ta, będąca jednym z europejskich pionierów operacyjnego wykorzystania danych satelitarnych w zarządzaniu produkcją roślinną na poziomie indywidualnych gospodarstw rolnych. Platforma SatAgro funkcjonuje w trybie online od 2015 roku i od tego czasu dynamicznie rozwija się równolegle z postępującą dostępnością obserwacji kosmicznych oraz rosnącymi potrzebami nowoczesnego rolnictwa.

SatAgro wniosło do projektu wyjątkowe kompetencje w zakresie przetwarzania danych przestrzennych, obserwacji Ziemi oraz modelowania środowiska, łącząc je z głębokim zrozumieniem wyzwań i realiów współczesnej agronomii. Firma współpracuje z szerokim

spektrum partnerów – od gospodarstw rolnych <10 ha po przedsiębiorstwa operujące na powierzchniach powyżej 100 000 ha – co przekłada się na skalowalność i elastyczność dostarczanych rozwiązań.

W kontekście omawianej operacji SatAgro było odpowiedzialne za opracowanie i dostarczenie komponentów technologicznych kluczowych dla wdrożenia precyzyjnego dawkowania regulatorów wzrostu, w tym:

- **zaawansowanych indeksów roślinności** (np. HyVeg1),
- **map aplikacyjnych** opartych na danych satelitarnych,
- oraz **interfejsów użytkownika** wspierających prowadzenie i ewaluację eksperymentów rolniczych.

Z kolei gospodarstwa rolne uczestniczące w projekcie odegrały kluczową rolę operacyjną i empiryczną. Szeroki skład konsorcjum – producenci rolni, doradcy czy przedsiębiorca gwarantował skuteczne tworzenie nowych powiązań i sieci kontaktu, które znacznie przyśpieszyły rozpowszechnianie informacji o realizowanej operacji. Przyspieszenie procesu adaptacji nowoczesnych technologii w rolnictwie wymaga dużej wiedzy, zrozumienia procesów zachodzących w gospodarstwach rolnych oraz znajomości czynników, które mają wpływ na decyzje podejmowane przez rolników. Z tego względu w projekcie założono współpracę podmiotów z różnych sektorów. Grupę operacyjną tworzą podmioty doradcze, rolnicy i przedsiębiorca. Kluczowa rola w realizacji operacji przypadała przedsiębiorstwu SatAgro sp. z o.o., które specjalizuje się w tworzeniu narzędzi i świadczeniu usług wykorzystujących dane satelitarne dla sektora rolniczego. Firma pełni funkcję łącznika pomiędzy dynamicznie rozwijającym się sektorem obserwacji satelitarnych a grupą przedsiębiorstw rolnych. Jej usługi umożliwiają dostęp do produktów działających na podstawie obserwacji satelitarnych NASA, ESA oraz szerokiej grupy prywatnych operatorów w połączeniu z danymi ze stacji meteorologicznych i modelami pogody. SatAgro prowadzi także projekty badawcze i konsultacje w zakresie monitoringu zbioru roślin uprawnych, rozpoznawania upraw, prognozowania plonów oraz szacowania strat. Natomiast rolnicy wchodzący w skład

konsorcjum prowadzą nowoczesną produkcję rolną i posiadają wieloletnie doświadczenie w zakresie rolnictwa. W ramach operacji gospodarstwa rolne odpowiedzialne były za prowadzenie zabiegów agrotechnicznych i zbiór roślin w ustaleniu z konsorcjum. Dzięki ich wsparciu merytorycznym w zakresie produkcji rolnej oraz udziału w wywiadach focusowych i indywidualnych możliwe było przeprowadzenie badań, których wyniki przełożyły się na wytworzenie innowacji, które w jak największym stopniu odpowiadają potrzebom rolników. Współpraca wszystkich członków grupy operacyjnej pozwoliła na opracowanie praktycznego rozwiązania cyfrowego, które z powodzeniem może zostać zastosowane przez rolnika.

Proces tworzenia i doskonalenia opracowanych rozwiązań wspierany był dodatkowo poprzez realizację badań jakościowych – w formie **wywiadów indywidualnych oraz sesji fokusowych** – z udziałem rolników i doradców zaangażowanych w operację. Dzięki temu możliwe było nie tylko uchwycenie zniuansowanych uwarunkowań decyzyjnych w gospodarstwach rolnych, ale także iteracyjne dostosowywanie interfejsów i funkcji systemowych do oczekiwań i kompetencji użytkowników.

Finalnie, synergia kompetencji wszystkich członków konsorcjum umożliwiła opracowanie spójnego, cyfrowego rozwiązania wspierającego precyzyjne zarządzanie łanem, które dzięki swojej funkcjonalności, skalowalności oraz użyteczności może być z powodzeniem wdrażane w szerokiej grupie gospodarstw rolnych, niezależnie od ich wielkości czy poziomu zaawansowania technologicznego.

3. Harmonogram realizacji projektu

Etap 1

SGGW: Wsparcie w zakresie wytworzenia siatki badań na podstawie danych satelitarnych oraz pobraniu próbek roślin, analiza parametrów łanu zebranych roślin,

Satagro: Zakup urządzeń i zapewnienie urządzeń pomiarowych, wytworzenie siatki badań na podstawie danych satelitarnych, przeprowadzenie badań glebowych w zakresie zasobności gleb w azot, pierwsze pobranie próbek roślin, przygotowanie bibliotek i środowiska

Rolnicy: zakup maszyn, przeszkolenie, rozpoczęcie prac agrotechnicznych w ustaleniu z konsorcjum

Instytut Nowoczesnego Rolnictwa: prowadzenie spotkań konsorcjalnych, nadzorowanie współpracy, przygotowanie dokumentów projektowych, przeprowadzenie procedur zakupowych,

Etap 2

SGGW: Wsparcie w zakresie wytworzenia próbek roślin, analiza parametrów łanu zebranych roślin, obróbka techniczna zebranych próbek roślin, wsparcie w zakresie importu danych z maszyn rolniczych

Satagro: Stworzenie wirtualnych modeli w zakresie analizy parametrów roślin, tworzenie podwalin pod zastosowanie algorytmów, analiza pozyskiwanych danych, stworzenie pierwotnych wireframe w zakresie modułu prowadzenia badań, testowe wytworzenie map poza środowiskiem produkcyjnym, prowadzenie badań polowych i nalotów dronem

Rolnicy: nawożenie, oprysk i zbiór roślin w uzgodnieniu z konsorcjum

Instytut Nowoczesnego Rolnictwa: prowadzenie spotkań konsorcjalnych, nadzorowanie współpracy, przygotowanie dokumentów projektowych, przeprowadzenie procedur zakupowych, wsparcie w zakresie gromadzenia danych

Etap 3 (

SGGW: Wsparcie w zakresie wytworzenia próbek roślin, analiza parametrów łanu zebranych roślin, obróbka techniczna zebranych próbek roślin, wsparcie w zakresie importu danych z maszyn rolniczych

Satagro: Ulepszanie wirtualnych modeli w zakresie analizy parametrów roślin, rozwój oprogramowania, analiza pozyskiwanych danych, analiza przestrzenna pozyskanych danych w celu porównania wyników z aparatury pomiarowej

Rolnicy: zabiegi agrotechniczne w ustaleniu z konsorcjum

Instytut Nowoczesnego Rolnictwa: prowadzenie spotkań konsorcjalnych, nadzorowanie współpracy, przygotowanie dokumentów projektowych, wsparcie w zakresie procedur zakupowych, wsparcie w zakresie gromadzenia danych

Etap 4 (

SGGW: Wsparcie w zakresie analizy statystycznej i przestrzennej danych, konsultacje w zakresie rozwoju funkcjonalności

Satagro: Ulepszanie wirtualnych modeli w zakresie analizy parametrów roślin, rozwój oprogramowania aparatury pomiarowej, przygotowanie możliwości generowania wstępnych map do aplikowania zmiennej dawki regulatorów wzrostu na nowy sezon wegetacyjny, analiza porównawcza danych z sensorów z danymi laboratoryjnymi, przeprowadzenie badań azotu glebowego

Rolnicy: przygotowanie map, zczytywanie danych z maszyn rolniczych, przeprowadzenie badań glebowych, jeśli to konieczne

Instytut Nowoczesnego Rolnictwa: prowadzenie spotkań konsorcjalnych, nadzorowanie współpracy, przygotowanie dokumentów projektowych, wsparcie w zakresie procedur zakupowych, wsparcie w zakresie gromadzenia danych

Etap 5

SGGW: Wsparcie w zakresie pobierania próbek i analizy parametrów łanu, wsparcie w zakresie analizy statystycznej i przestrzennej danych, konsultacje w zakresie rozwoju funkcjonalności

Satagro: Pobieranie prób, rozwój oprogramowania aparatury pomiarowej, analiza pozyskiwanych danych, stworzenie makiet aplikacyjnych, ulepszanie wirtualnych modeli w zakresie analizy parametrów roślin, rozwój oprogramowania aparatury pomiarowej, wygenerowanie testowych map, analiza przestrzenna skuteczności wytworzonych map, przygotowanie możliwości generowania map zmiennej dawki regulatora wzrostu, finalne wytworzenie dokumentacji projektowej i prototypu, analiza porównawcza danych z sensorów z danymi laboratoryjnymi, utworzenie modułu służącego do prowadzenia badań i porównywania efektywności działek, przygotowanie finalnej dokumentacji technologicznej z przeprowadzonego projektu

Rolnicy: nawożenie, agrotechnika i zbiór roślin w uzgodnieniu z konsorcjum

Instytut Nowoczesnego Rolnictwa: prowadzenie spotkań konsorcjalnych, nadzorowanie współpracy, przygotowanie dokumentów projektowych, wsparcie w zakresie procedur zakupowych, wsparcie w zakresie gromadzenia danych, przygotowanie finalnej dokumentacji technologicznej z przeprowadzonego projektu

4. Prace Terenowe

Ilustracja 1. Lokalizacja pól uprawnych i głównych punktów pomiarowych wykorzystanych w eksperymentach terenowych

4.1 Metodyka badań terenowych

4.1.1 Precyzyjne zabiegi skracania

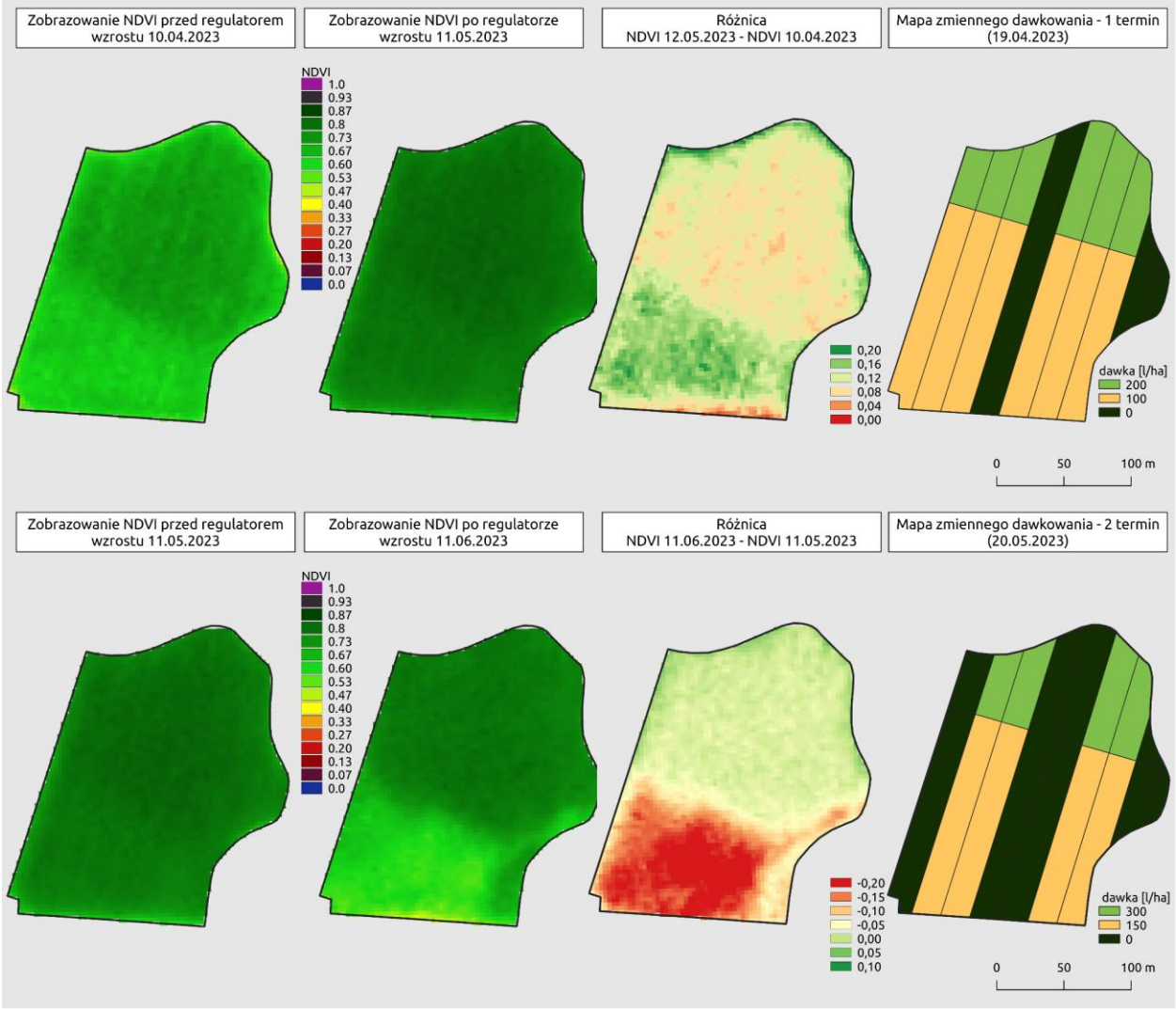
W sezonie 2023 i 2024 zrealizowano łącznie 22 zabiegi precyzyjnego skracania pszenicy ozimej i rzepaku ozimego (Tabela 1). Rolnikom dostarczono mapy aplikacyjne z dawkowaniem środka skracającego 100%, 50% i zero (kontrola). W niektórych przypadkach (duże pole uprawne) mapy aplikacyjne z kilku zabiegów łącznie tworzyły scenariusze obejmujące również 25% i 75% dawki. W większości przypadków środek był dawkowany automatycznie przez precyzyjne opryskiwacze wyposażone w terminal czytający mapę aplikacyjną. W jednym przypadku została zastosowana manualna zmiana dawki zgodnie ze znacznikami zainstalowanymi w terenie.

Na wszystkich polach zlokalizowano punkty pomiarowe, w miarę możliwości w sposób pozwalający uchwycić spektrum kondycji uprawy, określone na podstawie bieżących zdjęć satelitarnych.

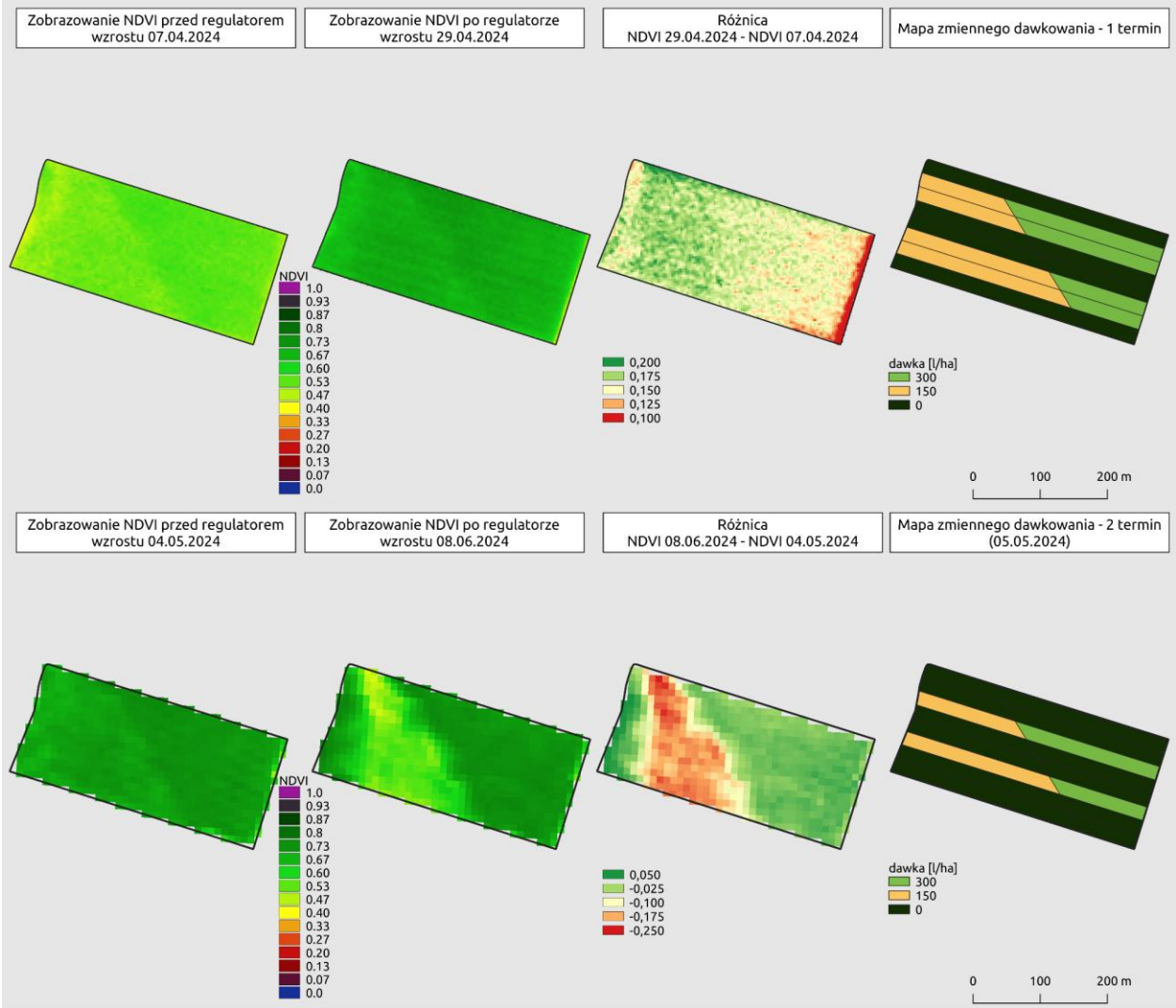
Mapy aplikacyjne poszczególnych zabiegów, jak również kondycja uprawy, a także zmiany kondycji po zabiegu, pokazane są na ilustracjach poniżej.

Tabela 1. Zabiegi precyzyjnego skracania przeprowadzone w ramach realizacji projektu.

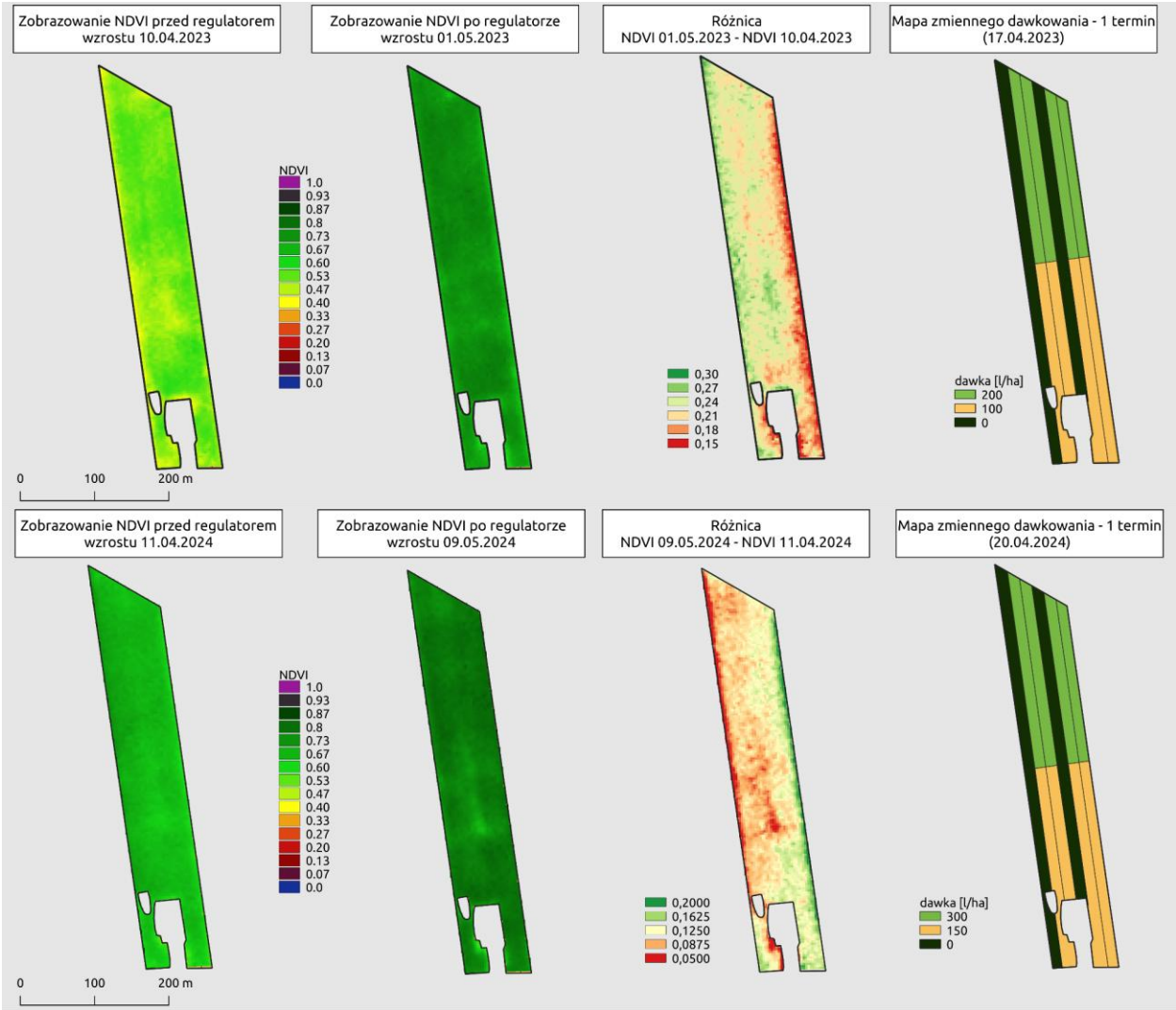
Sezon	Konsorcjant (pole uprawne)	Uprawa	Środek	Termin 0	Termin 1	Termin 2	Termin 3
2023	Wojtaś (Bojanówka)	rzepak	Caryx	----	17.04.23	08.05.23	----
	Kawska (Bendorzyn)	pszenica	Medax max	----	19.04.23	20.05.23	----
	Chilimoniuk (Czeberaki)	pszenica	Medax max	----	18.04.23	10.05.23	----
	Chmielewski (Pudłowice)	pszenica	Medax max	----	08.04.23	15.05.23	27.05.23
2024	Wojtaś (Bojanówka)	pszenica	Medax max	----	20.04.24	10.05.24	----
	Kawska (Bendorzyn)	pszenica	Medax max	----	12.04.24	05.05.24	----
	Chilimoniuk (Czeberaki)	rzepak	Caryx	28.09.23	23.03.24	12.04.24	----
	Chmielewski (Pudłowice)	rzepak	Caryx	24.09.23	27.03.24	08.04.24	----
	Asztmeborski (Borkowo)	rzepak	Caryx	30.09.23	26.03.24	14.04.24	----

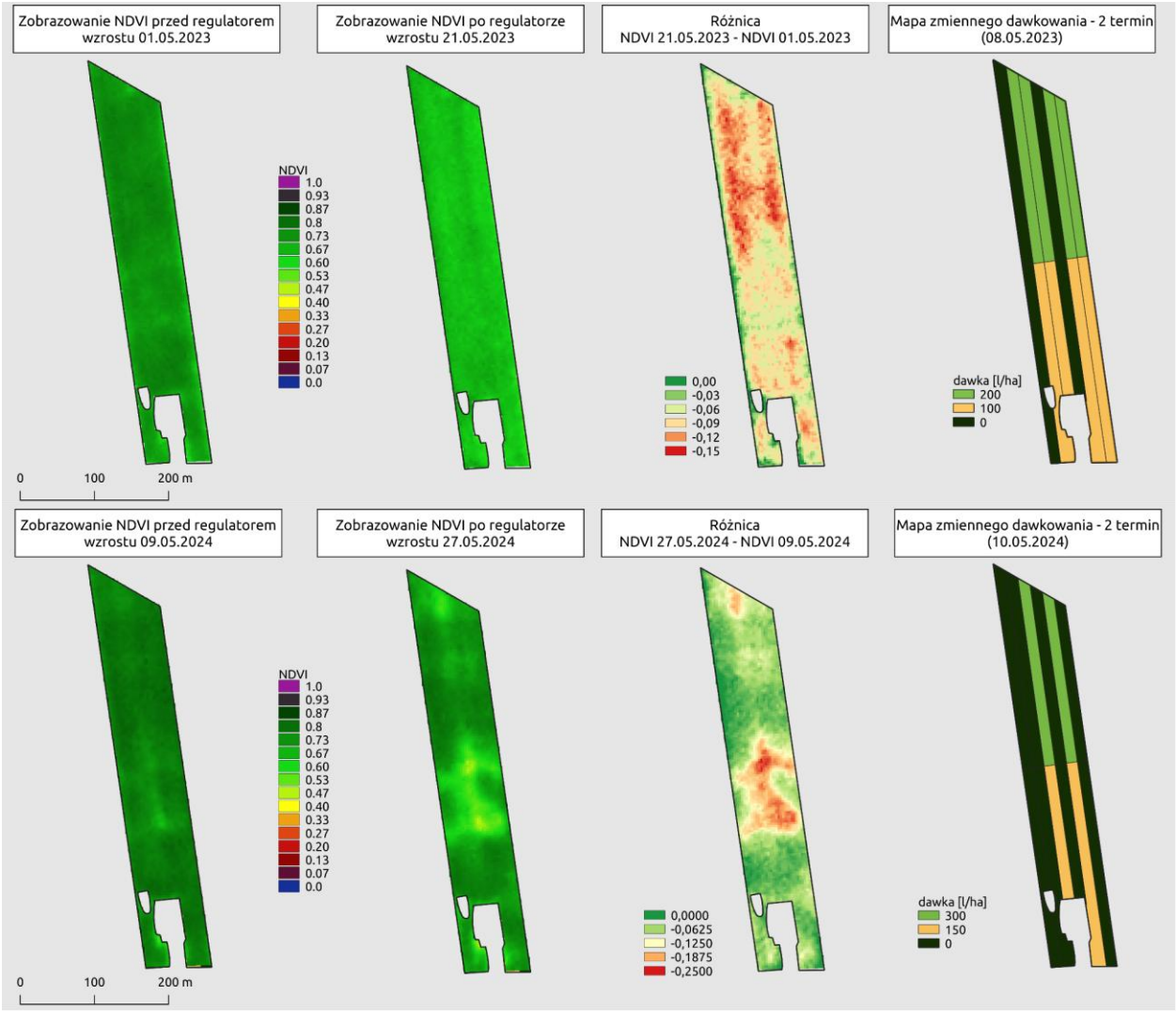


Ilustracja 2. Zabiegi skracania przeprowadzone w Gospodarstwie Rolnym Aleksandra Kawska w sezonie 2023.

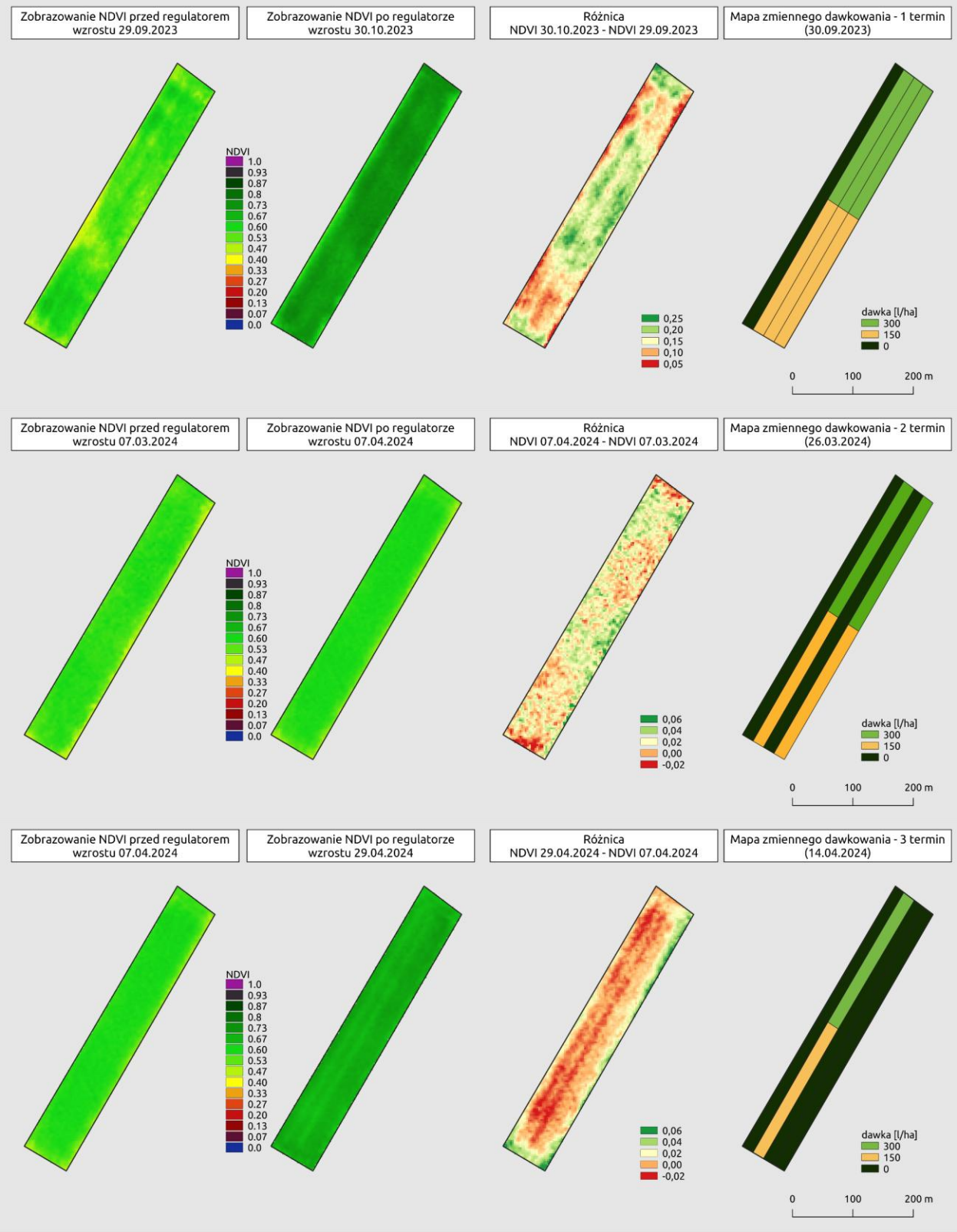


Ilustracja 3. Zabiegi skracania przeprowadzone w Gospodarstwie Rolnym Aleksandra Kawska w sezonie 2024.

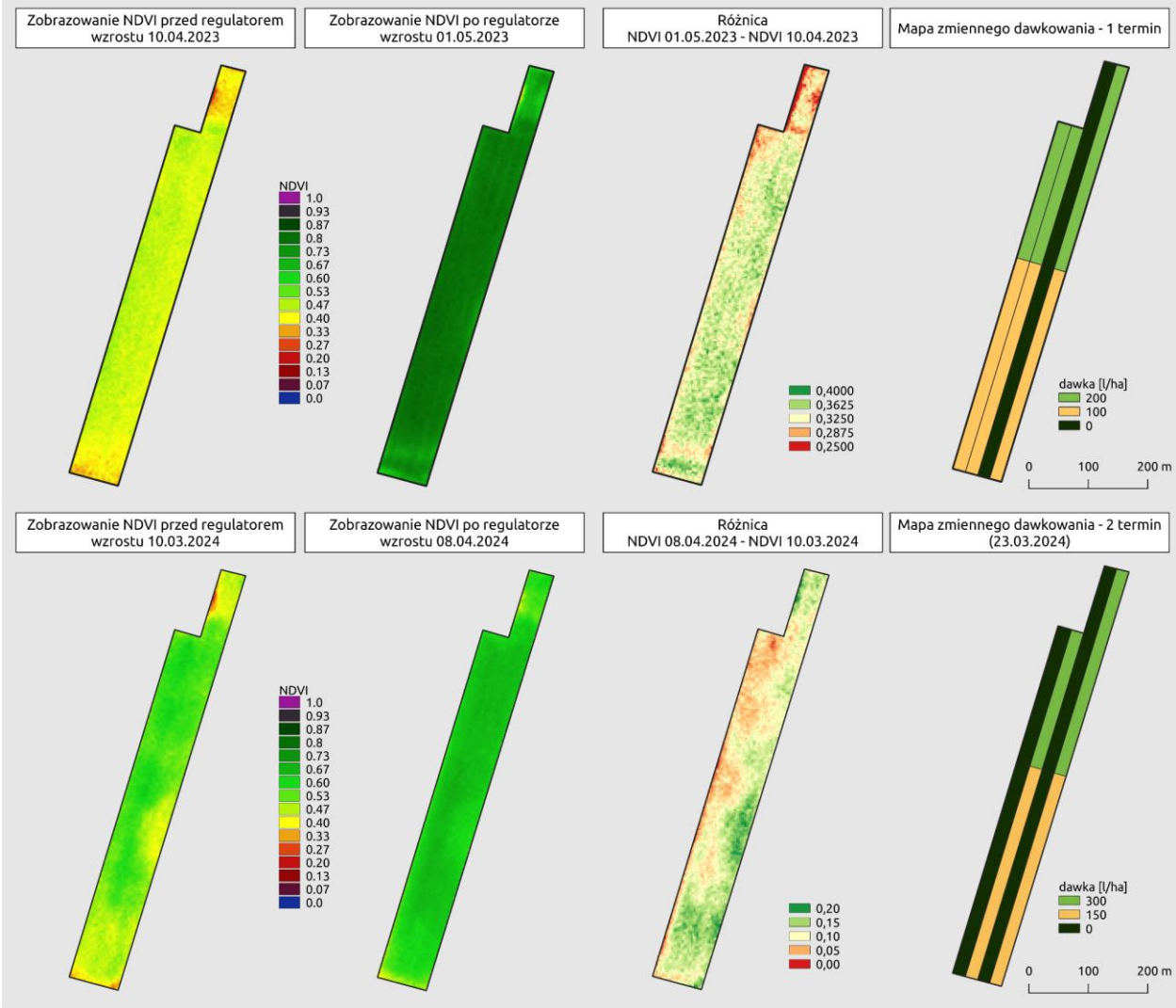

Zobrazowanie NDVI przed regulatorem wzrostu 10.04.2023
Zobrazowanie NDVI po regulatorze wzrostu 01.05.2023
Różnica NDVI 01.05.2023 - NDVI 10.04.2023
Mapa zmiennego dawkowania - 1 termin (17.04.2023)
NDVI
1.0
0.93
0.87
0.8
0.73
0.67
0.60
0.53
0.47
0.40
0.33
0.27
0.20
0.13
0.07
0.0
0,30
0,27
0,24
0,21
0,18
0,15
dawka [l/ha]
200
100
0
0
100
200 m
Zobrazowanie NDVI przed regulatorem wzrostu 11.04.2024
Zobrazowanie NDVI po regulatorze wzrostu 09.05.2024
Różnica NDVI 09.05.2024 - NDVI 11.04.2024
Mapa zmiennego dawkowania - 1 termin (20.04.2024)
NDVI
1.0
0.93
0.87
0.8
0.73
0.67
0.60
0.53
0.47
0.40
0.33
0.27
0.20
0.13
0.07
0.0
0,2000
0,1625
0,1250
0,0875
0,0500
dawka [l/ha]
300
150
0
0
100
200 m

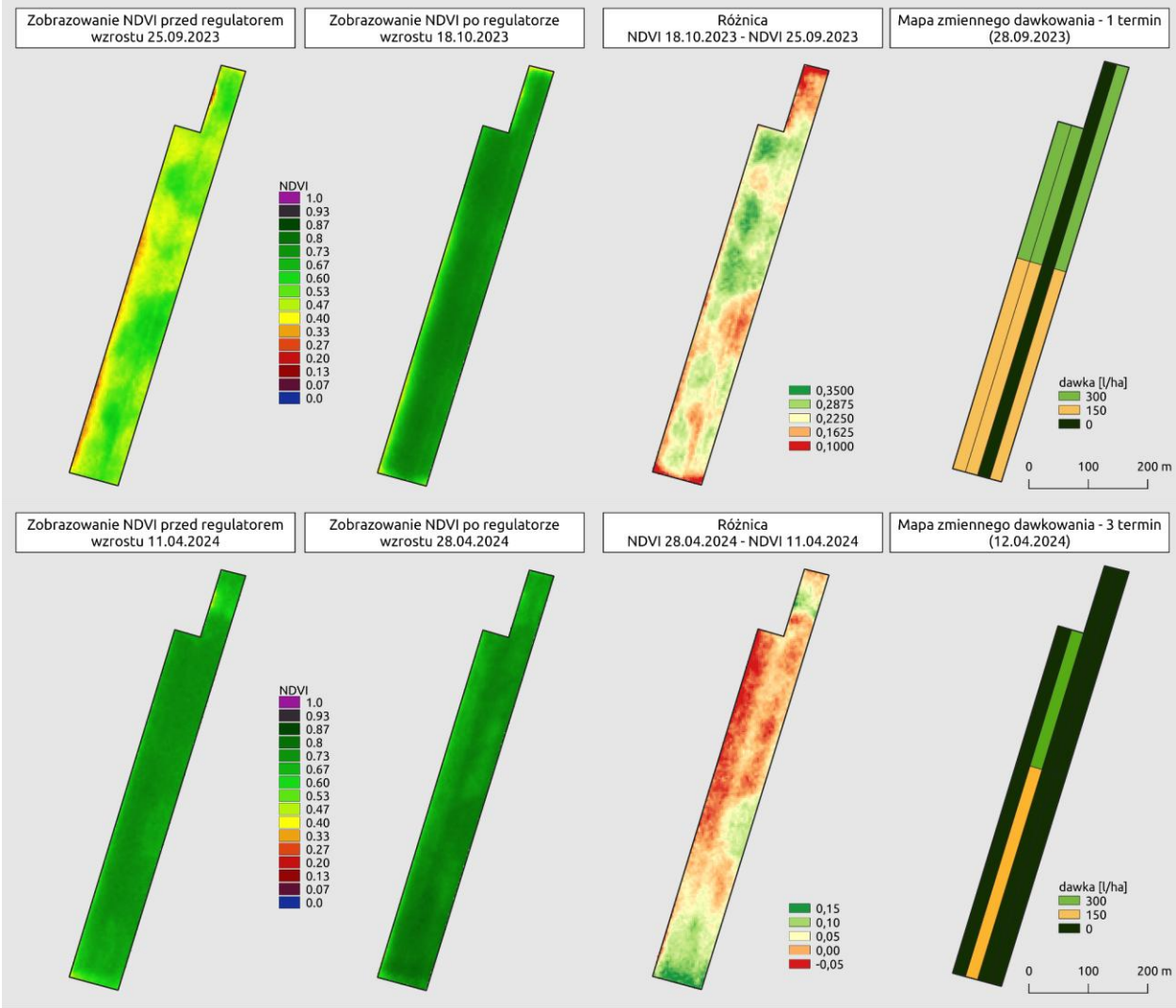


Ilustracja 4. Zabiegi skracania przeprowadzone w Gospodarstwie Rolnym Jacek Wojtaś w sezonach 2023 i 2024.

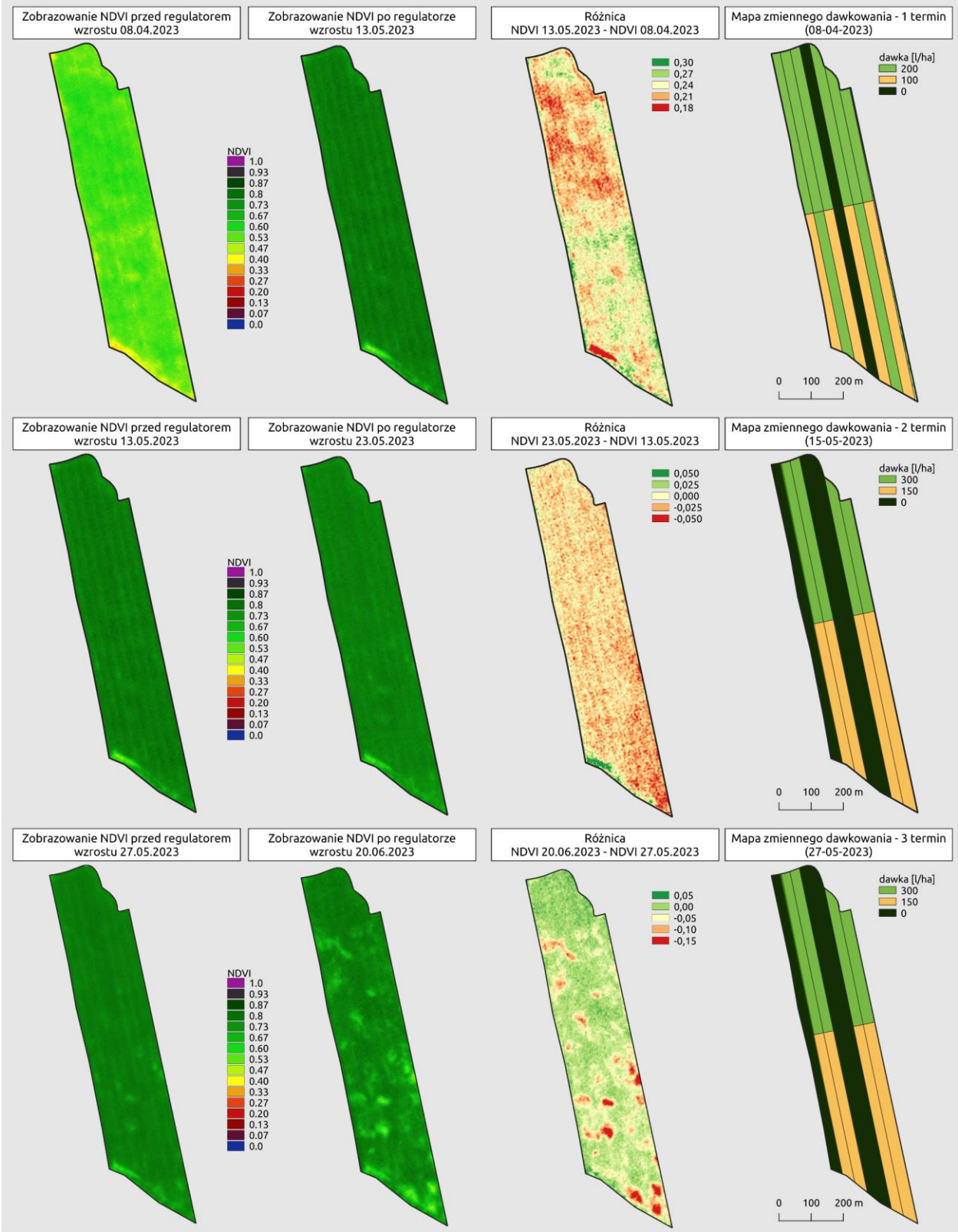


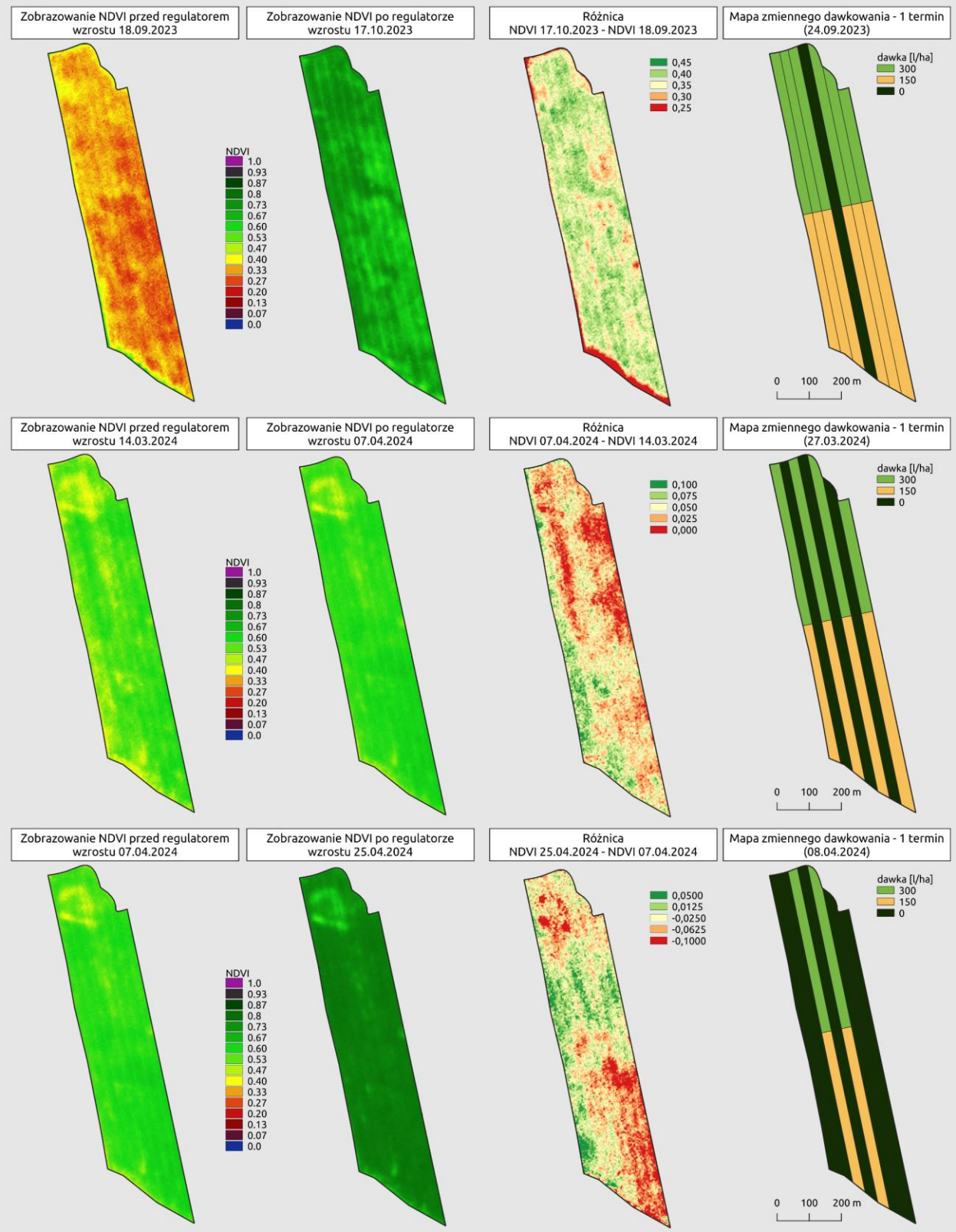
Ilustracja 5. Zabiegi skracania przeprowadzone w Gospodarstwie Rolnym Edward i Michał Asztemborscy, w sezonie 2024.


Zobrazowanie NDVI przed regulatorem wzrostu 10.04.2023
Zobrazowanie NDVI po regulatorze wzrostu 01.05.2023
Różnica NDVI 01.05.2023 - NDVI 10.04.2023
Mapa zmiennego dawkowania - 1 termin
NDVI
1.0
0.93
0.87
0.8
0.73
0.67
0.60
0.53
0.47
0.40
0.33
0.27
0.20
0.13
0.07
0.0
0,4000
0,3625
0,3250
0,2875
0,2500
dawka [l/ha]
200
100
0
0
100
200 m
Zobrazowanie NDVI przed regulatorem wzrostu 10.03.2024
Zobrazowanie NDVI po regulatorze wzrostu 08.04.2024
Różnica NDVI 08.04.2024 - NDVI 10.03.2024
Mapa zmiennego dawkowania - 2 termin (23.03.2024)
NDVI
1.0
0.93
0.87
0.8
0.73
0.67
0.60
0.53
0.47
0.40
0.33
0.27
0.20
0.13
0.07
0.0
0,20
0,15
0,10
0,05
0,00
dawka [l/ha]
300
150
0
0
100
200 m



Ilustracja 6. Zabiegi skracania przeprowadzone w Gospodarstwie Rolnym Radosław Chilimoniuk, w sezonach 2023 i 2024.


Zobrazowanie NDVI przed regulatorem wzrostu 08.04.2023
Zobrazowanie NDVI po regulatorze wzrostu 13.05.2023
Różnica NDVI 13.05.2023 - NDVI 08.04.2023
Mapa zmiennego dawkowania - 1 termin (08-04-2023)
NDVI
1.0
0.93
0.87
0.8
0.73
0.67
0.60
0.53
0.47
0.40
0.33
0.27
0.20
0.13
0.07
0.0
0,30
0,27
0,24
0,21
0,18
dawka [l/ha]
200
100
0
0 100 200 m
Zobrazowanie NDVI przed regulatorem wzrostu 13.05.2023
Zobrazowanie NDVI po regulatorze wzrostu 23.05.2023
Różnica NDVI 23.05.2023 - NDVI 13.05.2023
Mapa zmiennego dawkowania - 2 termin (15-05-2023)
NDVI
1.0
0.93
0.87
0.8
0.73
0.67
0.60
0.53
0.47
0.40
0.33
0.27
0.20
0.13
0.07
0.0
0,050
0,025
0,000
-0,025
-0,050
dawka [l/ha]
300
150
0
0 100 200 m
Zobrazowanie NDVI przed regulatorem wzrostu 27.05.2023
Zobrazowanie NDVI po regulatorze wzrostu 20.06.2023
Różnica NDVI 20.06.2023 - NDVI 27.05.2023
Mapa zmiennego dawkowania - 3 termin (27-05-2023)
NDVI
1.0
0.93
0.87
0.8
0.73
0.67
0.60
0.53
0.47
0.40
0.33
0.27
0.20
0.13
0.07
0.0
0,05
0,00
-0,05
-0,10
-0,15
dawka [l/ha]
300
150
0
0 100 200 m



Ilustracja 7. Zabiegi skracania przeprowadzone w Gospodarstwie Rolnym Aliny, Katarzyny i Zdzisława Chmielewskich, w sezonach 2023 i 2024.

4.1.2 Pomiary w terenie

W ramach prowadzonych prac badawczo-rozwojowych równolegle do pomiarów teledetekcyjnych przeprowadzono terenowe pomiary mające na celu określenie obsady oraz parametry biomasy nadziemnej pszenicy ozimej i rzepaku ozimego. Prace terenowe zostały wykonane w trzech kampaniach pomiarowych które odpowiadały kluczowym fazom rozwojowym roślin: jesienią (BBCH 20–29), wiosną (BBCH 31–39) oraz przed początkiem fazy generatywnej (BBCH 40–49). Wszystkie pomiary były realizowane na wyznaczonych działkach doświadczalnych, w stałych lokalizacjach, umożliwiających monitorowanie zmian zachodzących w czasie. Na każdej działce doświadczalnej wyznaczono miejsca poboru prób, które zlokalizowano w reprezentatywnych fragmentach łanu, z pominięciem obrzeży i stref przegęszczeń lub nadmiernych ubytków roślin. Pobór materiału roślinnego odbywał się z jednego metra bieżącego rzędu uprawy. Do precyzyjnego wyznaczenia długości odcinka wykorzystywano stalową taśmę mierniczą (metrówkę). Punkty oznaczano chorągiewkami, co umożliwiało zachowanie spójności w kolejnych pomiarach oraz zabezpieczało przed przypadkowym pominięciem oznaczonych stanowisk. W przypadku pszenicy ozimej materiał roślinny ścinano ręcznie przy użyciu ostrych nożyc ogrodniczych tuż nad węzłem krzewienia, w sposób pozwalający zachować nienaruszoną strukturę części nadziemnej roślin. Każda próba była analizowana pod kątem liczby źdźbeł. Jednocześnie liczono liczbę roślin na wyznaczonym metrze bieżącym, a po przeliczeniu z uwzględnieniem szerokości międzyrzędzi obliczano obsadę wyrażoną w jednostkach na metr kwadratowy. Rośliny pakowano bezpośrednio po zbiorze do szczelnych worków foliowych i niezwłocznie transportowano do laboratorium.

Ilustracja 8. Kampania pomiarowa pszenicy ozimej w sezonie wegetacyjnym 2023/2024.

W przypadku rzepaku ozimego pobór materiału przebiegał analogicznie – z odcinka o długości 1 mb rzędu. Rośliny odcinano przy szyjce korzeniowej lub w razie potrzeby wykopywano w całości. Również w tym przypadku liczono liczbę roślin przypadających na metr bieżący rzędu, co pozwalało na późniejsze przeliczenie i porównanie z zalecaną przez hodowcę obsadą. Wszystkie pobrane próbki były szczegółowo oznaczane markerem permanentnym – każda etykieta zawierała numer stanowiska, gatunek rośliny oraz numer próby. W warunkach polowych każdą roślinę ważono w stanie świeżym przy użyciu precyzyjnej wagi elektronicznej o dokładności 0,1 g.

Ilustracja 9. Kampania pomiarowa rzepaku ozimego w sezonie wegetacyjnym 2023/2024.

W końcowej fazie wegetacji, w celu przeprowadzenia szczegółowej analizy plonowania oraz określenia struktury łanu pszenicy ozimej, wykonano pomiar plonu w warunkach polowych. Próbki roślinne pobierano z dwóch wyznaczonych powierzchni o wymiarach 1 m x 1m każda, zlokalizowanych w obrębie wcześniej monitorowanych działek doświadczalnych. Miejsca te były wybrane na podstawie wcześniejszych obserwacji łanu oraz analizy jednorodności stanowiska, z uwzględnieniem reprezentatywności dla całej powierzchni badanej uprawy. Rośliny zbierano ręcznie, przycinając je na poziomie gruntu przy pomocy ostrych nożyc sekatorowych. Każdy okaz był zachowywany w całości, bez usuwania liści czy kłosów, co pozwalało na późniejsze wykonanie kompletnej analizy morfologicznej oraz biomasy. Po zbiorze próbki były transportowane w workach foliowych do strefy roboczej, gdzie wykonano pomiary poszczególnych cech roślin. Dla każdej z pobranych powierzchni oznaczono następujące parametry: długość całkowita rośliny (mierzona od podstawy źdźbła do podstawy kłosa), długość kłosa, długość międzywęźli oraz średnica źdźbła (mierzona w połowie wysokości rośliny za pomocą suwmiarki).

Dodatkowo określono liczbę roślin przypadających na 1 m² oraz liczbę kłosów na tej samej powierzchni, co pozwoliło na określenie stopnia rozkrzewienia oraz efektywności formowania pędów generatywnych. Po wykonaniu pomiarów morfologicznych przystąpiono do rozdziału biomasy – z każdej powierzchni oddzielono słomę od kłosów. Obie frakcje zostały następnie zważone osobno na wadze elektronicznej z dokładnością 0,1 g. Kłosy młócono w celu oddzielenia ziarna, które również zostało zważone, a następnie przeliczono MTZ (masę tysiąca ziaren), co umożliwiło określenie plonotwórczego potencjału pojedynczych kłosów oraz średniej liczby ziaren przypadających na jednostkę powierzchni.

Podobnie wyglądały pomiary w końcowym etapie wegetacji plonu rzepaku ozimego, które pozwoliły na ocenę parametrów struktury roślin oraz bezpośrednie wyznaczenie masy nasion, łuszczyn i słomy. Pobór materiału wykonano z dwóch powierzchni o wielkości 1 m² każda, wyznaczonych w obrębie monitorowanych wcześniej działek doświadczalnych. Obszary te zostały dobrane na podstawie wcześniejszych ocen kondycji łanu i przy uwzględnieniu jego jednorodności, z wykluczeniem stref brzeżnych i miejsc ze skrajnymi wartościami obsady.

Rośliny z każdej powierzchni zbierano ręcznie, przycinając je tuż przy szyjce korzeniowej przy użyciu nożyc ogrodniczych. Każdy egzemplarz pozostawał w całości, z zachowanymi łuszczynami, rozgałęzieniami i liśćmi, co umożliwiło wykonanie pełnych pomiarów morfologicznych oraz biomasy. Natychmiast po zbiorze przystąpiono do szczegółowego pomiaru cech fizycznych. Dla każdej rośliny określano długość całkowitą, a także długość pędu głównego do pierwszego i drugiego rozgałęzienia bocznego. Średnicę pędu głównego mierzono przy szyjce korzeniowej przy użyciu suwmiarki, co pozwoliło ocenić wpływ zabiegów regulacyjnych na rozwój organów nośnych.

Ilustracja 10. Wykonywanie pomiarów rzepaku ozimego

Ilustracja 11. Kampania pomiarowa rzepaku ozimego

Następnie określono obsadę – liczbę roślin przypadających na każdy metr kwadratowy, a także wykonano rozdział materiału roślinnego na trzy podstawowe frakcje: łuszczyny wraz z zawartością nasion, słomę (obejmującą łodygi i rozgałęzienia) oraz pozyskane z łuszczyn nasiona. Każdą z tych frakcji ważono osobno na precyzyjnej wadze elektronicznej z dokładnością do 0,1 g. Masa łuszczyn z nasionami pozwoliła na ocenę efektywności generatywnej rozgałęzień, natomiast masa całkowita słomy odzwierciedlała potencjał wegetatywny rośliny.

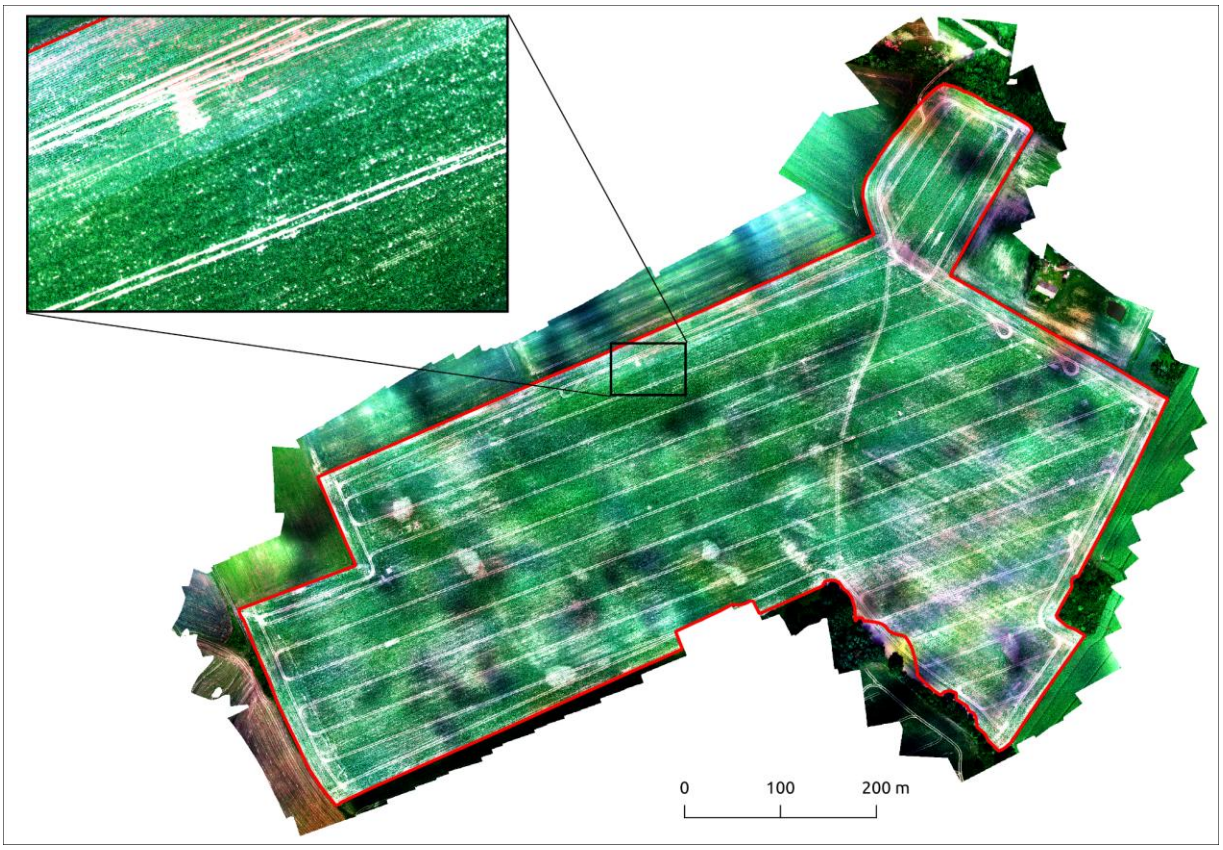
Po wyłuskaniu nasion z łuszczyn przystąpiono do analizy ich parametrów ilościowych i jakościowych. Oznaczono całkowitą masę nasion przypadającą na daną powierzchnię, a także wykonano pomiar masy 100 nasion. Dodatkowo, zliczono całkowitą liczbę pozyskanych nasion, co umożliwiło określenie średniej wydajności generatywnej jednej rośliny oraz jednostki powierzchni.

Zebrane informacje terenowe i laboratoryjne zostały zapisane w indywidualnych kartach pomiarowych, a następnie wprowadzone do elektronicznej bazy danych. Każdy wpis

zawierał pełny zestaw informacji lokalizacyjnych, czasowych oraz wynikowych. Dane te posłużyły do dalszej analizy w ramach kalibracji zdjęć satelitarnych i lotniczych oraz opracowania algorytmów zmiennego dawkowania regulatorów wzrostu i nawożenia. Zachowanie wysokiego rygoru metodycznego na każdym etapie realizacji pomiarów zapewniło spójność, powtarzalność oraz wiarygodność uzyskanych wyników, stanowiących podstawę do dalszych etapów realizacji projektu.

4.1.3 Naloty dronami

W dwóch sezonach zrealizowano kampanie nalotów dronami celem akwizycji danych multispektralnych o wysokiej rozdzielczości (5 cm), które pozwolą na pogłębioną interpretację danych satelitarnych z symultanicznych akwizycji danych satelitarnych. Kampania z 2023 r. (22 kwietnia) skupiała się na uprawach ozimych, natomiast kampania z 2024 r. (15 czerwca) - dodatkowo na uprawach letnich: kukurydzy i buraku cukrowym. Podsumowanie analizy znajduje się w rozdziale 4.2.

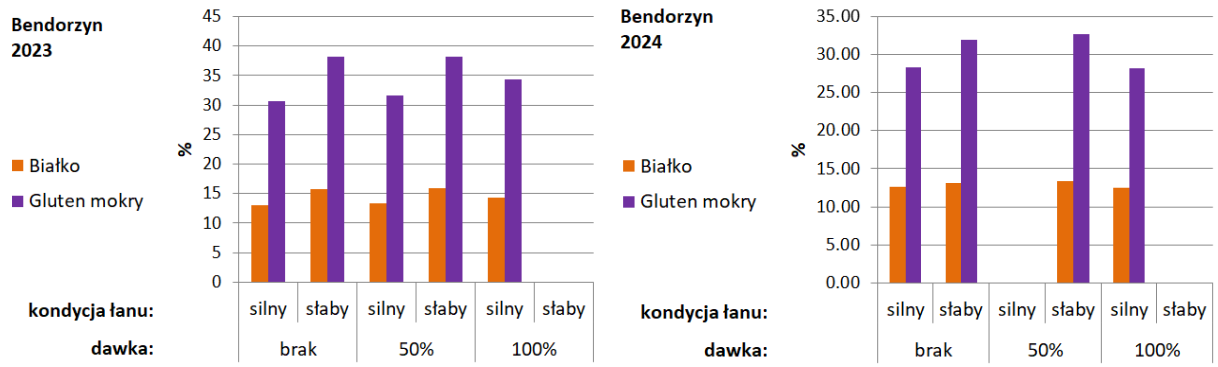


Ilustracja 12. Podgląd zobrazowania dronem wykonanego 15 czerwca 2024 r. (Gospodarstwo Rolne Aliny, Katarzyny i Zdzisława Chmielewskich).

5. Wyniki

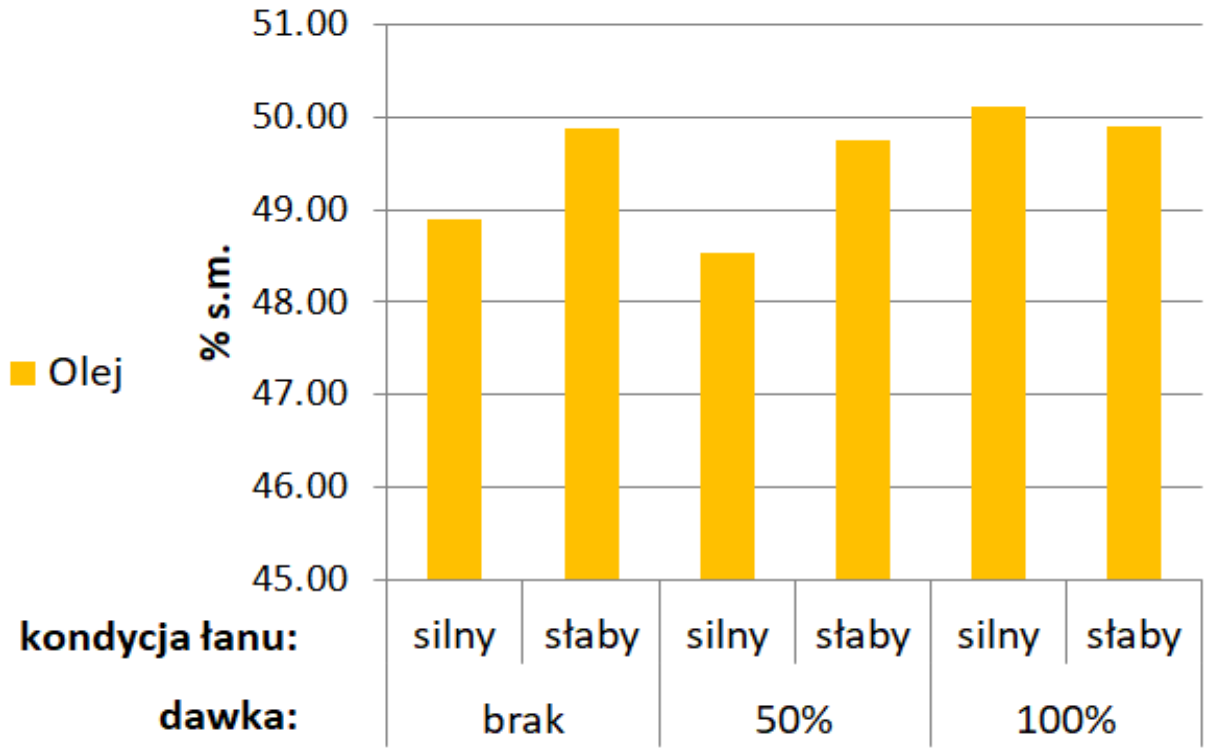
Analiza wszystkich przeprowadzonych doświadczeń terenowych wykazała, że zabiegi skracania miały minimalny pozytywny wpływ na parametry plonu pszenicy. Dotyczy to zarówno zawartości białka jak i glutenu. Prawdopodobnie relatywnie niewielki efekt skracania można przypisać faktowi, że sezon 2024 praktycznie na wszystkich badanych polach uprawnych był wyjątkowo suchy. W związku z tym plon kształtowany był wtedy przede wszystkim przez ograniczoną dostępność wody.

Co ważne, wyniki doświadczeń wskazują na kluczową rolę gęstości łanu w kształtowaniu parametrów plonu. Dwa spośród badanych pól uprawnych (Pola uprawne “Bendorzyn” - Gospodarstwo Rolne Aleksandry Kawskiej) charakteryzowały się znaczną zmiennością warunków glebowych, która pozwoliła zbadać interakcje między dawkowaniem czynnika skracającego a gęstością łanu. Łan mniej gęsty miał plon lepszej jakości, niezależnie od dawki środka skracającego. Wynika to zapewne z tego, że poszczególne rośliny miały do dyspozycji więcej składników odżywczych - były pod mniejsza presją konkurencyjną. Relatywnie niewielka pozytywna reakcja łanu gęstszego na skracanie była znacznie mniejsza niż sam pozytywny wpływ obsady na te same parametry.



Ilustracja 13. Podsumowanie eksperymentów terenowych dotyczących pszenicy ozimej.

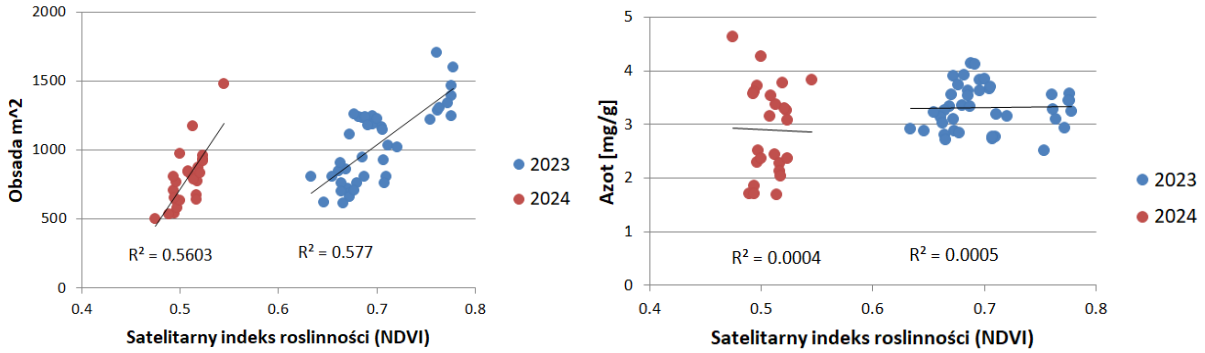
Większość pól rzepaku badanych w suchym sezonie 2024 (Tabela 1), w którym nie zaobserwowano istotnego wpływu skracania na parametry plonu. Doświadczenie z sezonu 2023 (Ilustracja 10) wykazało, że, podobnie jak w przypadku pszenicy, rzadszy łan produkuje plon lepszej jakości. Doświadczenie wykazało ponadto, że skracanie może zmniejszyć różnice w jakości plonu pomiędzy łanem rzadszym i gęstszym, niemniej efekt był mniej wyraźny niż w przypadku pszenicy.



Ilustracja 14. Podsumowanie eksperymentów terenowych dotyczących rzepaku ozimego.

Podsumowując kwestię efektu regulatora wzrostu, początkowa gęstość łanu miała kluczowe znaczenie dla jakości plonu. Można to tłumaczyć dostępnością zasobów przypadających na pojedynczą roślinę. Zastosowane zróżnicowane dawki regulatora wzrostu były w stanie minimalnie poprawić jakość plonu, niemniej początkowa gęstość pozostawała czynnikiem decydującym. Być może gdyby sezon 2024 nie był dotknięty suszą to efekt regulatora wzrostu byłby bardziej zauważalny.

W ostatnich latach monitoring satelitarny staje się coraz szerzej uznanym standardowym elementem rolnictwa precyzyjnego i cyfrowego. W procesie ewaluacji doświadczeń szczególną uwagę poświęcono kwestii możliwości oceny kondycji łanu przy pomocy danych satelitarnych. Poddano krytycznej ocenie możliwości najczęściej stosowanego wskaźnika NDVI (Normalised Difference Vegetation Index). Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że NDVI dobrze charakteryzuje gęstość łanu, natomiast nie jest praktycznie skorelowany z ilością azotu na jednostkę biomasy (Ilustracja 11). Należy tutaj zaznaczyć, że wyniki opierają się na porównaniu odczytu sensora satelitarnego dotyczącego około 80 m^2 powierzchni uprawy z przeanalizowaną w laboratorium próbką reprezentującą powierzchnię prawie dwa rzędy wielkości mniejszą. Można oczekiwać, że w przypadku porównania pomiarów dotyczących podobnej wielkości powierzchni wartości R^2 byłyby wyższe, co potwierdzają pokazane poniżej wyniki dotyczące nalotów dronami. Niemniej to relatywna różnica w korelacji NDVI z obsadą i zawartością azotu jest istotna, i wskazuje ona na zasadność tezy, że NDVI dużo lepiej sprawdza się jako miara ogólnej ilości żywej biomasy na jednostce powierzchni gleby, niż miara zawartości azotu, lub zapotrzebowania uprawy na niego. To stwierdzenie w szczególności dotyczy przypadków, kiedy uprawa całkowicie pokrywa glebę i ilość azotu jest przede wszystkim funkcją parametrów tkanek uprawy, a nie stopniem pokrywania przez nią dostępnej powierzchni gruntu.

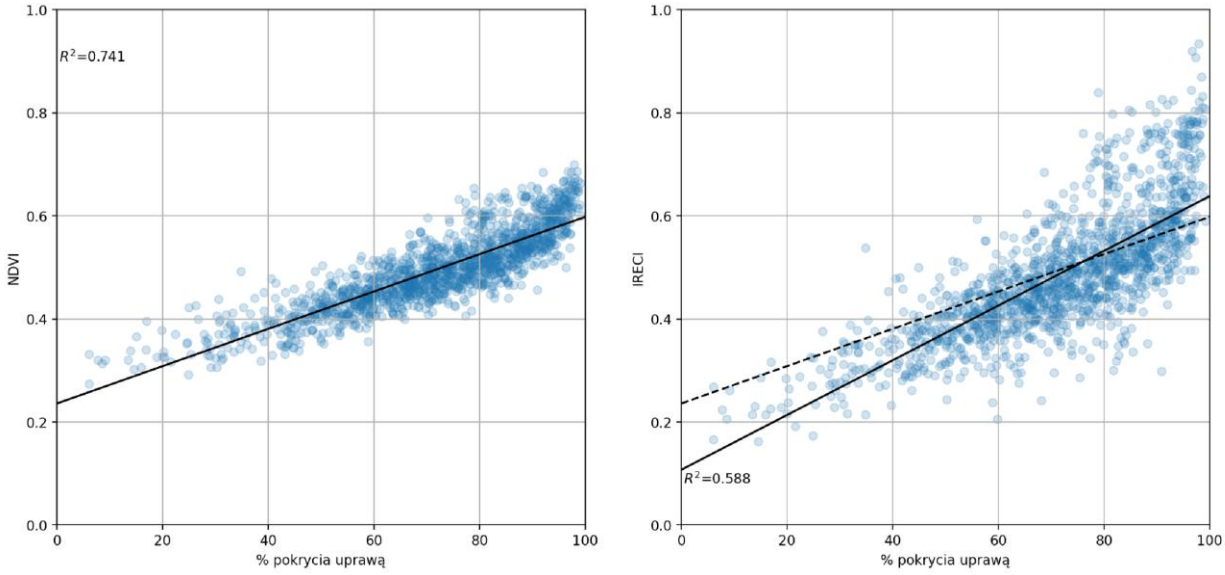


Ilustracja 15. Korelacja pomiędzy satelitarnym indeksem roślinności (NDVI, 10 m^2) i gęstością łanu (1 m bieżący) oraz zawartością azotu (próbka z 1 m bieżącego).

Dane pozyskane przy pomocy dronów, dzięki którym można było w wysokiej rozdzielczości sklasyfikować całą powierzchnię pól uprawnych, pozwoliły potwierdzić, że wskaźnik NDVI jest dobrą charakterystyką pokrycia gleby łanem. Jednocześnie wykazano, że przedstawiony dalej w raporcie nowy wskaźnik HyVeg1 przyjmuje bardziej zróżnicowane wartości na spektrum pokrycia gleby uprawą, co jest pośrednim dowodem na to, że jego wartości kształtowane są również przez inne parametry łanu, szczególnie zawartość azotu w tkankach. Jak wskazuje literatura, w szczególności Frampton i in. (2013)[1], wskaźnik IRECI wykorzystany przy konstrukcji HyVeg jest niemal bezpośrednim odzwierciedleniem zawartości chlorofilu w łanie w g/m^2 dla analizowanego przez autorów zestawu danych. Szczególnie włączenie pasm Red Edge miało duży wpływ na zwiększenie korelacji, jednocześnie łagodząc typowy dla NDVI efekt nasycenia przy wyższej zawartości chlorofilu w łanie. Niemniej należy zwrócić uwagę, że przy niepełnym pokryciu gruntu to właśnie ten czynnik głównie kształtuje ogólne zapotrzebowanie uprawy na azot (tzn. uprawy traktowanej jako powierzchnia pola, dla której planuje się zabiegi agrotechniczne), a w tej sytuacji NDVI sprawdza się bardzo dobrze. Stąd pomysł opisanego dalej bardziej szczegółowo wskaźnika HyVeg, który łączy zalety NDVI i IRECI.

Poniższa ilustracja (12) potwierdza, że wartości NDVI są przede wszystkim funkcją stopnia pokrycia gruntu łanem. Za niższą korelację w przypadku wskaźnika HyVeg szczególnie odpowiedzialny jest duży zakres jego zmienności przy pełnym pokryciu gruntu, co jest miarą zróżnicowanej kondycji uprawy i zawartości azotu w jej tkankach.

[1] Frampton, William James, Jadunandan Dash, Gary Watmough, and Edward James Milton. 2013. "Evaluating the Capabilities of Sentinel-2 for Quantitative Estimation of Biophysical Variables in Vegetation." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82 (August):83–92. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007.



Ilustracja 16. Korelacja pomiędzy satelitarnym indeksem roślinności (NDVI, HyVeg1) i stopniem pokrycia gleby uprawą. Na wykresie po prawej stronie linia przerywaną pokazana jest ta sama liniowa korelacja, która przedstawiona jest na lewym wykresie i dotyczy NDVI.

Podsumowując wyniki przeprowadzonych eksperymentów z szerszej perspektywy, można wysunąć wniosek, że dla jakości plonu takie czynniki jak gęstość zasiewu, stopień przezimowania i odżywienia są kluczowe, natomiast regulacja łanu jest czynnikiem wtórnym, którego zakres działania jest ograniczony w porównaniu do tych podstawowych czynników.

Doświadczenia pośrednio potwierdziły konieczność kompleksowego podejścia do rolnictwa precyzyjnego. Jednocześnie były one dodatkową motywacją do stworzenia rozwiązań wspierających ewaluację doświadczeń rolniczych w skali pól uprawnych i całego gospodarstwa, które można zastosować do różnych typów zabiegów precyzyjnych.

6. Prace konceptualne i informatyczne

6.1 Metodyka badań konceptualnych i informatycznych

6.1.1 Indeksy roślinności

Wraz z coraz bardziej zaawansowanymi spektralnymi sensorami satelitarnymi stopniowo zwiększającymi swój udział w domenie monitorowania powierzchni ziemi, operacyjny monitoring roślinności ma szansę wyjść poza obecny standard NDVI (Normalised Difference Vegetation Index). NDVI ma tę ogromną zaletę, że jest prosty, znormalizowany (zakres wartości 0-1), szeroko stosowany i znany wielu użytkownikom, także spoza społeczności teledetekcyjnej. Ma jednak jedną istotną wadę - saturuje się, co w praktyce prowadzi do niemożności pokazania zmienności na terenie pokrytym bujną roślinnością. W kontekście monitorowania upraw przekłada się to na ograniczoną przydatność na zaawansowanych etapach wzrostu, np. niemożność pełnego wykorzystania dostępnych technologii do precyzyjnego nawożenia i stosowania pestycydów.

W wyniku przeglądu literatury przeanalizowano grupę bardziej złożonych wskaźników, które wykorzystują pasma spektralne dostosowane do wykrywania roślinności, takie jak czerwona krawędź (ang. Red edge), które pozwalają na rozróżnienie stanu roślinności z lepszą precyzją radiometryczną. Przykłady obejmują S2REP i IRECI, pierwotnie zaproponowane przez Frampton et al (2013) w kontekście czujników MSI na pokładzie satelitów Sentinel-2.

Następnie w wyniku statystycznej analizy powyższych wskaźników w kontekście polskich upraw zaproponowano nowe podejście do operacyjnego wykrywania roślinności w oparciu o hybrydowy indeks roślinności, który wykorzystuje NDVI jako podstawę i rozszerza go w oparciu o bardziej zaawansowany indeks IRECI. Podejście to łączy mocne strony obu indeksów, unikając jednocześnie dostarczania nadmiarowych informacji, co jest ważne w warunkach operacyjnych. Co więcej, zaletą tego podejścia jest kompatybilność wsteczna z wynikami i aplikacjami opartymi na NDVI.

6.1.2 Interfejs wspomagający prowadzenie i ocenę eksperymentów terenowych

W trakcie realizacji projektu przeprowadzono grupę fokusową obejmującą uczestników projektu oraz szereg pogłębionych indywidualnych wywiadów z klientami platformy SatAgro. Wywiad pogłębiony jest techniką badania jakościowego polegającą na prowadzeniu intensywnych indywidualnych wywiadów z niewielką liczbą respondentów, w celu zbadania ich punktu widzenia na temat konkretnej idei, programu lub sytuacji. Podstawową zaletą wywiadów pogłębionych jest to, że dostarczają one o wiele bardziej szczegółowych informacji niż te, które są dostępne za pomocą innych metod zbierania danych, takich jak ankiety. Wywiady pogłębione powinny być stosowane zamiast grup fokusowych, jeśli potencjalni uczestnicy nie mogą być włączeni lub nie mogą swobodnie rozmawiać otwarcie w grupie, czy też, jeśli chce się poznać indywidualne opinie. Wywiad indywidualny ma bardziej kameralny charakter niż grupa fokusowa i jest elastyczny – może się odbywać w miejscu i czasie dogodnym dla respondentów, a także pozwala respondentowi na dłuższą i pełniejszą wypowiedź.

Podatność na stronniczość to jedno z ograniczeń przeprowadzania wywiadów pogłębionych. Ponieważ personel programu lub kliniki może chcieć "udowodnić", że program działa, ich odpowiedzi na wywiad mogą być stronnicze. Odpowiedzi członków społeczności i uczestników programu mogą być również tendencyjne ze względu na ich udział w programie lub z innych powodów. Dołożono wszelkich starań, aby wywiady były przeprowadzone sposób jak najmniej stronniczy.

6.2 Wyniki

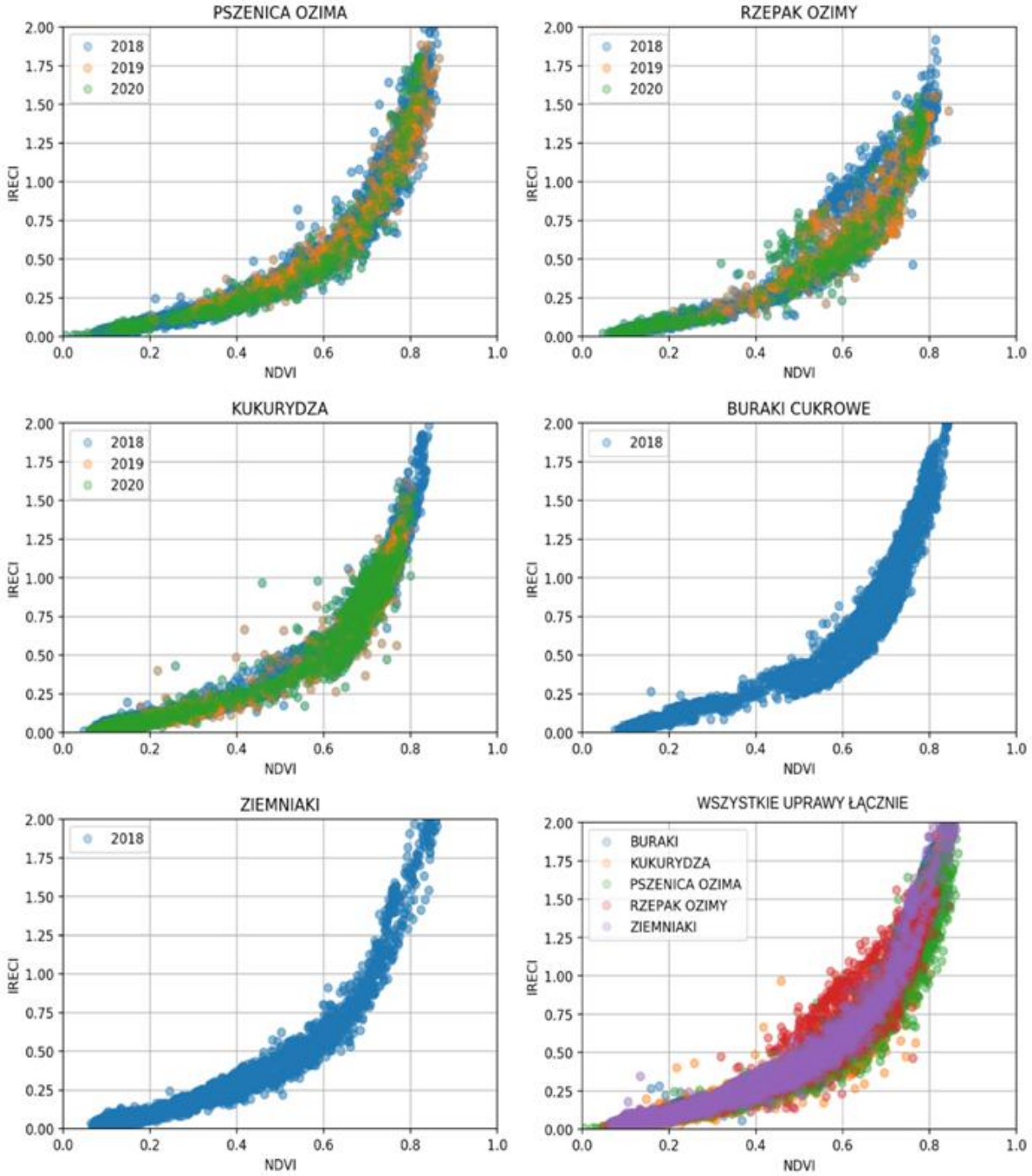
6.2.1 Indeksy roślinności

W pierwszym etapie zbadano wyselekcjonowany na podstawie literatury naukowej wskaźnik IRECI i porównano go ze standardowo stosowanym najpopularniejszym wskaźnikiem NDVI. Ilustracja 13 pokazuje, że NDVI i IRECI są ze sobą mocno skorelowane, ale nieliniowo. W konsekwencji NDVI bardziej nadaje się do charakterystyki łanu na początku sezonu (większa czułość), a IRECI - na końcu. Ogromna zaletą IRECI

jest fakt, że wskaźnik nie saturuje się tak jak NDVI w momencie, kiedy cała gleba zasłonięta jest łanem.

Tabela 1. Formuły wskaźników NDVI i IRECI oraz ich implementacja w sensorach satelitarnych

Wskaźnik	**Formuła**	**Kanały spektralne Sentinel-2**	**Kanały spektralne Planet SuperDove**
NDVI	(NIR – R)/(NIR + R)	(B8 – B4)/(B8 + B4)	(B13 – B5)/(B13 + B5)
IRECI	(NIR – R)/(RE1/RE2)	(B7 - B4)/(B5/B6)	(B13 – B5)/(B10/B13)



Ilustracja 17. Relacja NDVI i IRECI dla pięciu gatunków upraw.

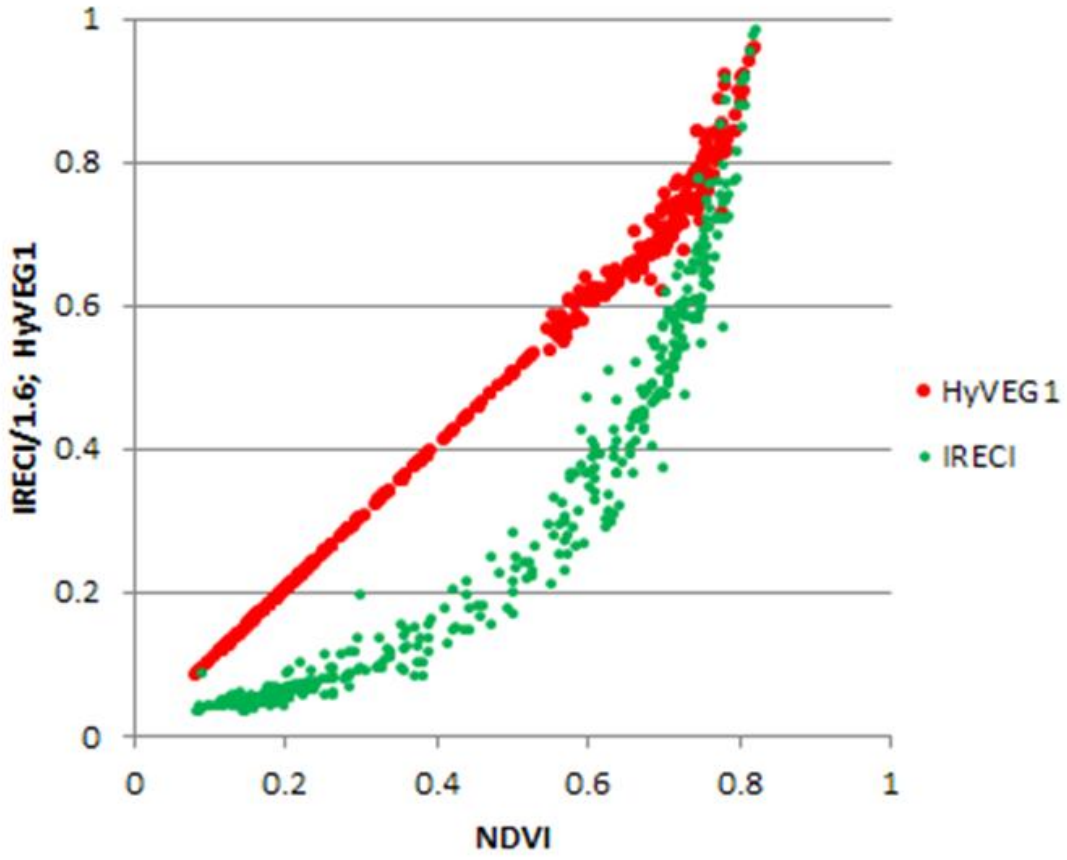
Następnie wskaźnik IRECI skalibrowano tak, żeby jego zakres dla wszystkich upraw mieścił się w zakresie <0,1>, tak jak NDVI, oraz, żeby wartości obu wskaźników w zakresie podobnej czułości przyjmowały podobne wartości. W wyniku tej transformacji

wskaźnik IRECI nadaje się do stworzenia, zgodnie z procedurą opisaną w Tabeli 2, “hybrydy”, której niższe wartości odpowiadają wskaźnikowi NDVI, środkowe wartości: średniej obu wskaźników, a wysokie: wartościom IRECI.

Tabela 2. Integracja wskaźnika NDVI i skalibrowanego wskaźnika IRECI do hybrydowego wskaźnika HyVeg1

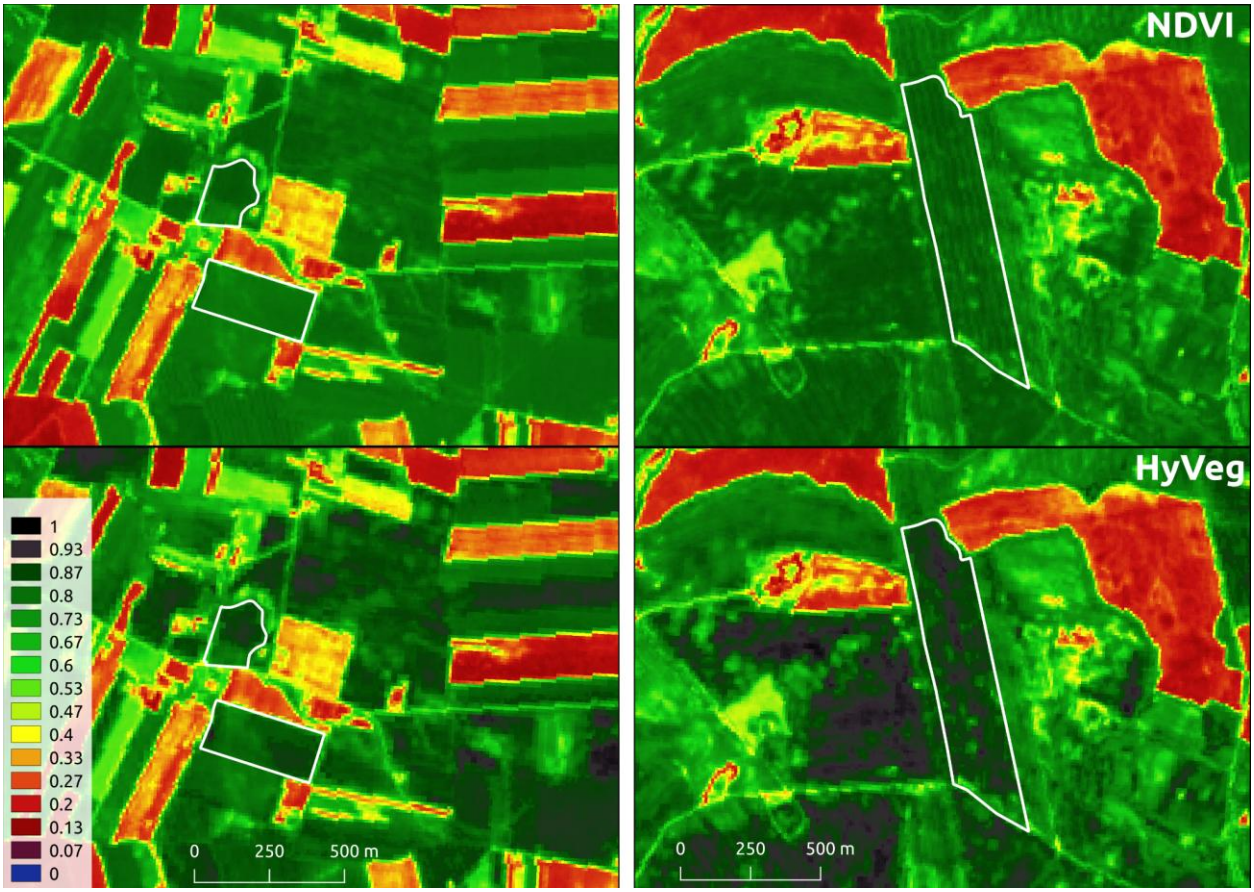
	Zakres NDVI	**Integracja HyVeg1**
1.	0.00-0.52	HyVI1 = NDVI
2.	0.52-0.56	HyVI1 = (0.75NDVI + 0.25IRECI’) / 2
3.	0.56-0.60	HyVI1 = (0.50NDVI + 0.50IRECI’) / 2
4.	0.60-0.64	HyVI1 = (0.25NDVI + 0.75IRECI’) / 2
5.	0.64-1.00	HyVI1 = IRECI`

Skonstruowany w ten sposób hybrydowy wskaźnik HyVeg1 przedstawiono na rysunku 14 w zestawieniu z NDVI. Można zauważyć, że zakres dynamiczny nowego indeksu został rozszerzony poza ~0,8, gdzie indeks NDVI ma tendencję do nasycania się. Takie zachowanie ułatwia typowe satelitarne monitorowanie upraw, z dodatkową korzyścią w postaci rozszerzonej możliwości rozróżnienia zmiennych warunków upraw w oknie czasowym, w którym wskaźnik NDVI często przestaje być użyteczny.



Ilustracja 18. Wizualizacja zakresu wartości przyjmowanych przez hybrydowy wskaźnik roślinności (czerwony) i wskaźnik IRECI.

Ilustracja 15 jest wizualizacją fragmentów krajobrazu rolniczego, obejmującego dwa gospodarstwa, w których przeprowadzono doświadczenia polowe: Gospodarstwo Rolne Aleksandry Kawskiej (po lewej) oraz Gospodarstwo Rolne Aliny, Katarzyny i Zdzisława Chmielewskich (po prawej). Widoczny jest powiększony zakres dynamiczny wskaźnika HyVeg1. W szczególności pozwala on wykryć pionowy pas łanu odpowiadający kontroli w doświadczeniu terenowym (bez skracania - prawy dolny róg ilustracji).



Ilustracja 19. Wizualizacja fragmentów krajobrazu rolniczego (po lewej: Gospodarstwo Rolne Aleksandry Kawskiej; po prawej: Gospodarstwo Rolne Aliny, Katarzyny i Zdzisława Chmielewskich) przy użyciu standardowego wskaźnika roślinności NDVI oraz zaproponowanego w projekcie wskaźnika HyVeg1. W prawym dolnym rogu widoczny jest pas łanu odpowiadający kontroli w doświadczeniu terenowym (bez skracania).

6.2.2 Interfejs wspomagający prowadzenie i ocenę doświadczeń terenowych

Nowe elementy platformy SatAgro opracowane celem wsparcia procesu planowania, realizacji i oceny eksperymentów (doświadczeń) terenowych można podzielić na trzy grupy.

Pierwsza grupa to elementy systemowe, niewidoczne dla użytkownika (backend), które umożliwiają zdefiniowanie eksperymentu, jako nowego elementu systemu danych użytkownika platformy. Eksperyment to nowa klasa danych. Każdy jej element powiązany jest z danym polem uprawnym i okresem uprawy, a także z grupą powierzchni

doświadczalnych, które determinują warianty doświadczenia i mają swoje specyficzne dawki zastosowane w poszczególnych zabiegach.

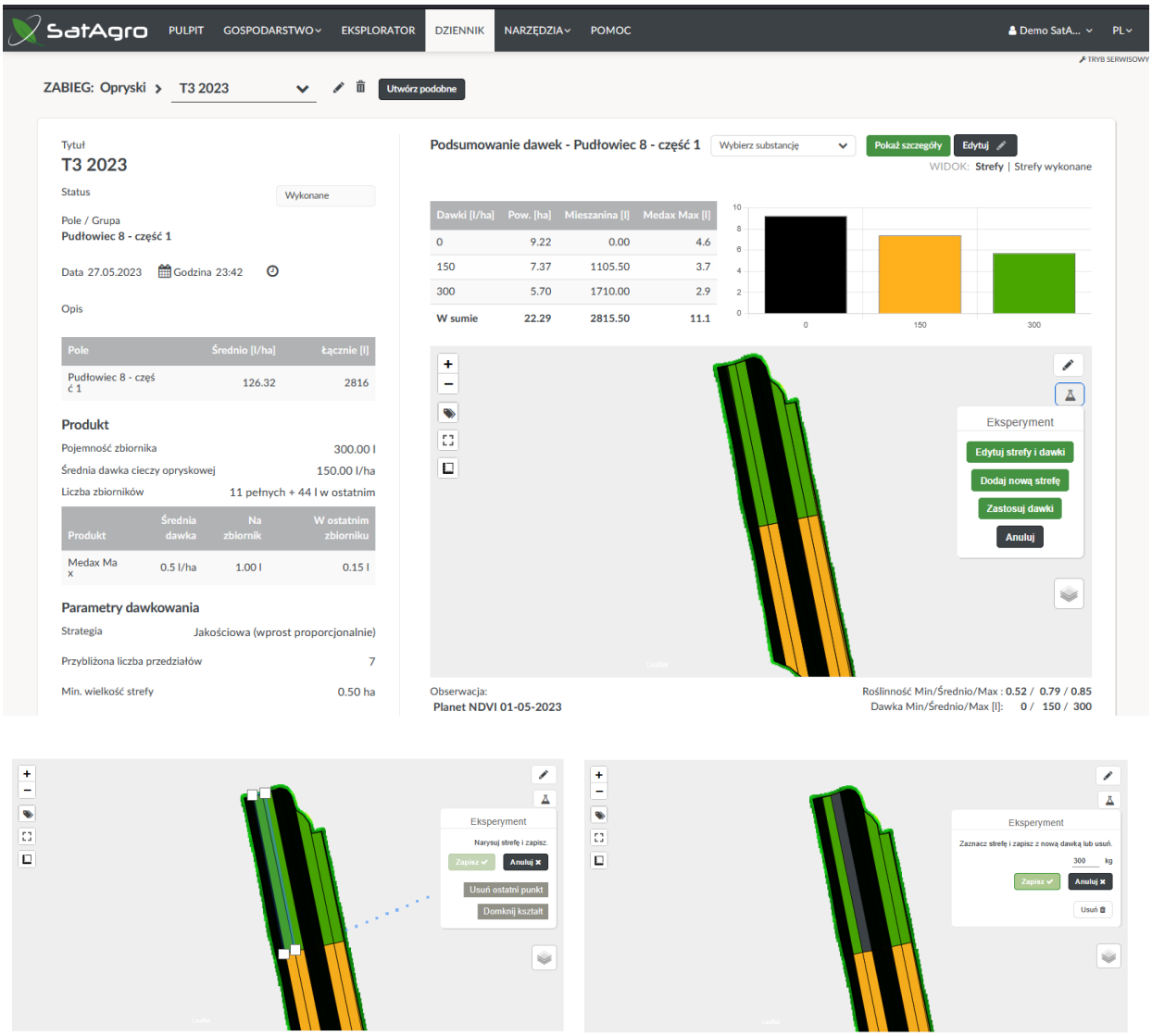
Ponieważ doświadczenie terenowe często obejmuje kilka zabiegów, platforma SatAgro musiała zostać zmodyfikowana aby umożliwić automatyczne sumowanie dawek substancji czynnych w formacie mapy. Funkcjonalność ta jest kluczowa dla właściwej charakterystyki eksperymentu, w którym aspekt przestrzenny odgrywa ważną rolę.

Druga grupa nowych elementów platformy obejmuje elementy interfejsu, przedstawione na Ilustracji 16, które pozwalają użytkownikowi zdefiniować (narysować) poszczególne powierzchnie eksperymentalne i nadać im wymagane dawki substancji czynnej, której dotyczy eksperyment. Do widoku mapy dodano nowy panel, który zawiera następujące funkcjonalności:

- definiowanie (rysowanie) powierzchni, na której zastosowano jednolitą dawkę i która jest tożsama z wariantem eksperymentu;

- przyporządkowanie dawki do powierzchni / wariantu eksperymentu;

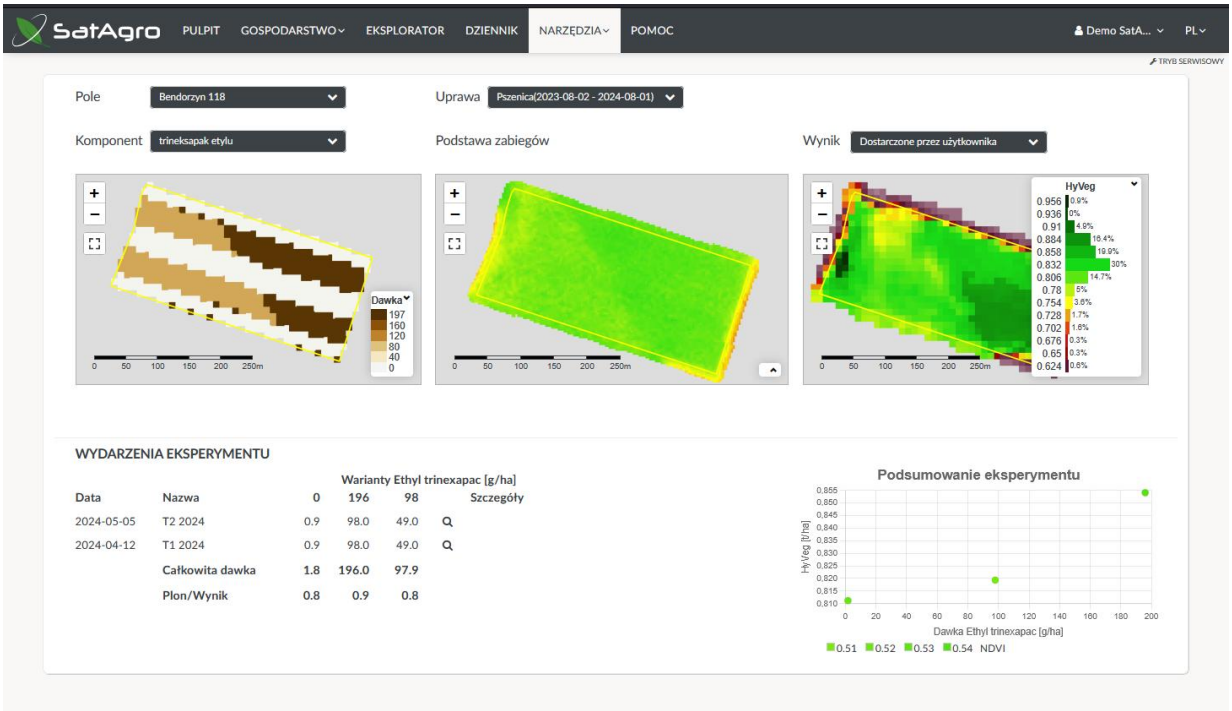
- integracja powierzchni i dawki reprezentującej wariant eksperymentu z precyzyjną mapą aplikacyjną dla konkretnego zabiegu agrotechnicznego.



Ilustracja 20. Nowe elementy interfejsu platformy SatAgro służące do definicji wariantów doświadczenia terenowego oraz powiązanych z nimi powierzchni pola uprawnego

Trzecia grupa, kluczowa, to cały moduł (podstrona) platformy SatAgro dedykowany ewaluacji doświadczenia terenowego.

Poniższa ilustracja przedstawia wariant interfejsu modułu, w którym jako zmienna zależna użyta została warstwa ze wskaźnikiem HyVeg1 z daty, w której uprawa była w szczytowym okresie rozwoju (w tym czasie wskaźnik dobrze koreluje się z plonem).



Ilustracja 21. Nowy interfejs platformy SatAgro służący do ewaluacji doświadczenia terenowego - przypadek, w którym zmienną zależną jest wskaźnik wyliczony na podstawie danych satelitarnych.

Moduł zawiera następujące elementy:

1. Interfejs selekcjonujący doświadczenia

Na górze interfejsu znajdują się rozwijane listy które pozwalają wyselekcjonować analizowany eksperyment przy użyciu trzech parametrów: pole, uprawa, komponent. Komponent to inaczej czynny składnik dawkowanego środka. Jeżeli dawkowany środek zawierał kilka czynnych składników to wszystkie one będą dostępne do wyboru na liście “Komponent”. Ponadto czwarta lista rozwijana dotyczy formatu wyniku eksperymentu.

2. Mapa podsumowująca zastosowane w eksperymencie dawkowanie

Pierwsza mapa modułu służy do wizualizacji rozłożenia w przestrzeni poszczególnych dawek wariantów doświadczenia, a także dawek poza doświadczeniem. Dawki stanowią zmienną niezależną w doświadczeniu. Dotyczą one opisanego wyżej wyselekcjonowanego komponentu.

3. Mapa wizualizująca warstwę powiązaną w dawkowaniem

Druga mapa modułu służy do wizualizacji rozłożenia w przestrzeni czynnika, który był podstawą różnicowania zmiennej niezależnej. Czynnik ten jest zmienną opisującą środowisko, w którym przeprowadzane było doświadczenie. Przewiduje się, że w większości przypadków jest nim kondycja łanu, scharakteryzowana przy pomocy wskaźnika roślinności. Niemniej może to być jakakolwiek mapa będąca podstawą dawkowania, np. mapa zasobności glebowej, albo geomorfologia powierzchni pola uprawnego.

4. Mapa wizualizująca warstwę stanowiącą zmienną zależną

Trzecia mapa modułu służy do wizualizacji rozłożenia w przestrzeni zmiennej opisującej wynik eksperymentu. Domyślnie jest nim mapa plonu, dostarczona przez użytkownika mapa pochodząca z kombajnu, lub wysymulowana przez system na podstawie wcześniej zdefiniowanych stref zmiennego plonowania (zwanych także strefami zarządzania). Mapa ta jest wizualizacją zmiennej zależnej w doświadczeniu.

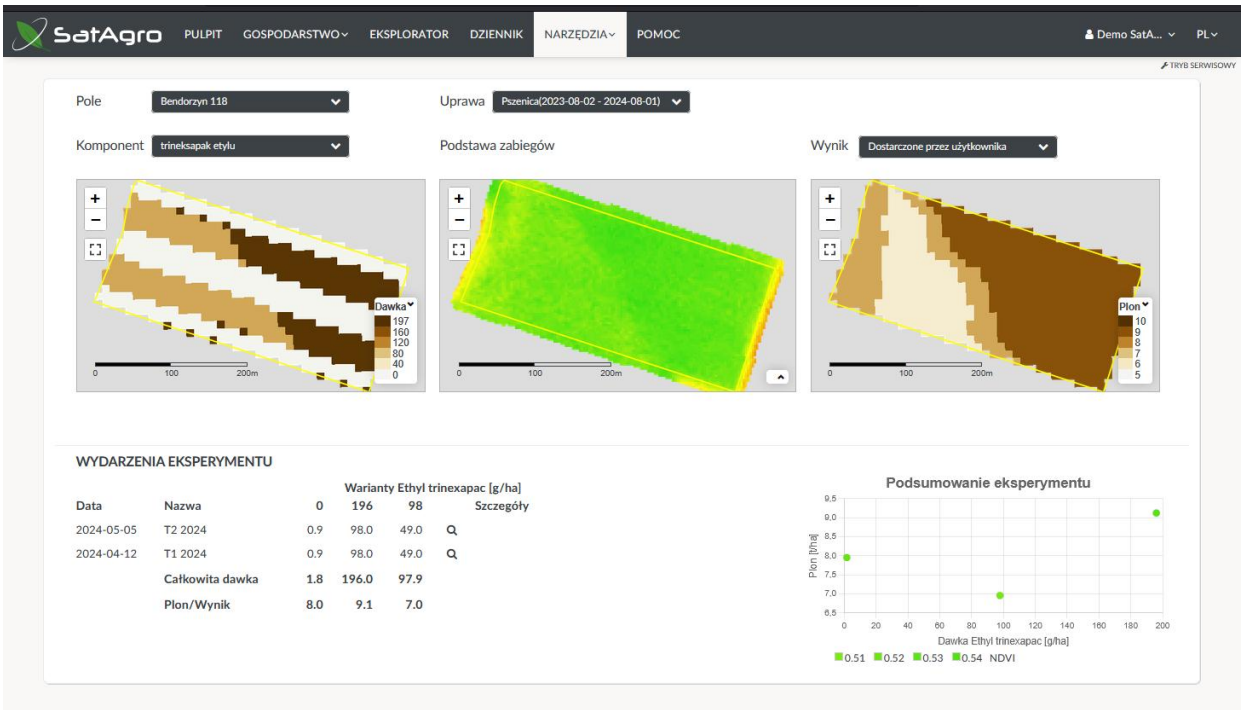
5. Tabela

Tabela przedstawia listę wykonanych w eksperymencie zabiegów, sumaryczną dawkę substancji czynnej w każdym wariancie (także w wariancie obejmującym część pola nie pokryta powierzchniami eksperymentalnymi), oraz wartość zmiennej zależnej obliczoną dla każdego wariantu eksperymentu.

6. Wykres

Wykres pozwala na graficzne podsumowanie wyników doświadczenia. Podsumowuje on zależność pomiędzy zmienną niezależną (oś X) i zależną (oś Y), jednocześnie pokazując, poprzez kolory, wartości trzeciej zmiennej, która opisuje środowisko przeprowadzanego eksperymentu, i na podstawie której różnicowane było dawkowanie badanego środka produkcji.

Ilustracja poniżej przedstawia wariant interfejsu, w którym zmienna zależna to mapa plonu.



Ilustracja 22. Nowy interfejs platformy SatAgro służący do ewaluacji doświadczenia terenowego - przypadek, w którym zmienną zależną jest mapa plonu.

Nowa właściwość platformy SatAgro, utworzona w ramach realizacji projektu, pozwalająca na automatyczne sumowanie dawek substancji czynnych w formacie mapy, otwiera nowe możliwości rozwoju kolejnych narzędzi wspierających optymalizację uprawy. Planowane jest wykorzystanie tej funkcjonalności do efektywnego mapowania wykorzystania wszystkich środków produkcji stosowanych w zabiegach agrotechnicznych, a także szacowania wpływu na środowisko, w tym emisyjności.

7. Innowacyjność operacji

Realizacja operacji badawczo-wdrożeniowej, której przedmiotem było opracowanie i przetestowanie modelu zmiennego dawkowania regulatorów wzrostu z wykorzystaniem danych satelitarnych i narzędzi cyfrowych, przyniosła wyniki, które w sposób jednoznaczny korespondują z pierwotnie zadeklarowaną innowacyjnością projektu. Wnioski płynące z analizy doświadczeń terenowych, korelacje empiryczne oraz skuteczność opracowanego oprogramowania cyfrowego potwierdzają, że operacja nie tylko odpowiadała na realne potrzeby współczesnego rolnictwa, ale również materializuje postulaty wynikające z europejskich i krajowych strategii transformacji sektora rolnego.

Jednym z podstawowych celów operacji było wdrożenie narzędzia, które pozwoli na obiektywną ocenę zapotrzebowania uprawy na dawkę regulatora wzrostu, z uwzględnieniem zróżnicowania przestrzennego i zmiennego rozwoju roślin w obrębie jednego pola. Tak sformułowany cel jest bezpośrednią odpowiedzią na postulat zrównoważonego rozwoju rolnictwa – zmniejszenia zużycia środków produkcji przy jednoczesnym utrzymaniu lub zwiększeniu wydajności produkcji. Wyniki uzyskane w trakcie realizacji projektu potwierdzają zasadność przyjętej koncepcji, wskazując, że skracanie może zmniejszyć różnice w jakości plonu pomiędzy łanem rzadszym i gęstszym.

Zastosowanie nowych indeksów roślinności, takich jak HyVeg1, opracowanych w ramach operacji jako odpowiedź na ograniczenia klasycznego NDVI, umożliwiło lepsze rozróżnianie fazy rozwojowej i stanu fizjologicznego upraw. NDVI – mimo że powszechnie stosowany – okazał się niewystarczający do wiarygodnego różnicowania łanów w zaawansowanych fazach rozwoju, kiedy rośliny pokrywają już całą powierzchnię gleby i zjawisko saturacji zakłóca odczyty. Wskaźnik HyVeg, oparty m.in. na komponentach red edge, wykazał znacznie większą czułość na zmiany zawartości chlorofilu i biomasy, co przełożyło się na możliwość bardziej precyzyjnego projektowania map aplikacyjnych.

Otrzymane wyniki jednoznacznie potwierdzają tezę zawartą w opinii o innowacyjności, zgodnie z którą utrzymanie konkurencyjności gospodarstw wymaga wdrażania narzędzi umożliwiających skuteczne różnicowanie zabiegów. Dostosowanie dawki regulatora wzrostu do lokalnych warunków glebowo-roślinnych, realizowane na podstawie analiz danych satelitarnych i UAV, przynosi wymierne efekty zarówno w sferze agronomicznej, jak i środowiskowej – umożliwiając redukcję zużycia substancji aktywnych i ograniczenie ich wpływu na ekosystem.

Zastosowane rozwiązania potwierdzają również potencjał badawczo-rozwojowy operacji – rozwijane oprogramowanie cyfrowe, generujące zmienne mapy oprysku, zostało zintegrowane z maszynami polowymi wyposażonymi w systemy precyzyjnego prowadzenia i umożliwiało realne wdrożenie strategii zmiennej dawki w warunkach gospodarstw operacyjnych. Zdolność do współpracy z terminalami ISOBUS i implementacja formatów danych kompatybilnych z najnowszymi urządzeniami rolniczymi udowadniają dojrzałość technologiczną produktu końcowego.

Analiza wyników operacji przeprowadzona w kontekście szeroko zakrojonych celów badawczo-rozwojowych wykazała, że projekt w pełni zrealizował postulaty wynikające z dokumentów takich jak Strategia Zrównoważonego Rozwoju Wsi, Rolnictwa i Rybactwa, Europejski Zielony Ład, czy Plan dla Wsi. Postęp technologiczny osiągnięty w ramach operacji stanowi wyraźny krok w stronę integracji nowoczesnych rozwiązań cyfrowych w codziennej praktyce agrotechnicznej, umożliwiając przełożenie wiedzy naukowej na konkretne narzędzia stosowane przez rolników w gospodarstwach różnej wielkości.
Jednym z kluczowych elementów tej innowacyjności jest możliwość szybkiej, zdalnej oceny skutków zastosowania regulatora wzrostu. Wprowadzenie takich funkcjonalności – opartych na danych satelitarnych i UAV – pozwala na monitorowanie reakcji uprawy w czasie rzeczywistym, co jeszcze kilka lat temu było domeną wyłącznie dużych centrów badawczych i instytutów naukowych. Dzięki zastosowaniu nowych algorytmów oraz dynamicznego rozwoju aplikacji SatAgro, zespół projektowy osiągnął funkcjonalność, która umożliwia rolnikowi podjęcie decyzji dotyczącej dalszych zabiegów w oparciu o dane nie tylko aktualne, ale również wysoce zinterpretowane – czyli przetworzone do postaci użytecznych rekomendacji.

Tym samym projekt bezpośrednio odpowiada na potrzebę wspierania transformacji rolnictwa w kierunku zrównoważonego systemu produkcji żywności, ograniczającego intensyfikację chemiczną i promującego racjonalne gospodarowanie zasobami środowiskowymi. Zastosowanie zmiennego dawkowania regulatorów wzrostu wpisuje się tu jako jedno z głównych narzędzi optymalizacji – zarówno z perspektywy środowiskowej, jak i ekonomicznej. Z jednej strony umożliwia ograniczenie zużycia substancji aktywnych (co ma bezpośredni wpływ na stan gleby, wód gruntowych i bioróżnorodność), z drugiej strony pozwala zwiększyć opłacalność produkcji dzięki precyzyjnemu dostosowaniu zabiegów do rzeczywistego zapotrzebowania uprawy.

Warto podkreślić, że opracowane w ramach projektu rozwiązania organizacyjne również mają charakter innowacyjny.

Stworzenie aplikacji umożliwiającej nie tylko planowanie, ale również przeprowadzanie i ewaluację eksperymentów polowych w skali całego gospodarstwa stanowi przełom w podejściu do prowadzenia doświadczeń w warunkach operacyjnych. Rolnik nie musi już angażować instytucji naukowej, aby w sposób metodyczny porównywać efektywność różnych wariantów agrotechnicznych – narzędzie cyfrowe umożliwia to w sposób zautomatyzowany, transparentny i porównywalny w czasie.

Takie podejście pozwala na realizację nowej formuły tzw. „rolnictwa jako laboratorium" (ang. on-farm experimentation) – koncepcji promowanej m.in. przez Międzynarodowy Instytut Badań nad Polityką Żywnościową (IFPRI) czy Europejską Sieć na rzecz Badań w Rolnictwie (ERA-NET). Włączenie gospodarstw rolnych do procesu generowania wiedzy i danych empirycznych nie tylko zwiększa trafność wypracowywanych rozwiązań, ale także buduje zaufanie użytkowników końcowych do stosowanych innowacji, co w istotny sposób przyspiesza ich wdrażanie w praktyce.

W ramach projektu zrealizowano także postulaty związane z dostępnością technologii – aplikacja została opracowana z myślą o szerokim przekroju gospodarstw, zarówno pod względem powierzchni, jak i zaplecza technicznego. Dzięki zastosowaniu formatów otwartych i zgodności z systemami stosowanymi przez wiodących producentów maszyn rolniczych, rozwiązanie jest gotowe do wdrożenia bez konieczności inwestycji w nowy sprzęt. To bezpośrednio koresponduje z zasadą demokratyzacji dostępu do innowacji, która jest fundamentem polityk takich jak Wspólna Polityka Rolna po 2023 roku.

Co więcej, stworzone w ramach operacji rozwiązania odpowiadają również na aktualne wyzwania związane ze zmianami klimatycznymi. W literaturze naukowej wielokrotnie podkreśla się, że jednym z kluczowych działań adaptacyjnych dla sektora rolniczego jest zwiększenie elastyczności i responsywności systemów produkcji – czyli zdolność do szybkiego reagowania na zmieniające się warunki pogodowe, siedliskowe i fitosanitarne. Precyzyjne mapowanie zapotrzebowania na regulator wzrostu i możliwość bieżącej analizy stanu łanu za pomocą danych satelitarnych stanowi realizację tej koncepcji w praktyce.

Wyniki eksperymentów terenowych dostarczyły również istotnych dowodów potwierdzających potrzebę tworzenia bardziej zaawansowanych wskaźników wegetacyjnych oraz korekcyjnych narzędzi diagnostycznych. Porównania pomiędzy klasycznym NDVI a nowo opracowanym wskaźnikiem HyVeg1 wykazały, że ten drugi cechuje się większą czułością diagnostyczną i niższym poziomem nasycenia przy wysokiej biomasie. Zjawisko to jest szczególnie istotne w przypadku zbóż ozimych, w których łany już we wczesnych fazach wiosennej wegetacji mogą osiągać wysokie wartości NDVI, mimo występowania istotnych różnic w strukturze i kondycji roślin.

Włączenie pasma red-edge oraz wykorzystanie indeksów takich jak IRECI (Improved Red Edge Chlorophyll Index) pozwoliło na lepsze rozróżnianie poziomów zawartości chlorofilu, co stanowi wartość dodaną w kontekście diagnozowania zasobności łanu w azot. Zastosowanie takich wskaźników ma wymiar nie tylko poznawczy, ale również praktyczny i operacyjny – pozwala bowiem na tworzenie map zapotrzebowania na środki ochrony roślin czy nawozy, które są bardziej precyzyjne, dynamiczne i zgodne z rzeczywistym stanem uprawy.

Niezwykle istotnym elementem weryfikacji innowacyjności projektu było również porównanie danych teledetekcyjnych z pomiarami naziemnymi oraz laboratoryjnymi. Analiza porównawcza obrazów satelitarnych i zdjęć z dronów, zestawionych z fizycznymi pomiarami biomasy i składu chemicznego próbek, pozwoliła ocenić wiarygodność algorytmów i wskazać kierunki dalszego rozwoju modeli predykcyjnych. Na tej podstawie opracowano model korelacyjny między strukturą łanu (w szczególności stosunkiem części generatywnych do wegetatywnych) a skutecznością zastosowanego regulatora wzrostu. Pozwoliło to nie tylko na kalibrację wskaźników, ale

również na stworzenie pierwszych wersji funkcjonalnych algorytmów rekomendacyjnych dla precyzyjnych zabiegów ochronnych.

Wyniki jednoznacznie potwierdzają, że zastosowanie podejścia zintegrowanego – łączącego dane satelitarne, UAV, laboratoryjne i operacyjne – jest warunkiem skuteczności precyzyjnych strategii ochrony roślin. Takie podejście, nazywane w literaturze „multi-source data fusion", jest dziś uznawane za jedno z kluczowych narzędzi nowoczesnej. Projekt w sposób wzorcowy implementował tę koncepcję, dowodząc, że integracja różnych źródeł danych znacząco zwiększa skuteczność interwencji oraz ich dopasowanie do potrzeb upraw.

Ponadto, projekt dostarczył istotnych wniosków społecznych i środowiskowych. Przeprowadzone wywiady i konsultacje fokusowe z rolnikami uczestniczącymi w operacji wykazały wysoką akceptację dla wdrażanych rozwiązań, o ile są one dostarczane w formie intuicyjnej, dobrze udokumentowanej i wspieranej doradczo. Rolnicy podkreślali, że głównym czynnikiem zachęcającym do adaptacji innowacji jest przewidywalność efektu ekonomicznego, transparentność procesu decyzyjnego oraz możliwość szybkiej reakcji w przypadku błędnych odczytów czy nieoczekiwanych warunków pogodowych.

Co więcej, operacja – poprzez możliwość ograniczenia ilości zużywanych regulatorów wzrostu bez pogorszenia jakości plonu – spełnia kryteria wskazywane w dokumentach unijnych jako kluczowe dla łagodzenia skutków zmian klimatycznych i ochrony środowiska. Wskaźniki zużycia środków chemicznych na hektar mogą zostać realnie zredukowane przy zachowaniu lub nawet poprawie jakości plonu, co ma ogromne znaczenie w kontekście nowej polityki środowiskowej UE, zakładającej redukcję stosowania pestycydów i regulatorów o 50% do 2030 roku.

Projekt pokazał również, że wdrożenie innowacji może być impulsem dla rozwoju krajowego przemysłu maszyn rolniczych. Opracowane rozwiązania są w pełni kompatybilne z systemami elektronicznymi nowoczesnych maszyn, co może zachęcać producentów do tworzenia urządzeń dedykowanych dla rolnictwa precyzyjnego i cyfrowego. W ten sposób operacja – choć skoncentrowana na aspekcie ochrony upraw – może mieć pozytywny wpływ na rozwój całego ekosystemu innowacji w sektorze rolno-spożywczym.

Zrównoważony rozwój, będący ideologicznym i praktycznym fundamentem operacji, został zrealizowany w sposób kompleksowy – zarówno na poziomie założeń teoretycznych, jak i efektów praktycznych. Wyniki projektu potwierdziły, że narzędzia rolnictwa precyzyjnego, w tym zmienne dawkowanie regulatorów wzrostu, umożliwiają osiągnięcie podwójnego celu strategicznego: optymalizacji produkcji i ochrony środowiska. Tym samym realizacja projektu stanowi przykład operacyjnego wdrożenia idei Zielonego Ładu, a także konkretnej odpowiedzi na założenia Agendy ONZ 2030 w obszarze „Zero głodu" i „Działań na rzecz klimatu".

W kontekście ochrony środowiska naturalnego, wyniki operacji wykazały możliwość redukcji zużycia regulatorów wzrostu na poziomie działki rolniczej. Zmienne dawkowanie – wdrażane na podstawie map generowanych z danych satelitarnych i UAV – pozwalało na znaczące ograniczenie aplikacji w obszarach, które nie wykazywały potrzeby intensywnej ingerencji. Tam, gdzie łan był rzadki, a obsada niska – zabieg okazywał się zbędny lub wymagał mniejszej dawki. To podejście nie tylko zmniejszało zużycie substancji czynnej, ale również minimalizowało ryzyko wypłukiwania środków chemicznych do wód gruntowych czy degradacji życia biologicznego gleby.

Innowacyjność projektu objawia się również w zastosowaniu wskaźników syntetycznych i modeli predykcyjnych. Opracowany algorytm – łączący różnorodne dane – pozwalał na dynamiczne i dostosowane do lokalnych warunków planowanie zabiegów agrotechnicznych. Model uwzględniał również historię zarządzania polem, co pozwalało na jego uczenie się i poprawianie rekomendacji z sezonu na sezon.

Projekt ma także wymiar edukacyjny i transformacyjny. Przeszkolenie członków grupy operacyjnej, ich zaangażowanie w planowanie, realizację i ocenę eksperymentów terenowych stanowiło swoiste laboratorium dla przyszłych liderów transformacji cyfrowej w rolnictwie. Uczestnicy nabyli umiejętności w zakresie interpretacji danych satelitarnych, korzystania z aplikacji mapowych, prowadzenia dokumentacji cyfrowej zabiegów, co w praktyce przyczynia się do budowy kapitału cyfrowego polskiego rolnictwa.

Dodatkową wartością projektu było również umożliwienie prowadzenia tzw. wewnętrznych poletek doświadczalnych w obrębie zwykłych pól produkcyjnych. Dzięki precyzyjnemu różnicowaniu dawek i możliwości porównywania efektów na poziomie subparceli, rolnicy otrzymali narzędzie pozwalające na prowadzenie badań

własnych bez konieczności przerywania produkcji czy ponoszenia dodatkowych kosztów. To podejście, rozwijane już w Kanadzie i Australii, wprowadza nową jakość do procesu podejmowania decyzji na poziomie gospodarstwa – decyzje są oparte na rzeczywistych danych i wynikach doświadczeń przeprowadzonych w warunkach tożsamych z produkcyjnymi.

Równie istotnym aspektem potwierdzającym innowacyjność operacji było udostępnienie narzędzia cyfrowego. Dzięki temu użytkownicy mogą korzystać z rozwiązania w dowolnym miejscu, bez konieczności instalowania dodatkowego oprogramowania, co znacznie zwiększa elastyczność wdrażania i zarządzania produkcją w dynamicznie zmieniających się warunkach pogodowych. Mobilność rozwiązania wpisuje się również w strategię cyfryzacji rolnictwa 4.0, wskazywaną jako jeden z filarów nowoczesnej polityki rolnej UE.

Operacja, dzięki swojej kompleksowej strukturze i iteracyjnemu charakterowi, umożliwiła wygenerowanie nie tylko rozwiązania technologicznego, ale również nowego modelu zarządzania uprawami. Połączenie danych teledetekcyjnych, laboratoryjnych i agrotechnicznych w ramach jednego narzędzia cyfrowego pozwala rolnikom samodzielnie planować, wdrażać i weryfikować zabiegi agrotechniczne na poziomie parceli, uwzględniając zróżnicowanie przestrzenne i czasowe. Taka funkcjonalność odpowiada bezpośrednio na potrzeby identyfikowane przez jednostki doradcze, agencje wdrożeniowe oraz środowiska naukowe.

Z perspektywy wdrożeniowej, projekt dostarczył pełnowartościowego prototypu, gotowego do komercjalizacji i upowszechniania w ramach programów wsparcia cyfryzacji rolnictwa. Interfejs użytkownika, zbudowany w oparciu o rozmowy z rolnikami (w tym członkami grupy operacyjnej), został oceniony jako intuicyjny i funkcjonalny. Wbudowane moduły pozwalają m.in. na:

- wybór pól, upraw i zabiegów,
- generowanie map aplikacyjnych w zależności od stref,
- zapis historii eksperymentów i porównań wyników plonowania,
- eksport map do maszyn i integrację z terminalami ISOBUS,
- przeglądanie wyników analiz teledetekcyjnych na poziomie działki.

Ważnym aspektem innowacyjności jest skalowalność rozwiązania. Oprogramowanie może być stosowane zarówno w gospodarstwach indywidualnych, jak i przez podmioty doradcze, grupy producenckie czy instytuty badawcze. Dzięki modularnej architekturze systemu możliwe jest rozszerzanie go o kolejne funkcjonalności, np. monitoring chorób, szacowanie ryzyka pogodowego czy zarządzanie planami nawożenia. Taki potencjał rozwoju zapewnia długoterminową trwałość efektów operacji i wpisuje się w kierunki wskazywane w unijnych strategiach transformacji cyfrowej obszarów wiejskich.

Rezultaty operacji wpisują się również w aktualne priorytety Europejskiego Zielonego Ładu i reformowanej Wspólnej Polityki Rolnej. Jednym z kluczowych celów tej polityki jest zwiększenie odporności rolnictwa na zmiany klimatyczne przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu sektora rolnego na środowisko. Operacja dostarcza narzędzi umożliwiających ograniczenie stosowania agrochemikaliów, poprawę efektywności nawożenia i ochrony roślin oraz zmniejszenie emisji CO_2 i N_2O – w tym szczególnie ważne w kontekście ograniczania nadmiaru azotu, którego obecność w środowisku wiąże się z eutrofizacją i negatywnym wpływem na zdrowie ludzi i zwierząt.

Zgodnie z opinią o innowacyjności, projekt od początku zakładał nie tylko wdrożenie narzędzia, ale także generowanie wiedzy, która będzie podstawą do dalszego rozwoju sektora rolnego. Wyniki doświadczeń terenowych, algorytmy i wskaźniki, a także wnioski z prowadzonych analiz – stanowią punkt wyjścia do kolejnych badań, np. nad predykcją plonów, planowaniem zabiegów w oparciu o warunki pogodowe, czy integracją ze sztuczną inteligencją. Opracowane metodyki mogą zostać z powodzeniem adaptowane do innych upraw (np. kukurydzy, buraka cukrowego, warzyw) oraz technologii (np. zmienne nawożenie organiczne, irygacja zmienna przestrzennie).

Z perspektywy transferu wiedzy, operacja wyznacza nowy standard współpracy między rolnikami, doradcami a firmami technologicznymi. Uczestnictwo praktyków w tworzeniu algorytmów, testowaniu rozwiązań i ocenie efektów stanowi wzór dla przyszłych projektów badawczo-wdrożeniowych. Jednocześnie pozwala ono przezwyciężyć często spotykane bariery zaufania do innowacji oraz zwiększa szansę na szerokie wdrożenie i replikację opracowanego modelu.

Podsumowując, projekt zrealizował wszystkie kluczowe założenia deklarowane w dokumentacji operacyjnej i opinii o innowacyjności. Uzyskane efekty – zarówno w wymiarze agronomicznym, jak i organizacyjnym – dowodzą, że zastosowane rozwiązania:

- w pełni wpisują się w koncepcję rolnictwa zrównoważonego i precyzyjnego,
- są zgodne z wytycznymi UE dotyczącymi transformacji ekologicznej i cyfrowej,
- wykazują wysoką efektywność operacyjną oraz możliwość wdrożenia w gospodarstwach różnej skali,
- posiadają potencjał adaptacyjny do innych upraw, technologii i kontekstów klimatycznych.

Wszystkie te elementy łącznie stanowią spójną i silną odpowiedź na potrzeby innowacyjności w rolnictwie, opartej na danych, nauce i doświadczeniu praktyków. Rezultaty projektu mogą służyć jako wzorzec dla przyszłych działań wspierających transformację polskiego rolnictwa – w kierunku bardziej inteligentnego, odpornego i przyjaznego środowisku systemu produkcji żywności.

8. Konkluzje

Wyniki przeprowadzonych doświadczeń terenowych oraz analiza danych pozyskanych za pomocą metod teledetekcyjnych i cyfrowych narzędzi wspomagania decyzji pozwalają na sformułowanie następujących wniosków, jednoznacznie potwierdzających trafność przyjętych założeń projektowych oraz zasadność dalszego rozwoju proponowanej innowacji:

1. Kluczowa rola gęstości łanu jako czynnika determinującego jakość plonu

Zgromadzone dane empiryczne wskazują, że początkowa gęstość łanu roślinnego miała istotniejszy wpływ na jakość plonu niż zastosowane zabiegi skracające. W szczególności łany o mniejszej obsadzie charakteryzowały się wyższą jakością zbioru – zarówno pod względem zawartości białka i glutenu w pszenicy, jak i oleju w rzepaku – co najprawdopodobniej wynika z mniejszej konkurencji między roślinami o zasoby środowiskowe (światło, woda, składniki pokarmowe).

2. Decydujące znaczenie warunków hydrologicznych sezonu 2024

Sezon wegetacyjny 2024 był szczególnie suchy, co wpłynęło na obniżenie efektywności działania regulatorów wzrostu, zwłaszcza w przypadku upraw rzepaku. Ograniczona dostępność wody najprawdopodobniej zaburzyła fizjologiczne mechanizmy odpowiedzi roślin na substancje regulujące, tym samym redukując ich skuteczność.

3. Rola zmienności glebowej w analizie efektywności zabiegów

Obserwacje prowadzone na polach o zróżnicowanych warunkach glebowych umożliwiły szczegółową analizę interakcji pomiędzy strukturą łanu, warunkami siedliskowymi a dawkowaniem regulatorów wzrostu. Pozwoliło to na lepsze dostrojenie algorytmów map aplikacyjnych do rzeczywistych potrzeb siedliskowych.

4. Drony jako narzędzie walidacji danych satelitarnych

Zebrane dane potwierdzają, że klasyczny wskaźnik NDVI dobrze odzwierciedla stopień pokrycia gleby przez łan, jednak nie jest adekwatnym miernikiem zawartości azotu w

biomasie. W tym kontekście dane z dronów pozwoliły na bardziej szczegółową ocenę stanu uprawy i były nieocenione w procesie kalibracji indeksów teledetekcyjnych.

5. Wprowadzenie nowego hybrydowego wskaźnika roślinności HyVeg1

W ramach projektu opracowano i przetestowano wskaźnik HyVeg1, który – dzięki wykorzystaniu pasm red-edge oraz komponentów chlorofilowych – pozwala na dokładniejszą ocenę kondycji uprawy w całym cyklu fenologicznym. Indeks ten wykazuje wyższą czułość diagnostyczną i mniejsze nasycenie w porównaniu z klasycznym NDVI, stanowiąc cenne narzędzie dla dalszych analiz.

6. Konieczność kompleksowego podejścia do rolnictwa precyzyjnego

Uzyskane wyniki wyraźnie wskazują, że skuteczność strategii regulacji wzrostu zależy od integracji wielu czynników zarządzania uprawą – od obsady i nawożenia, przez warunki siedliskowe, po termin aplikacji regulatora. Precyzyjna regulacja wzrostu, rozpatrywana w oderwaniu od innych komponentów technologii, wykazuje ograniczony potencjał optymalizacji.

7. Nowe funkcjonalności platformy SatAgro

W ramach projektu opracowano szereg innowacyjnych narzędzi cyfrowych ułatwiających prowadzenie eksperymentów polowych w pełnej skali:

- komponenty backendowe do definiowania, kontrolowania i archiwizowania doświadczeń rolniczych,
- interfejs użytkownika umożliwiający wizualne wyznaczanie stref eksperymentalnych i przypisywanie zmiennych dawek,
- rozbudowany moduł analityczny integrujący mapy wyników, tabele z danymi liczbowymi oraz automatyczne wykresy porównawcze.

Podsumowując, projekt dostarczył solidnych dowodów empirycznych na skuteczność wdrożonych rozwiązań oraz ich potencjał do dalszego rozwoju i skalowania. Wnioski płynące z analiz wskazują na konieczność kontynuowania prac w zakresie kalibracji

algorytmów oraz rozszerzania zakresu analiz o inne gatunki upraw i komponenty technologiczne rolnictwa precyzyjnego.

9. Rekomendacje dalszych działań

W oparciu o przeprowadzone badania, zebrane dane empiryczne, ewaluację wdrożonego rozwiązania oraz konsultacje z uczestnikami operacji, sformułowano szereg rekomendacji dotyczących kierunków dalszego rozwoju projektu oraz jego potencjalnej replikacji w szerszej skali. Poniższe zalecenia mają na celu maksymalizację efektów wdrożeniowych i zwiększenie trwałości rezultatów operacji:

1. Rozszerzenie zakresu badań na inne gatunki i technologie

W celu potwierdzenia uniwersalności opracowanego rozwiązania, zaleca się przeprowadzenie analogicznych badań dla innych gatunków roślin, w szczególności kukurydzy, buraka cukrowego i soi. Rekomenduje się również analizę efektywności zmiennego dawkowania regulatorów wzrostu w połączeniu z innymi technologiami: np. mikrobiologicznymi biostymulatorami czy adaptacyjnym nawożeniem organicznym.

2. Dalszy rozwój indeksów roślinności i ich kalibracja

Wyniki operacji potwierdzają wysoką przydatność nowego wskaźnika HyVeg1. Rekomenduje się dalsze prace badawczo-rozwojowe nad syntetycznymi indeksami łączącymi dane z wielu sensorów (Red Edge, Radar, UAV, LIDAR) oraz ich walidację w zróżnicowanych warunkach siedliskowych i klimatycznych. W przyszłości możliwe jest także stworzenie zindywidualizowanych indeksów dla konkretnych odmian.

3. Wdrożenie systemu doradztwa cyfrowego dla użytkowników

Dla zwiększenia skuteczności stosowania narzędzia, zaleca się integrację platformy SatAgro z komponentem doradztwa eksperckiego (chatbot, system ticketowy, wideokonsultacje). Celem jest wspieranie użytkowników w interpretacji danych, weryfikacji efektów oraz w podejmowaniu decyzji w sytuacjach niepewności (np. anomalie pogodowe, błędy w danych).

4. Integracja z systemami ewidencji i raportowania

Rekomenduje się rozszerzenie aplikacji o funkcjonalność generowania dokumentacji zgodnej z przepisami prawa – w szczególności z zakresu ewidencji zabiegów, zużycia agrochemikaliów, nawożenia oraz wymogów środowiskowych. Zintegrowane raportowanie mogłoby stanowić istotny atut w kontekście certyfikacji (np. Global GAP, Integrowana Produkcja Roślin).

5. Rozwój narzędzi do predykcji i wczesnego ostrzegania

W związku z rosnącą zmiennością klimatyczną, rekomenduje się rozwinięcie funkcji predykcyjnych – w szczególności prognozowania okresów suszy, nadmiaru wilgoci i warunków sprzyjających rozwojowi chorób grzybowych. Integracja prognoz z zaleceniami agrotechnicznymi może zwiększyć odporność produkcji na czynniki zewnętrzne.

6. Skalowanie rozwiązania poprzez sieć demonstracyjną

Zaleca się stworzenie ogólnopolskiej sieci gospodarstw demonstracyjnych wykorzystujących platformę i uczestniczących w ewaluacji jej efektywności w warunkach operacyjnych. Takie podejście zwiększy wiarygodność rozwiązania i przyspieszy jego adaptację w różnych rejonach kraju.

7. Internacjonalizacja i promocja poza Polską

Z uwagi na zgodność operacji z celami Europejskiego Zielonego Ładu i wspólnymi wyzwaniami klimatycznymi, rekomenduje się rozpoczęcie działań mających na celu wdrożenie narzędzia również na rynkach zagranicznych. W szczególności warto skoncentrować się na krajach UE o zbliżonych warunkach klimatyczno-glebowych (np. Litwa, Czechy, Słowacja, Węgry).

8. Dalsza iteracja i rozwój oprogramowania

Równolegle do działań wdrożeniowych, niezbędne są dalsze iteracje rozwojowe platformy, prowadzone w oparciu o dane użytkowników i feedback z pól. Proponuje się przyjęcie modelu „ciągłego rozwoju” (continuous development), pozwalającego na bieżące aktualizacje algorytmów i interfejsu.