

**CENTRUM DORADZTWA ROLNICZEGO W BRWINOWIE
ODDZIAŁ W POZNANIU**

dr hab. Renata Gaj

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Precyzyjne nawożenie roślin uprawnych

Poznań 2018

**Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie
Oddział w Poznaniu**

ISBN 978-83-60232-78-1

Projekt okładki, skład, łamanie:
Alicja Zygmanska

Druk: Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie
Oddział w Poznaniu
61-659 Poznań, ul. Winogrody 63
tel. 61 823-20-81, fax 61 820-19-71
e-mail: poznan@cdr.gov.pl
www.cdr.gov.pl

Zlecenie nr 1/2018, nakład 1000 egz.

Spis treści

1. Miejsce nawożenia w rolnictwie precyzyjnym	5
2. Różnica pomiędzy nawożeniem precyzyjnym a klasycznym	7
3. Elementy precyzyjnego nawożenia	8
4. Regulacja odczynu gleby pierwszym krokiem w precyzyjnym nawożeniu	15
5. Precyzyjna ocena przyswajalnych form składników w glebie	17
6. Regulacja zasobności gleby w przyswajalne formy fosforu i potasu	20
7. Precyzyjna ocena stanu odżywienia roślin w trakcie wegetacji	21
8. Prawidłowe określenie symptomów niedoboru azotu	25
8.1. Zboża	26
8.2. Rzepak	27
8.3. Kukurydza	28
9. Wybór nawozu azotowego – czym się kierować?	29
10. Technika w precyzyjnym nawożeniu	31
11. Literatura	33

1. Miejsce nawożenia w rolnictwie precyzyjnym

Rolnictwo precyzyjne (*Precision Agriculture*) jest definiowane jako zespół technologii tworzących system rolniczy, który dostosowuje wszystkie elementy agrotechniki do zmiennych warunków na poszczególnych polach uprawnych.

Nawożenie precyzyjne oznacza stosowanie nawozów w dawkach dokładnie dopasowanych do potrzeb nawożenia w danym punkcie pola.

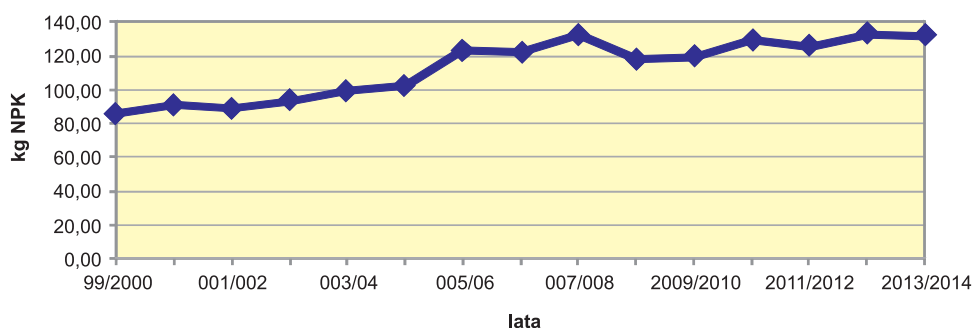
Koncepcja precyzyjnego rolnictwa, w tym nawożenia podlega bardzo dynamicznemu rozwojowi, który bezpośrednio wiąże się z postęпом w dziedzinie nawigacji satelitarnej, zmiennego dawkowania nawozów, mapowania plonów oraz precyzyjnym prowadzeniu maszyn. Na podstawie mapy plonów zróżnicowanych w obrębie pola, planuje się zabiegi nawożenia i ochrony roślin. Rolnictwo precyzyjne jest strategią gospodarowania polegającą na korzystaniu z technologii informacyjnych do przetwarzania danych pochodzących z różnych źródeł w decyzje operacyjne związane z produkcją roślinną. Postęp w tym zakresie wymaga współdziałania wielu dyscyplin zarówno w badaniach naukowych, jak i praktyce rolniczej. Szczególnie duży progres dokonuje się w dziedzinie pozyskiwania informacji i ich interpretacji. Dzięki zdolności szybkiego przetwarzania ilości informacji związanych z wdrażaniem nowych technologii możliwe jest utrzymanie opłacalności produkcji i spełnienie wymogów związanych z ochroną środowiska.

Głównym zadaniem stawianym rolnictwu precyzyjnemu jest minimalizacja nakładów, ochrona środowiska, ochrona zasobów naturalnych i ludzkich oraz stabilizacja plonów. Zgodnie z zasadami zrównoważonego nawożenia, prawidłowe nawożenie polega na dostarczeniu roślinom składników pokarmowych w odpowiednich proporcjach i ilościach umożliwiających uzyskanie maksymalnych plonów o pożądanej jakości konsumpcyjnej lub przetwórczej.

Wobec stale rosnących kosztów produkcji rolnej oraz uwagi nakierowanej na wpływ rolnictwa na jakość środowiska, nawożenie precyzyjne wzbudza coraz większe zainteresowanie. Nawozy mineralne są podstawowym środkiem produkcji współczesnego rolnictwa i stanowią znaczący udział w kosztach produkcji roślinnej. Według różnych analiz ekonomicznych szacuje się, że średnio wynoszą one 20% zaplanowanych środków na produkcję rolną. Stosowanie nawozów mineralnych w Polsce warunkowane jest przez współdziałanie czynników agrotechnicznych, ekonomicznych i ekologicznych. Nawożenie jest podstawowym czynnikiem plonotwórczym i według różnych źródeł literaturowych ocenia się, że udział nawozów w przyroście plonów szacuje się na po-

ziomie 50-70%. Cena nawozu związana jest z kosztami stałymi wytwarzania, w których kluczową pozycję stanowią koszty surowców oraz stosowana technologia granulacji bądź mieszania. Ocenę agrochemiczną przydatności oferowanego nawozu w technologii uprawy danej rośliny dokonuje się najczęściej na podstawie takich czynników jak: zawartość głównych składników mineralnych (azot, fosfor, potas) oraz tzw. składników drugoplanowych (siarka, magnez, wapń) i mikroelementy, a także wzajemnego stosunku ilościowego P_2O_5 i K_2O oraz form chemicznych tych pierwiastków w nawozie.

Aktualnie zużycie nawozów mineralnych w Polsce od dziesięciu lat kształtuje się na ustabilizowanym poziomie i kształtuje się w zakresie od 120 do 133 kg NPK/ha UR. (Ryc. 1).



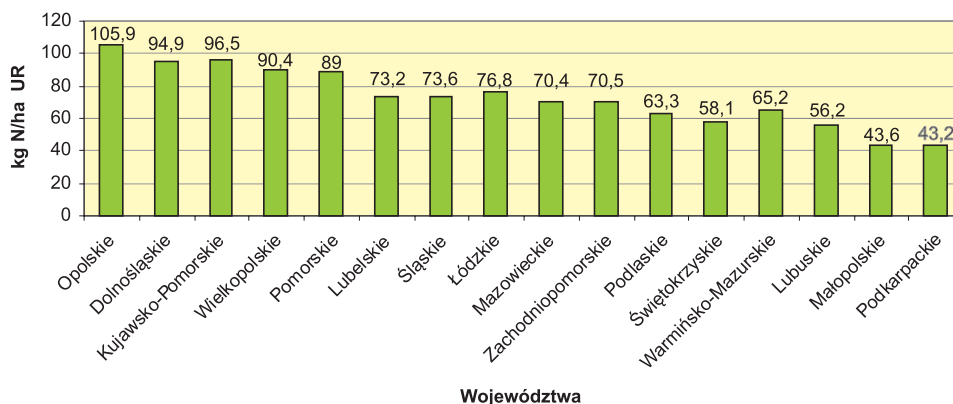
Ryc. 1. Poziom zużycia nawozów mineralnych w Polsce w czystym składniku NPK/ha UR

Źródło: GUS 2015

Wyniki badań dotyczące poziomu nawożenia mineralnego znajdują odzwierciedlenie w regionalnym zróżnicowaniu intensywności produkcji roślinnej. Zalecany stosunek N:P:K w zrównoważonym nawożeniu powinien wynosić dla upraw polowych 1:0,5:0,98. W sezonie wegetacyjnym 2013/2014 proporcje N:P:K znacznie odbiegały od zalecanych relacji i przedstawiały się następująco: 1:0,31:0,45. Stosunek N:P:K ulega nieustannemu poszerzeniu na rzecz azotu i średnio w skali kraju poziom zużycia N wynosi 75 kg N/ha. Oznacza to, że w ogólnym zużyciu nawozów mineralnych, w przeliczeniu na czysty składnik azot (N) stanowi 57%, fosfor (P_2O_5) 17,6% i potas (K_2O) 25,7%. Zużycie nawozów azotowych wykazuje również duże zróżnicowanie regionalne, wahając się w szerokim przedziale od 106 kg N/ha w województwie opolskim do 43 kg N/ha w województwie podkarpackim (Ryc. 2).

Struktura nawożenia mineralnego charakteryzuje się rosnącym udziałem azotu, co w dalszej perspektywie może niekorzystnie wpływać na procesy produkcyjne i spowodować zwiększenie zagrożenia środowiskowego.

Poziom niezbilansowana składników, a także duża zmienność przestrzenna zawartości form przyswajalnych składników w glebie, skłania do szerszego wdrożenia do praktyki rolniczej, nowej i bardziej efektywnej technologii nawożenia precyzyjnego, która spełnia zarówno cele produkcyjne, ekonomiczne jak i ekologiczne.



Ryc. 2. Regionalny poziom zużycia nawozów azotowych, kg N/ha UR

Źródło: GUS 2015

2. Różnica pomiędzy nawożeniem precyzyjnym a klasycznym

W rolnictwie konwencjonalnym pole produkcyjne traktuje się jako jednostkę homogeniczną, a zasobność gleby określa się na podstawie uśrednionej próbki glebowej. W sytuacji dużej zmienności glebowej, niezależnie od zawartości przyswajalnych form składników w glebie, aplikowane są takie same ilości składników wyznaczone na podstawie próby średniej. Takie postępowanie powoduje, że lokalnie wzrasta akumulacja składników w glebie, co w konsekwencji stwarza ryzyko strat pierwiastków na skutek wymycia. Stosując nawożenie jednakowe na całej powierzchni pola, zróżnicowanie przestrzenne waloryzacji warunków glebowych zostaje odzwierciedlone w zróżnicowanym poziomie plonów.

Podstawą nawożenia precyzyjnego jest właściwe rozpoznanie przestrzennej zmienności zawartości przyswajalnych składników pokarmowych poprzez zwiększenie ilości pobieranych prób glebowych. Wprowadzenie w gospodarstwie systemu nawożenia precyzyjnego pozwala na dostosowanie wielkości

dawek składników pokarmowych do jego zawartości w glebie, umożliwiając zmniejszenie nakładów na zakup nawozów oraz uzyskanie wyższych i jakościowo lepszych plonów niż w rolnictwie tradycyjnym.

Rolnictwo precyzyjne dąży do optymalizacji wykorzystania składników z nawozów i do minimalizacji ilości środków ochrony roślin. Pomimo dużej zmienności glebowej w Polsce wskazującej na celowość stosowania zmiennych przestrzennie dawek nawozów i środków ochrony roślin, rolnictwo precyzyjne ze względu na znaczne rozdrobnienie gospodarstw w kraju praktykowane jest głównie w gospodarstwach dużych, o powierzchni przekraczającej 100 ha. Według danych GUS ta grupa gospodarstw (>100 ha) obejmuje zaledwie 0,4% ogólnej liczby gospodarstw rolnych w Polsce, co stanowi 19,4% całkowitej powierzchni i odpowiada 3,1 mln ha. Średnia powierzchnia gospodarstwa w tej grupie wynosi 402 ha, natomiast największą grupę stanowią gospodarstwa o powierzchni do 10 ha.

O ile w przypadku nawożenia – system precyzyjnej aplikacji składników mineralnych jest coraz bardziej popularny i rozwija się dynamicznie, tak w ochronie roślin, nadal jest jeszcze mało rozpowszechniony ze względu na szybkość rozwoju różnego rodzaju chorób, czy gradacji szkodników. Czas wykrycia postępujących zniszczeń ma bardzo duży wpływ na ograniczanie związanych z tym strat. Opracowana metoda musi umożliwiać dużą częstotliwość wykonywania zdjęć, krótki czas ich realizacji, szybką identyfikację i interpretację informacji obrazkowej oraz wykonanie map aplikacyjnych.

Liczne analizy ekonomiczne wykazały, że koszt stosowania rolnictwa precyzyjnego w przeliczeniu na jeden hektar maleje wraz ze wzrostem gospodarstwa, ponieważ duży udział w całościowym wdrażaniu systemu mają koszty stałe jednorazowego zakupu sprzętu, a w dalszej kolejności profesjonalnych zdjęć satelitarnych przetworzonych w konkretne zalecenia aplikacyjne. Z punktu widzenia producentów rolnych oraz producentów środków produkcji najważniejszym wyzwaniem stojącym przed rolnictwem precyzyjnym jest udokumentowana opłacalność produkcji. Jeśli chodzi o aspekty środowiskowe, należy być świadomym, że zastosowanie zaawansowanych technologii może skutkować opłacalnością ekonomiczną, jeśli będzie opierać na fachowej wiedzy rolników i doradców.

3. Elementy precyzyjnego nawożenia

- 1) Mapy wykonane przy użyciu technik GPS i GIS przedstawiające dokładnie obrys pola oraz zmieniającą się zasobność gleby w makro i mikroelementy oraz odczyn gleby (pH);

- 2) Mapy aplikacyjne z zakodowaną zmieniającą się w przestrzeni dawką;
- 3) Mapy zasiewu;
- 4) Mapy plonu.

Informacje o przestrzennej i czasowej zmienności cech roślin i środowiska oraz parametrów określających warunki zewnętrzne służą do sporządzenia mapy, dzięki czemu możliwe jest powiązanie wartości danego parametru z określonym przez współrzędne geograficzne punktem w przestrzeni. W drugim etapie zgromadzone informacje wykorzystywane są do precyzyjnego wykonania zabiegu. Takie rozwiązanie pozwala na stworzenie bazy informacyjnej zwanej **GIS** (z ang. *Geographic Information System*). Informacje pozyskiwane są na drodze lustracji pól, pobierania prób oraz bezpośrednich lub zdalnych pomiarów przy użyciu standardowych czujników lub systemów optycznych i ultradźwiękowych.

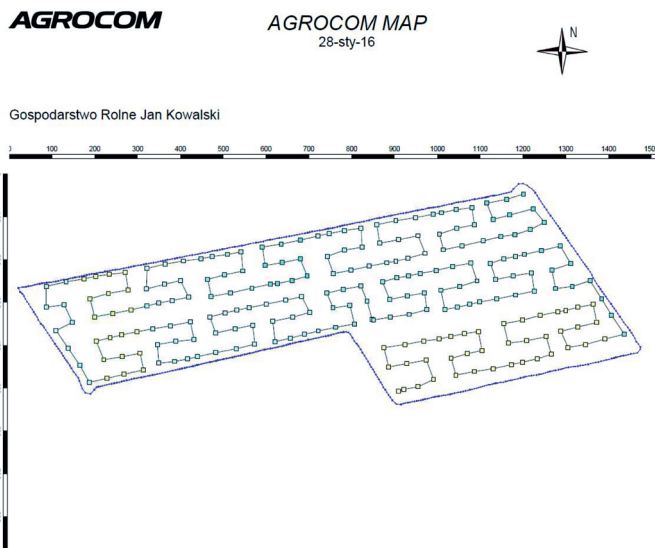
Mapy GIS stosowane są do celów dokumentacyjnych, a także jako wytyczne dla urządzeń wykonawczych podczas zabiegów polowych. Decydując się na wprowadzenie zasad precyzyjnego nawożenia w gospodarstwie w pierwszej kolejności należy dokonać dokładnego pomiaru powierzchni upraw, a w następnej kolejności sprawdzić zasobność gleby w przyswajalne formy składników oraz odczyn gleby. Pomiar pól jak i pobór prób glebowych coraz częściej przeprowadzany jest przez profesjonalne firmy, które dysponują pojazdami zwanymi quadami wyposażonymi w system pobierania prób glebowych, komputer z odpowiednim oprogramowaniem oraz system **GPS** (Fot. 1).





Fot. 1. Automatyczny pobór prób glebowych z wykorzystaniem quadów (Gaj, Koronczok, Agrocom)

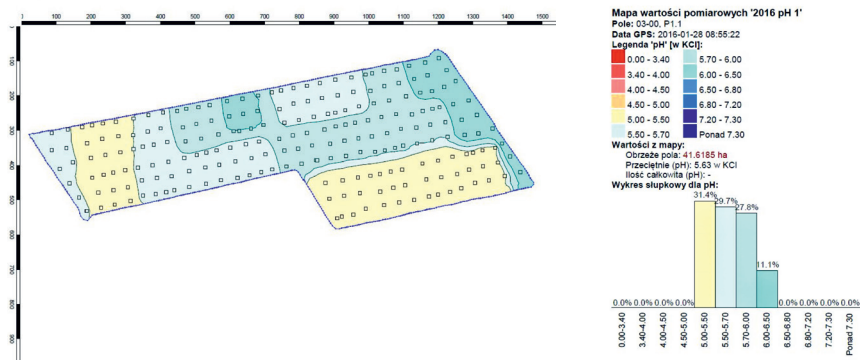
Zebrane dane źródłowe obejmujące podstawowe informacje o danym polu przetwarzane są w mapę. Podstawowym wymogiem procedury mapowania jest precyzyjna lokalizacja przestrzenna punktów na danym polu (Ryc. 3), która w dalszym etapie pozwala na wyznaczenie jednorodnych powierzchni pod względem oznaczonej właściwości.



Ryc. 3. Siatka punktów pobranych prób glebowych (Koronczok, Agronom)



Gospodarstwo Rolne Jan Kowalski



Ryc. 4. Zmienność kolorów wskazująca na różnice odczynu gleby

Mówiąc o systemie GPS (z ang. *Global Positioning System*) najczęściej mamy na myśli amerykański system NAVSTAR, który obejmuje, co najmniej 24 satelity krążące nad powierzchnią Ziemi na wysokości ponad 20 tys. km. W kilkunastu punktach na kuli ziemskiej rozmieszczone są stacje naziemne kontrolujące działanie tego systemu. Pozycja odbiornika GPS jest określana na podstawie czasu między emisją, a odbiorem sygnału radiowego poszczególnych satelitów. Dokładność określania pozycji jest zależna od użytkowanego odbiornika GPS. Zaawansowane odbiorniki GPS pozwalają na ustalenie pozycji ciągników rolniczych, kombajnów i innych maszyn z dokładnością do poniżej 1 m. Zaletą tego systemu jest ułatwienie podejmowania decyzji w zakresie zarządzania danymi obszarami oraz szybkość podejmowania decyzji.

Pomiary zmienności przestrzennej pola przeprowadza się, wykorzystując różne sposoby:

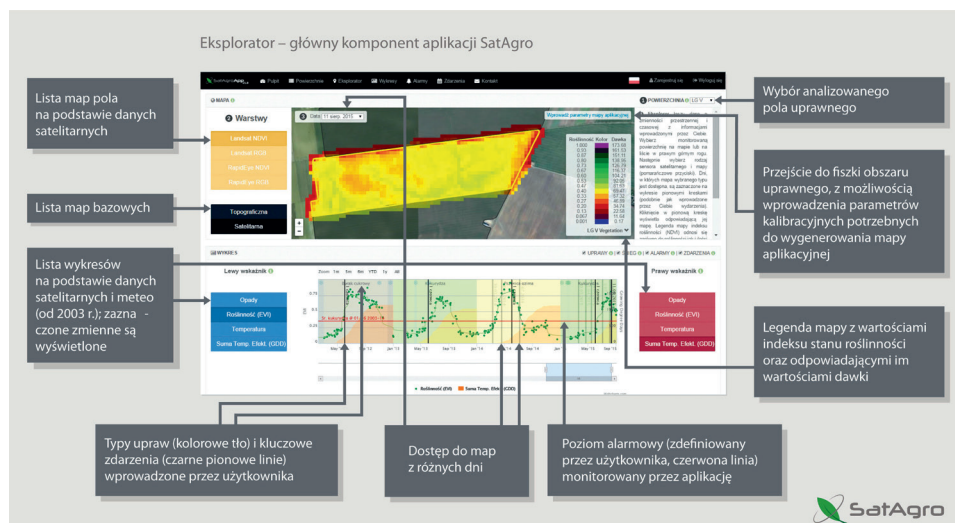
- 1) pomiary nieciągłe – polegają na punktowym pobieraniu próbek glebowych w określonych miejscach pola i przeprowadzeniu klasycznych analiz chemicznych w laboratorium. Podstawą uzyskania wiarygodnych informacji jest możliwie jak największa liczba pobranych próbek glebowych. Stacje Chemiczno-Rolnicze opierają się na wytycznych zawartych w Polskiej Normie (PN-R-04031), która określa ilość próbek glebowych składających się na próbę uśrednioną odpowiadającą powierzchni do 4 ha. Zgodnie z przyjętą normą, w przypadku pola jednorodnego na jedną próbę uśrednioną składa się 20 próbek pojedynczych. Próbkę gleby traktuje się jako wartość średnią dla pola.
- 2) pomiary ciągłe sprowadzają się głównie do pomiaru plonów podczas pracy kombajnów wyposażonych w specjalistyczny sprzęt pomiarowy umożliwiający ciągły pomiar przepływającej masy ziarna.

3) pomiar zmienności przestrzennej pola za pomocą zdjęć lotniczych i zdjęć satelitarnych. Informację obrazową wykorzystuje się jako podstawę szczegółowej analizy obejmującej stan odżywienia roślin, kondycję roślin, monitorowanie stopnia porażenia przez choroby, ocenę skutków klęsk żywiołowych. Zdjęcia z wielu satelitów są bezpłatne. Ograniczeniem w ich wykorzystaniu jest jednak mniejsza rozdzielczość (10-15 m). Natomiast zdjęcia komercyjne robione są na żądanie i mają większą rozdzielczość (5-6 m, a nawet 0,5 m).

Zdjęcia satelitarne

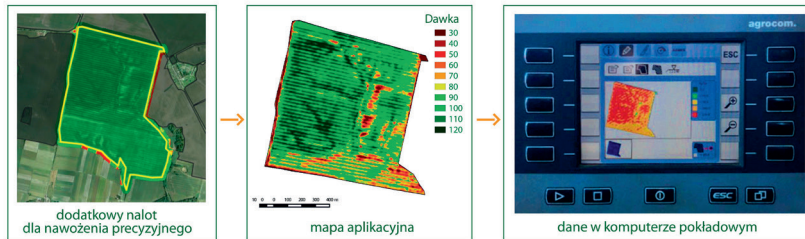
Branża kosmiczna w ostatnich latach bardzo dynamicznie rozwija się i jednocześnie wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem informacji pozyskanych z satelitów w sektorze rolniczym. Nowoczesne technologie monitoringu satelitarnego na potrzeby gospodarstw oferowane są przez wyspecjalizowane firmy, np. SatAgro. Pozyskane informacje firmy udostępniają rolnikom w postaci obrobionych zdjęć lub map, które pozwalają śledzić zróżnicowanie łąnu w czasie i przestrzeni w połączeniu z danymi meteorologicznymi (Fot. 2).

Możliwa jest obserwacja rozwoju roślinności na obrazach o rozdzielczości 10 i 15 m, a także na wykresach z uśrednionymi pomiarami tworzącymi krzywe wzrostu łąnu. Pozyskane w ten sposób informacje pozwalają na kontrolowanie wzrostu konkretnej uprawy w poszczególnych sezonach wegetacyjnych i identyfikowanie różnego rodzaju anomalii spowodowanych niedoborem składników, suszą, wylegnięciem, wymarznieniem, chorobami. Istnieje możliwość bezpłatnej obserwacji pól obejmujących areał do 50 ha, z wyjątkiem możliwości pobrania danych na dysk i tworzenia map aplikacyjnych. Przykład zdjęcia satelitarnego przedstawia Fot. 3.

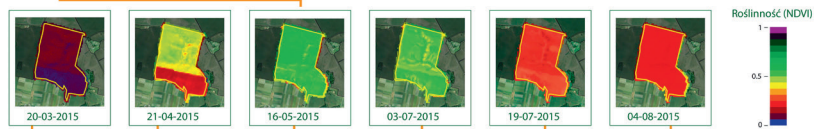


Dostępność danych satelitarnych w aplikacji SatAgro

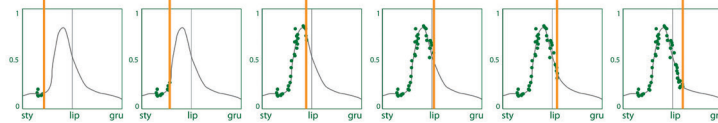
Wysokorozdzielcze dane komercyjne (1 piksel = od 1 do 6 m, na żądanie)



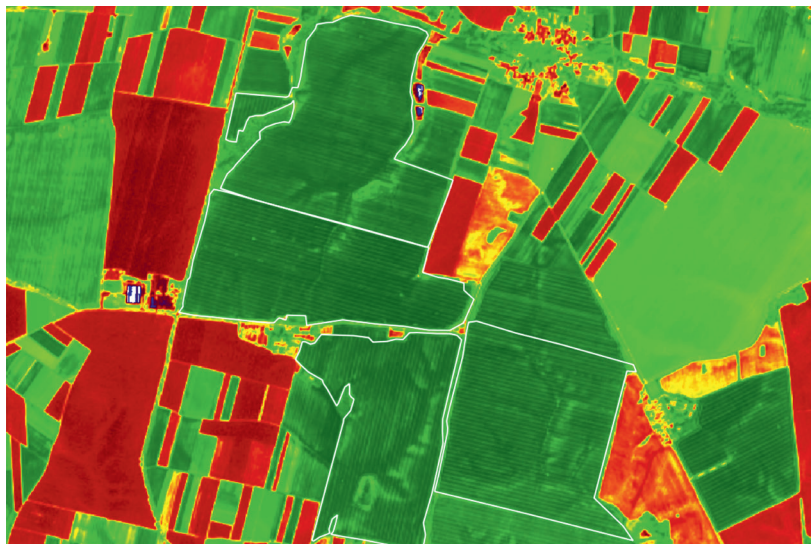
Średniorozdzielcze dane niekomercyjne (1 piksel = 15 m, przelot satelity raz na kilka dni)



Uśrednione pomiary dla całego pola (1 piksel = 230 m, 2 przeloty dziennie)



Fot. 2. Okna programu aplikacji SatAgro z zaimplementowaną mapą pola uprawnego



Fot. 3. Zdjęcie satelitarne przedstawiające stan pól w sezonie wegetacyjnym (SatAgro)

Podstawowe dane są dostarczane z częstotliwością kilku dni. Ponadto możliwe jest korzystanie z komercyjnych satelitów wysokorozdzielczych, które obserwują dany teren codziennie, aż uda się zrobić bezchmurne zdjęcie, co wiąże się jednak z dodatkowymi kosztami. Wykorzystując dane satelitarne uzyskuje się zaskakująco dużą precyzję zbieranych informacji. Na podstawie ogólnodostępnych danych można także z kilkudniową częstością monitorować postęp wegetacji na polu.

Innym nowoczesnym osiągnięciem techniki wykorzystywanym w precyzyjnym rolnictwie jako narzędzie pomocne w tworzeniu zaleceń nawozowych na podstawie wykonywanych zdjęć są **drony**. Urządzenia te definiowane są jako bezzałogowe statki powietrzne zdalnie sterowane wykorzystywane w różnych celach np. reklamowych, geodezyjnych, a także rolniczych (Fot. 4).

Dron jest wyposażony w aparat fotograficzny, dzięki któremu możliwe jest wykonanie zdjęć w paśmie widzialnym i coraz częściej również w podczerwieni. Lot trwa około 20-30 min na wysokości 500 m podczas, którego wykonywane jest ok. 200 zdjęć. Dzięki zastosowaniu wymienionych urządzeń można w krótkim czasie dokonać pomiaru pól i oceniać aktualny stan plantacji. Posiadanie takiego sprzętu umożliwia cykliczne powtarzanie obserwacji w sezonie wegetacyjnym i poprzez porównanie w odpowiednio krótkim czasie obrazów można podjąć określone działania zapobiegawcze. Powyższe rozwiązania pozwalają na znaczącą redukcję kosztów związanych z zakupem nawozów i środków ochrony roślin, pod warunkiem, że dysponujemy wcześniej zgromadzoną bazą informacyjną dotyczącą aktualnego odczytu gleby, zasobności w przyswajalne formy składników, mapy pól itd.

Należy być świadomym, że samo wykonanie zdjęć bez uzupełnienia ich o podstawowe informacje o danym polu oraz odpowiedniego przetworzenia zgromadzonych informacji w mapy aplikacyjne nie stanowi większej wartości użytkowej. Aktualnie procesy obróbki (przetwarzania) oraz pozyskiwania obrazów satelitarnych i ich implementacja dla potrzeb nawożenia w sezonie wegetacyjnym jest w pełni zautomatyzowana i wdrażana przez firmy komercyjne.

W warunkach polowych można również przeprowadzać pomiary właściwości chemicznych gleby, wykorzystując do tego celu **sensory elektrochemiczne**. Sprzęt pomiarowy obejmuje dwie grupy instrumentów: (1) elektrody jonoselektywne oraz (2) tranzystory polowe. Istota pomiaru polega na pomiarze różnicy potencjału między elektrodami pomiarową i referencyjną, która jest skorelowana dla danej elektrody z zawartością testowanych jonów. Ten rodzaj pomiarów wymaga stosowania metod związanych z punktowym pobieraniem próbek glebowych.



Fot. 4. Ocena stanu pól z wykorzystaniem dronów (Koronczok, Agronom).

4. Regulacja odczynu gleby pierwszym krokiem w precyzyjnym nawożeniu

Podstawowym warunkiem opłacalnej produkcji rolnej jest gospodarowanie na glebach o uregulowanym odczynie dostosowanym do wymagań uprawianej rośliny oraz odpowiedniej zasobności gleby w przyswajalne formy składników pokarmowych. Zarówno odczyn jak i zawartość składników przyswajalnych, obok za-

wartości próchnicy w glebie, należą do podstawowych wskaźników oceny jakości gleb. Przystawalność jest miarą zdolności gleby do zaopatrywania roślin w składniki pokarmowe, zgodnie z ich wymaganiami pokarmowymi.

Rośliny rozwijają się prawidłowo tylko wówczas, gdy rosną w glebie żyznej i o uregulowanym odczynie. Gleba żyzna powinna zawierać nie tylko dostateczną ilość składników mineralnych, ale także dostarczać je roślinie w sposób umożliwiający bezstresowy wzrost i rozwój w całym okresie wegetacji. Bezpośrednią miarą przystawalności danego składnika jest jego absorpcja wyrażona w ilości pobranej w jednostce czasu na jednostkę powierzchni.

Systematyczna kontrola odczynu gleb, ocena zawartości składników przyswajalnych oraz właściwe zmianowanie roślin jest gwarantem uzyskania założonych plonów. Częstotliwość oceny prób glebowych wynika z analizowanej cechy oraz przydatności jej oznaczania. W przypadku cech stabilnych, takich jak zawartość składników przyswajalnych fosforu i potasu oraz pH gleby, wystarczy pobrać próby glebowe raz na 4 lata. Najkorzystniejszym terminem pobierania materiału glebowego ze względu na stabilizację zachodzących w glebie procesów biologicznych i chemicznych jest jesień. Pobieranie prób glebowych najlepiej wykonywać po zbiorze roślin, przed siewem roślin następczych. Kwaśny odczyn gleby ogranicza wzrost i rozwój rośliny poprzez niekorzystny wpływ na strukturę i aktywność biologiczną gleby. W warunkach niskiego pH gleby, próchnica ma charakter kwaśny i traci właściwości klejące, co nie sprzyja tworzeniu struktury gruzełkowatej. W związku z tym pogarszają się stosunki powietrzno-wodne i następuje ograniczenie aktywności biologicznej gleby.

Silne zakwaszenie gleb powoduje pojawienie się aktywnych form glinu, które działają toksycznie na roślinę. Pierwszą oznaką nadmiaru toksycznych jonów glinu w glebie jest redukcja systemu korzeniowego roślin. Obecność materii organicznej w glebie, a dokładniej kwasów huminowych, łagodzi toksyczne działanie glinu.

Korektę odczynu gleby powinno się dokonywać w odstępach czasowych, co 4-5 lat, a częstotliwość przeprowadzenia zabiegu wapnowania wyznacza uprawa roślin o małej tolerancji na zakwaszenie, takich jak: rzepak, burak cukrowy, lucerna, koniczyna czerwona, jęczmień. Nawozy wapniowe powinno stosować się pod przedplon, po którym uprawiana będzie roślina najbardziej wrażliwa na kwaśny odczyn gleby. Czynnikiem istotnie kształtującym przemiany składników w glebie i ich dostępność dla roślin jest odczyn gleby. Gleby kwaśne charakteryzują się niską przystawalnością składników pokarmowych. W warunkach gleb kwaśnych fosfor tworzy z jonami żelaza i glinu związki niedostępne dla roślin, natomiast kationy zasadowe (potas, wapń, magnez) łatwo ulegają wymyciu. Większość roślin uprawnych rozwija się najlepiej przy obojętnym i lekko kwaśnym odczynie.

Odczyn gleby wymaga systematycznej kontroli, ponieważ zakwaszenie w naszych warunkach klimatycznych zachodzi samoistnie i wynika ze specyfiki procesu glebotwórczego oraz rodzaju skał macierzystych, z których dana gleba powstała. Na wymienione czynniki nakładają się procesy antropogenicznego zakwaszenia i zbyt małe zużycie nawozów o działaniu odkwaszającym. Zakwaszenie objawia się wzrostem ilości i aktywności kationów kwaśnych.

O kwasowości gleby decyduje udział składników zasadowych, a przede wszystkim wapnia w kompleksie sorpcyjnym. Przyczyny zakwaszania gleb tkwią w procesach naturalnych. Intensywność procesów prowadzących do zakwaszania gleb odnosi się do rodzaju skały macierzystej gleb, z których powstały; procesów mineralizacji materii organicznej (rodzimej gleby, resztek poźniwnych, nawozów organicznych); procesów utleniania związków azotu i siarki; wymywania kationów zasadowych (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+); wynoszenia kationów zasadowych z plonem. Pobranie wapnia z plonami roślin jest zróżnicowane w dość szerokim zakresie i waha się od 20 do ponad 300 kg/ha. Szczególnie duże zapotrzebowanie na wapń wykazują rośliny wieloletnie motylkowate (lucerna) oraz rzepak w fazie zawiązywania łuszczyń. Procesy zakwaszania gleb potęgowane są również przez aktywność człowieka, a wśród nich do najważniejszych zalicza się: stosowanie nawozów fizjologicznie kwaśnych (mocznik, siarczan amonu, RSM) oraz tzw. kwaśne deszcze.

5. Precyzyjna ocena przyswajalnych form składników w glebie

Ilość ekstrahowanych składników z gleby odzwierciedla zmiany ich zawartości wywołane nawożeniem, uprawą roślin, zmianami cech fizycznych i chemicznych gleby. Prawdłowo przeprowadzone testy glebowe są podstawowym narzędziem diagnostycznym umożliwiającym wyznaczenie dawek nawozowych składników mineralnych. W diagnostyce nawozowej istotne znaczenie ma nie tylko klasa zasobności gleby w testowany pierwiastek na danym polu, ale jego zawartość w fazie największego zapotrzebowania rośliny na ten składnik.

W Polsce do oceny przyswajalnych form składników P i K w glebie wykorzystuje się metodę Egnera-Riehma, w której do ekstrakcji używa się roztworu kwaśnego mleczanu wapnia o pH 3,55. Przyjmuje się, że dla wysokoplonujących upraw krytyczna zawartość **fosforu** po zbiorze rośliny przedplonowej powinna mieścić się w klasie wysokiej tj. powyżej 15,1 mg $\text{P}_2\text{O}_5/100$ g gleby, a dla zbóż w klasie średniej (powyżej 10,1 mg $\text{P}_2\text{O}_5/100$ g gleby).

Według danych GUS ocena zasobności gleb w przyswajalny fosfor przeprowadzona w latach 2010-2013 wykazała, że 42% gleb w Polsce charakteryzuje się bardzo

wysoką i wysoką zasobnością w ten składnik; 26% średnią, a 32% stanowią gleby o niskiej i bardzo niskiej zasobności. W skali kraju występuje duże zróżnicowanie regionalne pod względem zasobności gleb w P. Na szczególną uwagę zasługują województwa Kujawsko-Pomorskie oraz Wielkopolskie, ze względu na przeważający w tych regionach udział gleby o bardzo wysokiej i wysokiej zasobności P-przyswajalnego, stanowiąc odpowiednio dla wymienionych województw 54% i 52%. Znaczący udział gleb o bardzo niskiej i niskiej zasobności w fosfor dominuje na terenie Małopolski (58%), Podkarpacia (51%) oraz województwa Świętokrzyskiego (47%).

Składnikiem krytycznym dla większości upraw w Polsce jest **potas**. Niedobór tego pierwiastka w glebie jest na tyle duży, że nie gwarantuje efektywnego przetworzenia stosowanego azotu w plon i jednocześnie nie zapewnia odpowiedniej jego jakości.

Według danych GUS (2015) udział gleb o bardzo niskiej i niskiej zasobności K przedstawia się odpowiednio (16%) i (26%), natomiast średnio w Polsce wynosi 42%, przy jednocześnie również dużym zróżnicowaniu regionalnym. Najgorsza sytuacja występuje na terenie województwa Mazowieckiego, gdyż zawartość składnika o bardzo niskiej (29%) i niskiej zawartości (33%) obejmuje 62% gleb. W odróżnieniu od fosforu większość gleb Wielkopolski, charakteryzuje się niską (28%) i średnią (29%) zasobnością w potas przyswajalny.

W wielu regionach kraju, niedobór potasu w glebie silnie ogranicza plonowanie roślin uprawnych. Zawartość potasu w glebie jest tym niższa im gleba jest lżejsza. Małe ilości K zawierają gleby organiczne, głównie torfowe. Mimo, że zawartość potasu ogólnego w glebach ciężkich jest zwykle duża, to pierwiastek ten występuje w formach nieprzyswajalnych dla roślin, ponieważ wietrzenie minerałów mogących spowodować jego uwolnienie jest procesem bardzo powolnym. Średnia zasobność gleby w przyswajalny potas, rzadko zaspokaja potrzeby pokarmowe roślin wrażliwych na ten składnik i w konsekwencji rośliny reagują brakiem stabilności plonowania.

Do pokrycia potrzeb pokarmowych wysokoplonujących grup roślin w stanowiskach gleb lekkich niezbędna jest zawartość składnika na poziomie 15 mg $K_2O/100$ g gleby. Niedobór potasu w glebie na znacznym obszarze kraju jest na tyle duży, że nie gwarantuje efektywnego przetworzenia stosowanego azotu w plon i jednocześnie nie zapewnia odpowiedniej jakości ziarna.

Optymalny poziom zasobności gleby w potas przeznaczonej pod uprawę zbóż powinien kształtować się na poziomie przynajmniej średniej zasobności. Zawartość potasu w glebie jest tym niższa im gleba jest lżejsza. W przypadku uprawy takich roślin jak: rzepak, kukurydza, czy burak cukrowy – spośród wszystkich kationów potas pobierany jest w największych ilościach. Dynamika pobierania K

przez rośliny jest zróżnicowana ilościowo i zależy od gatunku, odmiany, dynamiki przyrostu biomasy w sezonie wegetacyjnym, zaopatrzenia łąnu w inne składniki pokarmowe.

Należy jednak pamiętać, że nie zawsze nawożenie potasem prowadzi do wzrostu plonów roślin uprawnych. Cały szereg czynników takich jak: odmiana, wysokość plonu, gęstość łąnu, temperatura, stosunki powietrzno-wodne gleby, mają duży wpływ na ilość pobieranego pierwiastka.

Kolejnym czynnikiem decydującym o pobieraniu potasu jest budowa i zasięg systemu korzeniowego. Lepiej wykształcony system korzeniowy roślin pozwala efektywniej korzystać z zastosowanych nawozów oraz rezerw składnika w glebie. Rośliny uprawne w większym stopniu pobierają potas z rezerw zakumulowanych w całej strefie ukorzenienia niż z bieżącego stosowania nawozu.

Potrzeby pokarmowe roślin względem potasu są uzależnione także od długości okresu wegetacji. Rośliny pobierające taką samą ilość potasu jak np. buraki cukrowe i trzcina cukrowa różnią się znacznie długością okresów wegetacji, który w przypadku pierwszej grupy roślin trwa zaledwie 120 dni, natomiast trzcina rośnie praktycznie przez cały rok. Zróżnicowanie długości okresu wegetacji wskazuje także na różne wymagania nawozowe wymienionych roślin i dynamikę pobierania składnika.

Potrzeby pokarmowe są również zróżnicowane w ciągu okresu wegetacji i generalnie największe w fazie wzrostu wegetatywnego. Zarówno w zbożach, jak i w rzepaku stadium wzrostu wydłużeniowego cechuje się największym pobieraniem potasu. W fazie intensywnego pobierania składnika dzienne zapotrzebowanie plantacji na potas waha się od kilku do kilkunastu kilogramów. Ziemiak np. w początkowym okresie wegetacji pobiera 50% ogólnej ilości potasu, rzepak ozimy w fazie strzelania w pęd pobiera 3-7 kg/ha, natomiast buraki od 8-15 kg K/ha/dzień. Dostatecznie wysoka zasobność gleb w K pozwala roślinie efektywnie gospodarować wodą, co ma istotny wpływ w przypadku zbóż na procesy kwitnienia i zawiązywania ziarniaków w okresie wegetacji wiosennej.

Niedobór potasu pociąga za sobą przede wszystkim zmniejszenie zawartości białka w roślinie, a w konsekwencji spadek plonu. Wskutek zakłócenia biosyntezy białka, w roślinach z niedoborem potasu gromadzą się w dużych ilościach wolne aminokwasy i amidy, które stanowią bezpośrednią pożywkę dla rozwoju patogenów. Niedostateczne zaopatrzenie w potas zmniejsza także odporność roślin na wymarzenie. Największe jednak zapotrzebowanie zbóż na potas przypada na wegetację wiosenną, a ściślej okres intensywnego przyrostu biomasy (od końca krzewienia do początku kwitnienia).

Zboża w odróżnieniu od rzepaku buraków cukrowych zaliczane są do grupy roślin tolerancyjnych na nawożenie potasem. W stanowiskach uprawianych po burakach

cukrowych, których liście zostały przyorane, nawożenie potasem jest zbędne. Ilość uwolnionego potasu w roku uprawy po burakach cukrowych kształtuje się na poziomie ok. 200 kg/ha/rok, co stanowi ok. 60% wykorzystania. Liście buraczane są także dobrym źródłem magnezu i wapnia.

6. Regulacja zasobności gleby w przyswajalne formy fosforu i potasu

W celu dokonania precyzyjnych zaleceń nawozowych, a zatem określenia dawek nawozów mineralnych P i K wprowadzonych do gleby, pozwalających uzyskać maksymalny plon, niezbędna jest analiza gleby. Szczególnej uwagi w przygotowaniu zaleceń nawozowych P i K wymagają rośliny, które wykazują silną reakcję na zasobność gleby w te składniki, jak i przedsiewne nawożenie nimi. Jedną z takich roślin jest np. rzepak. Punktem wyjścia w podjęciu decyzji o poziomie nawożenia mineralnego tymi składnikami jest aktualny poziom zasobności gleby.

Przyjmuje się, że krytyczne zawartości składników po zbiorze rośliny przedplonowej powinny kształtować się odpowiednio dla fosforu ($>15,1$ mg P_2O_5 /100 g gleby) oraz dla potasu w zależności od kategorii agronomicznej na poziomie 15-20,1 mg K_2O /100 g gleby. W sytuacji, kiedy stanowisko przeznaczone pod uprawę rzepaku charakteryzuje się znacznie niższym poziomem zasobności w przyswajalne formy P i K wówczas należy podjąć działania zmierzające do wyrównania zawartości składników do wymaganej wartości krytycznej. Zabieg ten należy rozłożyć w czasie, gdyż w wielu sytuacjach wyliczona jednorazowa dawka składników jest ze względów ekonomicznych trudna do wykonania. Wartość progowa, czyli optymalna, zawartości fosforu i potasu przyswajalnego w glebie w roku uprawy rzepaku czy buraków cukrowych powinna osiągnąć pogranicze zasobności średniej i wysokiej,

Procedura ustalania dawek nawozowych jest złożona. W każdym przypadku wymaga posiadania podstawowych informacji o zasobności stanowiska w składniki mineralne (fosfor, potas, magnez) oraz spodziewanym poziomie plonów w danych warunkach glebowo-klimatycznych. Ponadto nie ma uniwersalnego schematu zleceń, który można zastosować do wszystkich gospodarstw. Każdy przypadek wymaga indywidualnego rozważenia poszczególnych składowych niezbędnych do wyliczenia dawki nawozowej.

Opracowując strategię nawożenia np. rzepaku fosforem należy uwzględnić takie czynniki jak: fazę krytyczną na działanie fosforu, czas i rodzaj aplikowanego nawozu oraz zawartość składnika w glebie. Na glebach zasobnych w fosfor należy zastosować ok. 30% potrzeb pokarmowych plantacji.

Głównym zadaniem wprowadzonego „świeżego” fosforu do gleby jest zapewnienie dostatecznej ilości składnika w początkowych fazach wzrostu oraz pobudzenie roślin do przyspieszonego rozwoju. Obecność w glebie łatwo dostępnych związków fosforu stymuluje wzrost korzeni i decyduje o jego rozbudowie. Nawożenie fosforem poprzez wzrost zawartości P_i w roztworze glebowym stymuluje wzrost korzeni, co w konsekwencji oznacza lepsze zaopatrzenie rośliny w wodę i składniki pokarmowe. Ze względu na głęboki system korzeniowy rzepaku, roślina ta dobrze wykorzystuje rezerwy składników z zapasów glebowych. Szacowaną dawkę P najlepiej zastosować przed siewem roślin lub tuż przed wiosennym ruszeniem wegetacji roślin ozimych. Nawozy fosforowe wymagają dobrego wymieszania z glebą. Wynika to z właściwości fizycznych nawozu, dużego zapotrzebowania granuli na wodę.

Termin nawożenia fosforem i potasem jest niezwykle ważny. W przypadku rzepaku rola tych składników ma istotne znaczenie ze względu na wpływ P na rozwój systemu korzeniowego i znaczne pobieranie K już w okresie wegetacji jesiennej (do 20-25% całkowitej ilości pobranego potasu). W bardzo dobrym łanie oznacza to pobranie dochodzące nawet do 80 kg K_2O /ha. W pozostałych okresach wzrostu roślina korzysta głównie z rezerw składników zawartych w głębszych warstwach gleby. Z tych też przyczyn wymagana jest dobra, a nawet powyżej średniej, zasobność warstwy ornej w potas. Stosowanie nawozu tuż przed siewem stwarza niebezpieczeństwo zasolenia gleby, co jest niebezpieczne dla kiełkujących nasion. Niedobór potasu w glebie w wielu przypadkach jest na tyle duży, że nie gwarantuje efektywnego przetworzenia stosowanego azotu w plon i jednocześnie nie zapewnia odpowiedniej jakości.

Stosując system precyzyjnego nawożenia fosforem i potasem należy regularnie kontrolować dynamikę zmian zawartości przyswajalnych form składników w glebie. Najlepszym sposobem kontroli jest systematyczne pobieranie prób glebowych z tych samych miejsc wyznaczonych za pomocą GPS. Ścisłe badania przeprowadzone przez pracowników Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu wykazały, że precyzyjne nawożenie w okresie 4 lat zmniejszyło średnią zawartość P i K w glebie. Stwierdzono wyrównanie zawartości tych składników na obszarze pola, która wynikała ze wzrostu zawartości pierwiastków w miejscach o niskiej zasobności i spadku w miejscach o wysokiej zawartości form przyswajalnych.

7. Precyzyjna ocena stanu odżywienia roślin w trakcie wegetacji

Ocena stanu odżywienia roślin ozimych dokonywana na podstawie **obserwacji łanu** polega na porównaniu bieżącego stanu roślin ze standardem uznawanym za optymalny. Pomocnym narzędziem do realizacji tego celu są np. różnego rodzaju

atlasy niedoborów składników pokarmowych. W gospodarstwach wielkoobszarowych nastawionych na intensywną produkcję wykorzystuje się technologie bardziej zaawansowane polegające na zastosowaniu urządzeń optycznych sprzężonych z maszyną aplikującą nawóz.

Wśród metod pozyskania informacji o stanie odżywienia roślin szczególne zainteresowanie budzi **analiza spektralna promieniowania elektromagnetycznego** odbitego od obiektów. Analiza spektralna umożliwia określenie poziomu chlorofilu i śledzenie przebiegu procesu fotosyntezy w roślinach. Dane do analizy spektralnej pozyskiwane są przy użyciu kamer pobierających obrazy obiektów lub terenu w zakresie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni. Ilość energii słonecznej dopływającej do powierzchni Ziemi tylko w części jest związana przez łan i jest aktywna fotosyntetycznie. Ilość światła zaabsorbowanego i przechodzącego przez liść zależy od: powierzchni blaszki liściowej, jej kształtu, kąta nachylenia liścia, liczby liści oraz zdrowotności liścia.

Kluczowym parametrem określającym ilość energii świetlnej absorbowanej przez łan jest indeks liściowy LAI (ang. leaf area indeks). Z całkowitej ilości energii słonecznej dopływającej do powierzchni Ziemi udział energii fotosyntetycznie aktywnej (PAR – photosynthetic active radiation) wynosi w dni słoneczne 38%, a w pochmurne 58%. Z tej ilości ok. 50% obejmują fale o długości powyżej 700 nm (bliska podczerwień). Aktywne fotosyntetycznie są tylko fotony światła czerwonego (700 nm) i fioletowego (400 nm). Należy podkreślić, że fotony światła fioletowego zawierają o 75% więcej energii niż fotony światła czerwonego. Przez liść przechodzi światło o długości fali >700 nm.

Barwniki asymilacyjne są odpowiedzialne za pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego z zakresu fotosyntetycznie czynnej radiacji (PAR) jako energii do asymilacji dwutlenku węgla w procesie fotosyntezy. Barwniki asymilacyjne są zlokalizowane w błonach wewnętrznych chloroplastów, wchodząc w skład systemów zbierających światło. W roślinach wyższych występują barwniki asymilacyjne z dwóch grup strukturalnych: chlorofil i karotenoidy. Podstawę cząsteczki chlorofilu stanowi pierścień porfirynowy utworzony z czterech pierścieni pirolowych. W centrum cząsteczki znajduje się magnez połączony wiązaniami koordynacyjnymi z dwoma atomami z pierścieni pirolowych i kowalencyjnie związanymi z dwoma z czterech atomów N. Pierścień pirolowy połączony jest estrowo z fitolem – alkoholem 20-węglowym.

Oznaczanie ilości barwników w tkankach roślinnych ma zarówno aspekt naukowy jak i praktyczny. Ilość absorbowanej przez liść energii PAR jest funkcją zawartości w liściu barwników asymilacyjnych, zatem niskie stężenie chlorofilu może bezpośrednio ograniczać intensywność fotosyntezy i zmniejszać produkcję biomasy. Wytworzona przez roślinę biomasa jest funkcją zawartego w organach wegeta-

tywnych azotu. Procesy przepływu azotu między starszymi a młodszymi organami rośliny są podstawowymi czynnikami wzrostu i w rezultacie warunkiem uzyskania plonu. Ponadto, duża część azotu zawartego w liściach jest wbudowana w cząsteczki chlorofilu, dlatego też oznaczanie zawartości chlorofilu jest pośrednią miarą stanu odżywienia mineralnego rośliny azotem. W okresie wegetacji przepływ azotu ze starszych organów rośliny do młodszych zachodzi z różną szybkością. Zabarwienie liścia może być wskaźnikiem jego stanu fizjologicznego.

Barwniki asymilacyjne są odpowiedzialne za pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego z zakresu fotosyntetycznie czynnej radiacji (PAR), jako energii do asymilacji dwutlenku węgla w procesie fotosyntezy. Barwniki asymilacyjne absorbują radiację PAR w sposób selektywny, w zakresie zależnym od rodzaju barwnika. Reakcja ta jest konsekwencją stresu u roślin, który prowadzi do obniżenia zawartości chlorofilu i w rezultacie zmniejsza się ilość odbitego światła zielonego oraz w bliskiej podczerwieni.

Najstarszymi i najbardziej popularnymi testami spektralnym, opartymi na pomiarach współczynników odbicia światła w przedziałach czerwieni i bliskiej podczerwieni, jest **NDVI** (ang. Normalized Difference Vegetation Index) oraz **SPAD** (ang. Soil Plant Analysis Development). W klasycznej postaci indeks NDVI przyjmuje wartości w zakresie $< -1 \text{ do } 1 >$. Wartości w okolicach 0 występują na ogół dla obiektów nieożywionych. Im wyższe jest odbicie w NIR (bliskiej podczerwieni) i im mniejsze w RED (odbicie światła w paśmie czerwieni), tym rośliny są bardziej zielone i wartość NDVI jest większa. Oznacza to, że rośliny zawierają więcej chlorofilu, który odpowiada za pochłanianie promieniowania czerwonego oraz miększu gąbczastego odbijającego promieniowanie podczerwone. Wysokie wartości NDVI są związane z aktywnością procesu fotosyntezy. Generalnie, im wyższa wartość wskaźnika, tym większa ilość biomasy.

Test SPAD tzw. indeks zieloności liści albo zawartości chlorofilu, polega na pomiarze różnic pomiędzy ilością światła absorbowanego (o długości fali 650 nm) i przepuszczonego (o długości fali 940 nm) przez tkankę liścia. Iloraz tych różnic jest indeksem SPAD. Pomiar przeprowadza się bezpośrednio na polu przy użyciu urządzenia SPAD-502, zwanego chlorofilometrem lub N-testerem, wykonując 30 pomiarów, które składają się na wynik średni wyświetlany na ekranie aparatu w formie tzw. jednostek SPAD. Przy takim samym stanie odżywienia roślin azotem odczyty z N-testera są zróżnicowane w zależności od gatunku i uprawianej odmiany.

Spośród nowoczesnych narzędzi wykorzystywanych w precyzyjnym nawożeniu do najbardziej popularnych należą różnego rodzaju **czujniki optyczne**. Montuje się je w głowicach umieszczonych z prawej i lewej strony ramienia zamieszczonego na przednim zawieszeniu ciągnika (Fot. 5). Podczas pomiaru czujniki utrzymywane są na wysokości 80 cm nad uprawą. Każda głowica skanuje powierzchnię o śred-

nicy 50 cm. Urządzenie może być również wykorzystywane zarówno w dzień, jak i w nocy, dzięki zastosowaniu aktywnego oświetlenia LED. Pomiar prowadzi się w sposób ciągły wynikający z ruchu pojazdu. Zdolność barwników asymilacyjnych do pochłaniania światła wiąże się z ich budową chemiczną. Ręczne mierniki oparte na absorpcji promieniowania dokonują pomiaru absorpcji przez liść dwu długości fal, zwykle 660 nm (czerwień) i 730 nm lub 940 nm (bliska podczerwień).



Fot. 5. Czujniki optyczne zamieszczone w głowicach z prawej i lewej strony ramienia zamontowanego na przednim zawieszeniu ciągnika (Koronczok, Agrocom)

Innym urządzeniem wykorzystującym teledetekcję przy określaniu dawki azotu jest **N-Sensor** produkowany przez firmę Yara. N-Sensor podczas jazdy ciągnika z rozsiewaczem nawozów skanuje obszar przed i w otoczeniu ciągnika i przeprowadza uproszczoną analizę spektralną promieniowania odbitego od roślin. Czujnik mierzący ilość światła odbitego od łanu roślin, zamontowany jest na dachu ciągnika, co pozwala uniknąć stosowania wysięgników utrudniających wykonanie zabiegów agrotechnicznych. Źródłem światła jest lampa ksenonowa, wytwarzająca światło o dużej intensywności. Zmierzona ilość światła odbitego od łanu roślin stanowi wartość średnią wyliczoną na podstawie czterech jednocześnie wykonywanych pomiarów. Wartość światła odbitego przeliczana jest na dawkę azotu dla danego pola i jest określana przez operatora przed rozpoczęciem zabiegu nawo-

żenia. N-Sensor identyfikuje zmianę powstałą na skutek spadku poziomu chlorofilu w roślinach i przelicza ją na wymaganą dla danego obszaru dawkę azotu, umożliwiając odpowiednią regulację rozsiewacza w czasie rzeczywistym. Oprogramowanie dostarczane przez producenta wraz czujnikiem zawiera zdefiniowane algorytmy dla różnych gatunków roślin uprawnych, pozwalające na optymalizację nawożenia azotem.

Zadaniem operatora przed rozpoczęciem pracy urządzenia jest kalibracja czujnika N-sensora. Do pamięci komputera wymagane jest wprowadzenie następujących danych: gatunek rośliny, stadium rozwojowe, zawartość azotu w nawozie, minimalna i maksymalna dawka azotu, jaka może być zastosowana.

8. Prawidłowe określenie symptomów niedoboru azotu

Symptomy niedoborów składników nie są łatwe do rozpoznania wzrokowego i jednoznacznej interpretacji, gdyż zmiany w wyglądzie rośliny, czy też blaszki liściowej może wywoływać wiele różnych czynników, takich jak: temperatura, woda, choroby, herbicydy, odczyn gleby. Obserwacja łanu dotycząca stanu odżywienia powinna być prowadzona w sposób ciągły, z wykorzystaniem szeregu metod uzupełniających się, które pozwolą na szybką korektę tego stanu. Dla większości składników mineralnych wizualne stwierdzenie niedoboru oznacza głęboki stan zakłócenia gospodarki mineralnej rośliny prowadzący do spadku plonu, niezależnie od podjętych działań korekcyjnych. W pierwszym etapie oceny stanu odżywienia określa się ogólny wygląd rośliny związany z wielkością i barwą liści, przebarwieniami, a dopiero w następnej kolejności należy rozpoznać przyczynę takiego stanu.

Wizualne niedobory składników mineralnych obserwowane na roślinach są następstwem zakłócenia procesów biochemicznych, które wywołują reakcje fizjologiczne w postaci zauważalnych symptomów. Podstawowym organem diagnostycznym stanu odżywienia roślin zbożowych są liście. Objawy niedoborów na liściach w zależności od pierwiastka mogą ujawnić się w postaci chloroz (całkowita, międzynacyniowa) oraz nekroz (obumarłe tkanki blaszki liściowej). Objawy nekroz wyrażają zaawansowany stan niedoboru składników. Poza wymienionymi klasycznymi objawami niedoborów określonych pierwiastków, rośliny mogą reagować przebarwieniami zarówno blaszki liściowej, jak i pędu oraz zamieraniem merystemów wierzchołkowych pędów i korzeni. W przypadku zdiagnozowania określonych niedoborów składników należy podjąć działania mające na celu jak najszybsze ich uzupełnienie, aby maksymalnie skrócić czas stresu, na jaki narażona jest roślina.

Stan odżywienia azotem można określić precyzyjnie, stosując bezpośrednio lub pośrednio testy roślinne. Testy bezpośrednio polegają na oznaczaniu całkowitej zawartości składnika lub jego jonów. W odniesieniu do azotanów sprowadza się to do oznaczania zawartości azotu ogólnego w suchej masie roślin lub oznaczania zawartości azotanów w soku roślinnym. Skład chemiczny rośliny, w tym zawartość azotu zależy od działania trzech grup czynników:

- 1) odmiany, fazy rozwojowej, wielkości systemu korzeniowego, zdrowotności tkanek i organów;
- 2) naturalnych i sztucznych czynników środowiska wzrostu (klimat, warunki wodne, nawożenie, ochrona chemiczna);
- 3) współdziałania między składnikami mineralnymi.

8.1. Zboża

Korektę aktualnego stanu odżywienia rośliny azotem przeprowadza się w ściśle określonej fazie i pomiar powinien wyprzedzać fazę największego wzrostu biomasy rośliny.

Niedobory azotu w zbożach przejawiają się w postaci jasnozielonej barwy liści starszych, a przy pogłębiającym się niedoborze składnika chloroza obejmuje całą powierzchnię blaszki liściowej. W skrajnych warunkach chloroza przechodzi w nekrozy, a w konsekwencji najstarsze liście żółkną i usychają. W dalszej kolejności niedobór azotu ujawnia się w postaci skróconych i cienkich źdźbeł, które są słabo ulistnione. W stadium początkowym wizualne objawy niedoboru azotu można pomylić z niedoborami siarki i magnezu, gdyż przyjmują postać chlorozy międzynaczyniowej. Zasadnicza różnica pomiędzy składnikami sprowadza się do lokalizacji symptomów – niedobory N ujawniają się na liściach starszych, natomiast siarki na najmłodszych. Niedobór azotu od magnezu odróżniają nekrozy, które w przypadku magnezu pojawiają się we wczesnym stadium niedoboru składnika.

Niedobory azotu najczęściej ujawniają się w stanowiskach ubogich w ten pierwiastek, szczególnie po przyoraniu słomy, a także w warunkach nadmiernych opadów deszczu w danym regionie. Ujawnienie się niedoborów azotu pociąga również za sobą określone skutki produkcyjne, których rozmiar zależy od fazy rozwojowej rośliny:

- słabe krzewienie;
- redukcję liczby kłosów na jednostce powierzchni;
- zmniejszenie liczby nasion w kłosie;
- małą masę ziarniaków, często o zwiększonej zawartości białka;
- w fazie dojrzałości pełnej rośliny szybciej dojrzewają;

Diagnostując niedobory azotu należy zwrócić dokładną uwagę na cały łan, a nie pojedyncze rośliny, ponieważ żółknięcie liści może być powodowane przez sprawców chorób podstawy źdźbła, mączniak prawdziwego czy brunatnej plamistości.

Zarówno niedobór, jak i nadmiar azotu wywołuje określone skutki produkcyjne roślin. W trakcie wegetacji dodatkowym pomocnym wskaźnikiem przy ocenie wzrokowej stanu odżywienia azotem mogą być pozostawione „okna nawozowe”. Są to pozostawione w łanie powierzchnie kontrolne, na których celowo zastosowano mniejsze dawki azotu. Duża dawka azotu w nawożeniu zbóż prowadzi do produkcji nadmiernej masy vegetatywnej o zbyt dużej masie liści i słabych łodygach, a tym samym zwiększonej podatności na wyleganie i choroby grzybowe. Rośliny przენawożone azotem później osiągnają fazę kwitnienia, wolniej dojrzewają, co w konsekwencji prowadzi do spadku plonu ziarna.

8.2. Rzepak

Diagnostowanie niedoborów składników w rzepaku ukierunkowane na korektę stanu odżywienia rośliny należy przeprowadzać w okresie od wiosennego ruszenia wegetacji, aż do pełnego wykształcenia rozety. Wiosenne nawożenie rzepaku rolnicy rozpoczną od nawożenia azotem. Ocenę stanu odżywienia rzepaku w okresie wiosennym można określić na podstawie oceny wzrokowej lub z zastosowaniem testów roślinnych. Duże gospodarstwa wykorzystują zaawansowane technologie wykorzystując zdjęcia satelitarne, skanery optyczne, N-Sensory. Ocena wzrokowa łanu wymaga dużego doświadczenia i fachowości. Diagnostyka wizualna jest bardzo trudna, gdyż objawy niedoborów składników pokarmowych mogą się wzajemnie zacierać, często też deficytowi jednego składnika towarzyszy niedobór lub nadmiar innego. Ponadto podobne do braku składnika – objawy mogą wystąpić w wyniku porażenia roślin przez patogeny.

Z praktycznego punktu widzenia, szczególnie w małych gospodarstwach zdecydowanie bardziej miarodajne są analizy chemiczne stanu odżywienia roślin. Zastosowanie testów roślinnych stwarza możliwość określenia wielkości istniejącego niedoboru składnika lub przewidywanie tego stanu. Efekty stosowania testów roślinnych zależą od poprawności pobrania reprezentatywnej próbki roślinnej w różnych jej stadiach rozwojowych i pozwalają na stwierdzenie konieczności interwencji szybkodziałającymi nawozami dolistnymi.

O ile w przypadku niedoborów innych składników mineralnych wzrokowa ocena może być zawodna i wymagać dużego doświadczenia, i fachowości, tak w stosunku do azotu jest to zadanie znacznie łatwiejsze, ze względu na specyficzny charakter objawów. Faza rozety jest pierwszym krytycznym okresem wegetacji rzepaku,

w którym niedobór tego składnika spowalnia szybkość jego akumulacji w roślinie, a w rezultacie hamuje szybkość przyrostu biomasy. Na polach pozbawionych okrywy śniegowej wyraźnie widać żółte dolne liście, które z czasem odpadają. Żółknięcie dolnych liści w okresie jesienno-zimowym jest naturalnym zjawiskiem, które wskazuje nie tyle na niedobór azotu, co na przygotowanie roślin do spoczynku zimowego i jest to proces naturalny. Wczesne, wiosenne dostarczenie azotu jest niezbędne do odbudowania powierzchni asymilacyjnej liści.

Niedobór azotu wywołuje określone zmiany morfologiczne w roślinie, a do najbardziej charakterystycznych należą:

- jasnozielone zabarwienie starszych liści, (natomiast rośliny z nadmiarem azotu są intensywnie niebieskozielone);
- przy silnym niedoborze azotu żółknięcie liści, usychanie a następnie opadanie dolnych liści;
- chloroza liściowa - obejmuje całą powierzchnię blaszki liściowej i ujawnia się na starszych liściach;
- spowolnienie wzrostu całej rośliny;
- karłowacenie roślin;
- przyspieszone kwitnienie (zdjęcie kwitnącego rzepaku).

8.3. Kukurydza

Kukurydza jest rośliną bardzo dobrze pobierającą azot mineralny z gleby. Niezbędnym warunkiem do określenia dawki azotu, którą należy zastosować w formie nawozu mineralnego, jest oznaczenie lub oszacowanie ilości azotu dopływającego ze źródeł pozanawozowych, głównie z gleby. Zadanie to jest trudne, gdyż należy uwzględnić: (1) ilość azotu mineralnego w glebie w momencie siewu rośliny lub rozpoczęcia wegetacji (wiosna) oraz (2) szybkość mineralizacji azotu organicznego w glebie w okresie wzrostu rośliny.

Ilość azotu mineralnego uwalnianego w czasie wegetacji zależy od rodzaju przedplonu, sposobu zagospodarowania słomy oraz stosowanego nawozu naturalnego lub organicznego. W ostatecznych wyliczeniach dawkę nawozową N należy pomniejszyć o ilość azotu uwalnianego w czasie wegetacji z gleby oraz z nawozów naturalnych bądź organicznych (uwzględniając czas oddalenia od stosowania obornika liczony w latach). W pierwszym roku po zastosowaniu obornika ilość azotu wykorzystywana przez rośliny kształtuje się na poziomie 30-40%, co przy dawce obornika 30 t/ha daje ok. 45-60 kg N/ha. Kukurydza także bardzo dobrze wykorzystuje azot z przyoranych liści buraków. W optymalnych warunkach wilgotnościowych z liści, które zostały dobrze rozdrobnione i równomiernie rozmiesz-

czonych w glebie, może uwolnić się cały azot w sezonie wegetacyjnym, który roślina wykorzysta nawet w 70%.

Liczne badania krajowe jednoznacznie wykazały, że reakcja plonotwórcza kukurydzy na dawki azotu powyżej 150 kg/ha jest niewielka i bardzo często definiowana jako tzw. „reakcja pełzająca” tzn. nawet duże i bardzo duże dawki składnika powodują niewielkie przyrosty plonu. Zbyt duża dawka azotu prowadzi do nadmiernej masy wegetatywnej o zbyt dużej masie liści i słabych łodygach, a tym samym zwiększonej podatności na wyleganie. Rośliny przenawożone azotem później osiągają fazę kwitnienia, wolniej dojrzewają, co w konsekwencji prowadzi do spadku plonu ziarna. Zatem, wzrostu plonu ziarna należy poszukiwać na drodze zwiększania efektywności zastosowanego azotu, gdyż jest to także sposób na zwiększenie plonu białka i poprawę wartości kiszonki. Wyliczoną dawkę azotu można zastosować jednorazowo, lecz bardziej uzasadniony i celowy jest podział dawki. Dzielona dawka umożliwia korektę odżywienia roślin w okresie intensywnego ich wzrostu.

W celu poprawnego określenia dawki azotu w uprawie kukurydzy godna polecenia jest metoda stosowana we Francji, która opiera się na założeniu, że dawka azotu nie powinna przekroczyć 0,2 spodziewanego plonu ziarna. Przyjmując takie założenie dla plonu ziarna 8 t/ha dawka azotu wynosiłaby nie więcej niż 160 kg N/ha.

9. Wybór nawozu azotowego – czym się kierować?

Jednym z ważniejszych czynników decydujących o wyborze określonego nawozu azotowego powinna być roślina, z którą ściśle związek ma forma stosowanego azotu. Wśród roślin uprawnych jak dotąd nie wykształciły się typowe gatunki czy też odmiany preferujące tylko jedną formę azotu. Rośliny uprawne pobierają azot w formie amonowej (N-NH_4^+) i azotanowej (N-NO_3^-). Obie te formy, ściśle ze sobą powiązane, zachowują się w glebie odmiennie, a ponadto wywołują odmienną fizjologiczną reakcję roślin. Do roślin dodatnio reagujących na nawożenie formą N-NH_4 można zaliczyć ziemniaki i kukurydzę, a na N-NO_3 buraki cukrowe. Istotnym czynnikiem decydującym o wyborze nawozu obok formy azotu, jest termin stosowania nawozu, który powinien być dostosowany do indywidualnych potrzeb rośliny, dynamiki jej wzrostu i pobierania azotu oraz kierunku użytkowania.

W przypadku kukurydzy należy mieć również na uwadze fakt, iż działanie formy azotu na plonowanie tej rośliny w dużym stopniu zależy od jej fazy rozwojowej. Azot może być stosowany w formie amonowej, azotanowej bądź amidowej (mocznik). Ze względu na duże zapotrzebowanie kukurydzy na fosfor (P) w początkowych fa-

zach rozwoju wskazane jest wprowadzenie do gleby nawozów o zakwaszającym działaniu, najlepiej z jednoczesnym połączeniem P. Warunki te spełniają fosforany amonu oraz klasyczne nawozy azotowe takie jak: mocznik i ewentualnie siarczan amonu. W przypadku tych dwóch ostatnich wymienianych nawozów ważny jest termin aplikacji. Należy je zastosować możliwie jak najwcześniej, (co najmniej na dwa tygodnie przed siewem), gdyż zachodzi realne niebezpieczeństwo zakłócenia wschodów. Dawka składników wprowadzona do gleby w tej grupie nawozów nie powinna przekroczyć 2/3 całkowitej dawki azotu. Stosując mocznik należy mieć na uwadze fakt, że roślina może korzystać z tej formy azotu dopiero po jego hydrolyzie do formy amonowej. Głównym czynnikiem decydującym o szybkości przemiany mocznika w N-NH_4 jest temperatura. Uwalnianie azotu z formy amidowej nawozu wzrasta wraz ze wzrostem temperatury gleby.

Drugą grupę stanowią wolnodziałające nawozy azotowe typu saletrzak, saletra wapniowo-amonowa (CAN 27) czy też szybko działająca saletra amonowa. Przy stosowaniu tej grupy nawozów można jednorazowo wprowadzić do gleby całą oszacowaną dla kukurydzy dawkę składnika. Jednakże bardziej wskazane byłoby także nie przekraczać 2/3 dawki całkowitej. Pozostałą część azotu, czyli około 1/3 dawki całkowitej najlepiej zastosować tuż przed wejściem roślin w fazę 6-tego liścia (optymalny termin od 5 do 7 liścia). W tym terminie nawożenia azotem powinno preferować się formy szybko działające, a więc saletrę amonową, a zwłaszcza saletrę wapniową. Ten ostatni z nawozów bardzo korzystnie działa na pobieranie przez roślinę magnezu. Zatem, wskazane byłoby jego stosowanie w uprawie kukurydzy na ziarno. W latach wilgotnych czy też mokrych drugą dawkę azotu można zmniejszyć o połowę, lecz wówczas także należy preferować formy saletrane. Dobre wyniki daje również pogłównie nawożenie roztworem saletrzano-mocznikowym (RSM), stosowanym w międzyrzędzia.

Jednym z ważnych czynników decydującym o pobieraniu określonej formy azotu przez roślinę jest odczyn gleby. Pobieranie jonu NH_4^+ zachodzi najlepiej w środowisku obojętnym i maleje ze spadkiem wartości pH. Odwrotna sytuacja występuje przy pobieraniu NO_3^- , im niższa wartość pH, tym szybsze pobieranie tego jonu.

Azot nawozowy nie jest wykorzystany w 100%

Nawożenie azotem jest trudnym zadaniem agrotechnicznym, a jego optymalizacja wymaga w pierwszej kolejności realnego oszacowania plonu oraz pomiaru ilości azotu mineralnego w glebie przed ruszeniem wegetacji. Podstawowym błędem popełnianym przez rolnika jest najczęściej niezbilansowane nawożenie prowadzące do akumulacji niskocząsteczkowych białek (aminokwasy, amidy), które są łatwo przyswajane przez patogeny. Racjonalne prowadzenie przez rolnika łanu uprawnego sprowadza się nie tylko do kontroli poziomu nawożenia azotem, lecz

głównie do bilansowania potrzeb rośliny względem innych składników mineralnych tak, aby nadmiar jednego z nich nie prowadził jednocześnie do zmniejszenia pobrania pozostałych.

Tylko część azotu zastosowanego w formie nawozów zostaje włączona w biomasę rośliny. Pobieranie azotu przez rośliny uprawne przebiega z różną szybkością, wynikającą z odmiennego rytmu ich wegetacji. O wykorzystaniu azotu przez roślinę, tzn. przetworzeniu w plon decydują warunki naturalne, agrotechnika oraz stan odżywienia roślin innymi składnikami. Ustalenie dawki azotu jest znacznie trudniejszym zadaniem niż oszacowanie dawki fosforu i potasu.

Niezbędnym warunkiem do określenia dawki azotu, którą należy zastosować w formie nawozu mineralnego, jest oznaczenie lub oszacowanie ilości azotu dopływającego z innych źródeł pozanawozowych, głównie z gleby. Szacuje się, że rośliny pobierają 50% azotu dostarczonego do gleby z nawozami, natomiast pozostała część ulega immobilizacji (25%), denitrifikacji (20%) oraz wymyciu (5%). W ogólnej ilości całego wymytego azotu z gleby, azot z nawozów mineralnych stanowi 15%, a na resztę przypada na azot glebowy. Oznacza to, że więcej N może być wymyte z gleby o naturalnie większej zawartości tego składnika, czyli gleb bogatych próchnicę. Zagrożony wymyciem jest więc przede wszystkim azot mineralny pozostały w glebie jesienią po zbiorze roślin uprawnych (brak roślin na polu). Wymywanie azotu z gleby zależy również od wpływu innych czynników takich jak: wprowadzenie zbyt dużych dawek, nieodpowiednia agrotechnika i terminy stosowania nawozów, dawka i rodzaj nawozu azotowego, gatunek uprawianej rośliny a także niekorzystny przebieg warunków agrometeorologicznych). Ponadto nierozważne stosowanie nawozów azotowych przyczynia się do zanieczyszczenia wód azotanami, a powietrza amoniakiem i podtlenkiem azotu.

10. Technika w precyzyjnym nawożeniu

Producenci maszyn rolniczych deklarują bardzo szeroką ofertę sprzętu do precyzyjnej aplikacji nawozów i środków ochrony roślin. Nieodłącznym elementem precyzyjnego nawożenia są **maszyny i urządzenia do zmiennej aplikacji nawozów** (z ang. Variable Rate Application). Ciągnik powinien być wyposażony w komputer i odbiornik GPS sprzężony z komputerem maszyny aplikującej.

Do systemu zmiennego dawkowania wprowadzamy wcześniej przygotowaną mapę aplikacyjną z wyznaczonymi odpowiednio dawkami nawozów. W czasie przejazdu maszyny na danym polu odbiornik GPS podaje jej dokładne położenie na polu, a system zmiennego dawkowania przekazuje informację do komputera maszyny aplikującej o potrzebnej dawce. Najczęściej ograniczeniami w stosowaniu precyzyj-

nego nawożenia jest powierzchnia gospodarstw, rozdrobnienie oraz brak posiadanych maszyn i urządzeń stosowanych w zaawansowanych technologiach.

Anteny GPS najczęściej są montowane na dachu ciągnika oraz są zsynchronizowane z układem kierowniczym, powodując samo ustawianie się pojazdu do założonego toru jazdy.



Fot. 6. Antena GPS (Agrocom).





Fot. 7. Precyzyjna aplikacja azotu w zbożach (Koronczok, Agrocom).

11. Literatura

1. Doruchowski G. 2008. Postęp i nowe koncepcje w rolnictwie precyzyjnym. *Inżynieria Rolnicza* 9(107): 19-30.
2. Faber A. 1998. Systemy rolnictwa precyzyjnego. I Mapy plonów. Praca przeglądowa. *Fragmenta Agronomica* 15(1): 4-15.
3. Faber A. 1998. Systemy rolnictwa precyzyjnego. II Analiza i interpretacja map plonów. Praca przeglądowa. *Fragmenta Agronomica* 15(1): 16-27.
4. Fotyma M, Fotyma E., Stuczyński T. 1999. Wykorzystanie wyników analiz chemicznych w doradztwie nawozowym i ochronie środowiska. *Nawozy i Nawożenie. Fertilizers and Fertilization*. 1: 44-58.
5. Haneklaus S., Panten K., Lilienthal H., Shnug E. 2010. Precision application of nutrients on site-specific basis. *Landbauforsch. Volk.* 340: 57-66.
6. Gozdowski D., Samborski S., Sioma S. 2008. *Rolnictwo Precyzyjne*. SGGW Warszawa, 136 ss.
7. Grzebisz W. 2009. Nawożenie Roślin Uprawnych. *Nawozy i Systemy Nawożenia*. PWRiL, Poznań.
8. Jadczyzyn T. 1998. System rolnictwa precyzyjnego. III. Nawożenie w rolnictwie precyzyjnym. Praca przeglądowa. *Fragmenta Agronomica* (XV). 1(57): 28-38.

9. Jadczyzyn T. 2000. Podstawy precyzyjnego nawożenia. Nawozy i Nawożenie. *Fertilizers and Fertilization*, 5(4): 206-213.
10. Kulczycki G. 2012. Wpływ precyzyjnego nawożenia fosforem i potasem na zmiany zawartości rozpuszczalnych form tych pierwiastków w glebie. *Fragmenta Agronomica* 29(1): 70-82.
11. Piskier T., Mładanowicz R. 2003. Efektywność nawożenia mineralnego w rolnictwie precyzyjnym. *Inż. Rol.* 10: 221-227.
12. Samborski S., Rozbicki J. 2004. Kalibracja chlorofilometru do oceny odżywienia zbóż azotem. *Postępy Nauk Rolniczych*. 5: 27-37.
13. Śliwiński D., Śmietanka M., Szeptycki A. 2013. Możliwości wykorzystania teledetekcji bliskiego zasięgu dotworzenia map upraw na potrzeby rolnictwa precyzyjnego. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. 3(81): 63-70.
14. Wach D. 2015. Metody oceny stanu odżywienia roślin. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, Z. 42(16): 53-68.
15. Wróbel R. 2015. Możliwości wykorzystania systemów informacji przestrzennej w rolnictwie małym i średnioobszarowym. W: *Innowacje w branży rolno-spożywczej*, red. Słodczyk J. The Challenge Group, Warszawa: 233-246.
16. Zimny L. 2007. Definicje i podział systemów rolniczych. *Acta Agrophysica*, 10(2): 207-518.

