

**POZYSKANIE I WYKORZYSTANIE
INFORMACJI W ROLNICTWIE
PRECYZYJNYM**

MONOGRAFIA
pod redakcją
Marii Walczykovej

Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

POZYSKANIE I WYKORZYSTANIE INFORMACJI W ROLNICTWIE PRECYZYJNYM

MONOGRAFIA
pod redakcją
Marii Walczykovej

Opracował zespół w składzie:
Prof. dr hab. inż. Maria Walczykova
Dr hab. inż. Paweł Kielbasa
Dr inż. Mirosław Zagórda

Kraków 2016

Patronat naukowy: Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Rada Naukowa Wydawnictwa

Prof. dr hab. Janusz Haman – czł. rzecz. PAN
Prof. dr hab. Rudolf Michałek – czł. rzecz. PAN
Prof. dr hab. Małgorzata Bzowska-Bakalarz
Prof. dr hab. Jan Bronisław Dawidowski
Prof. dr hab. Józef Szlachta
Prof. dr hab. Jerzy Weres
Prof. dr hab. Zdzisław Wójcicki
Prof. Radomir Adamovsky (Rep. Czeska)
Prof. Stefan Cenkowski (Kanada)
Doc. Ing. Ján Frančák, CSc. (Słowacja)
Prof. Jürgen Hahn (Niemcy)
Prof. Dorota Haman (USA)
Doc. Ing. Zuzana Hlavačová, CSc. (Słowacja)
Prof. Gerard Wiliam Isaacs (USA)
Prof. Vladimir Kosołapov (Rosja)
Prof. Piotr Savinykh (Rosja)
Prof. Oleg Sidorczuk (Ukraina)

Komitety Redakcyjne

Prof. dr hab. inż. Rudolf Michałek, czł. rzecz. PAN	– redaktor naczelny
Prof. dr hab. inż. Janusz Haman, czł. rzecz. PAN	
Prof. dr hab. inż. Maciej Kuboń	– sekretarz
Dr hab. inż. Sławomir Kocira	
Dr hab. inż. Dariusz Kwaśniewski	

Wydawca:

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, ul. Balicka 116B

Recenzenci:

Prof. dr hab. Aleksander Lisowski	– Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Prof. dr hab. Sławomir Kocira	– Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

ISBN 978-83-64377-03-7

Druk i oprawa:

NOVA SANDEC
ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz
tel. +48 (18) 547 45 45
e-mail: biuro@novasandec.pl; <http://www.novasandec.pl>
Ark. wyd. 11,7; ark. druk. 10,5
Nakład: 150 egz.

Spis treści

PRZEDMOWA	7
1. WSTĘP	9
2. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA I PRZESŁANKI DLA STOSOWANIA ROLNICTWA PRECYZYJNEGO.....	11
3. CHARAKTERYSTYKA GLOBALNEGO SYSTEMU NAWIGACYJNEGO ORAZ OBSZARY JEGO WYKORZYSTANIA W PRODUKCJI ROLNICZEJ	18
3.1. Zasady działania GNSS i dokładność pozycjonowania.....	23
3.2. Przenośne komputery polowe – budowa i oprogramowanie	38
4. METODY OCENY ZMIENNOŚCI WARUNKÓW PRODUKCYJNYCH DLA CELÓW ROLNICTWA PRECYZYJNEGO	46
4.1. Mechaniczne czujniki do pomiaru zagęszczenia gleby	47
4.1.1. Systemy do pomiaru siły uciągu i oporów ścinania gleby przez wzorcowe narzędzia	47
4.1.2. Pomiary oporu penetrometrycznego.....	54
4.2. Czujniki elektryczne	62
4.2.1. Pomiary oporności i przewodności elektrycznej	62
4.2.2. Metoda georadarowa	70
4.2.3. Elektrody jonoselektywne	76
4.3. Czujniki optyczne	80
4.3.1 Pomiary właściwości gleby	80
4.3.2. Czujniki optyczne w rozpoznawaniu zapotrzebowania roślin na azot	88
4.4. Systemy wieloczujnikowe	97

5. TECHNIKI MAPOWANIA PLONÓW RÓŻNYCH ZIEMIOPŁODÓW	101
6. SYSTEMY TECHNICZNE STOSOWANE W ZMIENNEJ APLIKACJI	109
6.1. Mapy aplikacyjne	109
6.2. Systemy techniczne siewników	111
6.3. Systemy techniczne do nawożenia	114
6.4. Systemy techniczne do oprysku.....	117
7. SYSTEMY NAWIGACJI AGREGATÓW MASZYNOWYCH	121
8. ZDALNA KONTROLA PRACY MASZYN	141
9. OPROGRAMOWANIE DO OPRACOWANIA INFORMACJI W ROLNIC- TWIE PRECYZYJNYM	158
10. BIBLIOGRAFIA	162
STRESZCZENIE	175

PRZEDMOWA

Monografia dotyczy problemów rolnictwa precyzyjnego w zakresie produkcji roślinnej, które powstało na bazie przekonania, że zmienność warunków wzrostu roślin jest jednym z tych czynników, które najbardziej przyczyniają się do zmienności plonowania, a w związku z tym korzystne jest zróżnicowanie wysokości nakładów w obrębie danego pola.

Pośród innowacyjnych technologii, jakie powstały w ostatnich dekadach, rolnictwo precyzyjne można uznać za najważniejsze. Jego zastosowanie umożliwia maksymalizację zarówno produkcji żywności, jak też efektywności wykorzystania zasobów, bez strat i szkód dla środowiska. Odnosi się to do wszystkich zabiegów, w tym zwłaszcza do nadmiernego nawożenia i zużycia środków ochrony roślin.

W związku z powyższym rolnictwo precyzyjne jest uważane za doskonałe narzędzie rozwoju rolnictwa zrównoważonego, które umożliwia optymalizację produkcji dla obecnych i przyszłych pokoleń z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych, ekologicznych i społecznych.

W opracowaniu przedstawiono większość ważnych aspektów funkcjonowania tego nowoczesnego systemu. Omówiono zagadnienia, których znajomość jest niezbędna w związku z wprowadzaniem technologii rolnictwa precyzyjnego do praktyki rolniczej. Zwrócono uwagę na rozwiązania w zakresie techniki rolniczej, umożliwiające przestrzennie zmienną aplikację nakładów, w obszarze telematyki oraz dotyczące opracowania informacji. Ponieważ dla celów rolnictwa precyzyjnego producent rolny musi pozyskać wysokiej jakości informacje o przestrzennej zmienności różnych właściwości gleby oraz roślin, obszernie przedstawiono również nowoczesne metody przydatne do zastosowania w tym zakresie, zarówno komercyjnie dostępne, jak też będące w fazie rozwoju.

Publikacja jest przeznaczona dla studentów na kierunkach technika rolnicza i leśna, inżynieria biosystemów, zarządzanie i inżynieria produkcji, doktorantów, pracowników naukowych oraz praktyków, którzy interesują się nowoczesnymi technologiami w produkcji roślinnej.

W monografii wykorzystano opracowania krajowe, zagraniczne oraz własne doświadczenia z zakresu stosowania technologii rolnictwa precyzyjnego.

Autorzy

1. WSTĘP

Nowoczesne rolnictwo powinno uporać się z narastającymi problemami ekonomicznymi, społecznymi i środowiskowymi, które wymagają technologicznych innowacji umożliwiających prowadzenie uprawy z jak najmniejszym niekorzystnym wpływem na środowisko, wprowadzenia zaawansowanych form zarządzania w celu optymalizacji produkcji i obniżki kosztów, zebrania dokumentacji umożliwiającej śledzenie procesu powstawania produktu dla konsumenta oraz dla ochrony środowiska.

Produkcja rolnicza jest zależna od warunków klimatycznych i glebowych oraz ma istotny wpływ na życie ludzi i środowisko. Procesy technologiczne uprawy roślin są w większości utrwalone przez tradycję, ale pola różnią się pod względem warunków produkcyjnych, a różnice występują czasem nawet w ramach jednego pola. Różnice te mogą być trwałe, jak np. ekspozycja lub nachylenie terenu, gatunek gleby, itp. bądź tymczasowe, do których można zaliczyć zawartość składników mineralnych w glebie, ugniecenie, kwasowość, właściwości wodne itp.

Technologia, która uwzględnia zmienność występowania różnych czynników na polu jest określana mianem rolnictwa precyzyjnego. Idea rolnictwa precyzyjnego nie sprowadza się tylko do przestrzennie zmiennego wykonania pojedynczego zmechanizowanego zabiegu, ale umożliwia stosowanie zaawansowanych form zarządzania gospodarstwem.

Za punkt wyjścia do realizacji kompletnego zintegrowanego systemu rolnictwa precyzyjnego uważa się monitorowanie czynności w gospodarstwie, by w odniesieniu do każdego zabiegu polowego znany był jej rodzaj, miejsce wykonania, zaangażowane osoby i środki produkcji (Mazzeto i in., 2009). Pedersen i in. (2009) stwierdzają, że dla większości rolników kluczowym zadaniem jest utrzymanie się na rynku. To, w jakim stopniu rolnik będzie w stanie polepszyć swoją sytuację ekonomiczną, będzie wynikało z możliwości zastosowania zaawansowanych systemów technologii informatycznych i komunikacyjnych oraz technologii rolnictwa precyzyjnego w dawkowaniu agrochemikaliów, jak też możliwości oceny zastosowanej strategii w zarządzaniu gospodarstwem. Nash i in. (2009) podkreślają, że wiele standardów w ocenie zgodności (*compliance*) wymaga, aby środki produkcji były dokumentowane i rejestrowane były wszystkie czynności wykonywane w gospodarstwie. Holistyczne (całościowe) zarządzanie gospodarstwem prezentuje również Fountas i in. (2009), zawierając w swoim opracowaniu opis formalnej strategii zarządzania, zarządzanie celami i stosowane technologie.

Rolnictwo precyzyjne umożliwia realizację idei rolnictwa zrównoważonego, a więc takiego sposobu gospodarowania, który umożliwia optymalizację produkcji dla obecnych i przyszłych pokoleń z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych, ekologicznych i społecznych. Wg Prettygo (2008) rolnictwo zrównoważone stanowi poszukiwanie jak najlepszego wykorzystania zasobów naturalnych, jednocześnie bez ich naruszania. Włączenie procesów naturalnych do procesu produkcji żywności, zmniejszenie zużycia

nakładów pochodzących ze źródeł nieodnawialnych, szkodliwych dla środowiska i zdrowia ludzi, wyeliminowanie nadmiernych nakładów, uporanie się z problemami ochrony i gospodarki wodnej, to wg Prettyego (2008) są główne cele rolnictwa zrównoważonego. Aby je skutecznie realizować, niezbędne jest właściwe zarządzanie wszystkimi zasobami, a taką możliwość daje rolnictwo precyzyjne.

Oprócz produkcji polowej rolnictwo precyzyjne jest z powodzeniem stosowane w ogrodnictwie i produkcji zwierzęcej. Bez względu na rodzaj technologii i obszar funkcjonowania, stosowaniu rolnictwa precyzyjnego przyświecają trzy cele – pierwszy, to optymalizacja wykorzystania dostępnych zasobów, by podnieść rentowność i zagwarantować zrównoważony rozwój, drugi – zmniejszenie negatywnego oddziaływania na środowisko, a trzeci, to aspekt społeczny, odnoszący się do poprawy jakości życia.

2. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA I PRZESŁANKI DLA STOSOWANIA ROLNICTWA PRECYZYJNEGO

Ilość i jakość surowca

Zabezpieczenie w przyszłości dostaw żywności wymaga odpowiedniej ilości i jakości produktów pochodzenia rolniczego, a więc intensywnej, ale też bezpiecznej dla środowiska produkcji oraz zrównoważonej eksploatacji włączonych w tę produkcję zasobów naturalnych. Możliwość śledzenia ruchu surowców żywnościowych od produkcji, poprzez przetwarzanie, przechowywanie i dystrybucję jest niezbędne dla spełnienia wymagań rynku, zapewniając właściwą wartość odżywczą i bezpieczeństwo żywności (Gebbers i Adamchuk, 2010).

Powszechnie akceptowana jest definicja bezpieczeństwa żywności podana przez Organizację Narodów Zjednoczonych w 1996 r., w której stwierdza się, że *„bezpieczeństwo żywnościowe będzie osiągnięte, gdy wszyscy ludzie cały czas będą mieli fizyczny i ekonomiczny dostęp do wystarczającej, bezpiecznej i pożywnej żywności zaspokajającej ich potrzeby i preferencje żywieniowe do aktywnego i zdrowego życia”* (Mikuła, 2012). Do roku 2050 populacja na Ziemi prawdopodobnie osiągnie 9 miliardów. Tak więc oprócz wielu znanych rozwiązań mających na celu wzrost bezpieczeństwa żywnościowego, niezbędne jest stosowanie nowoczesnych metod na każdym etapie produkcji surowca, jego przetwarzania i sprzedaży. Oprócz poglądu, że poprzez wzrost wydajności w rolnictwie nie można się uporać z problemem ubóstwa w świecie, panuje również przekonanie, że najistotniejszym czynnikiem przyczyniających się do bezpieczeństwa żywności jest uzyskiwanie najwyższych możliwych plonów poprzez stosowanie nowoczesnych technologii i systemów zarządzania produkcją rolniczą.

Pośród innowacyjnych technologii, jakie powstały w ostatnich dekadach, rolnictwo precyzyjne można uznać za najważniejsze. Koncepcja ta zrodziła się z przekonania, że zróżnicowanie warunków wzrostu roślin jest jednym z tych czynników, które najbardziej przyczyniają się do zmienności plonowania w skali pola i w związku z tym byłoby korzystne dostosować wysokość nakładów do miejscowych warunków glebowych, a więc wykonać właściwe zabiegi, we właściwym miejscu i czasie (Robert, 1993; 2002). Stosowanie zmiennego dawkowania nawozów naturalnych było już wykorzystywane na początku rolnictwa, jednak wymagało to wiedzy na temat plonowania i warunków glebowych występujących na polach uprawnych. Zwiększanie powierzchni uprawy spowodowało, że stosowanie zmiennych dawek na podstawie wiedzy rolnika stało się bardzo trudne, a przy największych powierzchniach, niemożliwe do wykonania.

Rolnictwo precyzyjne powstało w połowie lat 1980-tych, co wiązało się z dostępnością technik satelitarnych, systemów informacji przestrzennej oraz mikrokompute-

rów. Definicje dotyczące rolnictwa precyzyjnego zmieniały się w miarę zrozumienia, co ta technologia przynosi. Od prostego określenia podanego przez Roberta (1993), iż jest to „gospodarowanie poprzez glebę” (*farming by soil*), przeszło się do definicji, iż jest to „zarządzanie produkcją rolniczą, oparte na informacji” (Gebbers i Adamchuk, 2010). Z początku rolnictwo precyzyjne ograniczało się do dostosowania nawożenia mineralnego do zróżnicowanych warunków glebowych na polu, a następnie rozwinęło się w kierunku automatycznej nawigacji agregatów po polu, zautomatyzowania pracy maszyn i procesów, identyfikowalności produktów, prowadzenia badań w gospodarstwach i rozwoju oprogramowania do zintegrowanego zarządzania w gospodarstwie (McBratney i in., 2005; Gebbers i Adamchuk, 2010). Rolnictwo precyzyjne ewoluuje w kierunku doskonalszej formy, którą określono mianem rolnictwa inteligentnego (*Smart Farming*) (Walczykova, 2012), odznaczającego się wyższym poziomem wiedzy i automatyzacji, wykorzystującego strategię kontekstowe, czyli przetwarzanie informacji zawsze w połączeniu z innymi. Kolejną cechą rolnictwa inteligentnego jest interaktywność w postaci nieograniczonej komunikacji między systemami wewnętrznymi oraz systemami z zewnątrz, ponieważ jest to warunek wymiany informacji. Istotna jest również możliwość modyfikacji strategii przez operatora oraz przystosowywanie się systemów drogą samoregulacji, a więc adaptacyjność. Podstawowe funkcje poszczególnych technik muszą być łatwe do przekazania i zrozumiałe, a więc odznaczające się przyjaznością. Systemy te w dużym stopniu mają funkcjonować automatycznie, a operator jest informowany w przypadku wystąpienia problemów. Najbliżej takim rozwiązaniom mają obecnie m.in. systemy: Telematics (Claas), JDLink (John Deere), czy MoDaSys (ang. *Modular Data Recording System*) (Fendt), które umożliwiają przesyłanie danych z maszyn drogą radiową, poprzez Internet, do komputera biurowego.

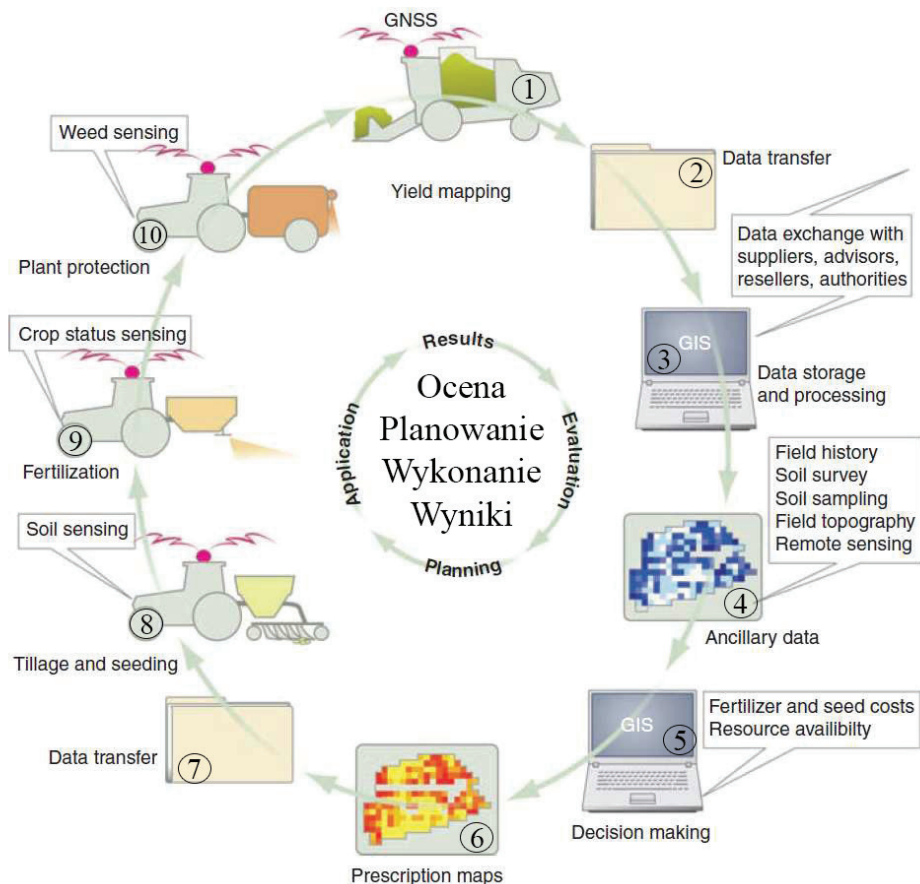
Realizując cele rolnictwa precyzyjnego producent rolny musi uporać się ze zmiennością w przestrzeni i czasie i do tego niezbędne są wysokiej jakości informacje o zmienności czynników mogących ograniczać plon w różnych miejscach na polu (Adamchuk, 2010a). Hornick (2010) wśród czynników mających wpływ na ilość i jakość pozyskanego surowca wymienia m.in. glebę, klimat, rodzaj rośliny, odmianę, technologię uprawy gleby, nawożenie i ochronę. Jako właściwości istotne dla produkcji roślinnej w odniesieniu do gleby Gebbers i Adamchuk (2010) wymieniają wilgotność, zawartość ilu, materii organicznej, dostępność składników pokarmowych, odczyn oraz gęstość objętościową. Do pozyskania informacji niezbędnych do zarządzania zmiennością przestrzenną i czasową w odniesieniu do gleby i rośliny, wykorzystuje się różnego rodzaju czujniki (Bah i in., 2012). Od lat trwają intensywne badania nad ich rozwojem, ponieważ wciąż możliwość pozyskania ww. informacji w krótkim czasie i po akceptowalnych kosztach jest jedną z największych przeszkód w szerokim upowszechnianiu technologii rolnictwa precyzyjnego (Adamchuk, 2010a). Ostatecznie, najlepszym wskaźnikiem zmiennych warunków jest plon i mapy plonowe, które są najczęściej stosowane do oceny wydajności upraw. Mapy te odzwierciedlają sumaryczny wpływ wszystkich czynników – pogodowych, glebowych i praktyk uprawowych. Zaobserwowana na mapach zmienność przestrzenna w jakości i ilości zebranego plonu odnosi się bezpośrednio do miejscowo zdefiniowanej rentowności (Gebbers i Adamchuk, 2010).

Planowanie i realizacja zabiegów polowych

Obecnie jest dostępny sprzęt do wykonania praktycznie wszystkich zabiegów polowych w sposób przestrzennie zmienny. Zabiegi polowe związane z realizacją cyklu produkcyjnego (rys. 2.1) mogą być w rolnictwie precyzyjnym zaplanowane na podstawie wcześniej zebranych danych (*off-line*), albo wykonane na bazie informacji pozyskanych w czasie rzeczywistym (*on-line*). W pierwszym przypadku podejmowane decyzje oparte są o przebieg plonowania w latach, mapy glebowe i topografii oraz inne dane przestrzenne niezbędne do planowania nakładów produkcyjnych na danym polu. Jeśli wykonanie danego zabiegu uprawowego może wyeliminować czynnik obniżający plon w danym miejscu pola (np. odczyn, ugniecenie gleby), to rozwiązaniem jest korzystanie z technologii o szybkozmiennych parametrach. Jeśli jednak nie da się go usunąć, wówczas w danym miejscu pola należy ograniczyć zastosowane nakłady na produkcję, ponieważ nie będą one wykorzystane przez rośliny i zostaną utracone. Realizacja zabiegu w czasie rzeczywistym oparta na detekcji warunków na polu i wykonaniu zabiegu jednocześnie, stosowana jest głównie w nawożeniu azotem, w ochronie roślin i w nawadnianiu (Gebbers i Adamchuk, 2010).

Nawożenie ma niewątpliwie ogromny wpływ na zaopatrzenie ludzi na świecie w żywność. Najważniejsze nawozy stosowane w cyklu produkcyjnym zawierające azot, fosfor i potas, istotnie przyczyniają się do wzrostu plonu, ale ich nadmierne użycie może powodować pogorszenie jakości surowca. Zmienna aplikacja nawozów była pierwszym zadaniem realizowanym w ramach rolnictwa precyzyjnego i jej stosowanie przyczynia się do poprawy efektywności wykorzystania nawozów. Roberts (2007) ujął to dobitnie stwierdzając, że jest to odpowiednia ilość nawozu, zastosowana w odpowiednim czasie i miejscu, co, jak już wspomniano, oddaje istotę idei rolnictwa precyzyjnego. W odniesieniu do zbóż, będących jednym z najważniejszych składników światowych dostaw żywności, aplikacja nawozów dostosowana do miejscowych warunków na polu przyczynia się do poprawy jakości ziarna.

Zawartość białka w ziarnie, zwłaszcza w pszenicy, jest głównym wskaźnikiem jego jakości i jednym z głównych kryteriów w obrocie handlowym. Ponieważ zależy ono głównie od nawożenia azotem, to techniki rolnictwa precyzyjnego są dobrym narzędziem do takiej aplikacji tego składnika, która gwarantuje uzyskanie odpowiedniej zawartości białka w ziarnie. Dzięki nowoczesnym technikom oceny odżywienia roślin azotem podczas wegetacji, pogłówne zastosowanie tego składnika jest możliwe w odpowiednich ilościach. Określenie zmienności przestrzennej zawartości białka w ziarnie można wykonać za pomocą czujników podczas zbioru, wraz z monitoringiem zmienności plonu (Taylor i in., 2005). Taka informacja pozwala zidentyfikować efektywność wykorzystania azotu w ramach pola.



Źródło: Zmodyfikowane na podstawie Gebbers i Adamchuk, 2010

Rysunek 2.1. Zamknięty cykl systemu rolnictwa precyzyjnego: 1 – mapowanie plonów, 2 – przesyłanie danych, 3-przechowywanie danych i opracowanie wyników (wymiana danych z dostawcami, doradcami, sprzedawcami, władzami); 4 – dane pomocnicze (historia pola, badanie gleby, pobór próbek, topografia pola, zdalna detekcja), 5 – podejmowanie decyzji (koszt nawozów i nasion, dostępność zasobów), 6 – mapy aplikacyjne, 7 – przesyłanie danych, 8 – uprawa i siew (detekcja właściwości gleby), 9 – nawożenie (detekcja stanu odżywienia roślin), 10 – ochrona (detekcja chwastów)

Drugim zabiegiem istotnie wpływającym na ilość i jakość plonu jest ochrona roślin. Straty w uprawach rolniczych są powodowane czynnikami abiotycznymi, takimi jak naświetlenie, woda, temperatura, składniki odżywcze oraz biotycznymi, jak chwasty, szkodniki, patogeny, znanymi pod nazwą czynników środowiskowych. Straty spowodowane tymi czynnikami prowadzą do obniżenia plonowania. Oerke (2006) wyróżnia straty potencjalne, powstałe wskutek braku ochrony oraz rzeczywiste, powstałe mimo

prawidłowego wykonania wszystkich zabiegów uprawowych. Oprócz ilościowych powstają również straty jakościowe, których skutkiem jest obniżenie wartości rynkowej (Oerke, 2006). Z tego względu wczesne wykrycie obecności szkodników i chorób jest istotne dla zapewnienia zdrowotności uprawy. Stosowanie pestycydów jest więc powszechne, mimo ogólnie znanych negatywnych skutków tego zabiegu (m.in. pozostałości pestycydów w surowcu, zatrucie wód powierzchniowych i podziemnych, nabywanie odporności roślin na środek chemiczny, zagrożenie dla zdrowia ludzi i zwierząt, itp.). Nie zwracano jednak uwagi na fakt, że nie zawsze stosowanie ochrony przyczyniło się do zmniejszenia strat. Pimentel i Burges (2014) stwierdzają, że w okresie od roku 1945 do 2000 zużycie środków ochrony roślin w USA wzrosło dziesięciokrotnie, a straty ogółem spowodowane szkodnikami się podwoiły. Aby zredukować negatywne oddziaływanie środków ochrony, niezbędne jest wykonanie tego zabiegu z uwzględnieniem aktualnego nasilenia patogenu w danym miejscu, a więc z wykorzystaniem technologii rolnictwa precyzyjnego (Park i in., 2007). Wykonanie zabiegu może być oparte na uprzednio sporządzonych mapach przestrzennego rozmieszczenia z wykorzystaniem systemu DGPS i GIS lub metodą *on-line*, z zastosowaniem systemów optycznych montowanych na platformach naziemnych (ciągniki), powietrznych (drony, samoloty) bądź satelitarnych (Park i in., 2007).

Planowanie i realizacja zabiegów polowych w sposób przestrzennie zmienny stosując technologię rolnictwa precyzyjnego, ułatwia wprowadzenie zasad Integrowanej Produkcji roślin, która zawiera między innymi takie elementy jak (<https://piorin.gov.pl>):

- planowanie i zakładanie uprawy z uwzględnieniem doboru odmian;
- nawożenie z uwzględnieniem analiz gleby;
- stosowanie racjonalnych sposobów regulowania zachwaszczenia;
- pielęgnacja upraw;
- ochrona przed chorobami i szkodnikami z uwzględnieniem metod niechemicznych;

Oplacalność

Według Schieffera i Dillona (2015), wobec producentów rolnych i decydentów stawiane są dwa konkurujące ze sobą wymagania, a mianowicie produkcja żywności dla coraz większej populacji oraz redukcja wpływu tej produkcji na środowisko. Stwierdzają oni, że to właśnie rolnictwo precyzyjne stwarza taką możliwość poprzez wzrost wydajności maszyn i sposób kierowania nakładów. Przyczynia się do tego zarówno zmienna aplikacja nawozów i środków ochrony roślin, która skutkuje mniejszym ich zużyciem, a więc mniejszymi kosztami i stratami z powodu spływów do wód gruntowych, jak też nawigacja agregatów po polu, ze względu na zmniejszenie zużycia paliwa i innych środków produkcji. Zdaniem Olivera i in. (2013) zastosowanie rolnictwa precyzyjnego umożliwia maksymalizację zarówno produkcji żywności, jak i efektywności wykorzystania zasobów, bez strat i szkód dla środowiska i odnosi się to do wszystkich zabiegów, w tym zwłaszcza do ograniczenia nadmiernego nawożenia i zużycia środków ochrony roślin. Co do opłacalności technologii o szybkozmiennych

parametrach w porównaniu z konwencjonalnymi, to z pokazanej liczby badań wynika, że jest ona zróżnicowana; w takiej ocenie bierze się zazwyczaj pod uwagę przestrzenną zmienność plonowania, rodzaj uprawy, koszty zużytych środków produkcji, ceny sprzedaży produktu oraz dodatkowe koszty związane ze stosowaniem tej technologii (English i in., 2005).

Generalnie można stwierdzić, że rolników, jak też dostawców środków produkcji, najbardziej interesuje rentowność technologii rolnictwa precyzyjnego i odpowiedź na pytanie o kosztach i korzyściach wynikających z implementacji tej technologii odgrywa zasadniczą rolę. Wyniki wielu badań nad efektami ekonomicznymi wykazują, że stosowanie zmiennych dawek było bardziej opłacalne od stałych, jak również nastąpił wzrost rentowności całego przedsiębiorstwa rolnego (Biermacher i in., 2009; Walczykova, 2011b; Lencsés i in., 2014). Gebbers i Adamchuk (2010) stwierdzają, że z uwagi na dużą różnorodność zastosowań, trudno jest ogólnie skwantyfikować korzyści wynikające ze stosowania rolnictwa precyzyjnego. Na podstawie przeglądu 234 prac wykonanych w latach 1988-2005 podają, że rolnictwo precyzyjne okazało się opłacalne w 68% przypadkach. W badaniach wykazano również, że im większa jest zmienność zasobów w gospodarstwie (np. mozaikowatość gleb) lub zaistniałego problemu (występowanie chorób i szkodników), tym większe są dochody wynikające ze stosowania technologii o szybkozmiennych parametrach (Talebpour i in., 2005).

Zdaniem Anceva i in. (2005), nawet jeżeli rolnictwo precyzyjne jest mniej opłacalne od technologii konwencjonalnej, to dochody mogą być tutaj wyższe, jeśli zróżnicuje się ceny produktów uzyskane w tych dwóch technologiach. Rolnictwo precyzyjne podnosi bowiem wartość produktu – lepsza jakość (mniej środków chemicznych), przyjazne dla środowiska oraz pozyskanie informacji o procesie powstawania produktu. Stoorvogel i Bouma (2005) podkreślają również aspekt społeczny – rolnicy dostają narzędzie do kształtowania własnej drogi dostosowania się do środowiskowych wymagań, zamiast konfrontacji z przepisami, które ograniczają ich elastyczność jako producentów.

Na zainteresowanie rolników implementacją technologii rolnictwa precyzyjnego ma wpływ szereg czynników, wśród których można wymienić: poziom rentowności w stosunku do aktualnie uzyskiwanej, zdolność adaptacji, prostota obsługi urządzeń, możliwość uzyskania rzetelnej informacji, wiedza itp. (Reichardt i Jürgens, 2007; Walczykova, 2011a).

Identyfikowalność produktu

Bezpieczeństwo konsumenta stało się jednym z najważniejszych i priorytetowych zagadnień w zarządzaniu łańcuchem żywności. Sprawny i efektywny finansowo system śledzenia ruchu i pochodzenia żywności umożliwia identyfikację źródeł ryzyka również w gospodarstwie. W jednej z definicji identyfikowalności wskazuje się, że jest to możliwość śledzenia ruchu żywności przez określone etapy - produkcji surowca, przetwarzania i dystrybucji. Jakość żywności obejmuje charakterystykę zewnętrzną, a więc system produkcji oraz aspekty środowiskowe i charakterystykę wewnętrzną

dotyczącą m.in. jej przetwarzania i przechowywania (Czarnecka-Skubina i Nowak, 2012).

Rolnictwo precyzyjne jako system zapewnia takie możliwości w postaci dokumentacji całego procesu technologicznego. Możliwość śledzenia ruchu produktu i identyfikowalności stanowi ważny obszar badań z zakresu rolnictwa precyzyjnego (McBratney i in., 2005). Zastosowanie systemów informacji przestrzennej umożliwia łączenie informacji wchodzących w zakres śledzenia z warunkami agrotechnicznymi i środowiskowymi. Dzięki przypisaniu współrzędnych geograficznych do charakterystyki warunków w danym miejscu na polu, możliwa jest dokumentacja różnych zdarzeń, które miały wpływ na uprawę od siewu do zbioru.

Perspektywy

W europejskim dokumencie, opartym na obszernym przeglądzie dokonań z zakresu rolnictwa precyzyjnego (JRC of the EC; MARS Unit H04) stwierdza się, że rolnictwo precyzyjne może odegrać znaczącą rolę w zaspokajaniu zapotrzebowania na surowce żywnościowe i nieżywnościowe, gwarantując zrównoważone korzystanie z zasobów naturalnych i środowiska. W dokumencie zauważa się, że przeszkodą w implementacji elementów tego systemu jest wielkość i różnorodność gospodarstw rolnych. Ważna jest więc ocena potencjalnych działań wspierających wprowadzanie rolnictwa precyzyjnego (RP) do średnich i mniejszych gospodarstw. W szczególności nowa Wspólna Polityka Rolna (*CAP – Common Agriculture Policy*) dostarcza kluczowych możliwości z szeregiem instrumentów i środków, dostępnych dla kompetentnych władz krajów członkowskich UE. A oto niektóre zalecenia, które w tym zakresie wyszczególniono:

1. Niezbędne są odpowiednie wytyczne oraz wsparcie dla krajów członkowskich. Potrzebne są badania w celu identyfikacji regionów i typologii gospodarstw odpowiednich dla wprowadzania rolnictwa precyzyjnego i potencjalnych środków wsparcia. Wskazane byłoby opracowanie czegoś w rodzaju „kalkulatora rolnictwa precyzyjnego”, dla różnych systemów gospodarowania z możliwością oceny korzyści środowiskowych, jako narzędzia wspierającego decyzje dla rolników i doradców.
2. Powyższemu powinny towarzyszyć badania i prace rozwojowe. Niezbędne są badania pilotażowe dla zdefiniowania, monitorowania i oceny konkretnych programów i środków. Dotyczy to poprawy oceny oddziaływania na środowisko, włącznie z oddziaływaniem poza terenem gospodarstwa. Bardzo ważną część takich badań stanowiłoby wyznaczenie korzyści wynikających ze stosowania tej technologii dla bardziej efektywnego zarządzania wodą.

3. CHARAKTERYSTYKA GLOBALNEGO SYSTEMU NAWIGACYJNEGO ORAZ OBSZARY JEGO WYKORZYSTANIA W PRODUKCJI ROLNICZEJ

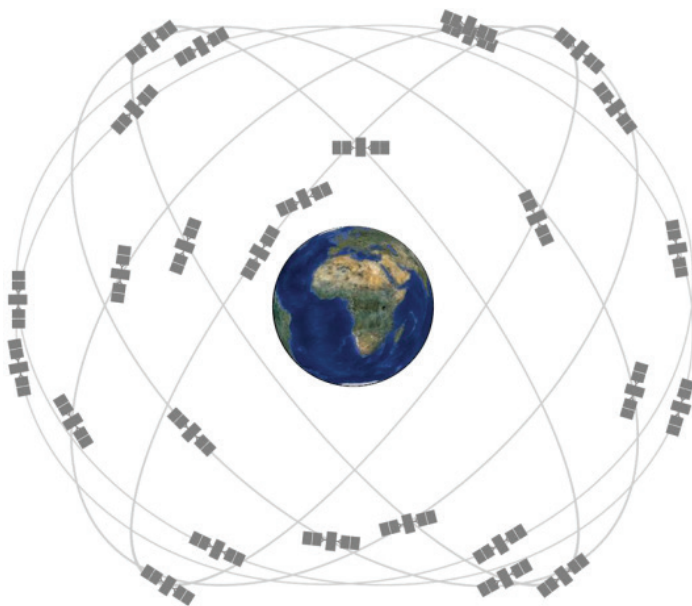
Globalny system nawigacji satelitarnej GNSS (ang. *Global Navigation Satellite System*) składa się obecnie z dwóch w pełni funkcjonalnych systemów satelitarnych, do których zalicza się zarządzany przez Departament Obrony USA GPS–NAVSTAR (ang. *Global Positioning System – NAVigation Signal Timing And Ranging*) i zarządzany przez Rosję GLONASS (ros. *GLObalnaja NAWigacionnaja Sputnikowaja Sistiema*). Początki systemów nawigacyjnych datuje się na lata sześćdziesiąte XX wieku, kiedy trwała „zimna wojna” i wyścig zbrojeń pomiędzy USA i ZSRR. Pierwszym systemem nawigacji satelitarnej był TRANSIT uruchomiony przez USA dla wojska w 1964 roku, a w ograniczonej formie dostępny dla celów cywilnych od 1967 roku (Specht, 2007). Równocześnie z ekspansją systemu TRANSIT w ZSRR powstał system CYKADA o zbliżonej konstrukcji oddany do eksploatacji w 1967 roku (Specht, 2007 <https://www.glonass-iac.ru>). Z biegiem czasu i wprowadzanych udoskonaleń system TRANSIT zmienił nazwę na GPS–NAVSTAR, natomiast CYKADA na GLO-NASS. Oprócz tych dwóch w pełni funkcjonalnych systemów o zasięgu globalnym budowane są jeszcze dwa. Pod koniec roku 2016 częściową funkcjonalność powinien uzyskać, budowany przez kraje europejskie i Koreę Południową, system GALILEO (www.geoforum.pl). Do roku 2017 pełną funkcjonalność systemu BEIDOU planują uzyskać Chiny (Januszewski, 2014 www.geoforum.pl, www.beidou.gov.cn). Podstawowe parametry globalnych systemów nawigacji satelitarnej zestawiono w tabeli 3.1.

Różnica pomiędzy trzema systemami GPS, GLONASS i GALILEO, opisanymi w tabeli 3.1, pod względem liczby satelitów jest niewielka. Zmiany występują natomiast w liczbie i ustawieniu orbit, po których poruszają się satelity. W przypadku amerykańskiego systemu jest to 6 orbit, po których porusza się po 5 satelitów (rys. 3.1) (<http://www.gps.gov>). Od roku 2016 następuje wymiana segmentu kosmicznego i wdrażanie satelitów systemu GPS III (<http://www.gps.gov>).

Tabela 3.1. Charakterystyka systemów GNSS

Nazwa	GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU
Kraj rozwijający system	Stany Zjednoczone	Rosja	Unia Europejska oraz Norwegia i Korea Południowa	Chiny
Docelowa liczba satelitów	32	30	30	35
Liczba orbit	6	3	3	3
Inklinacja orbity	55°	64,8°	56°	55°
Wysokość orbity	20183 km	19100 km	23616 km	21528 km (geosynchroniczne 35786 km)
Zajmowane częstotliwości	L1 (1575,42 MHz), L2 (1227,60 MHz), L5 (1176,45 MHz)	L1 (1598,06-1604,40 MHz), L2 (1242,94-1248,63 MHz), od 2010 r. L3 (1201,4 MHz)	E2-L1-E1 (1559-1591 MHz), E6 (1260-1300 MHz), E5a+E5b (1176,45-1207,14 MHz)	B1 (1559,052-1591,788 MHz), B2 (1166,22-1217,37 MHz), B3 (1250,618-1286,423 MHz)
Ogłoszenie pełnej funkcjonalności	17 lipca 1995 r.	grudzień 2010 r. (wcześniej na krótko w 1996 r.)	2020 r. (częściowa operacyjność w 2016 r.)	2017 r.

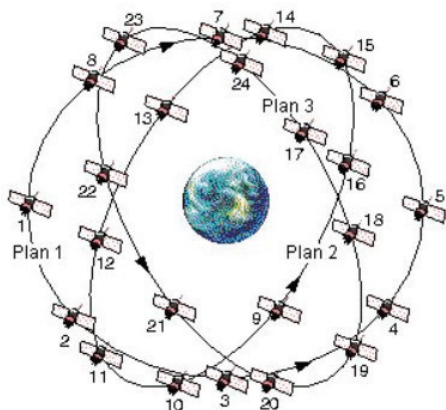
Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Januszewski, 2014; <http://geoforum.pl>



Źródło: <http://www.gps.gov>

Rysunek 3.1. Orbity satelitów systemu GPS

Mniejsza liczba orbit występuje w systemach GLONASS (rys. 3.2) i GALILEO (rys. 3.3). Obydwa wymienione systemy mają tylko 3 orbity, po których ma się poruszać po 10 satelitów, jednak docelowa liczba satelitów nie jest jeszcze osiągnięta i w przypadku GLONASS tych satelitów jest po 8 (łącznie 24).



Źródło: <https://pl.wikipedia.org/wiki/GLONASS>

Rysunek 3.2. Orbity satelitów systemu GLONASS



Źródło: <http://www.esa.int>

Rysunek 3.3. Orbity satelitów systemu GALILEO

Od kwietnia 2016 r. w systemie GALILEO pracuje 12 satelitów. Umieszczenie kolejnych 2 satelitów 24 maja 2016 r. i czterech jesienią umożliwi uruchomienie usług systemu GALILEO pod koniec 2016 r.

System BEIDOU składał się będzie z 35 satelitów, spośród których 5 będzie umieszczonych na orbicie geostacjonarnej (GEO), 27 na średnich orbitach Ziemi (MEO) i 3 na nachylonych względem równika orbitach geosynchronicznych (IGSO). (<http://www.insidegnss.com>)

Zapowiedź ogłoszenia pełnej zdolności operacyjnej systemu BEIDOU, jako systemu globalnego już w roku 2017 może oznaczać, że będzie to trzeci system nawigacji satelitarnej. Januszewski (2014) podaje, że zapowiadane zmiany dotyczące częstotliwości, metody modulacji sygnału, struktura obydwu depech nawigacyjnych D1 i D2 oraz przyjęty czas systemu i układ odniesienia spowodują, że system BEIDOU będzie w pełni kompatybilny z wszystkimi pozostałymi systemami satelitarnymi. Zdaniem Januszewskiego (2014) BEIDOU stanie się istotnym udziałowcem przyszłościowego systemu globalnego GNSS.



Źródło: <http://www.insidegnss.com/aboutcompass>

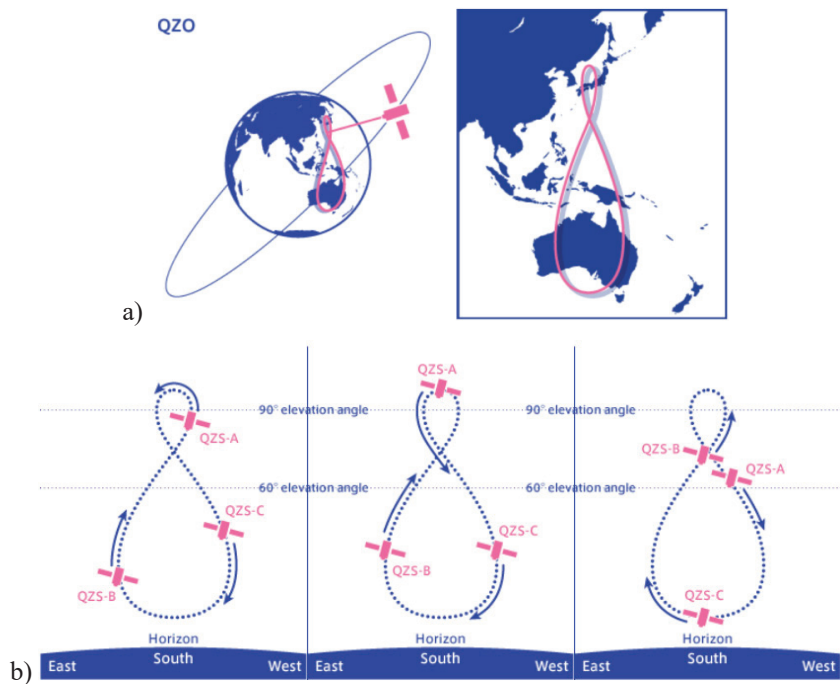
Rysunek 3.4. Orbitsy satelitów systemu BEIDOU

Oprócz systemów globalnych tworzone są systemy regionalne, których działanie obejmuje tylko część obszaru ziemi. Do tych systemów można zaliczyć QZSS (ang. *Quasi-Zenith Satellite System*) rozwijany przez japońską agencję kosmiczną JAXA (<http://qzss.go.jp>) i budowany przez Indie system IRNSS (ang. *Indian Regional Navigation Satellite System*) (<http://www.thehindu.com>). Zadaniem tych systemów jest uzupełnienie konstelacji satelitów systemu GPS i poprawa dokładności pozycjonowania.

System QZSS ma uzyskać pełną funkcjonalność w roku 2018 i składać się z 4 satelitów. Orbitę kwazi-zenitalną systemu QZSS oraz ruch satelitów przedstawia rysunek 3.5.

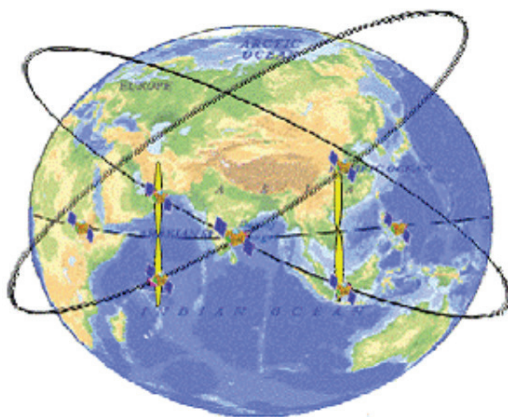
Japoński system obecnie na orbicie ma wystrzelonego we wrześniu 2010 roku satelitę QZS-1. Scalone odbiorniki obsługujące GPS i QZSS wraz z innymi systemami (GLONASS, BEIDOU) dla użytkowników profesjonalnych, udostępniać będą lokalizację z dokładnością rzędu 1-2 centymetrów, przy użyciu naziemnych stacji referencyjnych. Zwykły odbiornik będzie mógł natomiast wyznaczyć swoją pozycję z dokładnością do 2 m, a korzystając z urządzenia GPS+QZSS pracującego w pasmach L1 i L2C/L5 — nawet do 0,5 m (<http://qzss.go.jp>).

System IRNSS składa się z 3 satelitów na orbicie geostacjonarnej i 4 satelitów na orbitach geosynchronicznych (<http://www.sac.gov.in>). W tym systemie znajdują się 3 satelity nieruchome dla obserwatora z ziemi i 4 satelity, które wykonują niewielki ruch na nieboskłonie z obiegiem dobowym (rys. 3.6).



Źródło: <http://qzss.go.jp>

Rysunek 3.5. Orbita satelitów systemu QZSS: a) orbita satelitów i trajektoria przelotu, b) widok poruszających się satelitów po orbicie kwazi-zenitalnej nad Tokio



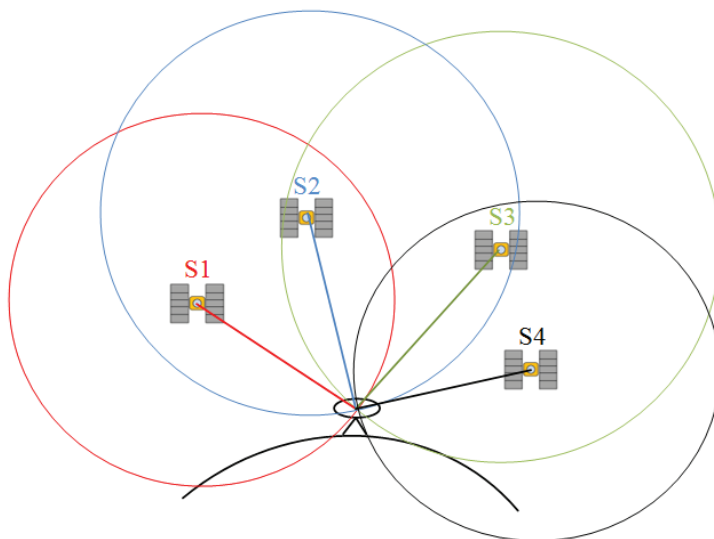
Źródło: <http://www.sac.gov.in/SACSITE/IRNSS-1A.html>

Rysunek 3.6. Rozmieszczenie satelitów systemu IRNSS

3.1. Zasady działania GNSS i dokładność pozycjonowania

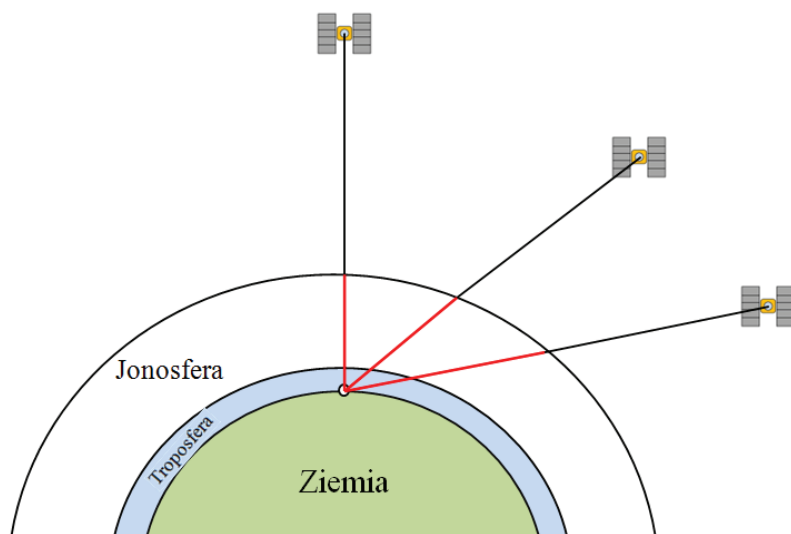
Każdy z wymienionych powyżej systemów składa się z trzech segmentów: a) kosmicznego (satelity krążące wokół Ziemi), b) naziemnego (stacje kontrolne i monitorujące), c) użytkownika (odbiorniki sygnałów) (Narkiewicz, 2003, 2007; Specht, 2007). Dla prawidłowego działania systemu i wyznaczania pozycji przez odbiornik użytkownika, niezbędne są dwa ściśle współpracujące ze sobą segmenty – kosmiczny i naziemny. Ogólna dostępność sygnału GNSS sprawiła, że został on rozpowszechniony w prawie każdej dziedzinie życia człowieka. GNSS jest obecnie podstawowym źródłem informacji o aktualnym położeniu i dokładnym czasie, jednolitym dla całej kuli ziemskiej.

Zasada działania GNSS jest podobna dla każdego z przedstawionych systemów. Różnice pojawiają się w przypadku częstotliwości nadawanego sygnału przez satelitę oraz sposobu kodowania informacji, a także sposobu podawania czasu. Wyznaczenie pozycji odbiornika na powierzchni ziemi wymaga wiedzy o odległości, jaka dzieli go od satelitów na orbitach okołoziemskich. Wyznaczenie tylko długości i szerokości geograficznej wymaga odebrania informacji od 3 satelitów, natomiast przy minimum 4 satelitach (rys. 3.7), oprócz współrzędnych geograficznych wyznaczona zostaje jeszcze wysokość odbiornika nad poziomem morza. Należy jeszcze dodać, że w obydwu opisanych powyżej przypadkach informacja odbierana od jednego z satelitów jest wykorzystywana przez odbiornik do obliczenia poprawki dla wewnętrznego zegara odbiornika. Oznacza to, że odbiornik synchronizuje swój zegar z zegarem atomowym satelity i przyjmuje podstawową skalę UTC (ang. *Universal Time Coordinated*) nazywaną tradycyjnie GMT (ang. *Greenwich Mean Time*) (Narkiewicz, 2003).



Rysunek 3.7. Wyznaczenie pozycji odbiornika

Wyznaczenie odległości pomiędzy odbiornikiem i satelitą (rys. 3.7), na podstawie pomiaru czasu dotarcia sygnału z satelity do odbiornika, wymaga ustalenia kiedy sygnał został wysłany z satelity i kiedy dotarł do odbiornika. Taka odległość nosi też nazwę pseudoodległości. Na początku działania systemu TRANSIT do pomiaru odległości do satelitów wykorzystywano efekt Dopplera (Specht, 2007). Obecnie powszechnie do wyznaczenia tego czasu stosuje się dwie metody: kodową i fazową (Specht, 2007; Narkiewicz, 2007). W celu zmniejszenia wpływu ośrodka na wyznaczoną odległość do satelitów stosuje się pomiar na dwóch lub więcej powiązanych ze sobą częstotliwościach. Wpływ ośrodka jest tym większy, im niżej znajduje się satelita nad horyzontem i zwiększa się droga sygnału w atmosferze (rys. 3.8). Przykładowo w systemie GPS stosowane są obecnie dwie podstawowe częstotliwości L1 i L2, wprowadzana jest nowa, trzecia częstotliwość L5 (tab. 3.1) (Specht, 2007; Narkiewicz, 2007).



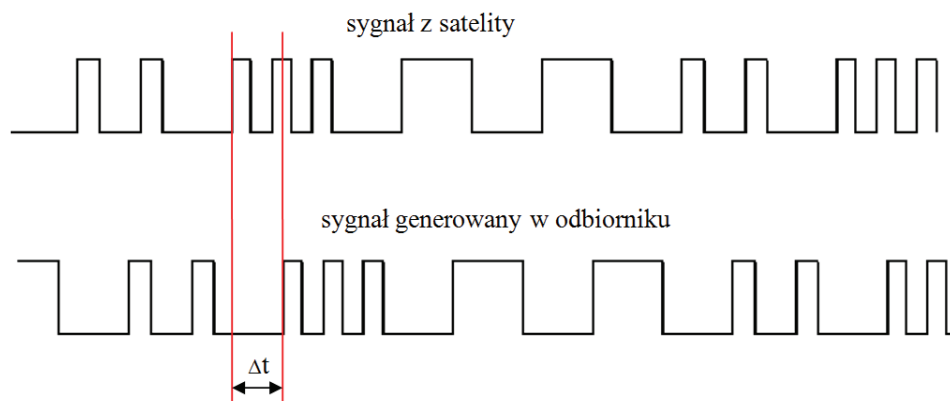
Rysunek 3.8. Zmiana długości drogi sygnału (czerwona linia) w atmosferze w zależności od wysokości satelity nad horyzontem

W metodzie kodowej na sygnał przesyłany z satelity nakładany jest specjalny kod pseudolosowy (poprzez modulację) – w przypadku systemu GPS wykorzystywane są 2 kody: **C/A** (ang. *Coarse Aquisition* – kod mniej dokładny) i **P** (ang. *Precise* – kod precyzyjny) (<http://www.asgeupos.pl>). Mierząc czas propagacji fali elektromagnetycznej wysyłanej przez satelitę i generowanej repliki sygnału w odbiorniku (rys. 3.9), (wyznaczając czas, kiedy dany fragment kodu został wyemitowany przez nadajnik satelity oraz moment dotarcia tego kodu do anteny odbiorczej), można wyznaczyć odległość odbiornika od satelity używając wzoru (1) (<http://www.asgeupos.pl>):

$$D = c \cdot \Delta t \quad (1)$$

gdzie:

c – prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodku ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
 Δt – wyznaczony czas propagacji (s).



Rysunek 3.9. Wyznaczenie czasu dotarcia sygnału do odbiornika

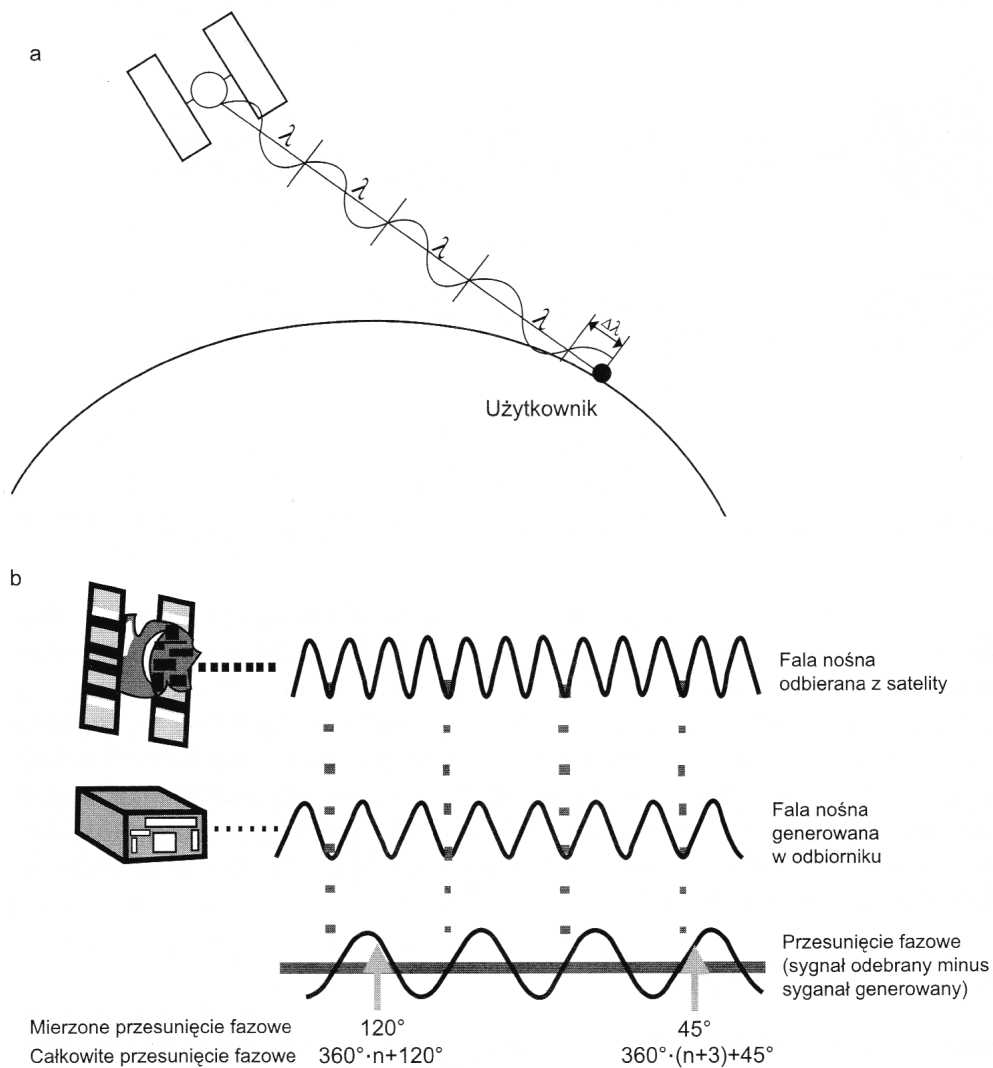
Najślabszym ogniwem powyższego równania jest prędkość c , którą jest bardzo trudno wyznaczyć z dużą precyzją, z uwagi na niejednorodność ośrodka przez jaki przechodzi sygnał. Ponadto problemem jest synchronizacja czasu zegarów odbiornika i nadajnika fali elektromagnetycznej tak, aby wyeliminować jej wpływ na wynik (<http://www.asgeupos.pl>).

Metoda fazowa pomiaru odległości (rys. 3.10) polega na wyznaczeniu fazy sygnału docierającego do anteny odbiorczej. Jednakże wyznaczenie odległości D (m) wymaga również znajomości liczby pełnych odłożeń (cykli fazowych) fali elektromagnetycznej na drodze nadajnik-odbiornik N . Odległość wyznaczona jest w ten sposób na podstawie wzoru (2) (<http://www.asgeupos.pl>):

$$D = (N + \varphi) \cdot \Delta D \quad (2)$$

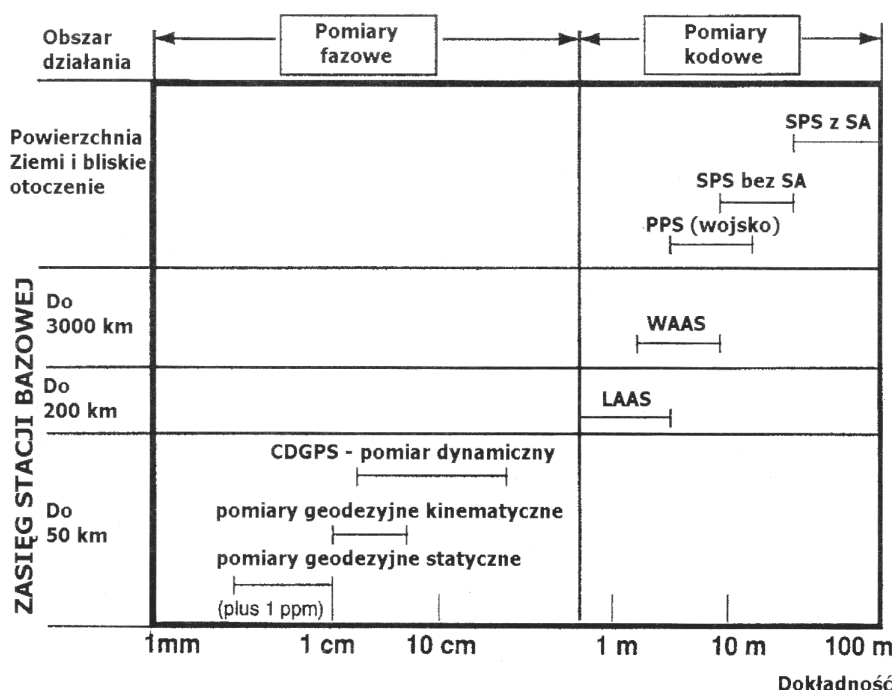
gdzie:

ΔD – długość fali elektromagnetycznej (m),
 N – liczba całkowitych cykli fazowych,
 φ – zmierzona faza sygnału przychodzącego.



Źródło: Narkiewicz, 2003

Rysunek 3.10. Pomiar w metodzie fazowej: a) odległość odbiornika od satelity ($4\lambda + \Delta\lambda$),
b) wyznaczenie przesunięcia fazowego na podstawie sygnału odebranego z satelity i generowanego w odbiorniku

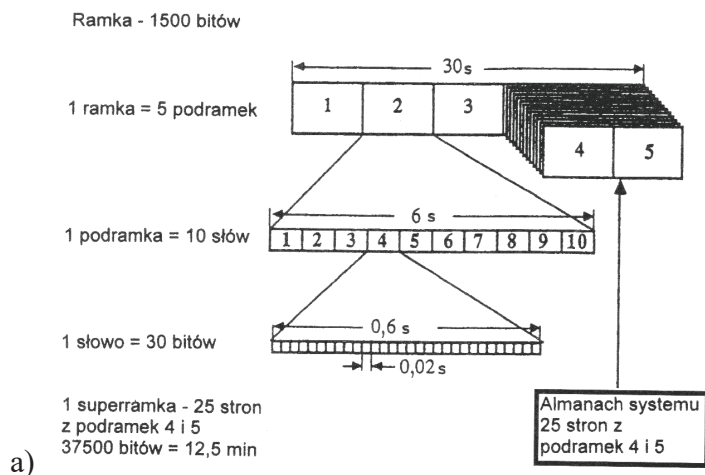


Źródło: Narkiewicz, 2003

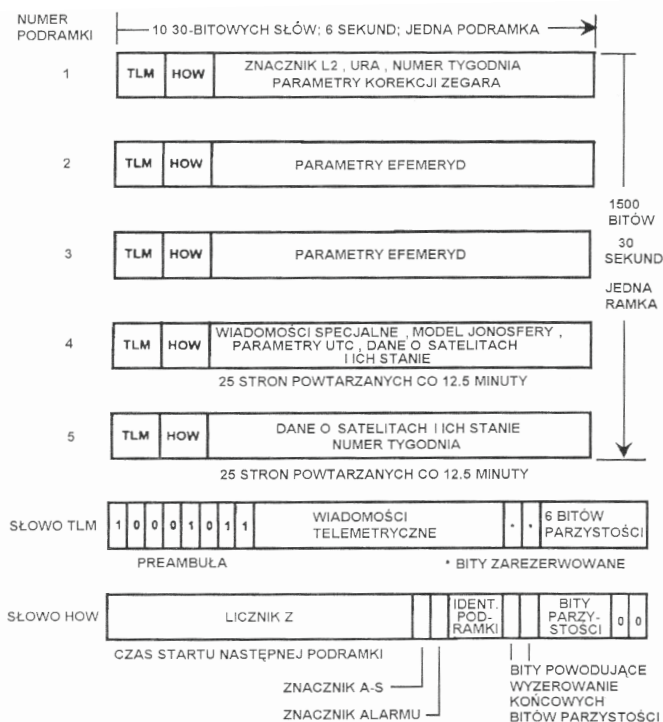
Rysunek 3.11. Dokładności GPS dla różnych sposobów pomiaru pseudoodległości

Dokładność odbiornika wynika bezpośrednio ze sposobu pomiaru odległości zastosowanej w urządzeniu (rys. 3.11). Pomiary kodowe umożliwiają wyznaczenie pozycji z dokładnością do około 1 m, fazowe z milimetrową (rys. 3.11).

Dla prawidłowej pracy odbiorników i szybszego wyznaczania pozycji niezbędne jest odbieranie depeszy nawigacyjnej (rys. 3.12). Sygnał ten o częstotliwości 50 Hz jest przesyłany z satelity do odbiornika i zawiera on sygnał rozpoznawczy danego satelity, aktualną pozycję na orbicie i dokładny czas. Informacje te są zawarte w almanachu (informacje o układzie satelitów na niebie) i efemerydzie (teoretyczna droga satelity i odchylenia od niej) (Narkiewicz, 2007; Specht, 2007).



a)

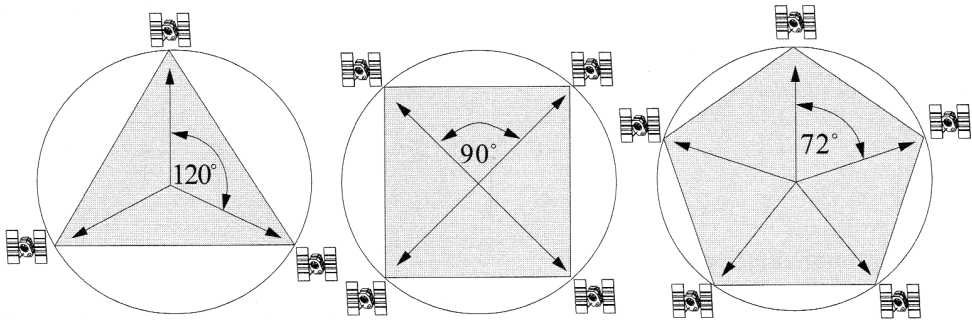


b)

Źródło: Narkiewicz, 2003

Rysunek 3.12. Depesza nawigacyjna: a) struktura, b) zawartość

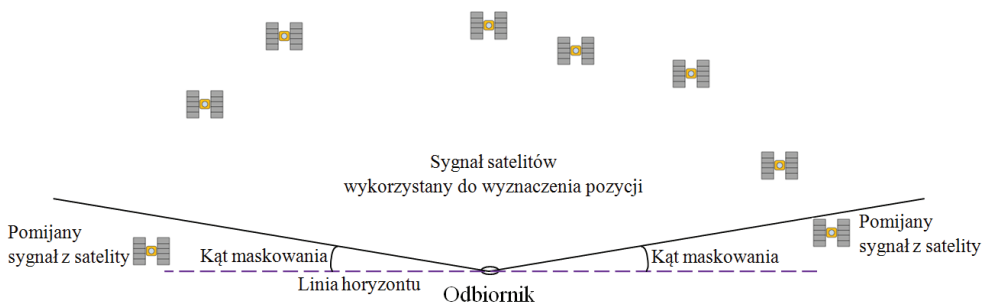
Bardzo duży wpływ na wyznaczenie pozycji ma rozmieszczenie satelitów na sferze niebieskiej. Informacja o jakości wyznaczanej pozycji jest podawana przez odbiornik w postaci współczynnika DOP (ang. *Dilution Of Precision*), czyli współczynnika dokładności (rozmycia) pozycji. Optymalne rozstawienie satelitów przedstawiono na rysunku 3.13 i dotyczy to wyznaczenia pozycji 2D, a jeżeli ma być wyznaczona pozycja 3D, to dodatkowo jeszcze jeden satelita powinien się znajdować dokładnie nad odbiornikiem.



Źródło: Specht, 2007

Rysunek 3.13. Optymalne rozmieszczenie satelitów minimalizujące współczynnik DOP

Ze wszystkich widocznych satelitów na niebie do wyznaczenia pozycji są wybierane tylko te, które znajdują się powyżej kąta maskowania, czyli powyżej 10° nad horyzontem (rys. 3.14). Niekiedy wartość kąta maskowania jest mniejsza i zawiera się w przedziale od 5 do 10° (Narkiewicz, 2007).



Rysunek 3.14. Rozmieszczenie satelitów nad odbiornikiem

Współczynnik DOP może być sprecyzowany poprzez dodanie dodatkowej litery na początku skrótu, która wyraża wpływ położenia satelitów na jakość wyznaczonej pozycji odbiornika (rozmycie dokładności wyznaczanych wielkości):

- GDOP (ang. *Geometrical Dilution Of Precision*) – rozmycie geometryczne (całkowite),
- PDOP (ang. *Positional Dilution Of Precision*) – rozmycie pozycji trójwymiarowej,
- HDOP (ang. *Horizontal Dilution Of Precision*) – rozmycie poziome (w pozycji dwuwymiarowej),
- VDOP (ang. *Vertical Dilution Of Precision*) – rozmycie pionowe (wysokości),
- TDOP (ang. *Time Dilution Of Precision*) – rozmycie czasowe.

Wykonanie precyzyjnych prac pomiarowych odbiornikiem GNSS wymaga odpowiedniego przygotowania się do nich. Dotyczy to głównie pomiarów wykonywanych w geodezji, czy hydrografii, kiedy istotne jest prawidłowe zaplanowanie pomiarów (Specht, 2007). Wykonanie dokładnych pomiarów powinno być poprzedzone rozeznaniem dotyczącym dostępności sygnału z satelitów oraz występowaniem zakłóceń w troposferze i jonosferze. Planowanie może być przeprowadzone przy użyciu specjalistycznego oprogramowania dostarczanego przez producentów odbiorników (Specht, 2007) lub informacji zawartych na stronach internetowych systemów GNSS wykorzystywanych do pomiaru. Przydatnym narzędziem wspomagającym zaplanowanie pracy z odbiornikami GNSS jest serwis GNSS Planning Online (<http://www.gnssplanningonline.com>) (rys. 3.15) szczególnie w przypadku, kiedy posiadamy odbiornik tylko jednego systemu. Za pomocą tej strony można sprawdzić nie tylko liczbę działających satelitów danego systemu (rys. 3.15), ale również ich widoczność na niebie (rys. 3.16). Ponadto można wyszukać informacje na temat jakości sygnału i zakłóceń oraz wyświetlić trajektorie przelotu satelitów na niebie (rys. 3.16).

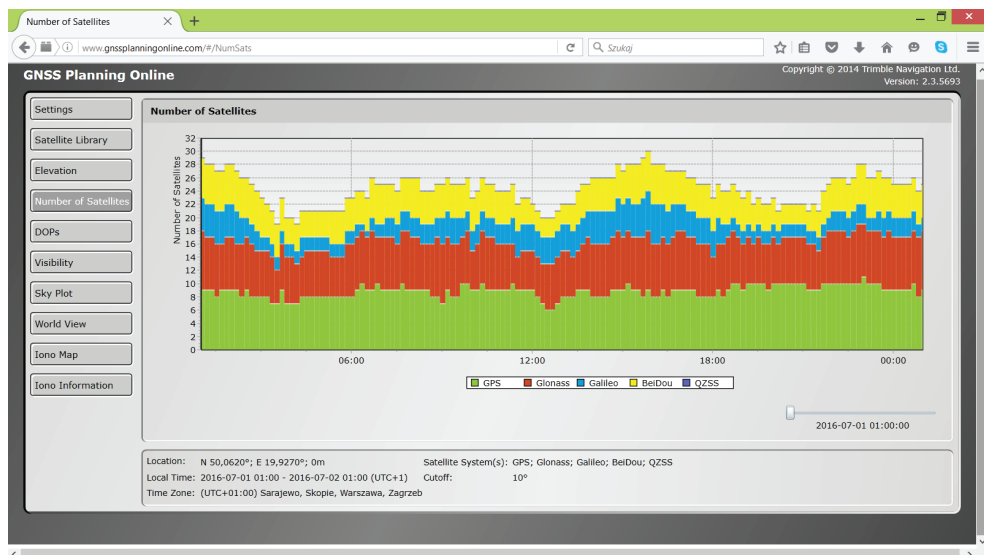
Ponieważ występuje teraz trend ujednolicenia standardów emitowanych sygnałów ogólnodostępnych (cywilnych) przez satelity różnych systemów, to odbiornik wielosystemowy może wyznaczać swoją pozycję na podstawie wszystkich dostępnych sygnałów. Dzięki temu już w niedalekiej przyszłości pomiary z dokładnościami rzędu 1-3 cm nie będą wymagały planowania pomiarów.

Dokładność pracy całego systemu wymaga ciągłej pracy segmentu kontrolnego, składającego się z sieci stacji monitorujących wskazania. W zależności od systemu GNSS stacje te mogą się znajdować na całej kuli ziemskiej (rys. 3.17) lub w przypadku systemów obszarowych występować tylko w tym regionie.



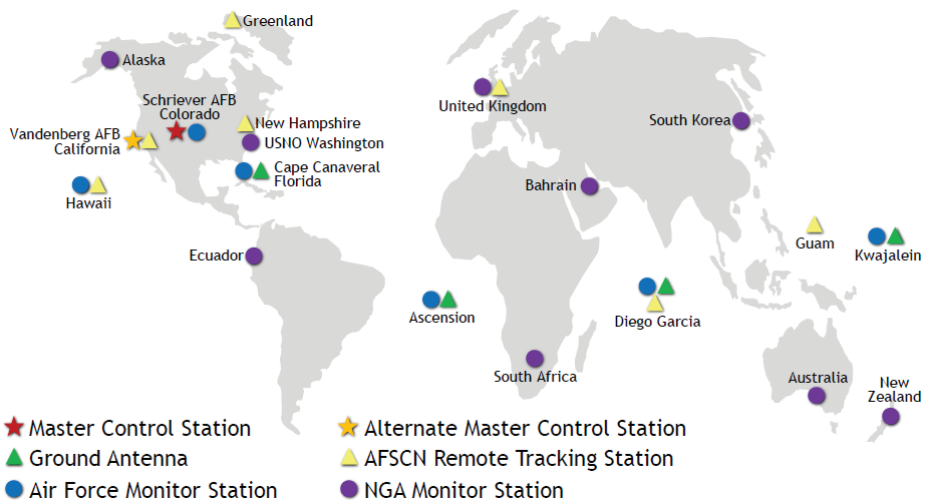
Źródło: <http://www.gnssplanningonline.com/#/SatLibrary>

Rysunek 3.15. Dostępne satelity GNSS na dzień 20 czerwca 2016 r. w systemach:
a) GPS, b) GLONASS, c) GALILEO, d) BEIDOU, e) QZSS



Źródło: <http://www.gnssplanningonline.com/#/SatLibrary>

Rysunek 3.16. Liczba satelitów widocznych na sferze niebieskiej w wyznaczonym dniu i przedziale czasu



Źródło: <http://www.gps.gov/systems/gps/control/>

Rysunek 3.17. Segment kontrolny systemu GPS

Główna stacja kontroli systemu GLONASS mieści się w Moskwie, kolejne na obszarze Rosji znajdują się w St.Petersburgu, Jenisejsku, Komsomolsku nad Amurem, jedna jest w Tarnopolu na Ukrainie, jedna w Niemczech w Neustrelitz oraz jedna w Brazylii (<http://gisplay.pl>).

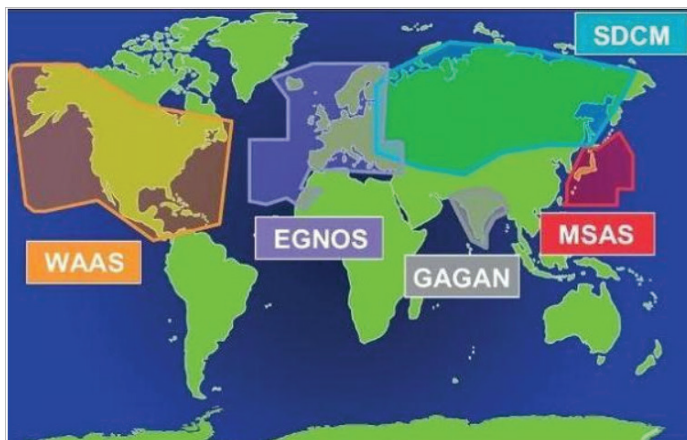
Sposobem na ustalenie dokładniejszej pozycji jest stosowanie pomiaru różnicowego DGPS (ang. *Differential Global Positioning System*). W metodzie tej wykorzystuje się tzw. stację bazową (referencyjną), czyli odbiornik ustawiony w dokładnie wyznaczonym punkcie, który oblicza na bieżąco poprawki różnicowe dla poszczególnych satelitów, eliminując błędy zegara satelity, efemeryd i opóźnień sygnału wynikających z oddziaływania jonosfery i troposfery (<http://gisplay.pl>). Sygnał taki może być następnie przesyłany do ruchomego odbiornika przez satelitę geostacjonarnego, modem GPRS lub modem radiowy bezpośrednio ze stacji bazowej. Wówczas do odbioru takiego sygnału potrzebny jest specjalny odbiornik DGPS. Poprawka może być nanoszona bezpośrednio podczas wykonywania pomiarów lub po ich zakończeniu, stosując postprocessing. Zastosowanie metody DGPS pozwala na osiągnięcie dokładności 0,5-2 m i większej (<http://gisplay.pl>).

Satelitarne systemy wspomagające SBAS (ang. *Satellite Based Augmentation System*) to rozwiązanie transmitujące poprawki dla sygnałów GNSS za pomocą jednego lub kilku satelitów geostacjonarnych (z reguły są to wielofunkcyjne aparaty telekomunikacyjne). Korekty są obliczane na podstawie danych z kilkunastu do kilkudziesięciu stacji pomiarowo-obszaryjnych, transmitowane do satelity SBAS, a następnie retransmitowane na Ziemię. Niektóre rozwiązania SBAS oferują także informacje o wiarygodności systemów nawigacji. Jest to szczególnie przydatne np. w lotnictwie, żegludzie czy podczas operacji służb ratunkowych. (<http://geoforum.pl>)

Istniejące lub planowane systemy SBAS z wyszczególnieniem krajów rozwijających dany system to obecnie:

- EGNOS (Europa),
- WAAS (USA),
- MSAS (Japonia),
- QZSS (Japonia),
- GAGAN (Indie),
- SDCM (Rosja),
- OmniSTAR (system komercyjny holenderskiej firmy Fugro NV).

Zasięg poszczególnych systemów przedstawiono na rysunku 3.18. Ponieważ ciągle występują obszary nie objęte sygnałami wymienionych powyżej systemów administrowanych przez państwa pojawiła się luka, którą wypełnił system komercyjny OmniSTAR (rys. 3.19). Od 2010 roku jest to także pierwszy tego typu system oferujący poprawki dla GLONASS. OmniSTAR wyróżnia także rekordowy zasięg – poprawki dostępne są bowiem dla większości obszarów lądowych świata (rys. 3.19). Segment naziemny systemu składa się z około 100 stacji referencyjnych (najbliżej Polski znajdują się w Wiedniu i Charkowie) i dwóch stacji kontrolnych. Na segment kosmiczny składa się siedem satelitów telekomunikacyjnych (<http://geoforum.pl>).



Źródło: <http://www.tendencias21.net>

Rysunek 3.18. Satelitarne systemy wspomagające SBAS

OmniSTAR VBS



OmniSTAR XP



OmniSTAR G2



OmniSTAR HP



Źródło: <http://www.omnistar.com/SubscriptionServices>

Rysunek 3.19. Serwisy systemu OmniSTAR i ich zasięg

Dokładność wyznaczania pozycji z uwzględnieniem satelitarnych systemów wspomagających SBAS wynosi odpowiednio (<http://geoforum.pl>; Ganeshan i in., 2016; <http://www.omnistar.com>):

- EGNOS – 1 - 3 m,
- WAAS – 1 m,
- MSAS – 1,5 – 2 m,
- QZSS – 1,5 m (planowane 0,3 m),
- GAGAN – 4 m,
- SDCM – 1 – 1,5 m,
- OmniSTAR:
 - OmniSTAR VBS – 1 m,
 - OmniSTAR HP – 0,05-0,1 m,
 - OmniSTAR XP – 0,08-0,1 m,
 - OmniSTAR G2 – 0,08-0,1 m.

Ponadto w przypadku rozwiązań przeznaczonych dla rolnictwa dostępny jest jeszcze jeden system satelitarny StarFire firmy John Deere. Dostępne są serwisy SF1 o dokładności 0,15 m, SF2 o dokładności 0,03-0,05 m i sygnał SF3 o dokładności 0,03 m (<https://www.deere.pl>). Odbiorniki StarFire 6000 odbierają poprawkę z 3 satelitów geostacjonarnych (w skład systemu wchodzi 6 satelitów), dzięki czemu wyznaczenie pozycji po uruchomieniu odbiornika jest szybsze i zapewnia ciągłość pracy nawet przy przeszkodach terenowych zasłaniających widoczność części nieba.

Drugim sposobem dostarczania poprawek jest Internet i sieć GPRS. Poprawki mogą być pobierane z systemu OmniSTAR, StarFire oraz innych regionalnych systemów. Na terenie Polski dostępne są dwa systemy - prywatny TPI NETpro oraz państwowy ASG-EUPOS (*Aktywna Sieć Geodezyjna – European Position Determination System*). Obydwa te systemy oferują możliwość przesyłania poprawki z wyznaczonej stacji referencyjnej (rys. 3.20, 3.21) lub obliczyć taką poprawkę dla wirtualnej stacji bazowej.

System TPI NETpro składa się ze 136 stacji referencyjnych rozmieszczonych równomiernie na terenie Polski (rys. 3.20) oraz na terenach przygranicznych. Był to pierwszy w kraju ogólnopolski system udostępniający korekty do pomiarów GNSS w systemach GPS oraz GLONASS. Sieć jest stworzona i udostępniana dla klientów TPI, którzy pracują zakupionym w Polsce odbiornikiem GNSS TOPCON lub SOKKIA. Wykorzystany na stacjach najnowocześniejszy sprzęt TOPCON umożliwia w przyszłości uruchomienie poprawek do powstającego systemu Galileo. TPI NETpro stanowi część ogólnoswiatowej sieci TOPCON TopNet Live (<http://www.tpi.com.pl>).

Niewątpliwą zaletą systemu ASG-EUPOS jest proces składania wniosków i aktywacji usług. Zautomatyzowany proces pozwala na wykupienie dostępu do systemu ASG-EUPOS i wniesieniu opłaty, określonej w dokumencie obliczenia opłaty (DOO), drogą płatności elektronicznych PayByNet, za pomocą przelewu internetowego lub kart kredytowych i płatniczych. Opłacona w ten sposób usługa systemu ASG-EUPOS jest uruchamiana w ciągu kilku minut po realizacji płatności.



Źródło: <http://www.tpi.com.pl>

Rysunek 3.20. Rozmieszczenie stacji referencyjnych systemu TPI NETpro



Źródło: <http://www.asgeupos.pl>

Rysunek 3.21. Rozmieszczenie stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS

Udostępniona w portalu PZGiK (*Państwowy Zasób Geodezyjny i Kartograficzny*) funkcja przedłużenia posiadanej licencji pozwala zachować ciągłość dostępu do usług systemu ASG-EUPOS, bez konieczności wprowadzania zmian w konfiguracji sprzętu pomiarowego. Klientom, którzy nie posiadają jeszcze konta w tym systemie, portal PZGiK umożliwia jego utworzenie i zamówienie do niego odpowiedniej usługi, bez konieczności wcześniejszego logowania się w systemie ASG-EUPOS (www.asgeupos.pl).

System ASG-EUPOS udostępnia trzy rodzaje rozwiązań sieciowych: VRS (ang. *Virtual Reference Station*), MAC (ang. *Master and Auxiliary Concept*) oraz FKP (niem. *Flächen Korrektur Parameter*). Dla użytkownika nie jest istotne, z którego rozwiązania korzysta, ponieważ informacje w nich zawarte generowane są przez to samo oprogramowanie i dają bardzo zbliżone rezultaty. Zaleca się użytkownikom przeprowadzenie pomiarów testowych w oparciu o udostępniane strumienie, w celu wybrania odpowiedniego rozwiązania. Testy przeprowadzone przez wykonawcę systemu oraz zewnętrzne podmioty potwierdzają, że w optymalnych warunkach pomiarowych wszystkie rodzaje danych korekcyjnych pozwalają osiągnąć powtarzalność wyznaczeń w granicach $\pm 0,03$ m w poziomie i $\pm 0,05$ m w pionie (www.asgeupos.pl).

Kolejnym sposobem przekazania poprawki dla wyznaczonej pozycji jest jej przesłanie ze stacji bazowej bezpośrednio do odbiornika. Wadą tego rozwiązania jest konieczność ustawienia stacji bazowej w niewielkiej odległości 3-8 km od ruchomego odbiornika (rys. 3.22), czyli najczęściej na skraju pola.



Źródło: <http://www.claas.pl>

Rysunek 3.22. Przenośna stacja bazowa RTK firmy CLAAS

Innym rozwiązaniem przydatnym w gospodarstwach, które pola mają niedaleko od swojej siedziby jest zastosowanie stacji bazowej wyposażonej w radionadajnik i antenę radiową UHF (rys. 3.23). Jeżeli potrzebna jest większa odległość transmisji (ponad 10 km), to antenę UHF montuje się na dachu najwyższego budynku i zwiększa się moc nadajnika, ale wymaga to uzyskania pozwolenia na nadawanie sygnału.



Źródło: <http://geomatix.com.pl>

Rysunek 3.23. Przenośna stacja bazowa RTK firmy SOUTH

3.2. Przenośne komputery polowe – budowa i oprogramowanie

Najczęstsze rozwiązanie umożliwiające wykonanie pomiarów w terenie to komputery polowe wyposażone w odbiorniki GNSS i oprogramowanie. Również popularne rozwiązanie, ale niosące ze sobą mniejszą dokładność wykonanego pomiaru, to korzystanie ze smartfona wyposażonego w odbiornik GNSS i oprogramowanie. Dostępność odbiorników, które zawierają Bluetooth powoduje, że nawet za pomocą smartfona

i prostych aplikacji GIS (ang. Geographic Information System) można wykonać precyzyjne pomiary.

Obecnie standardem jest, że każdy odbiornik przeznaczony do prac polowych spełnia normę IP65 dotyczącą zabezpieczenia przed wilgocią i pyłem (rys. 3.24, 3.25). Urządzenia te wytrzymują upadek z wysokości 1,2 m na twarde podłoże i bez uszkodzeń mogą pracować w temperaturach od -20 do +60°C.



Źródło: <http://sklep.navigate.pl>

Rysunek 3.24. Przykładowe odbiorniki firmy Spectra Precision z systemem operacyjnym Windows® Mobile 6.5, Windows Embedded Handheld 6.5



Źródło: <http://sklep.navigate.pl>

Rysunek 3.25. Przykładowe odbiorniki firmy Handheld z systemem operacyjnym Android

Zazwyczaj podstawowym wyposażeniem odbiornika jest procesor o częstotliwości 1,2 GHz lub w przypadku najprostszych urządzeń 600 MHz. Zawierają one pamięć operacyjną od 256 MB (przy tańszych urządzeniach), do 2 GB przy odbiornikach wyższej klasy. Pamięć wewnętrzna urządzenia waha się w przedziale od 2 GB do 16 GB. Zwiększenie miejsca na wyniki pomiarów możliwe jest poprzez zastosowanie dodatkowych kart pamięci o pojemności do 32 GB.

Źródłem zasilania tych urządzeń jest bateria (np.: Li-Poly, Li-Ion), która pozwala na pracę urządzenia od około 4 h do ponad 10 h. Czas pracy urządzenia w dużej mierze zależy od ustawień podświetlania ekranu i sygnałów dźwiękowych. Przeciętna wielkość ekranu w komputerach polowych to 3,5 cala.

Przydatnym wyposażeniem jest modem GPRS, umożliwiający połączenie z Internetem i pobieranie poprawek RTK, dzięki którym można pracować z dokładnością kilku cm. W przypadku komputerów polowych, które nie zawierają modemu GPRS i wykonują pomiary statyczne, możliwe jest dokonanie korekty wyników pomiarów w serwisach post-processingu (www.asgeupos.pl).

Standardowym wyposażeniem komputerów polowych jest możliwość łączności bezprzewodowej Bluetooth i WiFi. Do połączenia z komputerem zewnętrznym lub anteną zewnętrzną są porty RS232 lub USB. W przypadku oprogramowania do rolnictwa precyzyjnego port RS232 jest wykorzystywany do przekazania informacji o wielkości dawki odczytanej z mapy aplikacyjnej do komputerów sterujących maszynami.

W przypadku komputerów polowych, najczęściej jako system operacyjny występuje Windows® Mobile 6.5, Windows Embedded Handheld 6.5 oraz Android. W związku z tym zastosowanie oprogramowania specjalistycznego do wykonania pomiarów i ich opracowania jest uzależnione od systemu operacyjnego. Dla systemów Windows mogą to być oferowane w kraju programy: MobileMapper Field, DigiTerra Explorer, ESRI ArcPad, i inne.

Dla systemów Android wykonanie pomiarów można przeprowadzić programami: MobileMapper Field dla Androida, tMap, mLas Inżynier Lite, mLas Inżynier Pro, ESRI Collector for ArcGIS i inne.

Jeżeli występuje konieczność zastosowania przy pomiarach bardziej wymagających aplikacji pod względem obciążenia procesora i pamięci operacyjnej oraz większych ekranów (11,6 cala) umożliwiających na bieżąco edytowanie wyników pomiarów, wtedy rozwiązaniem jest zastosowanie pancernych tabletów i laptopów (rys. 3.26). Zastosowane oprogramowanie systemowe to Windows 7 lub 8, a czasami również system Android.

Przykład wykorzystania prostego urządzenia mobilnego w postaci palmtopa Fujitsu-Siemens z wbudowanym odbiornikiem GPS SiRF III do precyzyjnego wyznaczenia punktów pomiarowych (rys. 3.27), w których przeprowadzono pomiary przedstawił w swoich badaniach Kielbasa (2011).

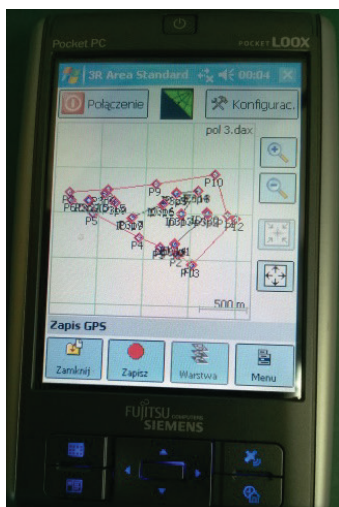


Źródło: <http://sklep.navigate.pl>

Rysunek 3.26. Przykładowe tablety i laptopy pancerne

Komputer polowy przez niego stosowany został wyposażony w aplikację 3R-Map, pozwalającą ustalać położenie punktów, rejestrować przebieg linii i granic działek (poligonów). Urządzenie podaje długość linii oraz powierzchnię i długość granicy działek. Na rysunku 3.27 przedstawiono rzeczywisty widok rozkładu punktów pomiarowych w oknie programu 3R-Area Standard. W celu dalszej obróbki dane pomiarowe przekształcane do formatu shp zostały transferowane do komputera stacjonarnego wyposażonego w oprogramowanie GIS, generujące mapy cyfrowe przestrzennego zróżnicowania mierzonych wielkości.

Innym przykładem bardziej zaawansowanego urządzenia jest komputer polowy NOMAD firmy Trimble (rys. 3.28). Komputer obsługuje procesor 806 MHz Marvell PXA320 XScale (www.impexgeo.pl), a rejestrowane dane mogą być odczytane bez dodatkowych urządzeń, dzięki dotykowemu wyświetlaczowi pracującemu w rozdzielczości VGA. Całość zamknięta jest w obudowie spełniającej normę IP67, która gwarantuje, że urządzenie jest w pełni odporne na zawilgocenie i zapylenie, a także ma ochronę przed uszkodzeniami mechanicznymi. Całość obsługuje oprogramowanie WINDOWS MOBILE w wersji 6.1.



Rysunek 3.27. Widok zarejestrowanych punktów pomiarowych poligonu doświadczalnego



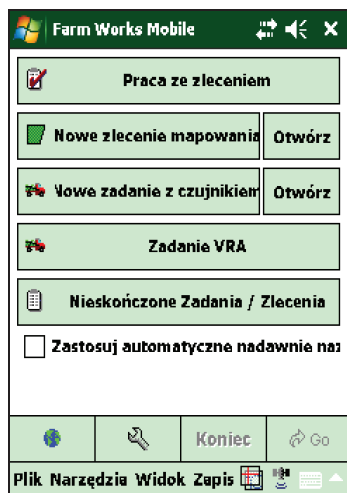
Rysunek 3.28. TRIMBLE NOMAD, odbiornik przeznaczony dla bardziej wymagających

Odbiornik GPS w jaki wyposażony jest ten komputer posiada następujące parametry (www.impexgeo.pl):

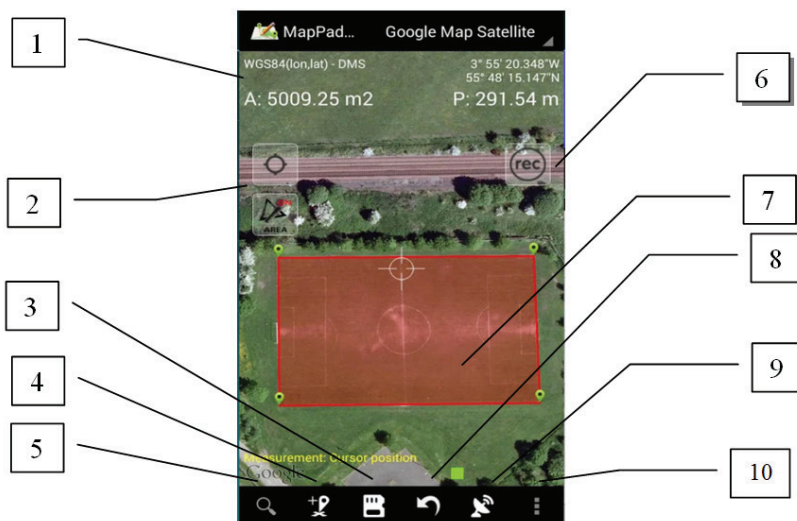
- deklarowana dokładność od 1-3 m, dzięki lepszemu wykorzystaniu poprawek SBAS przesyłanych do urządzenia także przez sieć GPRS,
- liczba kanałów 12, kod L1,
- częstotliwość wyznaczania pozycji 1Hz,
- czas do pierwszego wyznaczenia pozycji 50 sekund (typowy),
- protokoły SiRF, NMEA-0183 (domyślna prędkość NMEA 9600 bps).

Na rysunku 3.29 przedstawiono ekran startowy komputera TRIMBLE NOMAD wyposażonego w program FARM WORKS MOBILE. Oprogramowanie zostało przystosowane do współpracy z różnymi kontrolerami maszyn rolniczych i urządzeń pomiarowych, co pozwala na zapis pomiarów i sterowanie maszynami do zmiennej aplikacji. Ponadto oprogramowanie umożliwia również zapis przebiegu wykonywanego zabiegu agrotechnicznego.

Poza profesjonalnymi rozwiązaniami przedstawionymi powyżej istnieje możliwość wykorzystania darmowego oprogramowania. Dużą liczbę rozwiązań można znaleźć na system Android w aplikacji Sklep Google Play. Jednym z dostępnych programów jest np. MAP PAD w wersji do pomiaru powierzchni (rys. 3.30). Program nie jest zaawansowany, jednak jest narzędziem, które w założeniu miało być bardzo proste. Umożliwia wykonanie pomiaru granicy pola w intuicyjny sposób. Wszystkie niezbędne informacje dotyczące wyników pomiaru są na bieżąco wyświetlane na ekranie komputera.

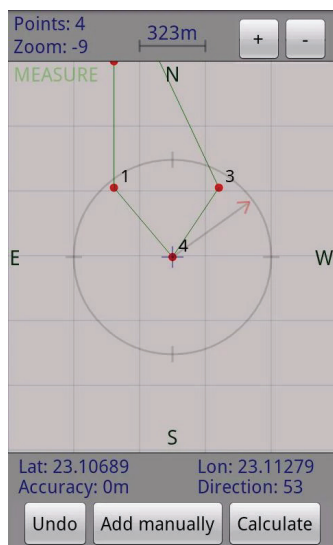


Rysunek 3.29. Ekran startowy programu MOBILE FARM WORKS w komputerze NOMAD TRIMBLE



Rysunek 3.30. Ekran programu MAP PAD: 1 – atrybuty pomiaru (powierzchnia, współrzędne, obwód), 2 – przyciski odpowiedzialne za rodzaj pomiaru oraz za odnajdowaniu aktualnej pozycji na mapie, 3 – zapis wyznaczonej ścieżki, 4 – pomiar ręczny, 5 – wyszukiwanie adresów, 6 – pomiar automatyczny, 7 – wyznaczona (przykładowa) powierzchnia, 8 – usuwanie zaznaczeń, 9 – zakładka sygnału GPS, 10 – ustawienia

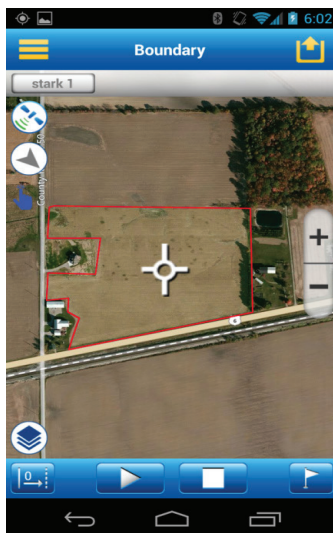
Kolejnym przydatnym narzędziem jest aplikacja AREA CALCULATOR (www.play.google.com). Otwierając jego okno, zamiast mapy czy podglądu satelitarnego, pojawia się siatka współrzędnych, ponieważ program nie ma możliwości nakładania warstw. Interfejs programu (rys. 3.31) to zaledwie kilka przycisków i mapa. Utrudnieniem w wykonywaniu pomiarów jest to, że aplikacja nie posiada opcji automatycznej rejestracji współrzędnych. Pomiary należy wykonywać w trybie ręcznym i po zaznaczeniu minimum trzech punktów poprzez łącze *Add Manually*, program zamknie obwód, a po wciśnięciu przycisku *Calculate* zostanie wyświetlone okno dialogowe z wynikami pomiaru.



Źródło: <https://play.google.com>

Rysunek 3.31. Okno programu AREA CALCULATOR

Istnieją również programy bardziej rozbudowane, w których pomiar powierzchni to tylko jedna z wielu funkcji. Do takich aplikacji należy CONNECTED FARM SCOUT (rys. 3.32), która jest wersją dla systemu Android programu CONNECTED FARM firmy Farm Works. Program jest na tyle zaawansowany, że współpracuje z różnymi czujnikami np. monitoringu plonu lub pomiaru zielonych liści GreenSeekerem, dzięki czemu na podstawie zarejestrowanych danych tworzone są mapy plonu oraz zapotrzebowania na składniki mineralne. Zaletą tego oprogramowania jest to, że dane można przysyłać na bieżąco na serwer *connectedfarm*, gdzie są dostępne dla dowolnej liczby zalogowanych użytkowników. Informacje z serwera mogą być poddane analizie w dowolnym oprogramowaniu do zarządzania przedsiębiorstwem rolnym. Samo pobranie programu jest darmowe, jednak do przysyłania informacji na serwer i korzystania z dodatkowych funkcji wymagane jest zakupienie subskrypcji.



Źródło: www.lh3.ggpht.com

Rysunek 3.32. Pomiar granicy pola w programie CONNECTED FARM SCOUT

4. METODY OCENY ZMIENNOŚCI WARUNKÓW PRODUKCYJNYCH DLA CELÓW ROLNICTWA PRECYZYJNEGO

Wyodrębnienie obszarów na powierzchni pola jest bardzo złożone, ponieważ wymaga uwzględniania wielu czynników i dużym wyzwaniem jest jak największe uproszczenie wyznaczania granic tych obszarów na podstawie jednego czynnika i określenie jego korelacji ze zmiennością plonu (Corwin i Lesch, 2010). Wśród najważniejszych czynników znajdują się właściwości gleby. Badanie zmienności środowiska glebowego dla celów realizacji rolnictwa precyzyjnego może obejmować określenie, m.in. (Adamchuk i in., 2004):

- tekstury gleby (uziarnienia), co jest istotne w optymalizacji nawożenia mineralnego, ma związek z dostępnością wody dla roślin;
- zawartości przyswajalnych form fosforu, potasu, azotu oraz zawartości magnezu, mikroskładników, odczynu gleby, dla planowania efektywnego nawożenia mineralnego;
- zawartości wody w glebie lub potencjału wodnego dla uregulowania stosunków wodno-powietrznych bądź zmiennego nawadniania;
- zawartości materii organicznej (próchnicy), by zapobiec wyjaławianiu gleby;
- właściwości fizycznych gleby dla rozpoznania nadmiernego zagęszczenia;
- topografii terenu, a więc nachylenia i wystawy terenu, co ma związek z podatnością na erozję wietrzną i wodną, nasłonecznieniem itp.

W związku z tym wiele uwagi zwraca się na poszukiwanie najbardziej efektywnych metod, które pozwolą na wyznaczenie na polu obszarów różniących się warunkami produkcyjnymi. Niektóre parametry gleby są zmienne w czasie i przestrzeni i uchwycenie tej zmienności metodami tradycyjnymi jest czasochłonne, pracochłonne i kosztowne. Z tego powodu powstało wiele technologicznie zaawansowanych urządzeń, dzięki którym w trybie pomiaru ciągłego (*on-the-go*) z wykorzystaniem detekcji zbliżeniowej (*proximal sensing*) można w czasie rzeczywistym pozyskać duże ilości danych w warunkach polowych. Pomiar czujnikami zbliżeniowymi można dokonać w sposób inwazyjny (*in situ* lub *ex situ*), kiedy dochodzi do styku z glebą, albo nieinwazyjny, bezkontaktowy. W zależności od źródła energii czujniki mogą być aktywne lub pasywne, z wykorzystaniem energii ze sztucznego źródła lub z naturalnego otaczającego oświetlenia, mogą pracować jako stacjonarne lub mobilne, a wnioskowanie dotyczące mierzonej właściwości może być bezpośrednie lub pośrednie. Czujniki zbliżeniowe pracują w odległości od gleby nie większej niż 2 m, nie zalicza się do nich metod teledetekcyjnych ani laboratoryjnych, poza koniecznością pomiarów laboratoryjnych do kalibracji urządzenia (np. w pomiarach vis-NIR) (Viscara Rossel i in., 2011).

Detekcja zbliżeniowa to przeważnie pomiary pośrednie, mniej dokładne i ciągle pracuje się nad ich doskonaleniem. Mogą one wymagać większych nakładów inwestycyjnych, ale wyżej wymienione zalety sprawiają, że takie czujniki przyczynią się do większego rozpowszechnienia rolnictwa precyzyjnego (Lobsey i Viscara Rossel, 2015).

Adamchuk i in. (2004) podają, że większość czujników stosowanych w tym celu to czujniki:

- elektryczne i elektromagnetyczne, mierzące oporność/przewodność elektryczną, pojemność lub indukcyjność, na którą ma wpływ tekstura badanej gleby;
- optyczne i radiometryczne, wykorzystujące fale elektromagnetyczne do wykrywania poziomu absorbowanej/odbitej energii poprzez cząstki gleby;
- mechaniczne, mierzące siłę wynikającą z pracy narzędzia w glebie;
- elektrochemiczne, w postaci elektrod jonoselektywnych, które pokazują napięcie powstające na skutek działania wybranych jonów (H^+ , K^+ , NO_3^- , Na^+ itp.).

Do oceny stanu zagęszczenia gleby, w tym wykrycia podeszwy płuznej czy zagęszczenia podglebia są stosowane czujniki do pomiaru oporu ścinania elementem uprawowym lub oporu penetrometrycznego, jaki gleba stawia podczas próby jej rozkłino-

4.1. Mechaniczne czujniki do pomiaru zagęszczenia gleby

4.1.1. Systemy do pomiaru siły uciągu i oporów ścinania gleby przez wzorcowe narzędzia

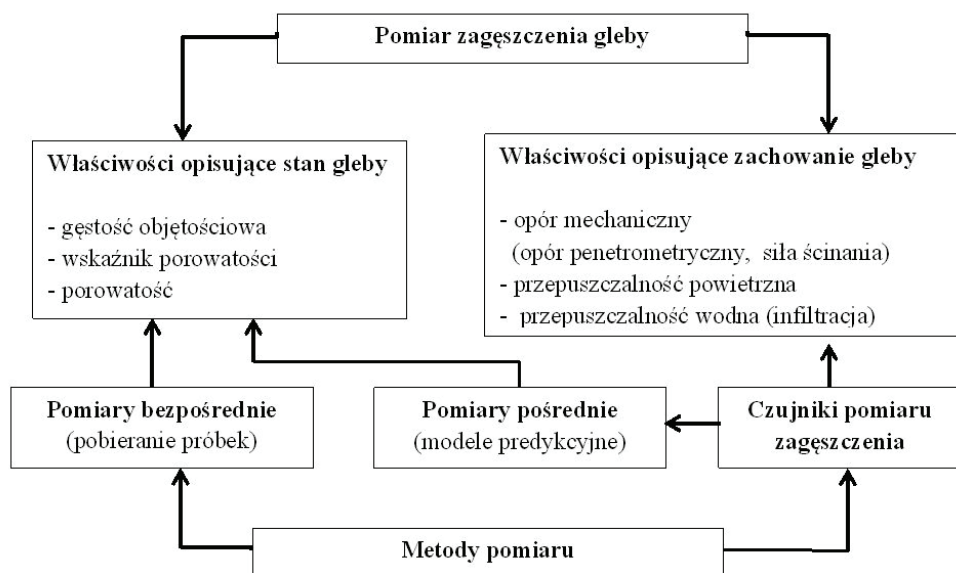
Wzrost wydajności produkcji rolniczej następuje zasadniczo poprzez wzrost gabarytów maszyn, co pociąga za sobą zwiększenie ryzyka nadmiernego zagęszczenia gleby. Wpływa ono niekorzystnie na strukturę gleby, obniża plony, przyczynia się do erozji i zanieczyszczenia wód środkami chemicznymi, zmniejsza efektywność wykorzystania wody i składników pokarmowych z powodu pogorszenia infiltracji (Soane i van Ouwerkerk, 1994; Gysi, 2000; Sudduth i in., 2008). Można wyróżnić kilka rodzajów ugniecenia: ogólne, spowodowane oddziaływaniem zewnętrznych obciążeń i sięgające od powierzchni w głąb gleby; miejscowe, powstałe na skutek oddziaływania narzędzia lub kół maszyn poniżej głębokości roboczej narzędzia; zagęszczenie podglebia, a więc warstwy poniżej zasięgu maszyn uprawowych, wywołane nadmiernym obciążeniem powierzchniowym, jak też naturalne głębokie ugniecenie w postaci cementowanych warstw lub warstw ilu (Spoor, 2006).

Do podjęcia właściwych działań naprawczych (mechanicznych, chemicznych, biologicznych) niezbędne jest ilościowe określenie stanu zagęszczenia gleby. Do jego wykrycia można stosować pomiary bezpośrednie, do których zalicza się m.in. wyznaczenie gęstości objętościowej gleby suchej, porowatości bądź wskaźnika porowatości (rys. 4.1) albo pośrednie, polegające na wyznaczeniu właściwości opisujących zach-

wanie gleby, jak stawiany opór mechaniczny, przepuszczalność powietrzna, wodna (infiltracja) (rys. 4.1) (Hemmat i Adamchuk, 2008; Johnson i Bailey, 2002).

Z rozwojem technologii rolnictwa precyzyjnego wiąże się potrzeba opracowania map przestrzennej zmienności ugniecenia gleby. Zmapowanie ugniecionych obszarów na polu w konfrontacji z mapami plonu może być pomocne w wyjaśnianiu przyczyn występowania jego niskich wartości (Walczykova i Zagórda, 2007; Walczyk i Zagórda, 2009). Może też posłużyć jako mapa aplikacyjna do zastosowania przestrzennie zmiennej głębokości uprawy, przyczyniającej się do zmniejszenia energochłonności zabiegów uprawowych (Kielbasa, 2011).

Tradycyjne pobieranie próbek do bezpośrednich pomiarów jest bardzo praco- i czasochłonne, jeśli ma być wykonane z odpowiednią rozdzielczością. Dla celów rolnictwa precyzyjnego alternatywą dla wykrycia różnego stopnia ugniecenia gleby są pośrednie metody pomiaru, a wśród nich najczęściej stosowany pomiar wytrzymałości mechanicznej gleby (rys. 4.1). Mierzona wielkością może być (a) siła pozioma (uciągu) i pionowa, za pomocą modelowych narzędzi, albo (b) opór mechaniczny w profilu glebowym, wyznaczany z wykorzystaniem penetrometrów (pionowe, poziome) lub wąskich redlic (Hemmat i Adamchuk, 2008).

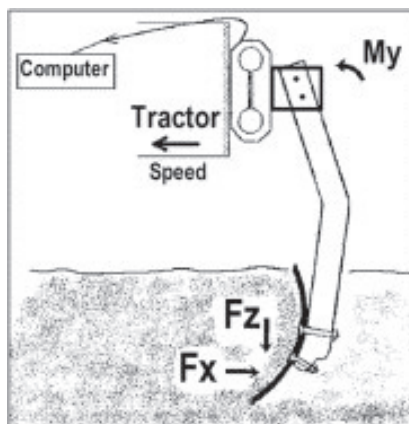


Źródło: Modyfikacja na podstawie Hemmat i Adamchuk, 2008

Rysunek 4.1. Metody pomiaru zagęszczenia gleby

Mapowaniem zmienności oporu mechanicznego gleby przez pomiar poziomej siły uciągu z wykorzystaniem narzędzia modelowego zajmowało się wielu badaczy: Sirjacobson i in. (2002), Hanquet i in. (2004), Kielbasa (2011), VanBergeijk i in. (2001), Neményi i in. (2006) oraz Mouzazen i Roman (2006). Autorzy pierwszych dwóch

opracowań opisali zaprojektowany i sprawdzony w warunkach polowych czujnik w postaci pojedynczego dłuta (rys. 4.2), przeciągany w glebie na głębokości 0,3 m ze stałą prędkością $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

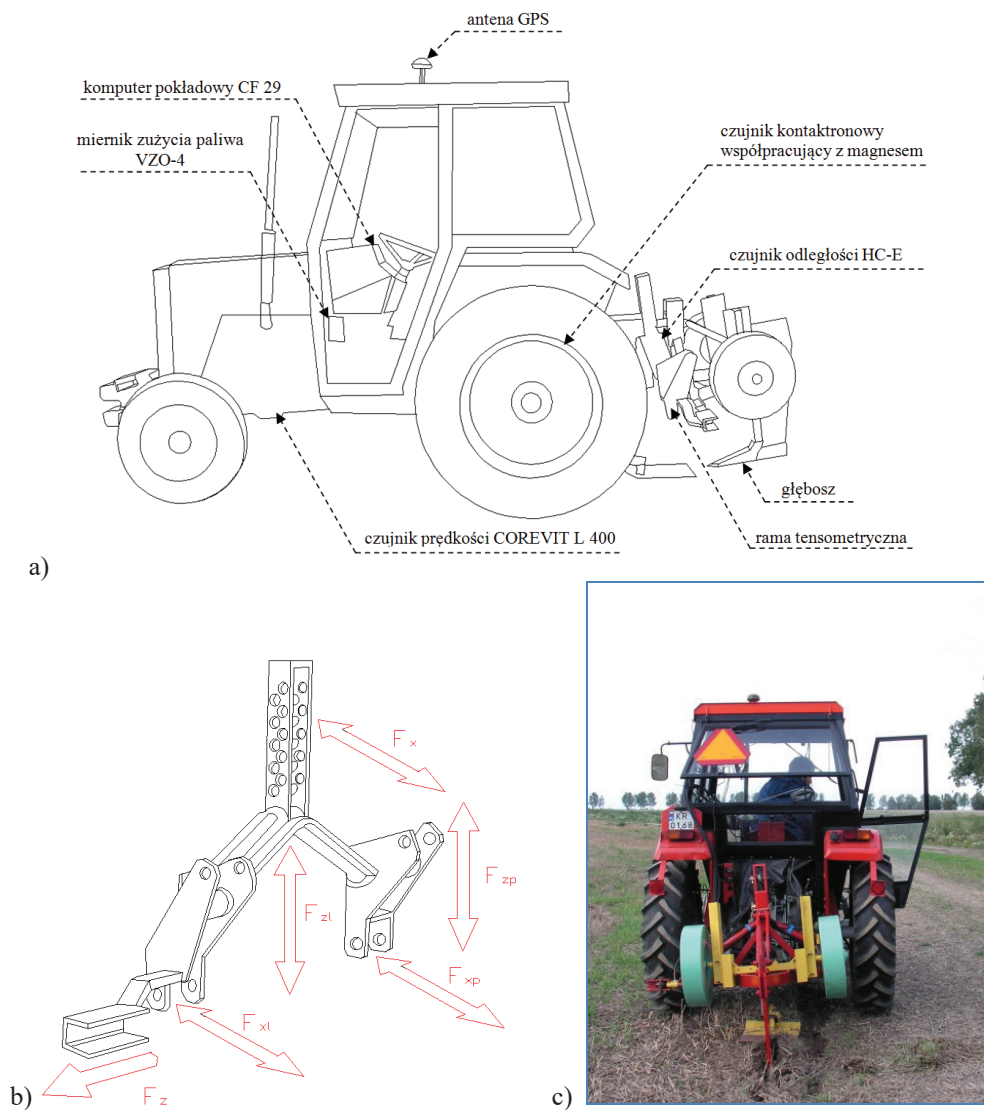


Źródło: Hanquet i in., 2004

Rysunek 4.2. Ogólny widok czujnika do pomiaru oporu gleby: F_x – siły poziome, F_z – siły pionowe, M_y – moment skręcający

Opór gleby był mierzony za pomocą dynamometru przymocowanego do ramy i rejestrowane były poziome i pionowe składowe siły uciągu oraz momentu skręcającego (rys. 4.2). Stwierdzono istotną korelację ($r=0,95$) pomiędzy mierzoną siłą uciągu, a średnią wartością oporu penetrometrycznego do głębokości 0,25 m oraz wilgotnością gleby do głębokości 0,30 m ($r=0,95$). W ten sposób autorzy potwierdzili przydatność tej metody do wyznaczenia na danym polu zmienności właściwości fizycznych gleby, jakimi są jej gęstość i wilgotność.

Do podobnych wniosków doszedł Kielbasa (2011), który jako narzędzie wzorcowe zastosował ząb głębosza z elementem roboczym w postaci dłuta o kącie natarcia 21° i długości 0,28 m (rys. 4.3). Narzędzie to było mocowane na ramie wyposażonej w czujniki tensometryczne (rys. 4.3a, b) zintegrowane z komputerem pomiarowym. Aby wyznaczyć całkowity opór roboczy narzędzia wzorcowego, mierzone były siły w kierunku poziomym F_x , pionowym F_z oraz w kierunku poziomym prostopadłym do kierunku jazdy F_y . Na podstawie przeprowadzonych badań autor konkluduje, że pomiędzy mierzonym oporem roboczym narzędzia a zwięzłością gleby, mierzoną penetrometrem stożkowym, wystąpiła istotna zależność, która pozwala na danym polu wyodrębnić obszary różniące się stanem zagęszczenia. W wyniku badań zagęszczenia gleby metodą pomiarów ciągłych autor stwierdził, że na badanej plantacji ziemniaków powierzchnię przeznaczoną do głębokiej uprawy można zmniejszyć o 70%, przyjmując dodatkowo jako kryterium spadek plonu o ponad 50%.



Źródło: Kielbasa, 2011

Rysunek 4.3. Mobilne stanowisko pomiarowe do wyodrębnienia na polu obszarów o różnym zagęszczeniu gleby: a) schemat stanowiska, b) rama wyposażona w czujniki tensometryczne, c) widok stanowiska

W opracowaniu VanBergijka i in. (2001) wykazano, że każde odpowiednio oprzyrządowane narzędzie uprawowe może pełnić rolę czujnika skanującego przestrzenną zmienność siły uciągu. Do sporządzenia mapy zmiennej siły uciągu autorzy zastosowali pług podczas wykonywania orki. Skanowanie miało na celu wyznaczenie na danym polu obszarów o różnej teksturze gleby. Mapy przestrzennej zmienności siły uciągu z dwóch lat wykazywały dużą zgodność, co pozwoliło na zredukowanie liczby próbek do wyznaczenia zawartości iłu z 60 do 18 z hektara, powodując tylko 20-procentowy błąd predykcji. Mapa przestrzennego rozkładu zawartości iłu w warstwie ornej jest podobna do mapy plonu.

Neményi i in. (2006), podobnie jak Sirjacobs i in. (2002), Hanquet i in. (2004) oraz Kielbasa (2011), jako czujnik do pomiaru siły uciągu zastosowali również pojedynczy ząb głębosza i powstałą mapę przestrzennej zmienności tego parametru porównali z mapą plonu kukurydzy. Autorzy stwierdzili, że na tej podstawie można zidentyfikować obszary, na których występuje spadek plonu z powodu ugniecenia gleby, jednakże w przeciwieństwie do wcześniej cytowanych autorów nie znaleźli korelacji pomiędzy mierzonym oporem a właściwościami gleby, za pomocą których zwyczajowo określa się stopień ugniecenia gleby. Takie samo stanowisko prezentują też Hall i Raper (2005) stwierdzając, że na glebach różnych pod względem tekstury może wystąpić taki sam opór dla różnych warunków stanu zagęszczenia.

Mouazen i Roman (2006) połączyli pomiar oporu ścinania gleby czujnikiem mechanicznym w trybie ciągłym z pomiarem głębokości i wilgotności. Jednocześnie pobierali próbki do bezpośredniego określenia gęstości objętościowej gleby. Stwierdzili wysoką korelację pomiędzy wynikami pomiarów pośrednich i bezpośrednich ($r = 0,75$) i opracowali równanie predykcyjne dla gęstości objętościowej z uwzględnieniem siły uciągu, głębokości i wilgotności dla gleby gliniastej oraz gliniasto-piaszczystej.

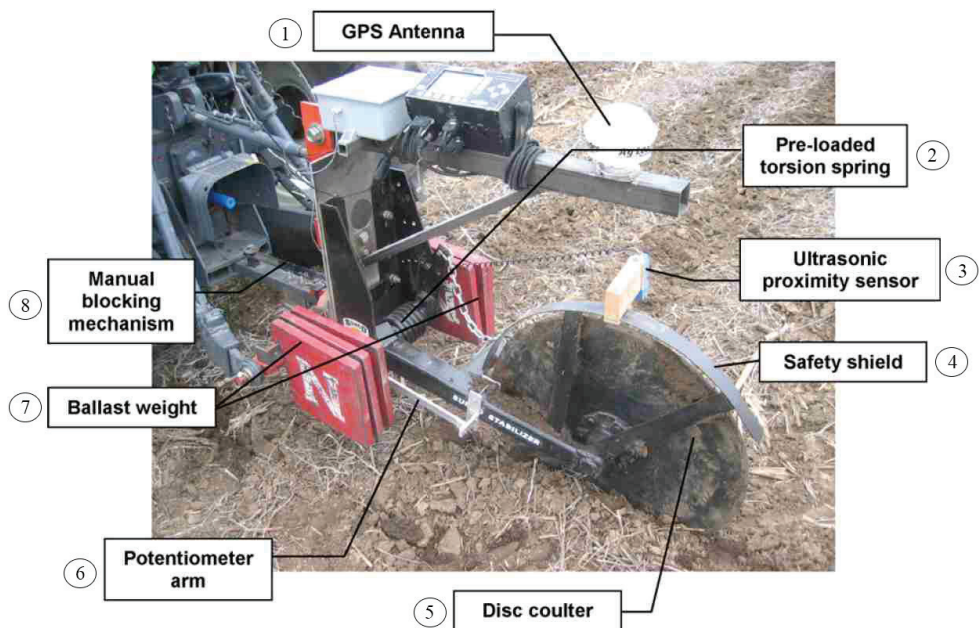
Niektóre badania z zakresu pomiarów siły pionowej dotyczyły określenia zmienności pionowej w celu wykrycia podeszwy płuźnej. W tym celu stosowano wąskie lub bardzo wąskie elementy, a w przypadku badań Pitla i Wellsa (2006) był to krój talarzowy. Dzięki siłownikom hydraulicznym narzędzie w czasie przejazdu po polu przemieszczało się w płaszczyźnie pionowej w zakresie głębokości 0,10-0,30 m i siła była rejestrowana w sposób ciągły. W tym samym czasie dokonano również pomiarów penetrometrem. Tak zmierzony średni opór wyznaczony penetrometrem porównano ze średnim oporem kroju tarczowego i uzyskano istotną zależność ($R^2 = 0,51$).

Hemmat i in. (2008) opracowali prototyp czujnika również w postaci kroju tarczowego (rys. 4.4). W skład systemu pomiarowego wchodziły dwa czujniki głębokości (dla porównania) oraz odbiornik GPS. Stwierdzono istotną zależność pomiędzy głębokością pracy kroju a oporem penetrometrycznym, jak też przewidywaną głębokością przy danym oporze penetrometrycznym. Zdaniem autorów opracowany system może posłużyć jako proste, niedrogie urządzenie do zmapowania zróżnicowanego zagęszczenia gleby na polu.

Opisy prototypów systemów do wykrywania różnego zagęszczenia, bazujących na pomiarze oporu mechanicznego gleby w sposób ciągły i z możliwością automatycznej rejestracji danych ze współrzędnymi geograficznymi, a więc mapowania stanu fizycz-

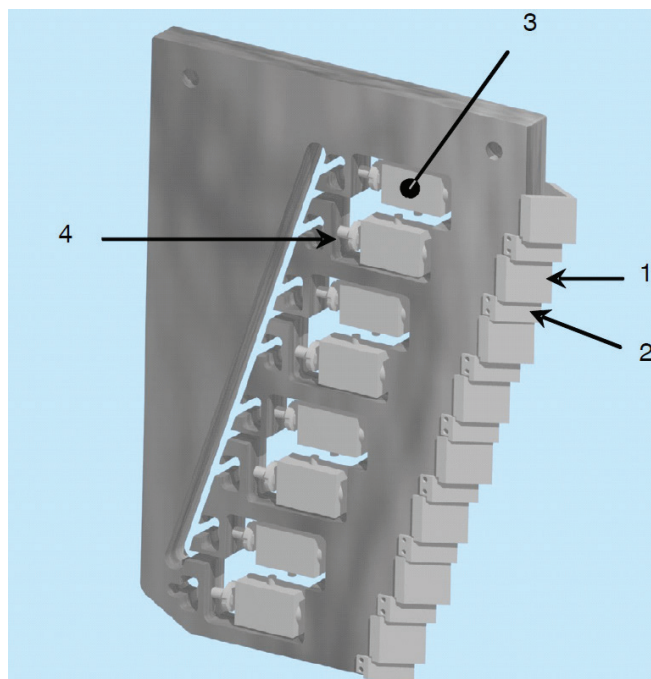
nego gleby, można znaleźć również w opracowaniach Halla i Rapera (2005), Sharifa i in. (2007), Suddutha i in. (2008), Andrede-Sancheza i in. (2007), czy Agüera i in. (2013).

Andrede-Sanchez i in. (2007) zaprojektowali i wykonali urządzenie do pomiaru ugniecenia w profilu glebowym (rys. 4.5), składające się z pięciu aktywnych elementów tnących każdy o długości 1 cm, bezpośrednio połączonych z czujnikami pomiaru oporu ścinania, które umieszczono przed każdym elementem ścinającym. Urządzenie to mierzy opory ścinania na głębokości 7,5-45,7 cm wraz z zapisem położenia w postaci współrzędnych geograficznych. Wg autorów, wyniki pomiarów mogą być ujęte w funkcji oporu penetrometrycznego i głębokości ze współczynnikiem determinacji 0,985.



Źródło: Zmodyfikowane na podstawie Hemmat i in., 2008

Rysunek 4.4. Składowe systemu do pomiaru zagęszczenia podglebia: 1 – antena GPS, 2 – wstępnie obciążona sprężyna, 3 – czujnik ultradźwiękowy, 4 – osłona ochronna, 5 – krój tarczowy, 6 – ramię potencjometru, 7 – obciążniki, 8 – mechanizm ręcznej blokady

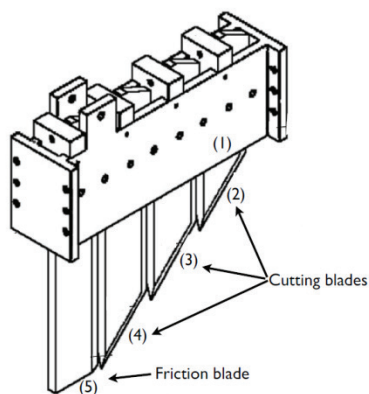


Źródło: Andrede-Sanchez i in., 2008

Rysunek 4.5. Model CAD czujnika do pomiaru ugniecenia w profilu gleby: 1 – aktywne elementy ścinające, 2 – atrapy, 3 – czujniki pomiaru siły, 4 – zabezpieczenie; kierunek ruchu z lewej do prawej strony

Czujnik do pomiaru oporów cięcia gleby opracowany przez Agüera i in. (2013) umożliwia uzyskanie sygnałów z różnych głębokości jednocześnie. Składa się on z czterech stalowych krojów umieszczonych jeden za drugim (rys. 4.6). Do wyznaczania współrzędnych geograficznych zastosowano RTK-GPS. Czujnik był zamontowany na Tuz ciągnika i sprawdził się jako alternatywa dla pomiarów penetrometrycznych. Współczynnik dopasowania zależności pomiędzy oporem gleby mierzonym tym urządzeniem a oporem penetrometrycznym wynosił 50% dla każdego z trzech zakresów głębokości (0-10, 10-20, 20-30 cm).

Rozwojem czujników mechanicznych do pomiaru oporu gleby w sposób ciągły (tryb *on-the-go*) narzędziem modelowym zajmowało się wielu badaczy. Zastosowane w tych urządzeniach tensometry przedstawiają dogodną metodę pomiaru sił działających na narzędzie pracujące w glebie. Tensometry są stosunkowo niedrogie, odporne na trudne warunki pracy w polu i łatwo się je łączy z systemem akwizycji danych. To sprawia, że doskonale się nadają do zastosowania w pomiarach w czasie rzeczywistym (Adamchuk i in. 2004).



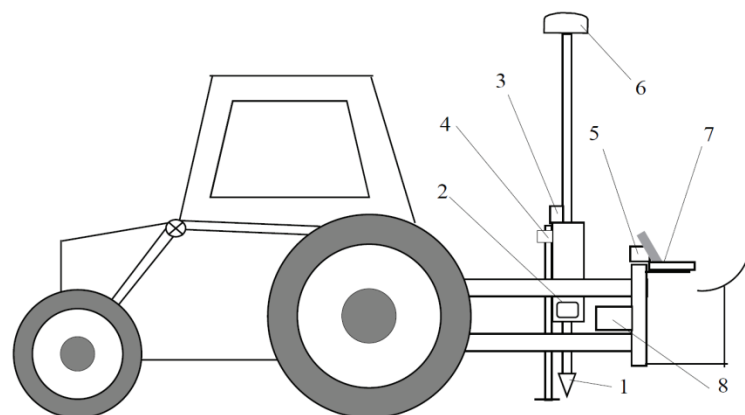
Źródło: Agüera i in., 2013

Rysunek 4.6. Składowe systemu do pomiaru zagęszczenia podglebia:
(1), (2), (3), (4) – ostrza tnące, (5) – ostrze tarcia

4.1.2. Pomiary oporu penetrometrycznego

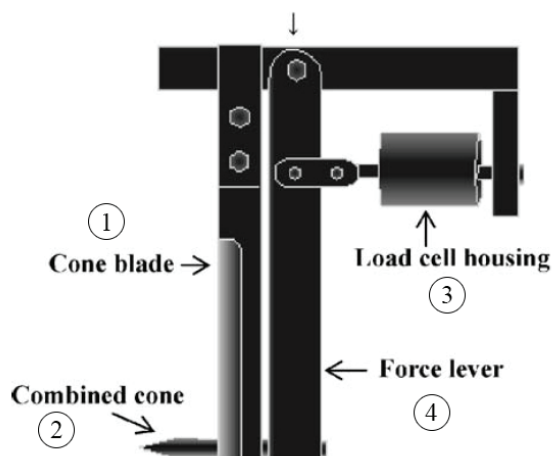
Czujnikami szeroko stosowanymi do pomiaru oporu mechanicznego w profilu gleby na różnych głębokościach są penetrometry. Opór penetrometryczny odzwierciedla wytrzymałość gleby, od której zależą m.in. warunki kiełkowania nasion, wzrostu i rozwoju korzeni oraz ugniatanie gleby. Jest to empiryczna miara stanu zagęszczenia gleby i przedstawia wypadkową oddziaływania wielu właściwości gleby, takich jak gęstość, wilgotność, tekstura, struktura itp. (Hemmat i Adamchuk, 2008). Na przestrzeni lat zagadnienia te były przedmiotem wielu badań (Moraes i in., 2014). Pomiary penetrometrem są wykonywane najczęściej ze stożkiem o wymiarach znormalizowanych przez ASABE (ang. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (ASAE S313.2 FEB99; ASAE EP542 (R2013))).

W licznych opracowaniach dotyczących zastosowania tych czujników do mapowania zwięzłości na polu stosuje się pomiary punktowe (tryb *stop and go*) w kierunku pionowym (rys. 4.7) (Boon i in., 2005; Carrara i in., 2003; Görücü i in., 2006; Kielbasa, 2011; Moraes i in., 2014; Rooney i in., 2000; Fountas i in., 2013) oraz pomiary ciągłe (tryb *on the go*) w płaszczyźnie poziomej (rys. 4.8, rys. 4.9) (Sun i in., 2006; Topakci i in., 2010; Zeng i in., 2008).



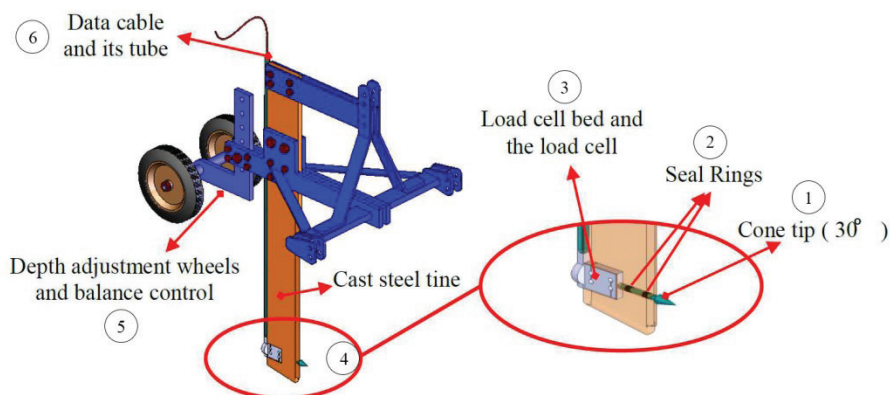
Źródło: Görücü i in., 2006

Rysunek 4.7. System pomiarowy z pionowym penetrometrem stożkowym: 1 – stożek, 2 – tensometr, 3 – czujnik głębokości, 4 – wyłącznik wykrywania powierzchni gruntu, 5 – odbiornik GPS, 6 – antena GPS, 7 – system akwizycji danych, 8 – zasilanie



Źródło: Sun i in., 2006

Rysunek 4.8. System pomiarowy z poziomym penetrometrem stożkowym: 1 – ostrze noża stożka, 2 – zespół roboczy ze stożkiem, 3 – czujnik siły, 4 – ramię siły



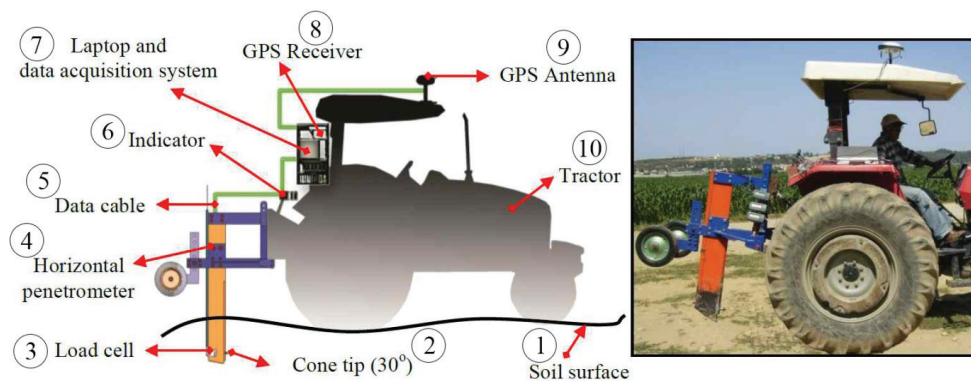
Źródło: Topacki i in., 2010

Rysunek 4.9. Schemat budowy penetrometru poziomego: 1 – stożek, 2 – pierścienie uszczelniające, 3 – czujnik pomiaru siły, 4 – ząb stalowy, 5 – mechanizm regulacji głębokości, 6 – kabel transmisji

Pomiary penetrometrem wykazują bardzo dużą zmienność i zebranie dużej ilości danych potrzebnych do zmapowania stanu zagęszczenia gleby jest bardzo pracochłonne i czasochłonne. Do poprawy komfortu pracy z tymi urządzeniami, do zebrania dużej ilości danych gwarantujących uzyskanie lepszej dokładności, przyczyniło się zastosowanie automatycznej rejestracji danych pomiarowych wraz ze współrzędnymi geograficznymi. Na rysunku 4.10 przedstawiono elementy składowe takiego systemu pomiarowego, obecnie będące praktycznie standardowym wyposażeniem również komercyjnie dostępnych penetrometrów.

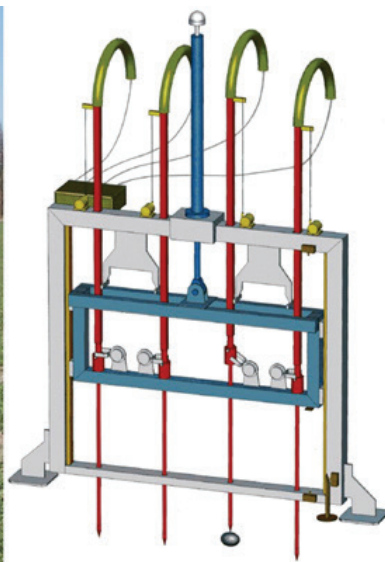
Aby zmniejszyć pracochłonność pomiarów, zwłaszcza w mapowaniu zwięzłości na całym polu, zbudowano systemy składające się z kilku elementów do jednoczesnego pomiaru. Rozwiązania te zastosowano zarówno do pionowej (rys. 4.11, rys. 4.12) jak i poziomej penetracji (rys. 4.13) i proces zautomatyzowano. Urządzenie Domscha i in. (2006) na rysunku 4.11 składało się z czterech pionowych hydraulicznie sterowanych penetrometrów, które pracowały na szerokości 0,6 m i do głębokości 0,6 m. Autorzy stwierdzili, że na długości 10 m z wystarczającą dokładnością potrafili określić, na jakiej głębokości powinna być wykonana uprawa. Fountas i in. (2013) zaprojektowali i zbudowali penetrometr z pięcioma elementami do pomiaru zwięzłości w pionie (rys. 4.12). Zastosowali go do badań stanu zagęszczenia gleby dla pięciu różnych technologii uprawy.

Hall i Raper (2005) stwierdzają jednak, że nawet zautomatyzowany przebieg pracy czujnikiem w sposób ciągły (tryb *on-the-go*) nie gwarantuje wystarczającej gęstości pomiarów, niezbędnej do uzyskania wiarygodnej informacji na temat zmienności warunków glebowych, zwłaszcza w przypadku dużych pól.



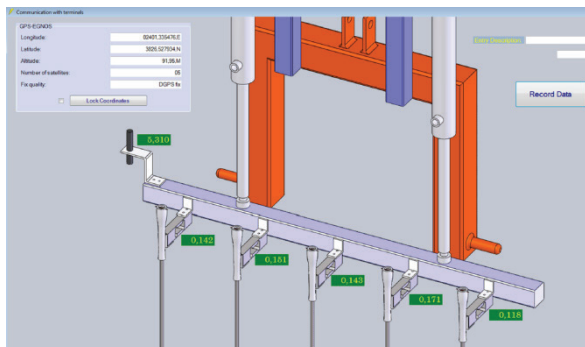
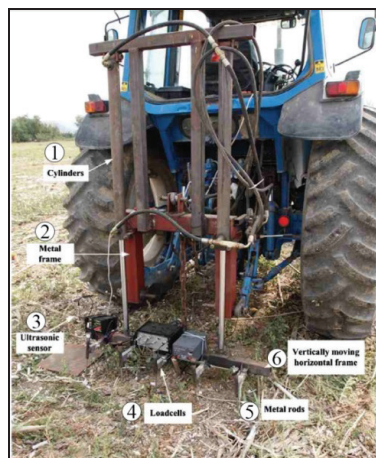
Źródło: Topakci i in., 2010

Rysunek 4.10. System pomiarowy z penetrometrem pracującym poziomo:
 1 – powierzchnia gleby, 2 – stożek, 3 – tensometr, 4 – penetrometr poziomy, 5 – kabel do transmisji danych, 6 – wskaźnik, 7 – system akwizycji danych, 8 – odbiornik GPS, 9 – antena GPS, 10 – ciągnik



Źródło: Domsch i in., 2006

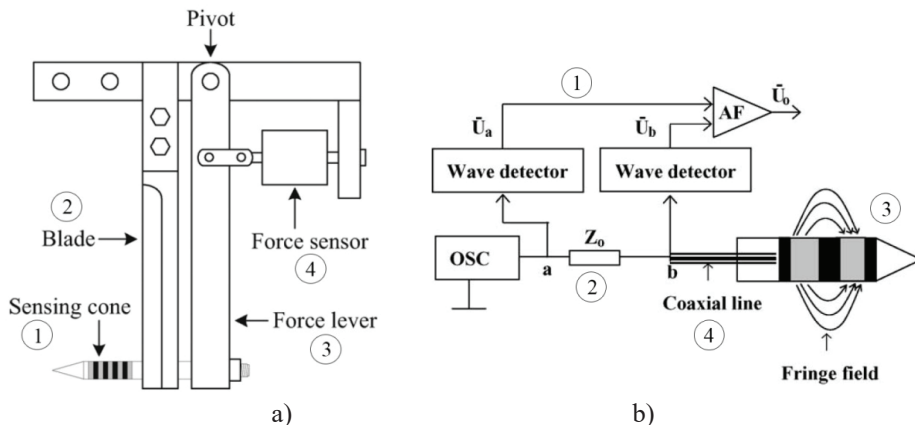
Rysunek 4.11. Penetrometr 4-elementowy do pomiaru w pionie profilu



Źródło: Fountas i in., 2013

Rysunek 4.12. Penetrometr 5 – elementowy do pomiaru w pionie w głąb profilu:
1 – siłowniki, 2 – hydrauliczna stalowa rama, 3 – czujnik ultradźwiękowy, 4 – czujnik tensometryczny, 5 – listwa metalowa, 6 – pozioma rama o ruchu pionowym

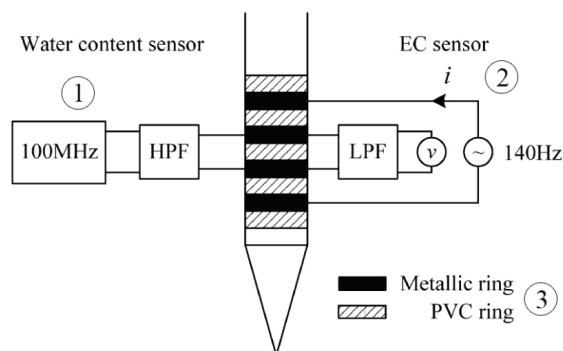
Opracowane przez Suna i in. (2006) oraz Topackiego i in. (2010) penetrometry poziome różnią się zarówno budową elementu penetrującego glebę (rys. 4.8, rys. 4.9), jak i funkcjonalnością. Uwzględniając fakt, że wilgotność gleby jest bardzo ważnym czynnikiem mającym wpływ na jej zwięźłość Sun i in. (2006) uzupełnili swój sprzęt o pomiar zawartości wody w glebie (rys. 4.13).



Źródło: Sun i in., 2006

Rysunek 4.13. System pomiarowy z poziomym penetrometrem stożkowym:
a) układ mechaniczny: 1 – stożek, 2 – ostrze noża, 3 – ramię siły, 4 – czujnik siły;
b) układ elektryczny: 1 – dwa detektory fal, 2 – element elektryczny,
3 – pole brzegowe, 4 – kabel koncentryczny

Ponieważ przewodność elektryczna (EC_a) jest wynikiem takich właściwości gleby jak zasolenie, wilgotność, porowatość, tekstura i zawartość materii organicznej, urządzenie przedstawione na rysunku 4.13 uzupełniono o pomiar przewodności elektrycznej (rys. 4.14).



Źródło: Zeng i in., 2008

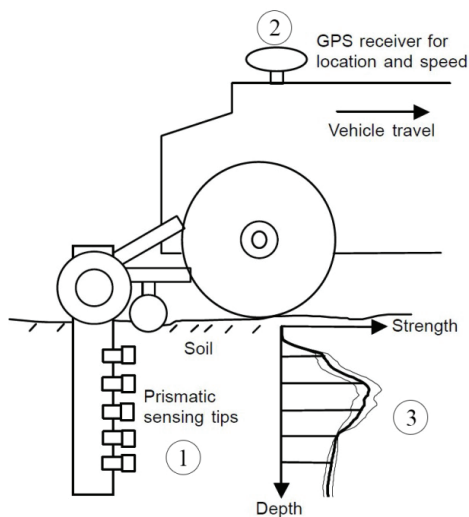
Rysunek 4.14. System pomiarowy z poziomym penetrometrem stożkowym:
1 – czujnik pomiaru wilgotności, 2 – czujnik pomiaru przewodności elektrycznej,
3 – krążki metalowe oraz plastikowe, HPF – filtr górnoprzepustowy,
LPF – filtr dolnoprzepustowy

Chung i in. (2006) opracowali penetrometr poziomy z pięcioma elementami pracującymi na różnych głębokościach warstw, przydatny m.in. do zlokalizowania podszwy płuznej (rys. 4.15). Od pozostałych omawianych penetrometrów różni się zasadniczo tym, że elementy penetrujące głębie są w kształcie graniastosłupa o kącie ostrza 60° . Urządzenie pracuje do głębokości 0,5 m, z rozdzielczością co 0,1 m.

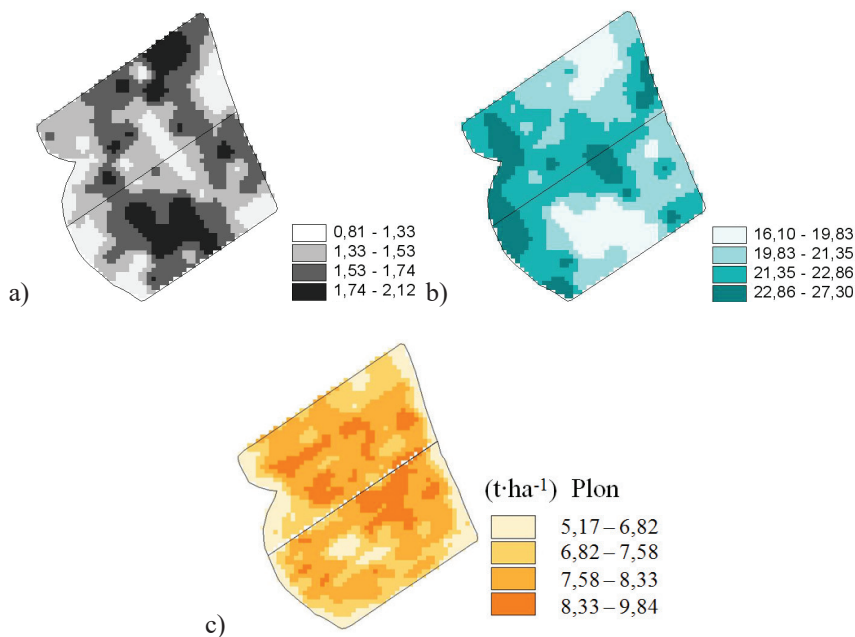
Ilościowe wyznaczenie stopnia ugniecenia gleby oraz lokalizacja ugniecionych warstw na powierzchni pola oraz w profilu glebowym, to podstawowe informacje, na bazie których można przeprowadzić zabiegi uprawowe w sposób dostosowany do lokalnych potrzeb.

Pomiary i mapowanie parametrów gleby dostarcza zarządzającemu również wsparcia informacyjnego w rozpoznaniu czynników limitujących wzrost i plony w różnych częściach pola (rys. 4.16), które mogą przyczynić się do zmiany sposobu użytkowania pola. Zwięzłość lub wilgotność gleby wraz z dostępnością wody są bowiem efektem kształtowania przez rolnika struktury gleby. Badania z zakresu wpływu wybranych właściwości fizycznych gleby na kształtowanie się plonu w ujęciu przestrzennym prowadzili Walczykova i Zagórda (2007), Walczyk i Zagórda (2009), Zagórda i Walczykova (2007) oraz Zagórda i in. (2008). Stwierdzili m.in., że współczynniki korelacji plonów badanych roślin z mierzonymi właściwościami gleby były przeważnie statystycznie istotne. W interpretacji kształtowania się właściwości gleby i plonu znaczącą rolę miała topografia terenu.

Rysunek 4.15. Penetrometr wieloelementowy do pomiaru ciągłego w poziomie z końcówkami graniastosłupowymi o kącie nachylenia płaszczyzn 30° : 1 – końcówki penetrujące głębę z czujnikami siły, 2 – odbiornik GPS do lokalizacji i pomiaru prędkości, 3 – wykres siła vs. głębokość, kierunek przejazdu



Źródło: Chung i in., 2006

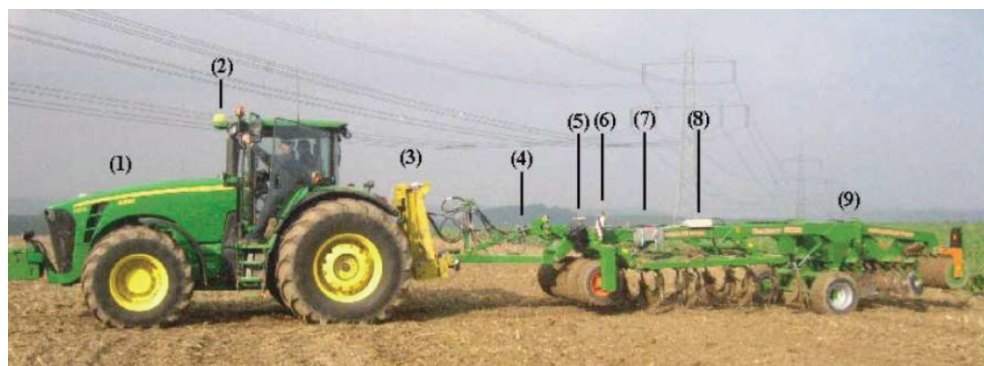


Źródło: Walczyk i Zagórda, 2009

Rysunek 4.16. Mapy przestrzennego rozmieszczenia właściwości gleby: a) zwięźłość (MPa), b) wilgotność (% obj.), c) mapa plonu

Jednym z użytkowych aspektów wykrywania różnego zagęszczenia gleby na różnych obszarach pola i głębokościach jest możliwość dostosowania głębokości uprawy do miejscowych warunków, jak również usuwanie tzw. podeszwy płużnej w celu zmniejszenia nakładów energetycznych. Görücü i in. (2011) na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczyli oszczędności wynikające ze stosowania zmiennej głębokości uprawy, wykonanej zgodnie z warunkami panującymi w różnych obszarach pola i w porównaniu do uprawy na stałej głębokości stwierdzili zmniejszenie o 56% zapotrzebowania na energię, a zużycia paliwa o 40%. Oszczędności paliwa na skutek zróżnicowanej pracy głęboszy vs. stałej wykazali również Raper i in. (2007).

Walther i in. (2007) do pracy agregatu uprawowego na zmiennej głębokości zastosowali sprzęt firmy Amazone, z możliwością hydraulicznej zmiany położenia redliczek równoległe do ramy (rys. 4.17). Przeprowadzona modyfikacja techniczna polegała na zamontowaniu zaworu elektrycznego do systemu hydraulicznego, by umożliwić pełny dostęp w czasie rzeczywistym do regulacji głębokości pracy. Dodatkowo do siłownika hydraulicznego zamontowano potencjometryczny czujnik przemieszczenia do pomiaru głębokości. Cały system był sterowany poprzez jednostkę sterującą podłączoną do komputera na ciągniku. Z uwagi na to, że celem doświadczenia były zadania dotyczące zapobiegania erozji, jako kryterium głębokości (intensywności) zabiegów uprawowych przyjęto nachylenie terenu oraz przykrycie resztkami roślinnymi po wykonaniu uprawy. Miejscową ilość słomy wyznaczono na podstawie mapy plonu.



Źródło: Walther i in., 2007

Rysunek 4.17. Sterowanie agregatem uprawowym za pomocą systemu pomiaru zmiennej siły uciągu: 1 – ciągnik, 2 – GPS na ciągniku, 3 – system pomiaru siły uciągu, 4 – elektrozawór, 5 – RTK GPS, 6 – czujnik nachylenia, 7 – siłownik hydrauliczny z czujnikiem przemieszczenia, 8 – czujnik nachylenia, 9 – narzędzi uprawowe

Komputer scalał dane z czujnika mierzącego parametry w czasie rzeczywistym, np. nachylenie z danymi z mapy plonu, obliczając wartość do ustawienia głębokości, która była wprowadzana do jednostki sterującej. Wartość nastawiona w jednostce kontrolnej była porównywana z wartością aktualną i odpowiednio regulowana. Algorytm decy-

zynny był opracowany przed zabiegami uprawowymi. Do wyznaczania położenia geograficznego narzędzia zastosowano system RTK-GPS. Zmiana głębokości pracy agregatu w czasie rzeczywistym dokonywana była w zakresie 0,125 – 0,20 m.

Görücü i in. (2006) stwierdzają, że dla różnych roślin znane są krytyczne wartości zwięzłości gleby, które uniemożliwiają przenikanie w głąb i wzrost korzeni, określone na podstawie pomiarów penetrometrycznych. Ważne jest jednak wyznaczenie głębokości zabiegu uprawowego do efektywnej likwidacji podeszwy płuznej i zdaniem cytowanych autorów do tego nie wystarczy posługiwanie się maksymalnymi wartościami zwięzłości. Tak więc Görücü i in. (2006) opracowali algorytm, za pomocą którego można z wykorzystaniem danych penetrometrycznych wyznaczyć głębokość i grubość podeszwy płuznej.

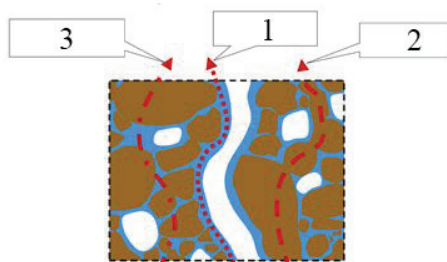
4.2. Czujniki elektryczne

Niektóre powszechnie stosowane geofizyczne metody pomiaru znalazły zastosowanie również w rolnictwie. Wśród nich można wymienić pomiar oporności /przewodności elektrycznej oraz radar do penetracji gruntu GPR (ang. *Ground Penetrating Radar*). W rolnictwie stanowią one istotne uzupełnienie bezpośrednich pomiarów do wykrywania niejednorodności przestrzennej właściwości gleby w celu uzyskania informacji pozwalającej stosować obszarowe zarządzanie polami zgodnie z zasadami rolnictwa precyzyjnego. Metody geofizyczne dostarczają pośrednich dokładnych informacji o różnych właściwościach fizycznych gleby zarówno warstwy ornej, jak i podornej (DeBenedetto i in., 2013). Dla badań geofizycznych gleby interesująca jest głębokość do 2 m. Obejmuje ona cały profil glebowy oraz strefę wzrostu i rozwoju korzeni (Allred, 2011).

4.2.1. Pomiary oporności i przewodności elektrycznej

Badanie gleby czujnikami zbliżeniowymi z wysoką rozdzielczością staje się powszechne i podstawowe do wyznaczania w rolnictwie precyzyjnym jednorodnych obszarów w obrębie pola (Rodriguez i in., 2015). Jedną z najbardziej niezawodnych, najprostszych w wykonaniu i najczęściej stosowanych metod do charakterystyki zmienności w obrębie pola jest pomiar przewodności elektrycznej EC (ang. *Electrical Conductivity*), czyli zdolności materiału do przewodzenia prądu elektrycznego (Johnson i in., 2001). Gleba przewodzi prąd elektryczny przez frakcję płynną (woda), stałą (minerały ilaste) oraz mieszane warstwy cząsteczek i roztworu glebowego (rys. 4.18) (Corwin i Lesch, 2005; Gebbers, 2014).

W przeciwieństwie do przewodności elektrycznej właściwej EC, mierzonej w laboratorium poprzez pomiar przepływu prądu elektrycznego w zawiesinie gleby i wody, przewodność całkowitą mierzoną w warstwie gleby bezpośrednio na polu określa się mianem przewodności pozornej EC_a (ang. *apparent conductivity*) (Corwin i Lesch, 2003; Coventry i in., 2011).



Źródło: Gebbers, 2014

Rysunek 4.18. Drogi przejścia prądu elektrycznego w glebie: 1 – woda wolna i związana, 2 – cząstki stałe, 3 – faza mieszaną

Przewodność elektryczna EC_a w warunkach polowych wyznaczana jest z wykorzystaniem indukcji elektromagnetycznej EMI (ang. *ElectroMagnetic Induction*) i powszechnie wyrażana w milisiemensach na metr ($mS \cdot m^{-1}$) lub oporności elektrycznej ER (ang. *Electrical Resistivity*) podawanej w omach na metr ($\Omega \cdot m^{-1}$) (Rodriguez i in., 2015).

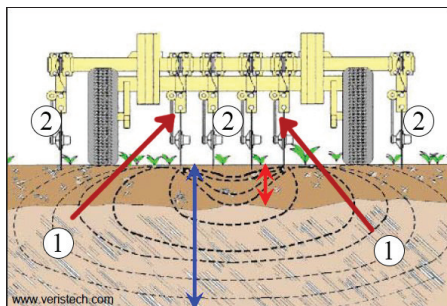
Do pomiaru EC_a wykorzystuje się komercyjnie dostępne urządzenia – konduktometry dwójakiego rodzaju:

- konduktometry kontaktowe, inwazyjne (rys. 4.19),
- konduktometry indukcyjne, nieinwazyjne (rys. 4.20).

Konduktometry kontaktowe (rys. 4.19) są zbudowane z kilku par elektrod w postaci obracających się tarcz stalowych płytko zagłębionych w glebie. Przez jedną parę elektrod doprowadza się do gleby prąd stały lub zmienny o niskiej częstotliwości, na skutek czego w glebie powstają eliptyczne pola elektryczne, oraz z 2-3 par elektrod, na których mierzy się spadek napięcia prądu, który zależy od chwilowej zdolności gleby do przewodzenia prądu elektrycznego (rys. 4.19 a, b). Znając wartość przepływającego prądu oraz spadek napięcia mierzonego na elektrodach pomiarowych oblicza się oporność gleby, której odwrotnością jest konduktywność mierzona w $mS \cdot m^{-1}$. Odległość między elektrodami decyduje o głębokości pomiaru.

W przypadku konduktometru Veris 3100 (rys. 4.19 a) obecnie jest już możliwy jednoczesny pomiar na głębokościach 0-30, 30-60 oraz 60-90 cm. Urządzenie ARP-03 (ang. *Automatic Resistivity Profiling*) francuskiej firmy Geocarta (rys. 4.19 b) również skanuje glebę na trzech głębokościach. Elektrody doprowadzające prąd mają rozstaw 1 m, zaś trzy pary elektrod pomiarowych są ułożone w formie trapezu w rozstawie 0,5; 1,0 oraz 2 m (Gebbers i Lück, 2008). Czujnik Geophilus (rys. 4.19 c) skanuje 5 głębokości, pracując jednocześnie na 4 częstotliwościach (Gebbers, 2014).

Samouëlian i in. (2005) oraz Brevik i in. (2006) zwracają uwagę na fakt, że na glebach przesuszonych oraz kamienistych elektrody mają zły kontakt z glebą, co skutkuje brakiem danych pomiarowych i zawężony zakres wartości EC dla danego pola utrudnia wyznaczenie na polu jednorodnych obszarów. Zaleca się wykonanie pomiarów na glebie wilgotnej i doprawionej, przed siewem (Coventry i in., 2011).

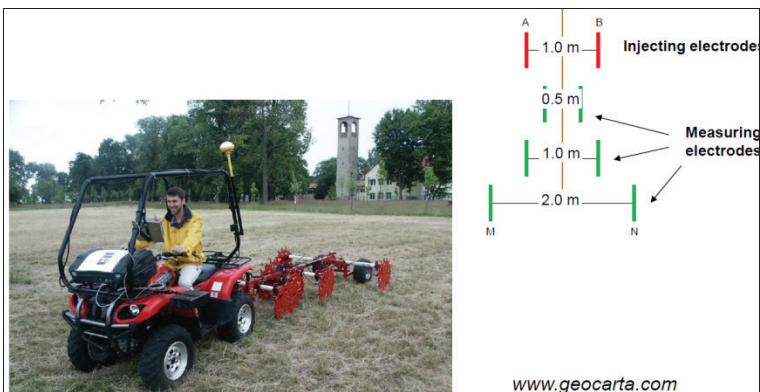


Źródło: Coventry i in., 2011



Źródło: <http://www.veristech.com/the-sensors/v3100>

a)



b)

Źródło: Gebbers, 2014

c)



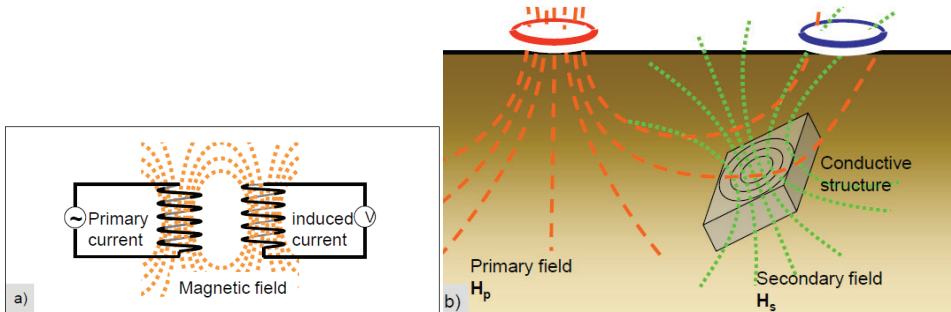
Źródło: <http://www.geophilus.de/>

Rysunek 4.19. Konduktometry kontaktowe do pomiaru oporności elektrycznej (ER):

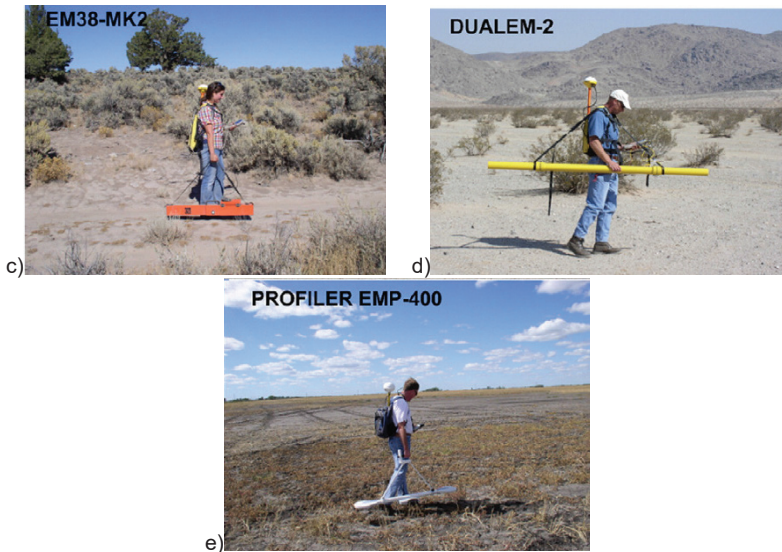
- a) Veris 3100 Veris Technologies USA, 1 – elektrody doprowadzające prąd, 2 – elektrody pomiarowe, b) ARP – 03 Geocarta, Francja; A, B – elektrody doprowadzające prąd do gleby; M, N – elektrody do pomiaru spadku napięcia;
- c) Geophilus (Geophilus GmbH, Niemcy)

Czujniki bezkontaktowe działają na zasadzie indukcji elektromagnetycznej. Metoda polega na pomiarze wzajemnej indukcyjności dwóch obwodów elektrycznych, w którym obwód magnetyczny zamyka się przez glebę. Urządzenie składa się z jednostki emitującej *primary current*, *primary field* oraz jednostki odbierającej *induced current*, *secondary field* (rys. 4.20 a,b). Wartość indukowanego prądu jest proporcjonalna do przewodności elektrycznej gleby *conductive structure* (rys. 4.20 b) (Daniels i in., 2008a).

Na tej zasadzie pracują wszystkie, obecnie komercyjnie dostępne urządzenia przedstawione na rysunku 4.20 c, d, e. W przypadku sondy EM38 możliwe jest wykonanie pomiarów na dwóch głębokościach: 0- 150 cm przy pionowym ułożeniu cewek oraz 0-75 cm przy ułożeniu poziomym, ale wymagane są odrębne przejazdy.



Źródło: Gebbers, 2014



Źródło: Doolittle i Brevik, 2014

Rysunek 4.20. Bezkontaktowe czujniki do pomiaru przewodności elektromagnetycznej:
a), b) zasada działania, c), d), e) konduktometry podczas pomiarów,
urządzenie trzymane ręcznie

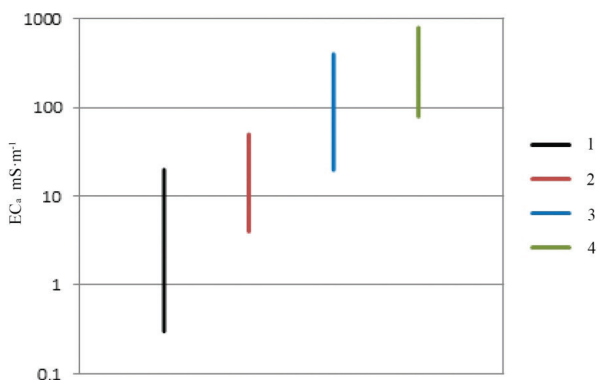
W sondzie EM38-MK2 są możliwe dwa rozstawy cewek emitującej i odbierającej, dlatego przy ich pionowym układzie uzyskuje się głębokości 0-75 cm oraz 0-150 cm, zaś przy poziomym 0-38 cm oraz 0-75 cm (Woods, 2013).

W zależności od wielkości powierzchni, urządzenie podczas pracy może być trzymane w rękach (rys. 4.20), albo przeciągane za pomocą pojazdu mechanicznego na postumencie (rys. 4.21).



Rysunek 4.21. Bezkontaktowy czujnik do pomiaru przewodności elektromagnetycznej podczas pomiarów; urządzenie umieszczone na postumencie

Na rysunku 4.22. przedstawiono zakresy przewodności elektromagnetycznej dla różnych gatunków gleb. Wartości EC powyżej $160 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ sygnalizują duże zasolenie gleby, które powoduje obniżkę plonów lub zmusza do uprawy roślin tolerancyjnych na zasolenie. Małe zasolenie gleby może świadczyć o małej dostępności niezbędnych dla roślin makro- i mikroelementów (Corwin i Lesch, 2003).



Źródło: Barbarosa i Overstreet, www.LSUSgCenter.com

Rysunek 4.22. Przewodność elektromagnetyczna dla gleb: 1 – piaszczystych, 2 – pyłowych, 3 – ilastych, 4 – zasolonych

Obie metody, kontaktowa i indukcyjna są odpowiednie do zastosowania na dużych polach, ponieważ dostarczają dużej ilości pomiarów, co redukuje wpływ zmienności lokalnej (Robinson i in., 2004). Wyniki uzyskane za pomocą urządzeń Veris 3100 oraz EM38 są ze sobą wysoko skorelowane. Występujące różnice w odczytach odnotowano na glebach silnie rozwarstwionych z nieprzepuszczalną warstwą ilastą (Sudduth i in., 2005). Nieznaczny wpływ na wynik mają różnice w kalibracji urządzeń, głębokość oddziaływania i objętość materiału glebowego podlegającego pomiarom (Doolittle i Brevik, 2014). Każda z przedstawionych metod pomiaru EC_a ma jednak wady i zalety. Urządzenia indukcyjne są wygodne w zastosowaniu, lekkie, ale są wrażliwe na obecność metali i podatne na powstawanie błędów pomiaru (Sudduth i in., 2005). Robinson i in. (2004) wskazują, że błąd pomiaru podczas pracy z EM-38 powstaje na skutek nagrzania się sprzętu powyżej 40° C. Można temu zapobiec nie dopuszczając do nadmiernego nagrzania się układu kompensacji temperatury, jak też włączyć sprzęt 2 godziny przed kalibracją. Sudduth i in. (2001) jako źródło błędu podają brak utrzymania stałej prędkości i wysokości czujnika nad badaną powierzchnią. De Benedetto i in. (2013) stwierdzają, że konduktometry bezkontaktowe są bardzo dobrze dopasowane do zastosowań rolniczych. Jest to metoda cechująca się wieloma zaletami nad innymi, z uwagi na nieinwazyjność oraz szybkość, prostotę wykonania pomiarów i łatwy transport.

Urządzenia kontaktowe są ciężkie i źle pracują na glebach suchych (Gebbers, 2014). Głębokość i objętość badanej gleby można jednak zmieniać poprzez zmianę rozstawu elektrod pomiarowych. Zaletą jest również to, że EC_a ma na badanej głębokości przebieg liniowy, w przeciwieństwie do wyników z sondy indukcyjnej, gdzie EC_a zależy od średniej ważonej głębokości (Robinson i in., 2004). Samouëlian i in. (2005) stwierdzają, że powtarzanie pomiarów czujnikami kontaktowymi w określonych odstępach czasowych może dostarczyć informacje o zachodzących zmianach w glebie, które są zazwyczaj bardzo pożyteczne dla agronomów, gleboznawców, czy specjalistów zajmujących się technikami rolniczymi bądź ochroną środowiska.

Doposażenie konduktometrów w anteny GPS, oprogramowanie do opracowania i mapowania danych poprawia dokładność i niezawodność tej techniki pomiaru (Doolittle i Brevik, 2014).

Zmienność przestrzenna przewodności może być stosowana jako wskaźnik potencjału produkcyjnego (plonowania) (Johnson i in., 2001). Otrzymuje się mapy o dużej rozdzielczości, które w połączeniu z plonem umożliwiają lokalizować na polu problemy powodujące obniżkę plonu w danym miejscu (Castrignanò i in., 2012), ale nie zawsze występuje zgodność pomiędzy wynikami na mapie EC oraz na mapie plonów z uwagi na złożone interakcje pomiędzy czynnikami biologicznymi, antropogenicznymi i meteorologicznymi (Corwin i Lesch, 2005; Sudduth i in., 2005).

Przewodność elektryczna profilu glebowego jest pośrednim wskaźnikiem istotnych fizycznych i chemicznych właściwości, takich jak zasolenie, zasobność w składniki odżywcze, ilość i rodzaj ilu, odczyn, pojemność sorpcyjna, wilgotność, pojemność wodna, temperatura, zawartość węgla organicznego i węglanu wapnia, gęstość objętościowa, porowatość (Allred, 2011; Corwin i Lesch, 2003; 2005; Doolittle i Brevik 2014;

Samouëlian i in. 2005; Shmulik, 2005; Sudduth i in., 2005). Uzyskiwane wartości EC_a i ER nie są bezpośrednim miernikiem którejś z właściwości gleby, ale najczęściej są wypadkową kombinacji kilku właściwości gleby i przedstawiają ich kompleksową współzależność. Wiele badań było ukierunkowanych na określenie zależności pomiędzy różnymi właściwościami gleby, a chwilową przewodnością elektryczną. Uzyskane wyniki są bardzo zróżnicowane, co świadczy o tym, że właściwości gleby oddziałują na oporność/przewodność gleby w sposób złożony (Allred i in., 2008). Poza tym, na większość wyżej wymienionych właściwości wpływa pogoda i pomiary EC_a są zmienne również w czasie. Czasowo-przestrzenne skanowanie EC_a stanowi najlepiej dopasowaną ocenę trendu zmian z roku na rok (Corwin i Lesch, 2005), która może być pomocna w doborze metod zarządzania obszarowego w ramach rolnictwa precyzyjnego.

Rodriguez i in. (2015) podają, że jeśli gleby nie są zasolone, wówczas EC_a reaguje głównie na zawartość ilu i wilgotność. W badaniach Suddutha i in. (2005) przewodność EC_a była najwyższej skorelowana z zawartością części ilastych i pojemnością kompleksu sorpcyjnego. Korelacje z pozostałymi właściwościami, jak wilgotność gleby, zawartość frakcji pyłu, piasku, węgla organicznego, były różne na różnych glebach. Z badań Doolittle i Brevika (2014) wynika, że zasadnicze znaczenie ma rodzaj i koncentracja jonów w roztworze glebowym, rodzaj ilu, zawartość wody oraz temperatura. Allred (2011) wymienia temperaturę i wilgotność gleby, jako czynniki mające duży wpływ na wynik pomiaru, stwierdzając jednak, że układ przestrzenny, czyli wyznaczone strefy przedstawiające przebieg przewodności elektrycznej pozostaje taki sam, co świadczy o tym, że na EC_a mają wpływ bardziej stabilne właściwości gleby, w tym zwłaszcza uziarnienie.

Możliwe jest proste porównywanie map plonów i map EC_a i szukanie wyjaśnień na bazie znajomości warunków panujących na polu, przebiegu pogody, wiedzy agronomicznej, czy własnych doświadczeń. Dużo prac z zakresu pomiarów EC_a dotyczyło ich odniesienia do plonu lub do właściwości gleby bez wyjaśnienia, w jakim celu te właściwości były mierzone i czy mają one wpływ na plon. Ten brak powiązania skutkował niespójnymi wynikami i niewłaściwym rozumieniem zależności pomiędzy EC_a i plonem. Od lat prowadzone są szeroko zakrojone badania mające na celu lepsze zrozumienie fizyki pomiarów przewodności elektrycznej EC_a i na bazie tego interpretowanie zależności z plonem. Pomiar EC_a nie jest już czymś w rodzaju „czarnej skrzynki” bezpośrednio odnoszony do plonu, chyba że dotyczy tylko prostego stwierdzenia, że jakaś zmienność na polu występuje, i jest to tylko pomiar pomocniczy do wyznaczenia zmienności przestrzennej właściwości gleby, które mogą, ale nie muszą wpłynąć na plon (Corwin i Lesch, 2005). W przypadku, kiedy ma miejsce korelacja EC_a z plonem, wówczas przestrzenne rozmieszczenie pomiarów EC_a może być podstawą do wyodrębnienia obszarów produkcyjnych w obrębie pola, ale istotne jest ustalenie, które właściwości gleby w danej sytuacji mają największy wpływ na EC_a , by ustalić, które z nich mają wpływ na plon. Pomiary EC_a , podobnie jak pomiary czujnikami zbliżeniowymi, charakteryzują bowiem zmienność glebową pośrednio, dostarczając informacji niezbędnych do pobierania próbek gleby, które powinny być zebrane tego samego dnia co wykonanie pomiarów, w celu weryfikacji i kalibracji bezpośrednich. Oznacza

to poddanie próbek laboratoryjnym analizom fizykochemicznym (skład granulometryczny, zasobność, zawartość C-organicznego itp.) i określenie korelacji EC_a z daną właściwością gleby lub z kilkoma (Corwin i Lesch, 2003; Johnson i in., 2001; Rodriguez, 2015; Sudduth i in. 2005).

Jednym z najnowszych rozwiązań w zakresie wyznaczania właściwości gleby na podstawie pomiaru przewodności elektromagnetycznej jest produkt austriackiej firmy GEOPROSPECTORS. Jest to bezdotykowy system do automatycznego wyznaczenia wielu właściwości gleby w czasie rzeczywistym. System składa się z czujnika do skanowania gleby (Topsoil Mapper), oprogramowania do gromadzenia danych, analizy i kontroli (Topsoil Visualizer) oraz sieciowego rozwiązania (web-based) dla zaawansowanego zarządzania danymi i dokumentacji (Topsoil Data Box) (rys. 4.23)



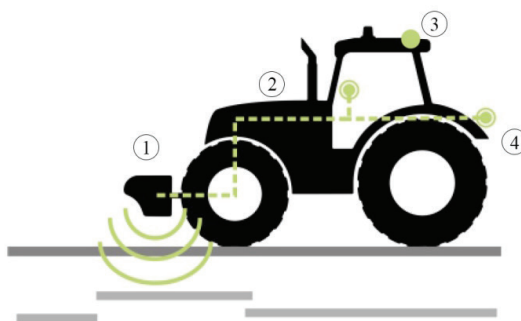
Źródło: Materiały firmowe producenta

Rysunek. 4.23. Elementy składowe systemu skanowania gleby TSM

Czujnik *Topsoil Mapper* zamontowany jest na przednim układzie zawieszenia ciągnika na wysokości max. 45 cm od skanowanej powierzchni (rys. 4.24). Pracuje na zasadzie indukcji elektromagnetycznej w systemie wielocewkowego układu. Złożony układ cewek nadawczych i odbiorczych tworzy bardzo zwartą instalację umieszczoną w szczelnie zamkniętej obudowie. System jest również wyposażony w szereg czujników bliskiego zasięgu do pomiaru odległości skanera od powierzchni gleby. Skanuje glebę do głębokości maksymalnie 1,1 m, z częstotliwością 5 Hz, z prędkością jazdy max. $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Wymaga 12-woltowego zasilania i wraz z mierzonymi danymi rejestrowane są również ich współrzędne geograficzne za pomocą systemu DGPS. Czujnik jest połączony z terminalem (rys. 4.24) za pomocą kabla lub poprzez Bluetooth.

Dane zapisane w terminale są opracowywane w drugim elementie składowym, którym jest *Topsoil Visualizer* (rys. 4.23). Mierzone parametry gleby mogą być skonfigurowane albo w postaci map wyświetlanych na terminale, albo do sterowania podłączonej maszyny uprawowej. Zagęszczenie warstwy ornej, zmienna wilgotność oraz tekstura gleby są dostępne w wersji standardowej urzędnienia.

Na podstawie pomiaru przewodności elektromagnetycznej obliczane są parametry gleby z wykorzystaniem modeli matematycznych. Urządzeniem można mierzyć bezpośrednio wilgotność, zasolenie, gęstość objętościową gleby. Pośrednio uzyskane informacje to m.in. zawartość węgla organicznego, pojemność sorpcyjna kationową i granice obszarów o różnej glebie.



Źródło: TSM Information Package, GEOPROSPECTORS

Rysunek 4. 24. Czujnik TSM i rozmieszczenie elementów systemu na ciągniku:
1 – czujnik, 2 – terminal, 3 – antena DGPS, 4 – wyjście parametrów do sterowania maszyną

Wyniki pomiarów są następnie przeliczane według opracowanych algorytmów. Przedziały oraz wartości graniczne mapowanych wielkości obliczono na podstawie testów polowych, biorąc pod uwagę prędkość ciągnika, wielkość maszyny, czas reakcji TUZ i parametry mechaniczne maszyny uprawowej wprowadzone zgodnie z systemem Topsoil Visualizer.

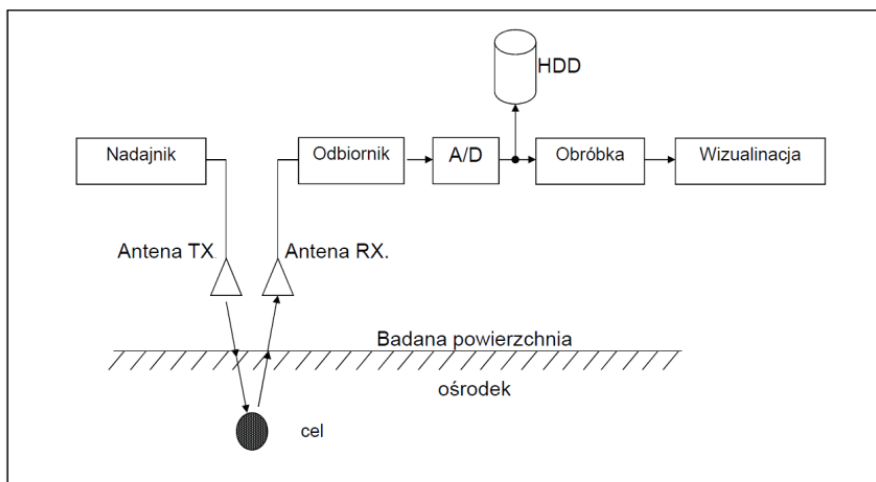
4.2.2. Metoda georadarowa

Georadar, okreśłany teŝ akronimem GPR (ang. *Ground Penetrating Radar*) to urządzenie wykorzystujące do pomiaru fale elektromagnetyczne. Metoda georadarowa jest jedną z najbardziej zaawansowanych metod z grupy pomiarów geofizycznych, która znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach, m.in. również w rolnictwie. Jest to nieinwazyjna metoda, której istotą jest emisja i odbiór impulsów elektromagnetycznych do zlokalizowania anomalii strukturalnych pod powierzchnią gruntu, jak również w obiektach budowlanych. Wykorzystane są fale z zakresu mikrofal i radiowych. (www.gprsystem.pl/pl/metoda-georadarowa,10049)

Aparatura pomiarowa składa się z anteny nadawczej, anteny odbiorczej, nadajnika, odbiornika jednostki centralnej, laptopa i urządzenia do rejestrowania połoŝenia układu pomiarowego (Szczmcyk i in., 2015). Antena nadawcza emituje w głęb ziemi impulsy, które rozchodząc się w gruncie ulegają odbiciu, załamaniu i tłumieniu wskutek zmian przewodnictwa elektrycznego i właściwości elektrycznych gruntu. Fala odbita jest rejestrowana przez antenę odbiorczą i zarejestrowany obraz falowy (echogram) jest odzwierciedleniem wewnętrznej budowy ośrodka. Impulsy powrotne podlegają dalszej obróbce i przetworzeniu w jednostce centralnej georadaru lub dodatkowym komputerze (rys. 4.25).

Podstawowym sposobem wykonywania pomiarów georadarowych jest profilowanie, kiedy obie anteny są przesuwane wzdłuż wytyczonego profilu (rys. 4.26). W ten sposób otrzymuje się ciągłą informację o budowie warstw przypowierzchniowych

wzdłuż badanego profilu. Główną zaletą płytkich profilowań georadarowych jest stosunkowo dobre odzwierciedlenie struktury ośrodka.



Źródło: <http://docplayer.pl/>

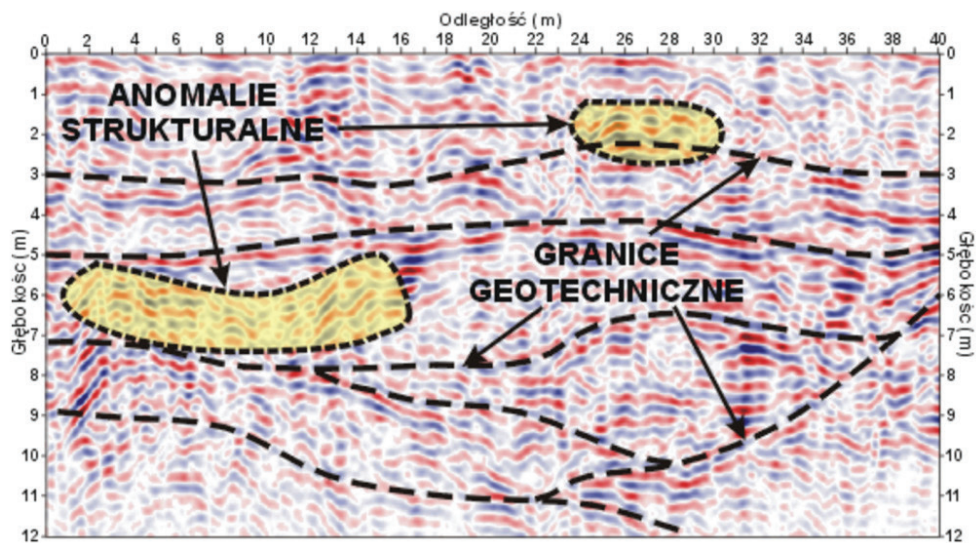
Rysunek 4.25. Zasada działania georadaru



Źródło: http://mediaelettra.com/m0z12_4.jpg

Rysunek 4.26. Pomiary georaderem –profilowanie

Ukazuje ono wszelkiego rodzaju anomalie strukturalne w stosunku do otoczenia (rys. 4.27), pod warunkiem, iż pomiędzy warstwami występuje kontrast względnej stałej dielektrycznej pomiędzy ośrodkiem. Im większy jest ten kontrast, tym bowiem większa jest amplituda fali odbitej (<http://home.agh.edu.pl/~karcz/zasadaDzialania.html>).



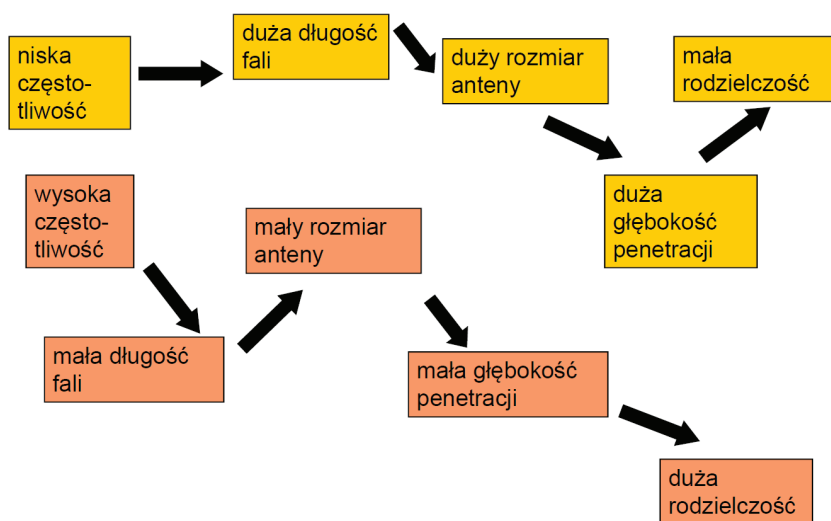
Źródło: <http://www.geospectrum.pl>

Rysunek 4.27. Przykład echogramu

Bardziej zaawansowaną odmianą tej metody geofizycznej jest mapowanie georadarowe. Wykonuje się wówczas serie równoległych profilowań, co pozwala na interpolowanie wyników pomiędzy kolejnymi profilami, a sam wynik jest przedstawiany w postaci przejrzystych map na dowolnym poziomie głębokościowym.

Możliwości głębokości pomiaru urządzeniami GPR oraz jakość obrazu (rozdzielczość) zależą od częstotliwości sygnału emitowanego w głąb ziemi przez anteny GPR (rys. 4.28). Wybór częstotliwości pracy jest zawsze kompromisem pomiędzy rozdzielczością a głębokością penetracji. Anteny systemów radarowych GPR o niskich częstotliwościach pomiarowych takich jak 10-100 MHz mają bardzo duży zasięg penetracji, ale rozdzielczość otrzymanego obrazu pomiarowego jest niska. Anteny o wysokich częstotliwościach działania od 1 do 3 GHz to narzędzia do pomiarów różnych struktur tam, gdzie wymagana jest duża precyzja (Daniels i in., 2008b).

GPR ma ogromne możliwości stosowania w geofizyce ogólnie, a w rolnictwie w szczególności, w tym również we wspieraniu zarządzania zasobami wodnymi. Kompaktowy, przenośny system z cyfrowym pozyskaniem danych umożliwia gromadzenie danych wraz z położeniem geograficznym, jak również włączenie nowoczesnych technik analizy danych (Adamchuk, 2011). Nieinwazyjność, szybkość, pozyskanie dużej ilości informacji i względnie niskie koszty sprawiają, że georadar jako metoda uzupełniająca techniki konwencjonalne jest stosowany w badaniach gleby rolniczej od ponad 30 lat, co ma to związek z rozwojem rolnictwa precyzyjnego.



Źródło: <http://docplayer.pl/10987381-Wspolczesne-metody-badan-instrumentalnych.html>

Rysunek 4.28. Schemat przedstawiający powiązanie pomiędzy częstotliwością anteny, a głębokością penetracji i rozdzielczością obrazu

Sposób oszacowania właściwości gleby na podstawie danych GPR polega na poszukiwaniu atrybutów sygnału, takich jak amplituda odbitych fal radarowych (rys. 4.29), faza czy obwódka, które dostarczają informacji na temat ciągłości oraz/lub nieciągłości odbić w badanej warstwie, geometrii przestrzennych struktur gleby oraz ich charakterystyki. Wartości ww. atrybutów danych GPR poddaje się geostatystycznej analizie, by znaleźć powiązanie pomiędzy obrazem z radaru, a poszukiwanymi właściwościami gleby (porowatość, gęstość, zawartość wody, tekstura), zmieniającymi się w małej skali w profilu glebowym (Adamchuk i in., 2004; DeBenedetto i in., 2012, 2013). W opinii Benedetto i in. (2013) opracowanie danych GPR jest bardzo złożone i wymaga bardzo dobrego wykształcenia.

O przydatności GPR decydują właściwości chemiczne, fizyczne i mineralogiczne ośrodka gruntu (Doolittle i Collins, 1995). Najważniejsze fizyczne właściwości badanego ośrodka dla fal radiowych to przenikalność dielektryczna i magnetyczna oraz przewodność elektryczna. Z innych czynników wpływających na skuteczność pomiarów GPR należy wymienić zawartość i rodzaj soli w roztworze glebowym, zawartość i rodzaj ilu oraz wilgotność, ponieważ mają one wpływ na przewodność elektryczną (Sudduth i in., 2005). Gleby ilaste cechują się wysoką przewodnością i szybko tłumią energię radaru. Minerale ilaste zwiększają rozproszenie energii elektromagnetycznej ze względu na ich zdolności adsorpcyjne, fale radiowe maleją wykładniczo, co ogranicza głębokość wykonania pomiarów i tym samym znacząco ogranicza skuteczność GPR. Doolittle i Collins (1995) podają zasięg penetracji z anteną o częstotliwości 120 MHz dla gleby piaszczystej 1 - 25 m, pyłu gruboziarnistego 1 - 5 m, gliny lub pyłu drobno-

ziarnistego 1 - 2 m oraz gleby drobno i bardzo drobno ilastej 0,5 – 1 m. W większości materiałów energia jest utracona również z powodu rozpraszania na skutek zmienności materiału i z powodu obecności wody. Efekt wody jest dwójaki: woda zawiera jony, które przyczyniają się do przewodności elektrycznej ogółem i cząsteczki wody pochłaniają energię elektromagnetyczną przy wysokich częstotliwościach, zazwyczaj powyżej 1000 MHz (www.sensoft.ca/FAQ.aspx). Tłumienie sygnału w glebie wilgotnej jest większe niż w glebie suchej (Doolittle i Collins, 1995).

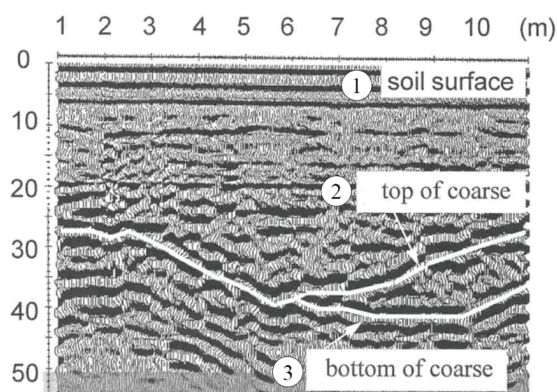
Brak odpowiednich informacji o zawartości wody w glebie i jej bardzo duża zmienność w czasie i przestrzeni wyklucza uwzględnienie tego parametru w ocenie przydatności danej gleby do pomiarów GPR. Dokonując klasyfikacji gleb pod względem przydatności do pomiarów metodą georadarową pod uwagę bierze się zawartość i rodzaj ilu, przewodność elektromagnetyczną, współczynnik absorpcji sodu, zawartość węgla wapnia i siarczany wapniowego (De Benedetto i in., 2008, 2012; Doolittle i in., 2007).

W odniesieniu do zastosowania georadaru w badaniach gleby rolniczej podstawowe pytania dotyczą wymaganej głębokości oraz rozdzielczości poziomej i pionowej, zakładając, że znane są właściwości elektryczne tego środowiska i gleba jest przydatna do takich pomiarów. Na podstawie tych informacji ustala się częstotliwość pracy anteny oraz optymalny rozstaw pomiędzy pomiarami na powierzchni pola. Zasada dla prawidłowego określenia rozstawu pomiarów jest taka, iż powinna to być dwukrotność częstotliwości Nyquista. Im więcej tym lepiej, ale to ekonomiczne i praktyczne względy stanowią o ograniczeniu rozstawu pomiędzy śladami. Nie ma ustalonych zasad co do wyboru zakresu częstotliwości anteny, ale powinny być wzięte pod uwagę cele badań i właściwości elektryczne terenu (przewodność). Ponieważ ze wzrostem częstotliwości pracy anteny głębokość penetracji maleje, to właśnie głębokość decyduje o wyborze częstotliwości. Wysoka częstotliwość (500 MHz) dostarczy szczegółowy obraz właściwości w płytkich warstwach, a niska częstotliwość (np. 50 MHz) do płytkich warstw się nie nadaje. Głębokość penetracji może poprawić łączenie anten o wysokiej i niskiej częstotliwości (De Benedetto i in., 2012). Teoretyczna głębokość penetracji dla anteny o danej częstotliwości może być obliczona dla znanej przewodności i przenikalności elektrycznej. Praktycznie najlepiej zrobić to na polu poprzez testowanie. Dla większości gleb głębokość penetracji wynosi od 1 do 3 m, z tym że w przypadku gleb zawierających montmorylonit jest to tylko kilka centymetrów, zaś dla czystego piasku może to być nawet kilkadziesiąt metrów (Daniels i in., 2008).

Stosując metodę georadarową Boll i in. (1996) wykryli bariery kapilarne na obszarze styku ośrodków o różnej teksturze. Przekrój poprzeczny gleby otrzymali poprzez stopniowe liniowe przemieszczanie się nadajnika i odbiornika. Obraz wynikowy pokazuje amplitudę kształtu odbitych fal w odniesieniu do czasu propagacji fali oraz przejechanej odległości (rys. 4.29). Na podstawie czasu propagacji i znanej prędkości fali określono głębokość zasięgu. Prędkość propagacji jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka stałej dielektrycznej i jest zależna od zawartości wody. Gleby piaszczyste gruboziarniste są suche, zaś drobnoziarniste zatrzymują więcej wody. Nagła zmiana wilgotności, a więc też stałej dielektrycznej pozwoliła na wykrycie graniczących ze

sobą dwóch ośrodków o różnej teksturze. Iły mają większą powierzchnię właściwą i mogą zatrzymać więcej wody niż frakcje pyłu i piasku. Ze względu na dużą pojemność adsorpcyjną dla wody i wymiennych kationów, iły odznaczają się dużym tłumieniem. Gleby o zawartości iłu większej od 35 % powodują duże ograniczenie, a dla mniej niż 10% nie ma ograniczeń.

King i in. (2003) zastosowali radar w badaniach nad nieinwazyjnymi czujnikami do pomiaru właściwości fizycznych. Stwierdzili, że możliwości zastosowania GPR są ograniczone składem mineralogicznym gleby. W przeciwieństwie do gleb piaszczystych, na glebach o wysokiej zawartości iłu nie otrzymali żadnych pozytywnych wyników. Sygnał był odbity zanim zdążył spenetrować warstwę gleby. Największy wpływ na pomiary GPR miała przewodność elektryczna gleby oraz stała dielektryczna. Georadar okazał się przydatny m.in. do wyznaczenia głębokości profilu glebowego, głębokości warstw bogatych w ił na piaszczystym materiale oraz głębokości poziomu wody podczas suszy.



Źródło: Boll i in., 1996

Rysunek 4.29. Obraz amplitudy kształtu odbitych fal sygnału w odniesieniu do czasu propagacji fali w nanosekundach (oś y) oraz przejechanej odległości (oś x) sygnału
1 – powierzchnia gleby, 2 – górna część warstwy gruboziarnistej, 3 – dolna część warstwy gruboziarnistej

Petersen i in. (2005) w swoich badaniach zajmowali się zmapowaniem ugniecenia gleby i zmiennością glebową w gospodarstwie rolnym. W tym celu zastosowali georadar pracujący z główną częstotliwością 500 i 900 MHz oraz sondę EM38 do pomiaru przewodności elektromagnetycznej. Z powodzeniem odróżnili obszary o większym ryzyku zagęszczenia (gleby gliniaste) od obszarów z mniejszym ryzykiem (gleby piaszczyste), jednakże ze względu na mały kontrast nie udało im się w pełni potwierdzić, czy głębsze warstwy były bardziej ugniecione.

Freeland i in. (2008) opracowali metodę zmapowania ugniecenia gleby spowodowanego na polu golfowym przez graczy. Do lokalizacji ugniecionych obszarów do

rekultywacji zastosowali GPR i antenę o bardzo wysokiej częstotliwości. Dzięki temu można było skanować profil do głębokości 50 cm poniżej murawy. Otrzymali przestrzenny rozkład ugniecenia gleby i grubości warstwy organicznej, piasku i żwiru.

Jakliński (2006) zastosował georadar do wykrycia podeszwy płużnej. Taką możliwość dostrzega również Adams (2008), jednak stwierdza on, że w tej kwestii ciągle brak jest doświadczeń z interpretacją dla celów rolniczych w kontekście konkretnych warunków.

Szerokie stosowanie GPR jest ograniczone przez złożoność opracowania danych. De Benedetto i in. (2015) przeprowadzili badania, których celem było określenie wpływu sposobu opracowania danych na sygnał z radaru i wybór szybkiej i efektywnej metody opracowania danych do wykrycia podpowierzchniowych właściwości gleby. Zastosowana przez autorów geostatystyczna analiza wykazała krytyczne znaczenie skali przeprowadzonych badań oraz potrzebę zastosowania odpowiedniego sprzętu do uchwycenia zmienności gleby zależnej od skali. Poza tym, jeśli sygnał jest wynikiem wieloczynnikowej interakcji bardzo heterogenicznego środowiska glebowego, to stanowi to główne ograniczenie w interpretacji danych. Niezbędne są więc dalsze badania mające na celu doskonalenie interpretacji tego typu danych poprzez stosowanie metod zmniejszających szumy oraz systematyczną zmienność, by uzyskać bardziej wiarygodne mapy amplitudy. Za poważne wyzwanie badawcze autorzy uważają wykrywanie właściwości fizycznych odpowiedzialnych za zaobserwowaną strukturę przestrzenną danych z georadaru.

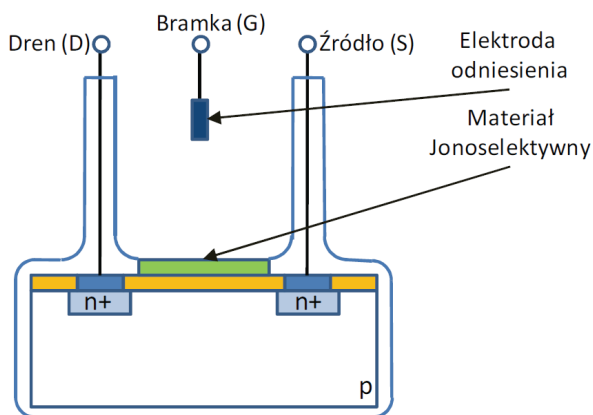
Najczęściej używane w badaniach przez uniwersytety i instytucje badawcze oraz w rolniczych/środowiskowych zastosowaniach są produkty firm GSSI (ang. *Geophysical Survey Systems, Inc.*, Niemcy), Sensors & Softwares (Kanada) oraz MALÅ (Szwecja). Produkty innych firm są przeznaczone dla zastosowań w inżynierii lądowej (Gradjean i in., 2010).

4.2.3. Elektrody jonoselektywne

Biorąc pod uwagę zasadę działania, do grupy czujników elektrycznych można zaliczyć również czujniki elektrochemiczne. Dla potrzeb realizacji efektywnego rolnictwa precyzyjnego niezbędne są dokładne pomiary pierwiastków glebowych N, P, K. Ocena zawartości makroskładników w glebie jest pomocna w dokładnym określeniu dostępnych składników pokarmowych i wskazówką do efektywnego wykorzystania nawozów. Tradycyjne metody oceny zasobności oparte na ręcznym lub mechanicznym pobieraniu próbek gleby są kosztowne i czasochłonne. To ogranicza ich liczebność, utrudniając tym samym właściwą charakterystykę czasową i przestrzenną zawartości składników na polu (Sibley i in., 2010). Dotyczy to zwłaszcza dokładnego określenia obecności azotanów, które są szybko traczone przez wypłukiwanie oraz denitryfikację w czasie pomiędzy poborem próbek i wykorzystaniem ich przez rośliny. Dlatego wiarygodne ilościowe wyznaczenie przestrzennej i czasowej zmienności azotu w glebie wymagałoby szybkich pomiarów i dużej liczby powtórzeń (Kim i in., 2009).

Do bezpośredniej oceny zasobności oraz odczynu gleby na podstawie pomiaru koncentracji jonów w laboratoriach od dawna z powodzeniem stosowane są czujniki elek-

trochemiczne. Wykorzystuje się w tym celu czujniki klasyczne - elektrody jonoselektywne ISE (ang. *Ion Selective Electrode*) lub jonoselektywne tranzystory polowe ISFET (ang. *Ion Sensitive Field Effect Transistor*). Jonoselektywne elektrody to czujniki potencjometryczne, których elementem czułym jest jonoselektywna membrana zintegrowana z elektrodą odniesienia. Reakcja chemiczna (koncentracja jonowa) przekształcana jest na sygnał elektryczny i mierzona różnica napięcia pomiędzy elektrodą pomiarową a odniesienia (referencyjną) jest związana z koncentracją określonych jonów m.in. H^+ , K^+ , NO_3 (Adamchuk i in., 2004; Kim i in., 2009; Lobsey i in., 2010). Tranzystor polowy jonoczuły jest strukturą półprzewodnikową i należy do grupy przetworników półprzewodnikowych stężeń substancji chemicznych CSSD (ang. *Chemically Sensitive Semiconductor Devices*). Bramkę metaliczną (rys. 4.30) zastąpiono elektrodą odniesienia, roztworem o badanym stężeniu i substancją selektywną. Rolę obszaru czynnego, sterującego przepływem prądu dren-źródło (rys. 4.30) przejmuje zewnętrzna warstwa substancji jonoselektywnej. Pomiar wybranych jonów uzyskuje się przez dobranie odpowiedniego materiału selektywnego, czułego na jeden rodzaj jonów. Jonoselektywne tranzystory polowe w porównaniu z elektrodami klasycznymi ISE mają szereg zalet. Charakteryzują się niską impedancją wyjściową, wysokim stosunkiem sygnału do szumu, szybkim pomiarem i możliwością tworzenia układów scalonych (integracji kilku czujników na jednym chipie elektronicznym (Adamchuk i in., 2004).



Źródło: http://www.wiak.imsi.pl/e-books/mechatronika1/rozdzial_8.pdf

Rysunek 4.30. Przekrój przez strukturę tranzystora ISFET

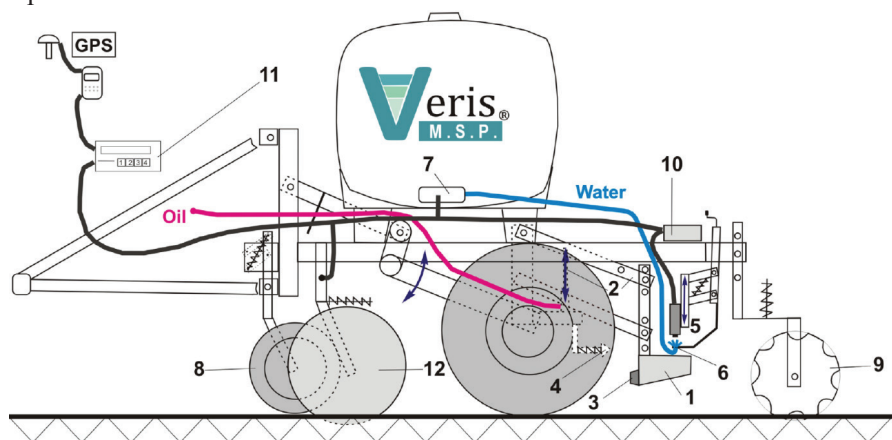
Z uwagi na rosnące zapotrzebowanie na pomiary nowych jonów i ogromny postęp w rozwoju elektroniki wymaganej do produkcji wielokanałowych elektrod ISFET, opracowano liczne membrany jonoselektywne. Kim i in. (2009) podają, że obecnie są dostępne dla większości pierwiastków w glebie, takich jak NO_3 , K, Na, Ca, Mg, Cl.

Jak dotąd, tylko czujniki elektrochemiczne mogą być stosowane do bezpośrednich (w roztworze glebowym) pomiarów chemicznych właściwości gleby, pozwalając pozyskać kluczową informację dla technologii rolnictwa precyzyjnego, jaką jest dostępność pierwiastków chemicznych w glebie oraz odczyn pH (Adamchuk i in., 2004). Badania nad zastosowaniem czujników elektrochemicznych do pomiaru zasobności gleby trwają od kilku dekad i metody pomiaru z ich wykorzystaniem sprawdzają się bardzo dobrze w warunkach laboratoryjnych. Dla celów rolnictwa precyzyjnego zdecydowanie preferowane są jednak metody wykonywane podczas przejazdów (w trybie *on-the-go*), szybkie, niedrogie, ale i w tym aspekcie zastosowanie czujników elektrochemicznych napotyka liczne ograniczenia. Jeśli na polu ma być powtórzony sposób postępowania podobny do laboratoryjnego, wówczas niezbędny jest pobór próbek i kilkusekundowa ekstrakcja pierwiastka, co wydłuża proces pomiaru (Kim i in., 2009). Price i in. (2003) podają 2-5 s, jako czas niezbędny do pomiaru ilości azotu po wstrzyknięciu roztworu ekstrakcyjnego do próbki gleby. Poza tym, pomiar przedstawia chwilową aktywność jonową, która nie może być bezpośrednio użyta do obliczenia dawki wapna lub nawozu opartej na obecnych zaleceniach. Taka procedura obliczenia mogłaby być opracowana wówczas, gdyby pomiar aktywności jonu był interpretowany wraz z oceną właściwości buforowych gleby, jak np. pojemność sorpcyjna, którą można by wyprowadzić z pomiaru przewodności elektrycznej albo z pomiarów spektralnych (Adamchuk i Viscarra Rossel, 2010).

Jednym z największych mankamentów tego typu pomiarów to ograniczona selektywność na jon docelowy, albo inaczej zakłócenie jonowe. Większość jonoselektywnych membran reaguje na cały szereg jonów. Problemu nie ma w przypadku wyznaczenia jednego jonu. Kiedy jednak pomiary w tym samym roztworze obejmują większą liczbę jonów, wówczas ma miejsce wysoka aktywność jonów zakłócających. Kolejny problem to zmiany czułości i błędy pomiaru, które wymagają częstej kalibracji. Istotna jest również praca nad poprawą trwałości elektrod, pracujących w trudnych warunkach (Kim i in., 2009). Upływ czasu pomiędzy pobraniem próbek i uzyskaniem wyniku pomiaru wyklucza na razie wykonanie zmiennego wapnowania lub nawożenia w czasie rzeczywistym (Adamchuk i in., 2004).

Ponieważ szybki pomiar podczas jazdy jest idealnym rozwiązaniem dla zmiennej aplikacji nawozów mineralnych, to naukowcy od lat 90-tych XX w. projektowali z różnym powodzeniem urządzenia do pomiarów pierwiastków glebowych, na które składały się mechanizm poboru próbek wg własnego projektu oraz komercyjnie dostępne elektrody jonoselektywne (Kim i in., 2009). Powstało kilka prototypów automatycznych systemów, jednakże w każdym przypadku z różnych powodów (czas reakcji, błąd pomiaru, niesystematyczne podawanie próbek do analizy itp.) wyniki badań polowych niekorzystnie odbiegały od wyników badań laboratoryjnych. Odpowiednim okazało się urządzenie zaprojektowane przez Adamchuka i in. (1999), zmodyfikowane później przez Collinsa i in. (2003), które stało się komercyjnie dostępne. Badania prowadzone przez Adamchuka i in. (2005) dotyczące jego przydatności do bezpośrednich pomiarów polowych pierwiastków K, NO₃, Na oraz odczynu pH wykazały, że tylko pomiar odczynu pH jest wystarczająco dokładny. Świadczyły o tym wartości współ-

czynników determinacji, które wynosiły 0,93-0,96; 0,61-0,62; 0,41-0,51 i 0,1 odpowiednio dla pH, K, $\text{NO}_3\text{-N}$ i Na. Dużo mniejszą dokładność wyznaczania trzech pierwiastków chemicznych autorzy tłumaczą różną zmiennością właściwości gleby w pobieranych próbkach. Wciąż nie są komercyjnie dostępne metody pomiaru NPK w trybie *on-the-go* (Lobsey i in., 2010). Wyżej wspomniane urządzenie jest jednak z powodzeniem stosowane do mapowania odczynu pH gleby, bardzo ważnego ze względu na jego wpływ na dostępność składników chemicznych, strukturę gleby, organizmy glebowe, podatność roślin na choroby, a w ujęciu globalnym na wzrost plonów (Adamchuk in., 2007; Schirman i in., 2011b). Wprawdzie pomiary te są mniej dokładne od laboratoryjnych, ale 10-krotne zwiększenie liczebności próby oznacza uzyskanie dokładniejszej mapy odczynu pH (Adamchuk i Viscarra Rossel, 2010) o większej rozdzielczości, co istotnie obniża błąd oceny wartości pH i zwiększa opłacalność zmiennego wapnowania. Według Gebbersa i Adamchuka (2010) jakość map odczynu pH zależy przeważnie od gęstości pobierania próbek, a pozostałe czynniki mają mniejszy wpływ. Potwierdzili to również Schirman i in. (2011b), którzy oceniali platformę Veris MSP (rys. 4.31), będącej jedyną jak dotąd komercyjną wersją urządzenia (Adamchuk i in., 1999), pozwalającego w trybie *on-the-go* zmapować odczyn na polu w celu wykonania przestrzennie zmiennego wapnowania.



Źródło: Schirrmann i in., 2011

Rysunek 4.31. Schemat platformy Veris MSP: 1 – redlica pobierająca próbki gleby, 2 – układ czworoboku do mocowania redlicy, 3 – stożek podcinający glebę, 4 – zgarniacz gleby, 5 – dwie elektrody antymonowe, 6 – dwie dysze do mycia elektrod, 7 – pompa elektryczna, 8 – zgarniacz resztek roślinnych, 9 – zagarniacz brzozy, 10 – zewnętrzny sterownik, 11 – panel użytkownika, 12 – moduł pomiaru przewodności elektrycznej

Badania przeprowadzili w warunkach gospodarstwa rolnego i wyniki porównali z wynikami uzyskanymi wg standardowej metody z analizy laboratoryjnej o siatce 100x100 m. Na wapnowanie pola, na podstawie map uzyskanych z pomiarów z czujni-

ka, zużyto w przybliŹeniu o połowę mniejszą ilość wapna, niż byłaby potrzebna przy ocenie metodą standardową.

Pokazany na rysunku 4.31 system platformy MSP amerykańskiej firmy Veris Technologies składa się z dwóch modułów – do pomiaru przewodności elektrycznej EC oraz odczynu pH.

Pozorna przewodność elektryczna EC_a gleby jest obliczana na podstawie oporności elektrycznej zmierzonej metodą kontaktową. Za pomocą sześciu elektrod talerzowych pomiar oporności następuje na dwóch głębokościach – 30 oraz 90 cm. Odczyn gleby jest mierzony bezpośrednio z uŹyciem dwóch antymonowych elektrod jonoselektywnych.

Na moduł do pomiaru odczynu gleby składają się trzy układy (Schirman i in., 2011b): (a) hydrauliczny, do pobierania próbek, (b) dwie elektrody do pomiaru pH oraz (c) układ myjący elektrody. Podczas przejazdu redlica do pobierania gleby jest hydraulicznie opuszczana i zagłębiana w glebie, co trwa około 2 s. W chwili wygłębiania się redlicy z próbką gleby określane są współrzędne geograficzne danego miejsca. Następnie próbka gleby jest doprowadzana do bezpośredniego styku z elektrodami pomiarowymi. Pomiar trwa od 7 s do 25 s. Po zakończeniu pomiaru redlica jest ponownie opuszczana i zagłębiana i w tym czasie następuje mycie elektrod. Cały proces jest sterowany zewnętrznym sterownikiem i dane przesyłane są do urządzenia uŹytkownika.

Schirman i in. (2011b) stwierdzają, Źe połowe wyniki pomiaru odczynu pH były bardzo dobrze skorelowane z laboratoryjnymi. Do kalibracji urządzenia potrzebowali 10 próbek. Dla zwiększenia dokładności funkcji kalibracji sugerują włączenie dodatkowych czujników, np. do pomiaru temperatury oraz wilgotności gleby. Jest to zgodne ze spostrzeŹeniami Lobseya i in. (2010), którzy stwierdzają, Źe istnieje potrzeba zajmowania się podstawowymi zagadnieniami związanymi z tego rodzaju pomiarami, m.in. wpływem zmiennych czynników otoczenia na wyniki pomiaru.

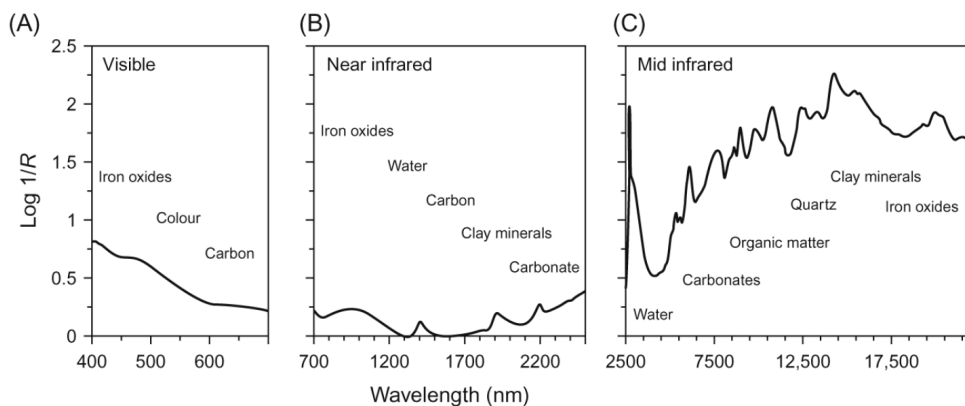
Ostatnia wersja platformy Veris MSP-3 jest wyposaŹona również w spektrofotometr i na podstawie pomiaru światła odbitego od gleby w pasmach czerwieni i podczerwieni moŹliwe jest wyznaczenie również zawartości węgla organicznego.

4.3. Czujniki optyczne

4.3.1. Pomiary właściwości gleby

Zmienność parametrów gleby występuje na małych odległościach i to zarówno w poziomie, jak i pionie. Biorąc pod uwagę znaczenie gleb, istnieje potrzeba wykrywania tych zmian, aby moŹna było odpowiednio reagować w razie ich degradacji. Badanie gleby moŹe odbywać się na obszarze kraju w celu inwentaryzacji zasobów glebowych, regionu w celach rolniczych, gospodarstwa lub nawet pola dla monitorowania, np. zawartości węgla, składników odŹywczych, odczynu czy zasolenia. Dalsze stosowanie map glebowych wymaga rozwoju i dopasowania technik zastępujących metody tradycyjne (Viscarra Rossel i McBratney, 2008a)

Jedną z takich technik jest spektroskopia, zajmująca się powstawaniem i interpretacją widm uzyskanych w efekcie oddziaływania różnego rodzaju promieniowania na materię. Zarejestrowany obraz promieniowania odbitego lub zaabsorbowanego to widmo spektralne, na podstawie którego można określić właściwości badanej materii. Aby otrzymać widmo glebowe, próbkę naświetla się promieniami zawierającymi wszystkie istotne częstotliwości w danym zakresie. W zależności od składników gleby, promieniowanie wywołuje drgania wiązań cząsteczkowych rozciągających albo deformacyjnych, które będą absorbować światło w różnym stopniu, z kwantem energii odpowiadającym różnicy pomiędzy dwoma poziomami energetycznymi. Ponieważ kwant energii jest bezpośrednio związany z częstotliwością, otrzymane widmo będzie miało charakterystyczny kształt, który będzie można wykorzystać do celów analizy składników badanej próbki. Częstotliwość absorpcji pojawia się jako zmniejszenie sygnału odbitego promieniowania i jest wyświetlona w procentach odbicia R , po czym może być przeliczona na chwilową absorpcję według zależności $A = \log(1/R)$ (rys. 4.32) (Sternberg i in. 2010).



Źródło: Viscarra Rossel i in., 2011

Rysunek 4.32. Typowe widmo elektromagnetyczne gleby w zakresie:
 (A) światło widzialne – tlenki żelaza, kolor, węgiel, (B) bliska podczerwień – tlenki żelaza, woda, węgiel, minerały ilaste, węglan; (C) średnia podczerwień – woda, węglany, materia organiczna, krzem, minerały ilaste, tlenki żelaza

Spektroskopia odbicia rozproszonego DRS (ang. *Diffuse Reflectance Spectroscopy*) jest szybka, niedestrukcyjna i nie wymaga przygotowania próbek gleby oraz nie zużywa się niebezpiecznych dla środowiska substancji chemicznych, co sprawia, że ma przewagę nad również bardzo obiecującymi metodami elektrochemicznymi (Kim i in., 2009). Podobnie jak w przypadku czujników elektrycznych i elektromagnetycznych, na pomiary optyczne ma również wpływ kombinacja parametrów właściwości gleby.

Wpływ różnych wlaściwořci na wynik jest jednak różny w poszczególnych pasmach widma, co pozwala odseparować niektóre wpływy w pomiarach jednym czujnikiem.

Spektroskopia w badaniach gleby jest przedmiotem szczególnego zainteresowania, ponieważ odnosi się do wielu jej wlaściwořci chemicznych i może stać się jedną ze zbliżeniowych metod pomiaru, uzupełniając metody konwencjonalne, za pomocą których nie można w skali pola uzyskać obrazu przestrzennej zmienności żyzności gleby z odpowiednią rozdzielczością. Zmienność przestrzenna takich wlaściwořci gleby związanych z żyznością jak materia organiczna, P, K, pH często występuje w odległościach poniżej 50 m. Dogłębne zrozumienie układu przestrzennego będzie korzystne zarówno dla producenta, chcącego poprawić warunki glebowe, jak i środowiska, by zapobiec zanieczyszczeniu poprzez redukcję nadmiaru nawozów lub wymywanie składników odżywczych. W większości przypadków stosowanie laboratoryjnych metod do liczby próbek, jaka gwarantowałaby ujęcie zmienności przestrzennej jest bardzo kosztowne (Schirman i in., 2013).

Od lat 90-tych XX w. opracowano cały szereg czujników optycznych do pomiarów zbliżeniowych, z wykorzystaniem jednego zakresu długości fali lub więcej, z różnym przeznaczeniem (Adamchuk i Viscarra Rossel, 2010b). Literatura dotycząca zagadnień stosowania spektroskopii vis-NIR oraz mid-NIR do analizy gleby jest bogata i techniki te są coraz częściej stosowane (Christy, 2008; Reeves i in., 2010; Viscarra Rossel i in., 2009).

Do pomiarów czujnikami optycznymi wykorzystywane są pasma światła widzialnego (vis: 400-700 nm), bliskiej podczerwieni (NIR: 700-2500 nm) oraz/albo średniej podczerwieni (mid-IR: 2500-25000 nm) (rys. 4.32) (Adamchuk i Viscarra Rossel, 2010).

Zarówno vis-NIR, jak i mid-IR to techniki bardzo czułe na organiczne i nieorganiczne składniki gleby i dlatego są narzędziami potencjalnie użytecznymi do oceny i monitorowania gleby oraz jej jakości i funkcji. Zasadniczo w paśmie NIR absorpcję wykazują grupy funkcyjne C-H, H-O-H, O-H, N-H oraz C-O, w związku z tym te widma zawierają ważne informacje dotyczące takich składników gleby jak materia organiczna, wilgotność gleby, węglany oraz minerały ilaste, azot, potas i magnez. Pasma mid-IR zawiera dużo więcej informacji o mineralnych i organicznych składnikach gleby, niż pasmo vis-NIR i spektroskopia glebowa mid-IR szczególnie dobrze nadaje się do analizy zawartości materii organicznej oraz składników mineralnych, dlatego że skojarzone z nimi pasma absorpcji są łatwo zidentyfikowane. W technice vis-NIR pasma absorpcji są szerokie i mają tendencję do nakładania się i w porównaniu z mid-IR są trudniejsze w interpretacji (Viscarra Rossel i McBratney, 2008a; Schirmann i in., 2013; Dhawale i in., 2015). Viscarra Rossel i in. (2006b) badali przydatność wszystkich trzech pasm. Konkludują oni, że wybór pasma spektralnego zależy od dokładności, z jaką dana wlaściwořć gleby ma być prognozowana, od kosztów technologii i zakresu przygotowania próbek. Z cytowanych badań wynika, że korzyści wynikające z większej dokładności uzyskanej w paśmie mid-IR niż w vis-NIR nie równoważą większych kosztów ponoszonych przy zastosowaniu technologii mid-IR. Reeves i in. (2010) stwierdzili, że kalibracje mid-IR nie były tak niezawodne jak w przypadku

spektrometru NIR. Pozostali autorzy, którzy stosowali w badaniach spektroskopię mid-IR stwierdzają, że przeniesienie tej technologii do warunków polowych wymaga zwartej konstrukcji, miniaturyzacji i łatwości przenoszenia. Dhawale i in. (2015) podają, że rozwój technologii półprzewodników dał podstawy do rozwoju spektrometrów pracujących w średniej podczerwieni mid-IR. Autorzy przeprowadzili badania mające na celu ocenę prototypu takiego spektrometru do bezpośrednich pomiarów w celu prognozowania zawartości piasku, iłu i materii organicznej w zakresie wilgotności gleby w warunkach polowych i potwierdzili jego przydatność do wykonania pomiarów zbliżeniowych gleby.

Metody optyczne zastosowano do wyznaczania wielu właściwości gleby. Sternberg i in. (2010) stwierdzają, że metody pomiaru zawartości pierwiastków odżywczych roślin N, P, K, Fe, Ca, Na, Mg, są przedmiotem dużego zainteresowania w rolnictwie. W technologii rolnictwa precyzyjnego do zmiennego nawożenia dane o dostępnej formie fosforu i potasu niezbędne są do uzyskania map o dużej rozdzielczości. Viscarra Rossel i in. (2011) wśród cytowanych badań z zakresu pierwiastków glebowych wymieniają badania na zawartość azotu metodą mid-NIR (Jahn i in., 2006), fosforu w paśmie vis-NIR (Bogrecki i Lee, 2005), potasu z zastosowaniem obu zakresów z różnym powodzeniem, wapnia i magnezu, które były dobrze skorelowane z widmami pasma zarówno vis-NIR, jak i mid-NIR (Lee i in. 2009; Viscarra Rossel i McBratney, 2008 a).

Na podstawie wyników badań wykazano, że większość korelacji składników odżywczych z widmem w obszarze vis-NIR była na ogół bardzo słaba, chociaż zdarzyły się wyjątki. Sternberg i in. (2010) cytują opracowania dotyczące szacowania zawartości składników odżywczych, podając uzyskane przez autorów współczynniki determinacji dla następujących pierwiastków: N mineralny (0,20-0,99), K dostępny (0,56-0,83), K wymienny (0,11-0,55), Ca (0,75-0,89), Fe (0,64-0,91), Na (0,09-0,44), Mg (0,53-0,82), P (0,23-0,92). Zdaniem Sternberga i in. (2010) niektóre dobre wyniki kalibracji mogły być efektem miejscowego współoddziaływania innych spektralnie aktywnych składników. Odnośnie do fosforu stwierdzają, że występowanie w warunkach naturalnych tego drugiego najważniejszego po azocie pierwiastka jest również ograniczone. Możliwości prognozowania ekstrahowanego fosforu na podstawie widma vis-NIR jest szeroko przebadane, jednak wyniki są z różnych powodów bardzo rozbieżne. Między innymi może się do tego przyczyniać również forma fosforu i metoda jego wyznaczenia. Qiao i Zhang (2012) do wyznaczenia zawartości dostępnych form N, P, K oraz materii organicznej zastosowali rozproszone widmo odbicia NIR przy użyciu spektrometru FieldSpec3 (Analytical Spectral Devices, Inc., ASD, USA). Uzyskane korelacje dla wartości zmierzonych oraz predykcyjnych wynosiły 0,87; 0,72; 0,84 i 0,68 odpowiednio dla N, P, K i materii organicznej.

W odniesieniu do dostępności pierwiastków dla roślin istotną rolę odgrywa pojemność sorpcyjna wymienna. Jej większa wartość sprzyja lepszemu pobieraniu składników przez rośliny. Zastosowaniem techniki vis-NIR oraz mid-NIR do jej wyznaczenia zajmował się m.in. Viscarra Rossel i in. (2006b). Ze względu na wiele czynników mających wpływ na tę właściwość, takich jak tekstura gleby i materia organiczna, jej bar-

dziej dokładne wyznaczenie byłoby możliwe poprzez stosowanie kombinacji kilku pomiarów pochodzących z różnych czujników zbliżeniowych (Viscarrą Rossel i in., 2011).

Dużo uwagi zwraca się na szacowanie zawartości materii organicznej oraz węgla organicznego z zastosowaniem vis-NIR oraz mid-NIR (Viscarrą Rossel i in., 2006b; Janik i in., 2007b). Sternberg i in. (2010) cytują kilkadziesiąt opracowań z tego zakresu, podając, że z wykonanych badań dotyczących wykorzystania vis-NIR do prognozowania właściwości gleby najwięcej odnosiło się do wyznaczania zawartości węgla organicznego oraz iłu. Wynika to z faktu, że materiały ilaste oraz materia organiczna to podstawowe składniki gleby istotne w ocenie jakości gleby, mające znaczący wpływ na jej właściwości fizyczne, kształtowanie się pojemności sorpcyjnej, retencyjność i strukturę. Znaczenie materii organicznej w procesach biologicznych oraz w zarządzaniu środowiskiem jest niekwestionowane, a ponadto w związku z globalnym ociepleniem dużą uwagę zwraca się na rozwój praktyk uprawowych wspierających sekwestrację węgla w celu zmniejszenia wydzielania CO₂ do atmosfery (Sternberg i in., 2010). Do uporania się z powyższymi zagadnieniami niezbędna jest ogromnie duża ilość informacji, których pozyskanie metodami konwencjonalnymi byłoby bardzo kosztowne i dlatego dla wyznaczania tych czynników są już dobrze rozpoznane ich właściwości absorpcyjne w obszarze vis-NIR. Według Viscarrą Rossel i in. (2006b), w tym obszarze badań gleby oraz w obszarze szacowania azotu, metody optyczne są stosowane z największym powodzeniem.

Jak już wspomniano, odczyn gleby jest ważnym regulatorem jej żyzności. Od jego wartości zależy rozpuszczalność pierwiastków, jak również skuteczność herbicydów, a niekorzystne wartości pH mogą ograniczać rozwój korzeni roślin. Odczyn ma bardzo duży wpływ na aktywność biologiczną, rozkład resztek roślinnych, mineralizację itp., zaś na odczyn ma duży wpływ pojemność sorpcyjna, ważna dla pojemności buforowej gleby, która jest związana z frakcją iłu oraz zawartością materii organicznej oraz minerały glebowe z uwagi na ich różną kwasowość. Odczyn nie ma bezpośrednio charakterystyki widmowej, ale jego w miarę dobra korelacja z widmem vis-NIR jest możliwa ze względu na współzależność ze składnikami spektralnie aktywnymi, takimi jak materia organiczna oraz ił. To sprawia, że mechanizm kalibracji dla pH jest złożony. Poza tym, w praktyce po zastosowaniu niezbędnego wapnowania określone zależności ulegną zmianie (Sternberg i in., 2010). Wyznaczaniem odczynu z wykorzystaniem metod vis-NIR oraz mid-IR zajmowali się Viscarrą Rossel i McBratney (2008). W praktyce Kuang i in. (2014) wykonali wapnowanie na podstawie modeli kalibracyjnych dla węgla organicznego, odczynu oraz pojemności sorpcyjnej. Właściwości te mapowali za pomocą spektroskopowego czujnika vis-NIR w czasie rzeczywistym, uzyskując współczynniki determinacji 0,71-0,76. Okazało się, że ilość wapna potrzebna wg tak sporządzonej mapy była znacznie wyższa od ilości dla tradycyjnego nawożenia, co wynikało z bardziej szczegółowych informacji odzwierciedlających znacznie lepiej występującą na polu zmienność.

Składowe mineralne to połowa objętości gleby. Rodzaj cząstek mineralnych, ich udział i koncentracja mają jednoznacznie wpływ na takie właściwości gleby jak tekstu-

ra, struktura i pojemność sorpcyjna, a te z kolei mają wpływ na pozostałe właściwości gleby. Mineralały glebowe absorbują światło w obszarze UV, widzialnego vis, bliskiej podczerwieni vis-NIR oraz średniej podczerwieni mid-NIR. Tlenki żelaza silnie absorbują światło w obszarze UV, słabiej w vis-NIR, zaś materiały ilaste mają wyraźne widma w obszarze vis-NIR (Sternberg i in., 2010). Mineralogię gleby metodami vis-NIR badali m.in. Viscarra Rossel i in. (2006a, 2009).

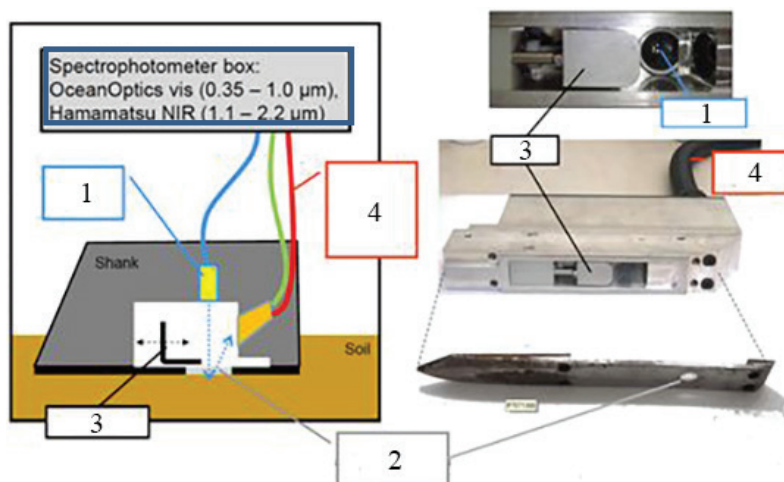
Z opracowań Lee i in. (2009) oraz Viscarra Rossel i in. (2006b; 2009), którzy zastosowali spektroskopię vis-NIR oraz mid-IR do oszacowania zawartości piasku, pyłu i łu wynika, że wyznaczenie pyłu jest mniej dokładne od określania łu, a w paśmie vis-NIR nie ma reakcji na piasek. W odniesieniu do tekstury gleby najwięcej uwagi zwraca się na zawartość łu z powodu jego dużego wpływu na strukturę gleby. Znalezione ważne pasmo do kalibracji zawartości łu i nim związanych takich parametrów jak powierzchnia właściwa tj. sumaryczna powierzchnia cząstek mineralnych i organicznych zawartych w 1 gramie gleby oraz pojemność sorpcyjna tj. miara zdolności gleby do wymiennego wiązania jonów. Ponieważ te dwie cechy są bardziej bezpośrednio związane ze składem granulometrycznym oraz mineralogią gleby niż sama zawartość łu, to można zakładać, że będą one mogły być również prognozowane na podstawie widma vis-NIR, czego dowodzą dotychczasowe wyniki badań (Brown i in., 2006; Shepherd i Walsh, 2002).

Jest wiele powodów, dla których ważna jest informacja o zawartości wody w glebie (Sternberg i in., 2010). Oprócz podstawowej funkcji regulatora wzrostu roślin i właściwości biologicznych gleby, woda ma wpływ na ważne procesy zachodzące w glebie, takie jak nitrifikacja/denitrifikacja, jak również procesy hydrologiczne, do których zalicza się wymywanie oraz erozję. Wilgotność ma wpływ również na wyniki pomiarów. Różne formy wody wykazują silną absorpcję w obszarze NIR. Woda zawarta w siatce minerałów ilastych silnie absorbuje światło w pobliżu 1400 oraz 1900 nm i odnosi się bezpośrednio do właściwości mineralogicznych próbki. Mimo tak silnej absorpcji światła w obszarze vis-NIR błędy średniokwadratowe prognozowanych wartości były wysokie, chociaż podobne do tych, jakie uzyskano dla kalibracji węgla i łu. Powodem może być fakt, że walidacja polowa daje gorsze wyniki od laboratoryjnej, a może się do tego przyczynić również wykonanie pomiarów metodą *on-the-go*. Do określenia zawartości wody w glebie zastosowano zarówno technikę vis-NIR (Whiting i in., 2004), jak i mid-IR (Janik i in., 2007a).

Widma światła odbitego i rozproszonego gleby są w dużej mierze niespecyficzne na skutek interferencji wynikającej z nakładania się widm składowych gleby, które same w sobie są zmienne i wzajemnie powiązane. Na brak selektywności może wpłynąć praca samego urządzenia (szumy, błędy pomiaru). Wszystkie te czynniki składają się na złożony wzorzec absorpcji, który musi być matematycznie wyłonić z widma, by można go było skorelować z właściwościami gleby (Sternberg i in., 2010). Analiza widma spektroskopii rozproszonej wymaga stosowania technik chemometrycznych oraz wielowymiarowych kalibracji. Chemometria odnosi się do matematycznego i statystycznego opracowania danych chemicznych, zaś kalibracja w tym przypadku oznacza zastosowanie danych empirycznych i wcześniejszej wiedzy do prognozowania

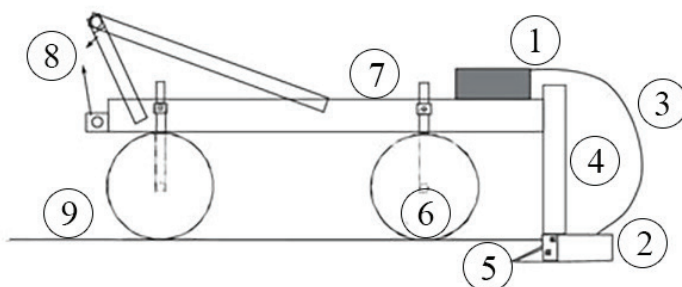
nieznanych właściwości gleby z wielu spektroskopowych pomiarów (poprzez matematyczne funkcje przekształcania). Spektroskopowa kalibracja gleby to są funkcje pedo-transferu z dużą liczbą zmiennych spektroskopowych (Viscarrá Rossel i in., 2008a; Minasny i in., pobrane z Internetu 2016). Do opracowania danych spektralnych obecnie stosowane są zaawansowane metody statystyczne i matematyczne, jak analiza składowych głównych PCR (ang. *Principal Components Regression*), regresja cząstkowych najmniejszych kwadratów PLSR (ang. *Partial Least Squares Regression*), sztuczne sieci neuronowe (do szacowania zawartości materii organicznej, fosforu i potasu z widma vis-NIR), drzewa decyzyjne również z widm vis-NIR i inne. Ogromna różnorodność gleb może powodować różnice w powstających widmach i też powoduje zmniejszenie dokładności predykcji. Thomasson i in. (2001) podają, że na badanych przez nich polach korelacje odbitego widma z właściwościami gleby były różne, jak również długości fal dla najlepiej dopasowanych modeli różniły się między polami. Dlatego duże biblioteki spektralne mogą być pomocne w ujawnieniu ukrytej różnorodności pomiędzy różnymi klasami gleb i umożliwić szersze stosowanie techniki spektroskopowej. W opracowaniach Shepherd i Walsha (2002) oraz Viscarrá Rossel i in. (2008b) opisane są metody tworzenia takich bibliotek. Dla ich rozwoju niezbędne są następujące wymagania: (a) powinny zawierać taką liczbę próbek, jaka jest niezbędna do odpowiedniego opisu zmienności glebowej w rejonie, w którym z biblioteki będzie się korzystało, (b) próbki należy starannie przygotować i przechowywać; w widmach zarejestrowane są wszystkie informacje dotyczące próbek do momentu ich skanowania, (c) dane referencyjne dotyczące gleb, stosowane do kalibracji, powinny być pozyskane w laboratoriach akredytowanych. W wielu krajach na świecie takie biblioteki są tworzone (Brown i in., 2006; Bellinaso i in., 2010; Brodský i in., 2011; Shepherd i in., 2002; Terhoeven-Urselmans i in., 2010; Shi i in., 2014), zaś dotychczasowe osiągnięcia w tym zakresie przedstawiono w opracowaniu Viscarrá Rossel i in. (2016), gdzie wymienia się 35 instytucji z całego świata, biorących udział w tym zadaniu.

Ze stosowaniem spektroskopii związane są dwa rodzaje inwestycji. Jest to zakup spektrofotometru (rys. 4. 33; rys. 4.34) i rozwój biblioteki spektralnej. Viscarrá Rossel i in. (2008 a) podają, że wykonanie analiz 500 próbek gleby w akredytowanym laboratorium może dorównać cenie spektrometru. Takie analizy obejmują określenie odczynu pH, węgla organicznego, węgla i azotu ogólnego, pojemności sorpcyjnej i kationów wymiennych, fosforu, żelaza, piasku i pyłu. Inwestycje są wprawdzie duże, ale duże są również potencjalne oszczędności. Spektroskopia odbicia rozproszonego jest bowiem jedną z najprostszych i najbardziej wydajnych technik spektroskopowych. Może poprawić możliwości analizy i wydajność laboratoriów komercyjnych i badawczych, przy znacznie obniżonych kosztach. Potrzebne są bardzo małe, kilkugramowe próbki z minimalnym przygotowaniem i Viscarrá Rossel i in. (2008 a) podają, że w ciągu 7 godzin możliwe jest ręczne zeskanowanie 100 próbek i dwa razy więcej w przypadku zastosowania spektrometru przenośnego. Przy automatyzacji tego procesu liczba ta jeszcze bardziej wzrośnie. Możliwe jest również prognozowanie właściwości gleby w czasie rzeczywistym, albo w bardzo krótkim czasie po zebraniu próbek.



Źródło: Gebbers, 2014

Rysunek 4.33. Spektrometr vis-NIR firmy Veris: 1 – źródło światła, 2 – okno z szafiru, 3 – migawka, 4 – włókno szklane dla vis oraz NIR



Źródło: Sternberg i in., 2010

Rysunek 4.34. Spektrometr do pomiarów polowych: 1 – spektrometr, 2 – czujnik optyczny, 3 – włókno, 4 – słupica, 5 – redlica, 6 – koło, 7 – rama, 8 – podnośnik, 9 – powierzchnia gleby

W cyfrowym mapowaniu właściwości gleby zastosowanie techniki spektroskopowej może być niezmiernie przydatne. W rolnictwie precyzyjnym może być wykorzystane w systemie wspomagającym nawożenie w celu określenia zaleceń nawozowych. Zebranie widm gleby nie nastręcza żadnych trudności, ale potrzebne są umiejętności opracowania i analizy dużej ilości pozyskanych danych (Viscarra Rossel i in., 2008a).

4.3.2. Czujniki optyczne w rozpoznawaniu zapotrzebowania roślin na azot

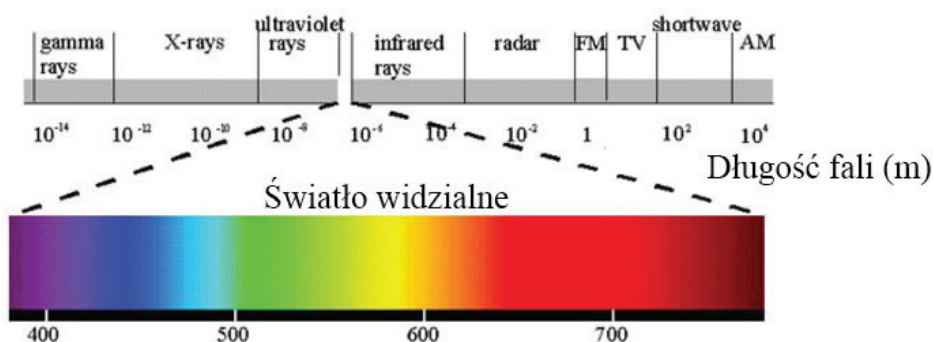
Azot odgrywa kluczową rolę w cyklu życia roślin i optymalizacja jego wykorzystania ma bezpośredni wpływ na wzrost produkcji, jakość surowca oraz ograniczenie wymywania i wytwarzanie tlenków tego pierwiastka (Ali i in., 2016). Azot jest najważniejszym składnikiem odżywczym, niezbędnym do produkcji chlorofilu i odgrywa ważną rolę w kluczowych procesach wzrostu roślin, takich jak podział komórek, synteza białka i produkcja enzymów (Muñoz-Huerta i in., 2013). Azot jest składnikiem odżywczym, którego brak najczęściej ogranicza produkcję roślinną (Samborski i in., 2009). Rośliny pobierają go głównie z gleby, gdzie jest dostępny w formie amonowej (NH^{+4}) lub azotanowej (NO_3^-). Dla uzyskania dobrych plonów producenci często nadmiernie zwiększają dawki nawozu azotowego, co pociąga za sobą dodatkowe koszty, negatywny wpływ na rośliny i wymywanie nadmiaru azotu niepobranego przez rośliny (Muñoz-Huerta i in., 2013). Duża ilość azotu pozostającego w glebie po zbiorze jest powodem znacznych strat tego składnika na skutek wymywania w jesieni oraz w zimie (Samborski i in., 2009). Wymywanie, denitryfikacja oraz ulatnianie się azotu to główne procesy strat jego nadmiaru, przyczyniające się do zanieczyszczenia środowiska. Wymyty azot zanieczyszcza wody gruntowe, co powoduje eutrofizację, zaś ulatniający się azot przyczynia się do globalnego ocieplenia poprzez produkcję gazów cieplarnianych (tlenki azotu NO , N_2O) (Muñoz-Huerta i in., 2013).

Poprawę efektywności wykorzystania azotu można uzyskać poprzez stosowanie dawek opartych na szacowaniu zapotrzebowania przez rośliny w czasie, kiedy straty są najmniejsze, a więc w chwili, kiedy rośliny go potrzebują (Samborski i in., 2009). Producenci mają mieć najbardziej aktualne informacje o stanie odżywienia roślin w ten pierwiastek i w tym kierunku prowadzone są intensywne badania, dotyczące pomiaru zawartości chlorofilu w liściach i określenia stanu odżywienia roślin w azot (Ali i in., 2016).

Jedną z metod poprawy efektywności wykorzystania jest pomiar zawartości azotu w liściach w różnych fazach rozwoju rośliny. Można to wykonać stosując metody destrukcyjne i niestrukcyjne. Te pierwsze, to laboratoryjne metody badania zawartości azotu w tkankach roślin, tzw. testy roślinne, które wymagają zebrania materiału do badań, a następnie analizy laboratoryjnej. Są wprawdzie skuteczne, ale czaso- i pracochłonne oraz zużywa się przy tym szkodliwe dla człowieka środki chemiczne. Badania niestrukcyjne są szybkie, mniej kosztowne, ale też mniej dokładne (Ali i in., 2016; Muñoz-Huerta i in., 2013).

Te drugie leżą u podstaw rolnictwa precyzyjnego, które jest jedną z najlepszych dróg rozwiązania tego problemu. Najważniejszym pigmentem w liściach roślin jest chlorofil, który jest odpowiedzialny za ich zielony kolor i jako niezbędny składnik

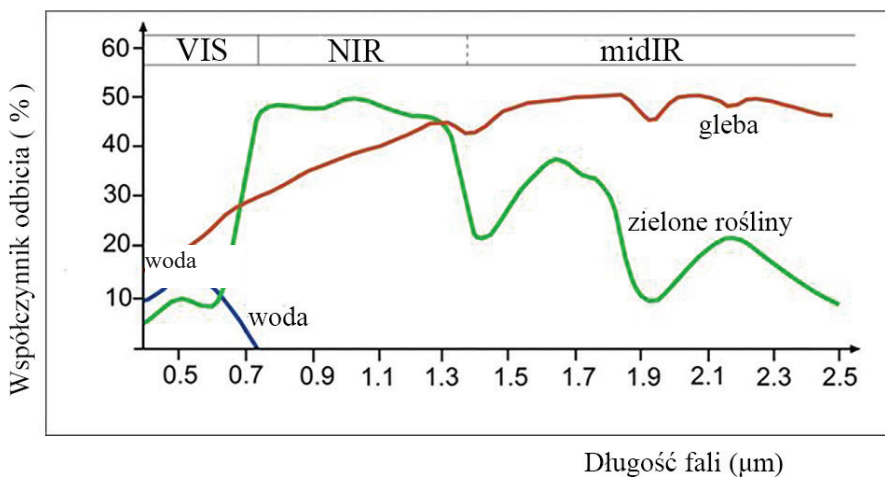
fotosyntezy może być wskaźnikiem zawartości azotu (Shapiro i in., 2006). Wiele urządzeń pracuje na zasadzie pomiaru zawartości chlorofilu, który jest wysoko skorelowany z zawartością azotu. Nieinwazyjną metodą szacowania stanu odżywienia roślin azotem jest wykorzystanie czujników teledetekcyjnych (obiekt i czujnik nie wchodzi w bezpośredni kontakt), w których nośnikiem informacji o badanym obiekcie jest promieniowanie elektromagnetyczne (rys. 4.35). Ich działanie bazuje na pomiarze odbicia lub emisji światła przez badany obiekt. Na podstawie powstałego widma można określić również cały szereg biochemicznych i biofizycznych właściwości roślin (Muñoz-Huerta i in., 2013).



Źródło: Ortiz i in., 2011

Rysunek 4.35. Widmo promieniowania elektromagnetycznego

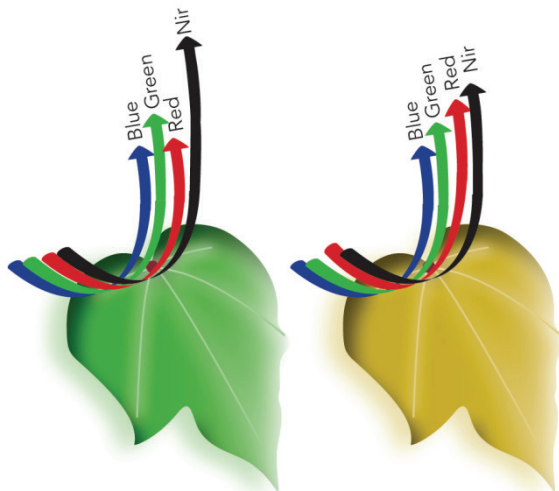
Zarówno sztuczne, jak i naturalne światło składa się z promieniowania elektromagnetycznego, sklasyfikowanego w powstałym widmie według długości fali (Ortiz i in., 2011). Nie wszystkie fale niosą informacje o obiektach i też znaczna część promieniowania ulega absorpcji lub rozproszeniu. Dla teledetekcji zakres promieniowania użytecznego zaczyna się od pasma widzialnego (http://home.agh.edu.pl/~galia/students/NS/teledetekcja_w_skrocie.pdf). Światło widzialne (VIS) postrzegane jako kolor, widoczne dla ludzkiego oka, występuje w wąskim zakresie długości fal od 400 do 700 nm (rys. 4.35) (Ortiz i in., 2011). Około 50% docierającej energii słonecznej pochodzi z tego zakresu długości fal i skład spektralny promieniowania odbitego jest związany z budową chemiczną obiektów (Capała i Jadczyzyn, 2000). Zależność współczynnika odbicia od długości fali przedstawia tzw. krzywa spektralna. Zakłada się, że krzywe spektralne poszczególnych obiektów są na tyle zróżnicowane, że na ich podstawie można dokonać ich rozróżnienia (rys. 4.36) (http://home.agh.edu.pl/~galia/students/NS/teledetekcja_w_skrocie.pdf).



Źródło: Opracowanie własne na podstawie <http://www.seos-project.eu/>

Rysunek 4.36. Przykład krzywej spektralnej: pasma światła VIS – widzialnego, NIR – bliskiej podczerwieni, midIR – średniej podczerwieni

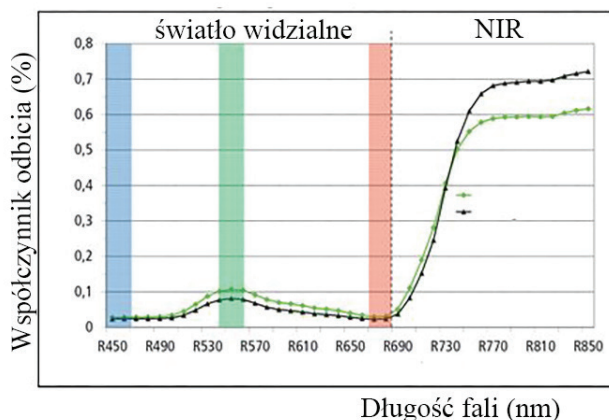
Podczas wegetacji ilość odbitego światła w roślinach związana jest zazwyczaj z ilością chlorofilu lub ze stanem zdrowotnym rośliny (rys. 4.37) (Ortiz i in., 2011).



Źródło: Ortiz i in., 2011

Rysunek 4.37. Różnice w odbiciu światła liścia zdrowego i chorego

Ilość chlorofilu w tkankach liści ma związek z ilością azotu w liściach. Około 75% azotu w roślinie zawiera się w chloroplastach, dlatego teledetekcyjne określenie zawartości chlorofilu daje możliwość szybkiej oceny stanu odżywienia roślin azotem. Istnieją dwa główne pasma absorpcji światła przez chlorofil – niebieskie (450 nm) oraz czerwone (670 nm) (rys. 4.38). Z uwagi na to, że już niewielka ilość chlorofilu powoduje wysycenie absorpcji w paśmie 660-680 nm, zmniejszając w ten sposób czułość wskaźników spektralnych, to modele empiryczne do prognozowania zawartości chlorofilu oparte są zazwyczaj na odbiciu w pasmach oddalonych od tego miejsca, np. w obszarach 550 lub 700 nm. Aby jednak uzyskać maksymalną czułość szacowania ilości chlorofilu, to wybrana długość fali powinna znajdować się jak najbliżej pasm absorpcji. Dużo uwagi poświęca się obszarowi pomiędzy bardzo silną absorpcją przez chlorofil światła czerwonego (680 nm) oraz wysokim odbiciem fali w bliskiej podczerwieni NIR (780 nm). Obszar ten określany jest mianem „red Edge” i kilka takich wskaźników zostało opisanych (Rodriguez i in., 2006).



Źródło: Reckleben, 2011

Rysunek 4.38. Widmo światła odbitego w pasmach światła widzialnego oraz bliskiej podczerwieni NIR

Różne metody proponowane w opracowaniach dotyczących optymalnej strategii nawożenia azotem oparte są na komercyjnych oraz niestandardowych urządzeniach (Muñoz-Huerta i in., 2013). Komercyjnie dostępne czujniki do teledetekcyjnego pomiaru zieloności roślin (tab. 4.1) mają różną rozdzielczość spektralną, przestrzenną i czasową (Basso i in., 2004; Ortiz i in., 2011).

Rozdzielczość spektralna (tab. 4.1) to czułość czujnika na różnej długości fali w widmie EM albo liczba i szerokość pasm rejestrowanych fal. Wyróżnia się czujniki wielospektralne – do 10 szerokich kanałów oraz bardziej czułe hiperspektralne – do kilkuset węższych kanałów.

Rozdzielczość przestrzenna (tab. 4.1) odnosi się do wielkości piksela, czyli najmniejszej możliwej powierzchni, jaką czujnik może zarejestrować jako odrębną jednostkę. Wielkość piksela zależy od odległości pomiędzy czujnikiem i badanym obiektem, jak również od kąta ustawienia czujnika lub chwilowego pola widzenia. W przeciwieństwie do obrazów o dużej rozdzielczości, przy niskiej rozdzielczości są widoczne tylko duże obiekty z mniejszą możliwością rozróżniania szczegółów.

Rozdzielczość czasowa (tab. 4.1) to częstotliwość, z jaką można pozyskiwać dane i może wynosić od kilku minut do kilku tygodni. Charakterystyki spektralne obiektów są zmienne w czasie i pozyskanie obrazów w różnych okresach umożliwia wykrycie tych zmian.

Czujniki teledetekcyjne różnią się też rodzajem platformy, na której mogą być montowane oraz rodzajem źródła światła. Platformą mogą być satelity, samoloty, drony, maszyny rolnicze czy pojazdy terenowe. Rodzaj platformy ma wpływ na wymiar obiektu, jaki może być badany, wielkość powierzchni objętej polem widzenia czujnika i czas dostarczenia danych. Czujniki korzystające z energii słonecznej są określane mianem pasywnych, zaś posiadające własne modułowane źródło światła o określonej długości fal to czujniki aktywne. W drugim przypadku czujnik oświetla obiekt i fotodioda mierzy światło odbite. Takie rozwiązanie umożliwia wykonanie pomiarów o każdej porze dnia. Aktywne źródło światła mają satelity radarowe (np. Radarsat-2) oraz urządzenia montowane na pojazdach naziemnych w rolnictwie (tab. 4.1) (Ortiz i in., 2011)

Tabela 4.1. Charakterystyka niektórych czujników teledetekcyjnych do zastosowania w rolnictwie

Czujnik	Platforma	Źródło światła	Rodzaj danych	Rozdzielczość		
				spektralna nm	przestrzenna m	czasowa doba, godzina
IKONOS	satelita	pasywny	multispektralny	400-1100	4	2-3 dni
QuickBird	satelita	pasywny	multispektralny	450-900	2,5	2-5 dni
Landsat	satelita	pasywny	multispektralny	440-1250	30	16
Spot	satelita	pasywny	multispektralny	500-890	20	26
Rapideye	satelita	pasywny	multispektralny	440-850	6,5	1
EO-1/Hyperion	satelita	pasywny	hiperspektralny	400-2400	30	16
GreenSeeker	pojazd naziemny	aktywny	multispektralny	656 i 774	0,6	godzina
Crop Circle	pojazd naziemny	aktywny	multispektralny	konfigurowalny VIS/NIR	0,6	godzina

Źródło: Ortiz i in. 2011

Satelita QuickBird jest najczęściej wykorzystany do pozyskania informacji o stanie azotu w roślinach. Pasma zielone (520-600 nm), czerwone (630 nm) i bliska podczerwień (760-900 nm), w których satelita rejestruje dane, są istotne dla rozpoznania braku wody i azotu. Do wad systemu należy zaliczyć wysokie koszty pozyskania, zakłócenia spowodowane pogodą (chmury), długi czas opracowania obrazu, opóźnienie pomiędzy

wykonaniem zobrazowania, a dostępnością tej informacji dla użytkownika. Większych możliwości można się spodziewać dzięki nowym rozwiązaniom hiperspektralnym (Sims i in., 2014).

Światło padające na powierzchnię jest częściowo odbite, częściowo transmitowane a pozostałe jest absorbowane. Udział poszczególnych ww. składowych zależy od rodzaju powierzchni i zmienia się w zależności od długości fal światła (Jackson i Hute, 1991). W praktyce na charakter odpowiedzi spektralnych ma jednak wpływ szereg czynników, takich jak jasność, kolor i wilgotność gleby oraz inne uwarunkowania środowiskowe i widmo spektralne obszarów roślinnych jest wypadkową ich oddziaływania (Bannari i in., 1995). Prosty pomiar światła odbitego nie jest więc wystarczający do scharakteryzowania powierzchni w sposób powtarzalny. Z problemem tym można się uporać poprzez kombinację danych zarejestrowanych w dwóch lub więcej pasmach spektralnych i wyznaczenie wskaźnika wegetacyjnego. W przypadku roślinności są to zazwyczaj pasma światła widzialnego (VIS) oraz bliskiej podczerwieni (NIR). W odniesieniu do roślinności większość światła w NIR jest transmitowana i odbita z minimalną absorpcją (wpływ struktury liścia), zaś w zakresie światła widzialnego (VIS) przeważa absorpcja, a odbicie i transmisja są minimalne (wpływ obecności chlorofilu). Wskaźniki wegetacyjne mogą powstać przez ilorazy, różnice, ilorazy różnic i sum danych spektralnych (Jackson i Hute, 1991). Są to wzory matematyczne do oszacowania prawdopodobieństwa obecności zielonej roślinności na podstawie pozyskanych danych teledetekcyjnych. Wskazują ilość roślinności (procent pokrycia, biomase), odróżniają ją od gleby, redukują wpływ czynników otoczenia, w tym topografii terenu. Opracowano kilkadziesiąt wskaźników wegetacyjnych w celu zwiększenia dokładności wyniku i zmniejszenia wpływu czynników otoczenia (Wiegand i in., 1991; Bannari i in., 1995; Silleos i in., 2006).

Najczęściej stosowany jest znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacyjny NDVI (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*), równanie 3, który jest ilorazem różnicy odbicia w pasmach bliskiej podczerwieni i czerwonym do sumy odbicia w tych pasmach wyrażonych w procentach (Bannari i in., 1995; Verhulst i Govaerts, 2010; Ali i in., 2016):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (3)$$

Zdrowa i bujna roślinność pochłania większość światła widzialnego i odbija w paśmie bliskiej podczerwieni, więc typowe wartości dla roślinności to 0,2-0,7. Wartości <0,2 oznaczają roślinność rzadką i w złym stanie, zaś >0,6 odwrotnie (Ali i in., 2016). Teoretycznie wartości NDVI mogą się wahać od -1 do 1. Wartości ujemne odpowiadają obecności wody, zaś zerowe brakowi wegetacji.

Rozwój technologii RP sprawia, że popularne stały się systemy do zdalnego oznaczenia kondycji roślin. Wśród obecnie komercyjnie dostępnych optycznych systemów stosowanych w rolnictwie wymienia się następujące: SPAD (Konica Minolta, Japonia), HYDRO N-Tester (Yara International), DUALEX i Multiplex (Force A, Francja), N-Sensor ALS (Yara), GreenSeeker (Trimble, USA), CropCircle (Holland Scientific,

USA), CroSpec (Topcon, Japonia), ISARIA (Fritzmeier, Niemcy), OptRx (AgLeader, USA) (Reckleben, 2011, 2014; Povh i dos Anjos, 2014).

Najprostszy systemy do oceny odżywienia roślin azotem są chlorofilometry. W praktyce znane są trzy typy – SPAD-502- Soil-Plant Analyses Development, HYDRO N Tester oraz DUALEX.

W chlorofilometrze SPAD-502 podczas pomiaru część liścia zamyka się w komorze, w której u góry znajdują się źródła światła czerwonego (640 nm) oraz podczerwonego (940 nm), zaś światło, które przeniknęło liść jest sekwencyjnie mierzone czujnikami znajdującymi pod liściem (Muñoz-Huerta i in. 2013; Ali i in. 2016). Iloraz absorpcji światła w tych pasmach jest wskaźnikiem zawartości chlorofilu (Samborski i Rozbicki, 2004; Zagóřda i in., 2007). Na podobnej zasadzie pracuje HYDRO N Tester. W obu przypadkach wyniki pomiaru są niemianowane i odpowiadają względnej zawartości chlorofilu. Dla chlorofilometru SPAD-502 wahają się one w zakresie 1-100, zaś dla Hydro N Tester w zakresie 0-800 i krytyczne wartości, przy których wskazane jest nawożenie azotem, zależą od rośliny i warunków uprawy (Ali i in., 2016).

Zasada użytkowania DUALEX-u oparta jest na właściwościach fluorescencyjnych roślin (Sulkiewicz i Ciereszko, 2016). Urządzenie jest obsługiwane w podobny sposób jak chlorofilometr, ale ocenia się zawartość polifenoli w liściach (Samborski i in., 2009). W wyniku wielu lat badań i doświadczeń okazało się bowiem, że polifenole, a zwłaszcza flawonoidy są dobrymi wskaźnikami stanu odżywienia roślin azotem. Polifenole to wtórne metabolity roślin, wytwarzane przy braku azotu. Odgrywają one istotną rolę jako ochrona chemiczna, m.in. przeciwko szkodnikom lub przed promieniowaniem UV (Muñoz-Huerta i in., 2013).

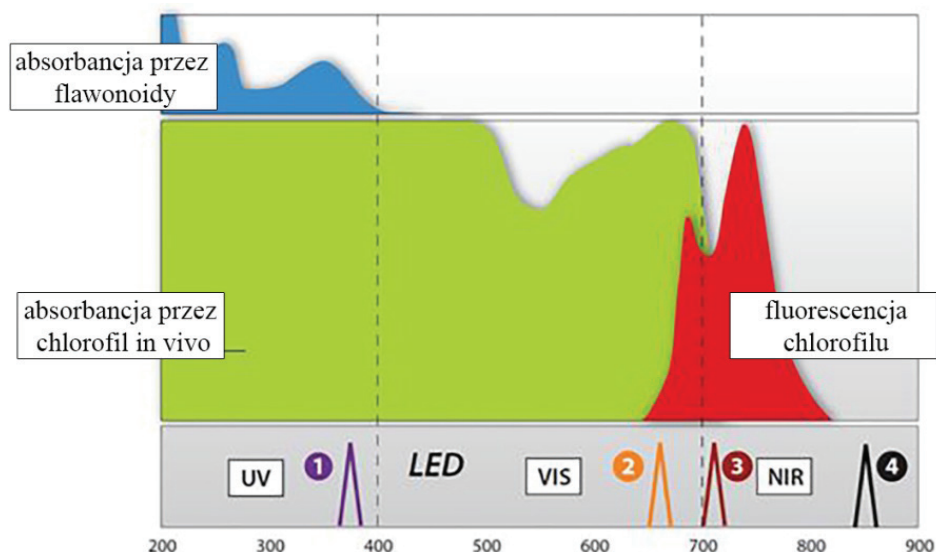
Za pomocą systemu DUALEX możliwe jest wyznaczenie trzech wskaźników: absorpcji flawonoidów, względnej zawartości chlorofilu oraz bilansu azotu w roślinie (<ftp://ftp.dynamax.com/DynamaxPDF/Dualex.pdf>).

DUALEX mierzy zawartość flawonoidów poprzez fluorescencję chlorofilu (Goulas i in., 2004; Goffart i in., 2008). Urządzenie emituje światło o dwóch długościach fali wzbudzenia: światło UV (375 nm) do wzbudzenia chlorofilu oraz referencyjne światło czerwone REF (650 nm). Promienie te są aktywowane sekwencyjnie. Obie długości fal wzbudzają fluorescencję chlorofilu, ale promienie UV są pochłaniane tylko przez flawonoidy, odpowiednio do ich koncentracji w liściu (Muñoz-Huerta i in., 2013). Absorbancja, jako miara absorpcji przez flawonoidy jest obliczana jako iloraz wskaźnika fluorescencji chlorofilu wywołana promieniami UV oraz promieniami w paśmie czerwonym (rys. 4.39). Druga uzyskana informacja to względna zawartość chlorofilu WZCH, którą oblicza się na podstawie pomiaru przepuszczalności światła w dwóch zakresach długości fal (równanie 4).

$$WZCH = (NIR - R) / R \quad (4)$$

Pierwszy pomiar, bardzo blisko światła czerwonego (rys. 4.38, punkt 3), ma związek z zawartością chlorofilu, drugi pomiar jest w zakresie bliskiej podczerwieni NIR (rys. 4.38, punkt 4) i uwzględnia strukturę liścia.

Na podstawie wykonanych pomiarów można obliczyć bilans azotu w roślinie *NBI* (ang. *Nitrogen Balance Index*) jako iloraz zawartości chlorofilu do zawartości polifenoli (ftp://ftp.dynamax.com/DynamaxPDF/Dualex.pdf). Według Cerovica i in. (2012) wskaźnik ten dotyczy bardziej zmian w ilościowym stosunku węgla organicznego (C) do azotu (N) na skutek niedoboru azotu, niż jego zawartości w liściach per se.



Źródło: <ftp://ftp.dynamax.com/DynamaxPDF/Dualex.pdf>

Rysunek 4.39. Pasma absorpcji promieniowania przez flawonoidy przez liść oraz fluorescencji chlorofilu

Zalety wyżej opisanych ręcznych urządzeń, do których można zaliczyć możliwość przenoszenia, szybkie pomiary i dostępność sprawiły, że przeprowadzono wiele badań ich zastosowania do szacowania azotu w uprawie różnych roślin. Stwierdzono, że na wynik pomiaru chlorofilu ma wpływ szereg czynników, takich jak faza rozwoju roślin, odmiana, woda glebowa oraz brak pierwiastków innych niż azot. Cerovic i in. (2012) podają również wpływ budowy anatomicznej liścia. Mimo tych ograniczeń, uzyskane informacje wspomagają w praktyce decyzję w zakresie nawożenia azotem (Cerovic i in., 2012), umożliwiając wykrycie początku niedoboru azotu, niewidocznego dla ludzkiego oka i dokonania korekty (Shapiro i in., 2006; Ali i in., 2016). W wielu opracowaniach zaproponowano metody postępowania, by uzyskać wiarygodne wyniki. Należy zaznaczyć, że ich przydatność ogranicza się do zastosowania na małych powierzchniach.

Wyniki pomiaru chlorofilometrami dotyczą bezpośrednio ilości azotu w liściach, zaś systemy montowane na ciągniku w większości mierzą parametry do wyznaczenia wskaźnika NDVI, który odnosi się do wielkości powierzchni liści (Samborski i in.,

2009). Złane są teŹ systemy mierzącą koncentracj chlorofilu w liściach metod fluorescencji (Reckleben 2011, 2014), ale wg Heege i in. (2008) wskaźnik NDVI, czyli ocena biomasy, jest w odniesieniu do zwarteo łanu bardziej niezawodną informacj o zapotrzebowaniu na azot. Zaznaczają jednak, Ź wszystkie systemy pracujące na zasadzie odbicia promieniowania obarczone są błędem, kiedy w obszarze pola widzenia czujnika jest gleba pozbawiona roślinnořci. Jest tak w przypadku zbóŹ i rzepaku podczas pierwszego nawoŹenia pogłównego i w tym celu niezbędne są doświadczenia z różnymi roślinami w aspekcie ich rozstawu i faz rozwojowych, które pomog ustalić kierunek skanowania, by ten błąd wyeliminować. Takich problemów nie napotyka się w przypadku urządzeń wykorzystujących zjawisko fluorescencji, w których wynik pomiaru w ogóle nie zaleŹy od biomasy i które byłby przydatne do zastosowania we wcześniejszej fazie rozwoju roślin, jak równieŹ do upraw szerokokorŹdowych.

We wszystkich aktywnych czujnikach N-Sensor ALS, GreenSeeker, CropCircle i CropSpec, OptRx, stan odŹywienia azotem określony jest poprzez pomiar charakterystyki odbicia w pasmach VIS/NIR, w różnych długořciach fali. Mimo Ź czujniki te rŹnią się pod względem skanowanej powierzchni, jak równieŹ długořci wykorzystanych fal, to wszystkie realizuj to samo zadanie. Obliczany jest wskaźnik NDVI lub inne wskaźniki wegetacyjne (Wiegand i in., 1991; Heege i in., 2008), na podstawie których wyprowadzony jest algorytm pozwalający wyznaczyć optymalną dawk azotu z wykorzystaniem referencyjnych fragmentów pola, odpowiednio nawoŹonych azotem (Ali i in., 2016). Kipp i in. (2014) stwierdzili, Ź największy wpływ na dokłdnořć odczytu danych spektralnych miała odległořć czujnika od powierzchni roślin, czřciowo równieŹ temperatura urządzenia. Kim i in. (2012) badali komercyjnie dostępny czujnik GreenSeeker pod względem wpłwu wielu czynników na wskazania NDVI. Stwierdzili około 10% spadek wartořci NDVI podczas pomiarów w południe i 41% wzrost przy pomiarze wilgotnej powierzchni liřci. Zwracają uwagę na rŹne aspekty związane z prawidłowym uŹytkowaniem urządzenia w celu poprawy dokłdnořci pomiarów.

Jedynym obecnie komercyjnym urządzeniem, które oprócz informacji o aktualnym stanie wegetacji wykorzystuje równieŹ inną informacj dla bardziej dokłdnego określania dawki nawozu jest ISARIA (Fritzmeier), dostępny pod nazwą CLAAS Crop Sensor ISARIA (Rataj i in., 2014). Wykorzystuje mapy potencjalnego plonu, które są opracowane na podstawie zdjęć satelitarnych z poprzednich lat i okreřla miejsca, gdzie w przeszłci osiągano plony ponadprzeciętne, przeciętne i poniŹej przeciętnej. Dla tak zdefiniowanych miejsc na polu system stosuje odpowiednią krzywą dawkowania potrzebnej ilořci azotu.

Sposób dawkowania azotu jest następujący:

- docelowe zapotrzebowanie na azot w danym miejscu pola, dla danej fazy rozwojowej rořliny, jest określone przez krzywą plonow (plon niski, řredni, wysoki),
- czujnik za pomocą indeksu wegetacyjnego okreřla aktualne odŹywienie roślin azotem,
- aplikowane zapotrzebowanie stanowi rŹnica pomiędzy docelową dawk, a aktualnym stanem.

Z powyższego wynika, że rośliny wykazujące taki sam indeks, mogą otrzymać różne dawki nawozu w zależności od tego, w jakim obszarze pola rosną. Celem takiego postępowania jest uzyskanie maksymalnego plonu w danym miejscu. Na obszarach, gdzie ze względu na potencjał plonowy gleb większe dawki N nie byłyby wykorzystane, azot jest aplikowany tylko w niezbędnej ilości. Prezentowana tutaj zasada określana jest mianem kalibracji absolutnej, która obecnie jest dostępna dla pszenicy ozimej. W tym systemie wykorzystuje się odbicie w 4 wybranych długościach fali, z których obliczany jest indeks wegetacyjny IRMI (ang. *Isaria REIP Mess Index*) oraz IBI (ang. *Isaria Biomasse Index*).

4.4. Systemy wieloczuJNIKowe

Przestrzenna i czasowa zmienność właściwości gleby oraz warunków meteorologicznych wpływa na wzrost roślin, uzyskaną wysokość plonu i jego jakość. By zapewnić rentowność gospodarstw oraz ochronę środowiska, sposób zarządzania musi być dostosowany do zmiennych warunków na polu. Do oceny gleby i roślin bierze się pod uwagę wiele alternatywnych metod i uzupełniające metody konwencjonalne. Za pomocą metod geofizycznych można uzyskać informacje o właściwościach gleby ornej i podornej, zaś poprzez teledetekcję satelitarną lub zbliżeniową czujnikami hiperspektralnymi informacje o roślinach z różną rozdzielczością spektralną (De Benedetto i in., 2013).

Jednym z największych ograniczeń każdego zarządzania z wykorzystaniem czujników jest fakt, iż praktycznie każda warstwa informacji zależy od więcej niż jednej właściwości terenu, gleby czy rośliny, zastosowanej do opisu warunków wzrostu i procesu. To sprawia, że strategię podejmowania decyzji cechuje niepewność lub znaczna złożoność, kiedy ma być zastosowana w różnych warunkach produkcyjnych. Jeśli zastosuje się koncepcyjnie różne techniki pomiaru i zintegruje się pozyskane dane, to stwarza się większą możliwość uzyskania bardziej dokładnej oceny danej właściwości, bardziej solidnego zarządzania i lepszego dopasowania zarządzania na bazie czujników (Adamchuk i in., 2011b). Według Schirmanna i in. (2011a) należy zwrócić uwagę na zastosowanie odpowiednich metod modelowania, ponieważ w ich przypadku połączenie informacji o przewodności gleby EC_a oraz odczynu pH z danymi pozyskanymi ze spektrometru nie poprawiło predykcji makroelementów przy zastosowaniu metody PLSR (regresji cząstkowych najmniejszych kwadratów), a przyczyny dopatrują się w niedużej zmienności wielkości docelowych.

Rolnictwo precyzyjne oparte jest na lokalnym zarządzaniu pola, zakładając z reguły jego podział na podstawie wysokości plonowania. Oznacza to, że wpływ na plony warunków pogodowych, gleby i topografii uważa się praktycznie za jednakowy na całym polu. Ale w poszczególnych latach ma miejsce zmienność plonów, spowodowana interakcjami pomiędzy czynnikami biotycznymi, abiotycznymi i klimatycznymi. Do wyznaczania na polu obszarów różniących się warunkami produkcyjnymi potrzebne są również informacje o glebie i terenie (Castrignanò i in., 2012). Topografia i gatunek

gleby to kluczowe czynniki mające wpływ na zmienność środowiska wzrostu roślin. Zmienność we wzroście roślin jest wynikiem różnorodności w mikrośrodoisku wraz z praktykami uprawowymi. Zdolność dokładnego rozpoznania i uwzględnienia tych różnic może podnieść efektywność produkcji (Adamchuk i in., 2011b) i dlatego wiele badań koncentruje się na opracowaniu metod wyznaczania granic obszarów na polu, które są w miarę jednolite pod względem warunków produkcyjnych (De Benedetto i in., 2013).

Jak już wspomniano, za pomocą metod geofizycznych można przy niskich kosztach i bezinwazyjnie pozyskać duże ilości pośrednich i dokładnych informacji na temat fizycznych właściwości gleby zarówno warstwy ornej, jak też podornej (De Benedetto i in., 2013). Wyniki z pojedynczych urządzeń nie muszą być jednak odpowiednie do zastosowania w systemie wspierającym decyzje, ponieważ mogą być one rezultatem wpływu więcej niż jednej właściwości agrotechnicznej gleby (Adamchuk, 2011a). De Benedetto i in. (2012) stwierdzają, że w określonych warunkach, np. w przypadku wysokiej zawartości ilu lub na glebach mokrych, pojedynczy czujnik nie dostarcza rzeczywistej informacji o danej właściwości gleby i ma on ograniczone zastosowanie. Według Castrignanò i in. (2012) za pomocą powszechnie stosowanej sondy elektromagnetycznej można czasem nie rozpoznać różniących się między sobą gleb na danym polu, a Wong i in. (2010) podają, że sam pomiar przewodności elektromagnetycznej EC_a nie wystarczy do rozróżnienia rodzaju piasku, czy odróżnienia piasku od żwiru. Poza tym większość komercyjnie dostępnych czujników glebowych nie mierzy właściwości gleby wprost, lecz reakcję gleby (np. EC_a , naturalnie występujące promieniowanie gama), która jest wynikiem kilku właściwości gleby (Taylor i in., 2010). Niektóre z nich są stałe w czasie (np. rodzaj ilu), inne mogą być zmienne w ciągu dnia lub tygodnia (np. wilgotność gleby) lub miesięcy i lat (np. zawartość materii organicznej, pH). W pomiarach różnych właściwości gleby oczekuje się stosowania różnych wzajemnie uzupełniających się czujników i w rolnictwie precyzyjnym mogą znaleźć zastosowanie bardziej wydajne kombinowane systemy. Badania geofizyczne z większą liczbą czujników (więcej niż jeden) staną się standardem, ze względu na różnorodność informacji o polu, niezbędnych do właściwego zarządzania (Allred, 2011; De Benedetto i in., 2013). Wybór optymalnego zestawu czujników zależy od praktycznych potrzeb i dostępności czujników. De Benedetto i in. (2013) na podstawie badań, w których zastosowali jednocześnie cztery różne czujniki stwierdzają, iż najprostszy zestaw do oceny gleby i roślin powinien zawierać pomiar przewodności lub oporności gleby oraz ręczny hiperspektralny czujnik do oceny stanu roślin. Ich zdaniem, ze względu na wpływ zmienności mikroreliefu na stan plantacji, ważne są też pomiary wysokościowe (mapy elewacji) z dokładnością submetrową. Kolejny problem stojący przed nauką to opracowanie zintegrowanego systemu, na który składa się więcej niż jedno urządzenie (Allred, 2011). Obecnie przykładem komercyjnie dostępnego zintegrowanego czujnika jest VERIS (Taylor i in., 2006). Istnieją już wieloczujnikowe systemy oparte na pojedynczej metodzie geofizycznej (przewodność elektromagnetyczna, georadar), mające więcej cewek nadawczo-odbiorczych oraz więcej niż dwie anteny (Allred, 2011). Przykładem takiego urządzenia pracującego na podstawie po-

miaru przewodności elektromagnetycznej jest wcześniej wspomniane urządzenie Top Soil Mapper (TSM). Kolejnym krokiem wg Allreda (2011) jest zintegrowanie takiego urządzenia z maszyną, co w przypadku czujnika TSM również zostało zrealizowane.

Według Adamchuka i in. (2010b) scalanie danych z wielu czujników to proces pozyskania, filtrowania, korelowania i integrowania istotnych informacji z różnych źródeł do formatu odpowiedniego dla podejmowania decyzji w aspekcie agrotechnicznym i środowiskowym. Wyżej cytowani autorzy wymieniają następujące zalety wieloczynnikowego zintegrowanego urządzenia w zbliżeniowych pomiarach gleby:

- fuzja wzajemnie uzupełniających się informacji skutkuje uzyskaniem pełniejszej informacji niż w przypadku tylko jednego źródła,
- można uzyskać bardziej aktualne informacje ze względu na taką samą prędkość poruszania się przez wszystkie czujniki oraz równoległość przetwarzania podczas integrowania danych,
- wydajność zabiegu się poprawia, ponieważ zawsze z któregoś czujnika otrzyma się informacje, kiedy pozostałe będą niedostępne,
- zasięg pomiarów jest poszerzony, ponieważ różne czujniki mogą docierać do różnych miejsc,
- zwiększa się pewność wykonania pomiarów, kiedy na tej samej glebie pracuje kilka czujników,
- zmniejsza się ryzyko wykluczenia części powierzchni z pomiarów.

Należy więc skupiać się na integracji danych z różnych czujników, by wykorzystać korzyści wynikające z teledetekcji, zbliżeniowych pomiarów gleby i łanu roślin oraz mapowania plonów. W związku z rosnącą liczbą danych pozyskanych z różnych urządzeń Castrignanò i in. (2015) akcentują potrzebę prowadzenia badań nad techniką łączenia danych, jak również nad wykorzystaniem różnych ustawień czujników. Podobnie jak Shaddad i in. (2016), do łączenia danych pochodzących z pomiarów różnymi czujnikami zastosowali wieloczynnikowe narzędzia geostatystyczne w celu poprawy predykcji właściwości gleby.

Zintegrowanie różnych pomiarów w jeden system mapowania jest jednym z aktualnych problemów badawczych (Adamchuk i in., 2010b). Dlatego zdaniem Adamchuka (2011) uwaga powinna skupiać się na:

- integrowaniu czujników, które będą w różnym stopniu reagować na różne zjawiska w glebie,
- opracowaniu metody kalibracji, by zdefiniować zależność pomiędzy wynikami pomiarów czujnika oraz wynikami laboratoryjnymi,
- integracji danych w celu wykorzystania korzyści wynikających z teledetekcji, zbliżeniowych pomiarów łanu roślin i mapowania plonów dla optymalizacji zabiegów uprawowych.

Kluczową sprawą jest dostępność urządzeń, niewygórowane ceny i przydatność dla produkcji rolniczej, rekultywacji gruntów i innych sytuacji, w których zmienność glebowa odgrywa istotną rolę.

Należy też wspomnieć o celach wytyczonych w dużych projektach realizowanych w ramach 7 Europejskiego Programu Ramowego o nazwach DIGISOIL (Gradjean i in.,

2010) oraz iSOIL (Werban i in., 2009), które wciąż są aktualne. Wśród nich znajdują się takie zadania, jak (a) opracowanie i przetestowanie najważniejszych technik geofizycznych (m.in. georadar, przewodność elektromagnetyczna, metody optyczne) do mapowania właściwości gleby, (b) opracowanie korelacji pomiędzy parametrami geofizycznymi oraz właściwościami gleby w odniesieniu do erozji, ugniatania, ubytków materii organicznej, zasolenia itp., (c) ocena opracowanych technologii pod kątem ich znaczenia dla użytkownika, wykonalności technicznej oraz opłacalności, (d) opracowanie sposobu użytkowania włącznie ze standaryzacją procesu i specyfikacją techniczną składowych systemu pomiarowego.

5. TECHNIKI MAPOWANIA PLONÓW RÓŻNYCH ZIEMIOPŁODÓW

W krajach o rozwiniętym rolnictwie istnieją zaawansowane metody określenia produktywności działki rolnej, które prowadzą do identyfikacji i optymalizacji rozwiązań w zakresie mechanizacji (Boling i in., 2010). Zmienna wielkość pól w produkcji roślinnej powoduje, że na wielkość plonu ma wpływ duża liczba czynników (Zalewski, 2000). Technologia rolnictwa precyzyjnego wymaga pozyskania tych danych w celu wyznaczenia prawidłowego postępowania podczas uprawy roślin i w technologii siewu, nawożenia, nawadniania, zwalczania chwastów i szkodników oraz zbioru, przede wszystkim kombajnowego (Munack, 2004). Jedną z podstawowych informacji jest wielkość plonu (Faber, 1998b; Godwin i in., 2003; Lisowski, 2005). Technologia cyfrowej obróbki danych oraz możliwość precyzyjnego określenia położenia na polu z dokładnościami centymetrowymi przyczyniły się do powiązania informacji o wielkości plonu ze współrzędnymi miejsca pomiaru w postaci monitoringu plonu (Faber, 1998a). Wykorzystanie oprogramowania GIS do analizy przestrzennych informacji o plonie i właściwościach gleby umożliwia wyznaczenie głównych czynników wpływających na plon (Berry, 1999). Monitorowanie plonu musi przebiegać przez kilka lat, aby można było na jego podstawie podejmować decyzje (Berry, 1999).

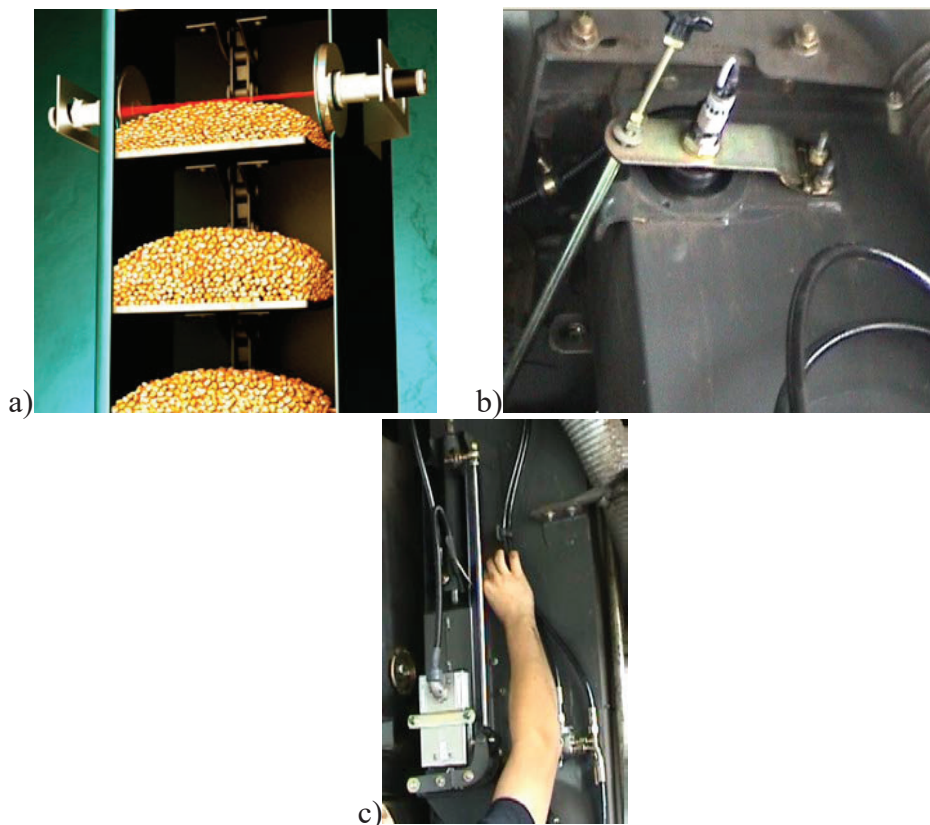
Systemy automatycznej rejestracji plonów z uwzględnieniem współrzędnych geograficznych i pomiarem wilgotności ziarna są proponowane przez wszystkich producentów maszyn do zbioru, a zasada ich działania została opisana w wielu opracowaniach (Boling i in., 2010; Gozdowski i in., 2007; Jankowiak, 2000; Kobylarz, 1998; Příkryl, 1998). Monitoring plonu roślin okopowych i zielonek nie dorównuje poziomem rozwiązaniom technicznym, jakie stosowane są w kombjanach zbożowych, w związku z tym metody te są testowane i doskonałe (Klonowski i Lisowski, 2005; Lisowski i Klonowski, 2005).

Podstawową informacją umożliwiającą podjęcie decyzji o wprowadzeniu technologii rolnictwa precyzyjnego jest pozyskanie informacji o plonie i nie dotyczy to tylko informacji o ogólnej ilości zebranego plonu, ale również o jego przestrzennym zróżnicowaniu. Berry (2004) podaje, że wprowadzenie tej nowoczesnej i kosztownej technologii jest opłacalne w przypadku kiedy zmienność plonów przewyższa 25%. Zestawienie systemów monitoringu plonu stosowanych na całym świecie (Voicea i in., 2011):

1. System CEBIS Caterpillar (rys. 5.1) - pomiar przepływu ziarna za pomocą fotokomórki;
2. System FieldStar AGCO (wersja europejska) (rys. 5.2) - pomiar przepływu ziarna za pomocą wirnika łopatkowego;
3. System FieldStar AGCO (wersja europejska) (rys. 5.3) - pomiar przepływu ziarna za pomocą detektora promieniowania;
4. System AFS AG-Leader & Case IH (rys. 5.4) - czujnik, który mierzy przepływ masowy za pomocą przetwornika siły;

5. System Fieldstar Micro-Trak Grain-Trak AGCO (rys. 5.5) (wersja amerykańska) - pomiar przepływu z przetwornika siły z palców pomiarowych;
6. System GreenStar John Deere (rys. 5.6) - pomiar przepływu z potencjometrem.

Pierwszy system bazuje na pomiarze czasu zasłonięcia fotokomórki przez ziarno i łopatki przenośnika ziarna (rys. 5.1 a). Do wyznaczenia objętości ziarna na łopatkę przenośnika potrzebne są jeszcze wymiary kanału transportowego (wymiar łopatki) oraz prędkość przesuwu przenośnika.



Źródło: a) www.polski-farmer.pl, b) i c) materiały własne

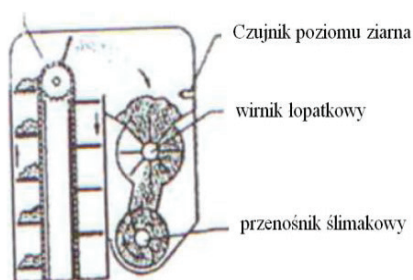
Rysunek 5.1. System CEBIS Caterpillar: a) fotokomórka,
b) mocowanie fotokomórki na przenośniku ziarna,
c) czujnik do pomiaru wilgotności zamocowany na przenośniku ziarna

W przypadku tego systemu ważne jest dostarczenie dodatkowej informacji dotyczącej nachylenia kombajnu, ponieważ przechył boczny ma duży wpływ na wskazanie. Informacje o czasie przesłonięcia fotokomórki, nachyleniu, prędkości i szerokości roboczej oraz masie objętościowej ziarna są analizowane przez komputer i przedstawiane na wyświetlaczu w postaci informacji o plonie. W przypadku wszystkich wy-

mienionych powyżej systemów podawane są takie dane jak: chwilowa wartość plonu ($t \cdot ha^{-1}$) i wilgotności ziarna (%), wydajność żniwna kombajnu ($ha \cdot h^{-1}$ i $t \cdot h^{-1}$), ilość zebranego plonu (t) itp. Ten system stosowany jest np. w kombajnach Tucano i Lexion firmy Claas. Kombajny marki Claas, które oznaczano naklejką 'Agrocom on-board', miały w standardzie zamontowany kwantymetr, czyli fotokomórkę do pomiaru plonu oraz wilgotnościomierz wraz z modułem przetwarzającym te sygnały na dane zrozumiałe dla komputera pokładowego CEBIS (Olszewski, 2010).

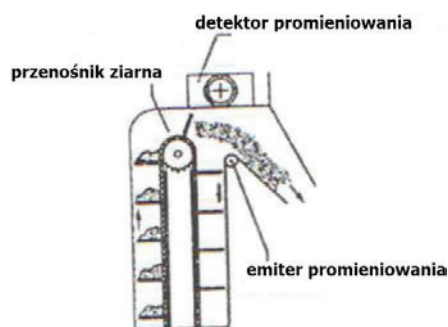
Drugie rozwiązanie to pomiar objętości ziarna za pomocą wirnika łopatkowego o znanej objętości komory pomiędzy łopatkami i obudową (rys. 5.2). Na podstawie informacji o objętości komór i obrotach wirnika zostaje określona objętość zebranego ziarna. Podobnie jak to miało miejsce w poprzednim systemie niezbędne jest jeszcze wprowadzenie informacji o masie objętościowej zbieranego ziarna i jego wilgotności, aby prawidłowo przeliczyć plon.

Kolejne rozwiązanie stosowane jest w kombajnach firmy Massey Ferguson i Gleaner. Pomiar ilości ziarna polega na pomiarze (detektorem) promieniowania wysyłanego przez emiter. Mierzona wartość energii jest odwrotnie proporcjonalna do ilości ziarna jakie zostało przerzucone przez wiązkę promieniowania pomiędzy emiterym i detektorem, a wynika to z faktu pochłaniania części promieniowania przez ziarno.



Źródło: Voicea i in., 2011

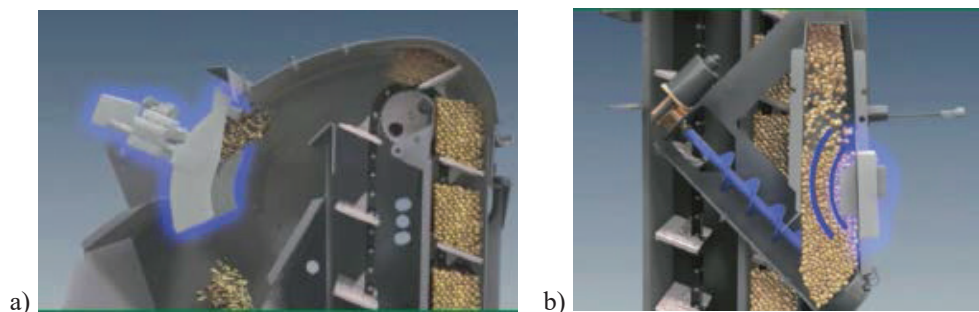
Rysunek 5.2. System FieldStar AGCO (wersja europejska)



Źródło: Voicea i in., 2011

Rysunek 5.3 System FieldStar AGCO pomiar radiacyjny (wersja europejska)

Kombajny firmy New Holland i Case IH mają podobne czujniki pomiaru plonu do tych montowanych na kombajnach firmy John Deere. Zasada pomiaru polega na pomiarze siły jaka jest wywierana na płytkę uderzeniową przez ziarno wyrzucane z przenośnika (rys. 5.4a). Masa ziarna jest bezpośrednio mierzona przez płytkę uderzeniową. Wilgotnościomierz pojemnościowy jest zamontowany na obudowie przenośnika żarnowego. Obie wielkości dotyczące właściwości zbieranych nasion, można na bieżąco monitorować na ekranie pokładowego komputera IntelliView III. W niektórych kombajnach jest również montowany system z fotokomórką firmy RDS (Olszewski, 2010).



Źródło: Olszewski, 2010

Rysunek 5.4 System AFS AG-Leader & Case IH – a) pomiar masy ziarna przez płytkę uderzeniową, b) pomiar wilgotności ziarna

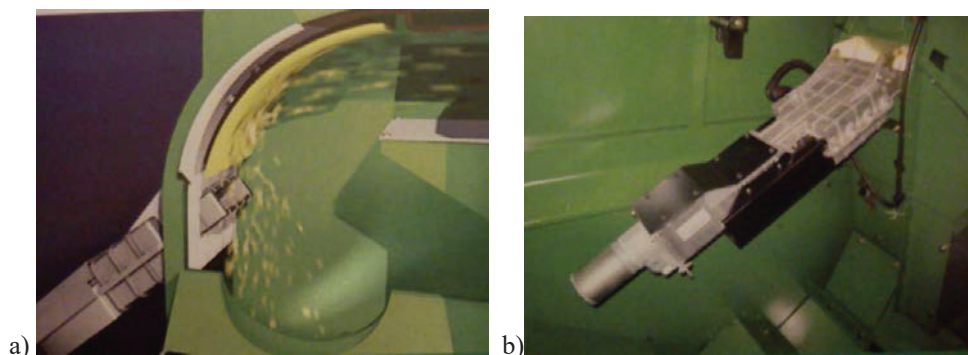
Podobnie jak w przypadku Ag-Leader oraz Case IH, systemy Micro-Trak i Grain-Trak używają przetwornika siły do pomiaru przepływu zboża z przenośnika do zbiornika. Do pomiaru wykorzystuje się zestaw „palców” pomiarowych (rys. 5.5), które są połączone z czujnikiem siły i przetwornikiem. Palce pomiarowe umieszczone są na drodze przepływu ziarna z wyjścia przenośnika ziarna do zbiornika. Wytworzona siła jest następnie zamieniana na sygnał elektryczny za pomocą przetwornika. Podobnie jak w innych układach, sygnał jest przesyłany do komputera, który wraz z informacją z czujnika wilgotności wyznacza wartość chwilową plonu.



Źródło: Voicea i in., 2011

Rysunek 5.5 System Fieldstar Micro-Trak Grain-Trak AGCO - pomiar plonu za pomocą „palców” pomiarowych

Ostatni system GreenStar jest proponowany przez amerykańską firmę John Deere i pozwala rejestrować oraz monitorować plon w kombajnach serii W, T, C i S. Funkcję tę najłatwiej uruchomić w maszynach z tzw. grupy 'i' (ang. *intelligence*), gdyż mają one w standardzie m.in. wagowy czujnik plonu, pojemnościowy czujnik wilgotności, HarvestDoc oraz AutoTrac Ready.



Źródło: Olszewski, 2010

Rysunek 5.6. System GreenStar John Deere - pomiar plonu za pomocą płytki uderowej:

a) płytki uderowej i wlot czujnika wilgotności ziarna, b) zamontowany w zbiorniku czujnik wilgotności ziarna

Sensor plonu, umieszczony na wylocie z łopatkowego przenośnika ziarnowego (rys. 5.6 a), mierzy siłę uderzeniową strumienia ziarna. Płytki uderowej połączone jest z elektronicznym czujnikiem hallotronowym w celu uzyskania precyzyjnego pomiaru wielkości plonu (<https://www.deere.pl>). Jego kalibracja jest bardzo prosta i jednorazowa. W tym celu wystarczy zważyć przyczepę z odebrany z określonego odcinka pola np. 50 m plonem, następnie pomniejszyć o masę własną środka transportowego i porównać z uśrednioną pod względem masy i wilgotności, wartością zmierzoną przez czujnik wagowy kombajnu. Producent podaje tolerancję błędu pomiaru plonu 3%. Z kolei dokładność wilgotnościomierza szacowana jest na 1%. Wspomniany czujnik nie jest standardowo umieszczony na boku przenośnika ziarnowego, jak ma to obecnie miejsce u większości konkurentów. John Deere zdecydował się umiejscowić go w zbiorniku ziarna. Część nasion po kontakcie z płytką uderzeniową do pomiaru plonu dostaje się do komory pomiarowej wilgotnościomierza. Interesującym rozwiązaniem jest elektrycznie napędzany tłok, który po każdym pomiarze czyści kanał z pozostałości, mogących fałszować wynik (Olszewski, 2010).

Posiadanie kombajnu wyposażonego w czujniki do pomiaru plonu nie gwarantuje jeszcze możliwości przedstawienia danych w postaci mapy przestrzennej zmienności plonu. Każdy z wymienionych powyżej systemów musi być wyposażony w odbiornik GNSS i oprogramowanie rejestrujące dane plonowe w połączeniu ze współrzędnymi geograficznymi.

Podgląd danych dotyczących wysokości plonu w poszczególnych kwaterach pola podczas jazdy kombajnem umożliwia terminal typu GreenStar np. GS3 2630 (rys. 5.7) marki John Deere. Wykonane mapy monitorowane są na jego kolorowym, dotykowym, 10,4-calowym wyświetlaczu. Zainstalowane w urządzeniu oprogramowanie Harvest-Doc służy do zbierania i gromadzenia informacji odnośnie do przebiegu parametrów plonu i wilgotności. Z kolei HarvestMonitor pozwala na bieżąco obserwować te wielkości w postaci mapy na ekranie komputera. Po przeniesieniu za pomocą portu USB map wydajności do komputera domowego, można wykonać mapę dawkowania nawo-

zu dla rozsiewacza nawozów, korzystając m.in. z oprogramowania JD Office (Olszewski 2010).



Źródło: Olszewski, 2010

Rysunek 5.7 Terminal GreenStar GS2 2600

Z pomocą niektórych terminali pełną mapę plonu wraz z izoliniami, przedstawiającymi obszary jego wielkości, można podejrzeć w czasie rzeczywistym podczas pracy, zaś w niektórych przypadkach dopiero po przetworzeniu zarejestrowanych danych za pomocą biurowego oprogramowania (Olszewski, 2010).

Terminal AFS 600 Pro (rys. 5.8), instalowany standardowo w większej serii 20 marki Case IH, a także na życzenie w mniejszych modelach z rodziny 88, pozwala obsługiwać zarówno operacje powiązane z ustawianiem i kontrolą samego kombajnu, jak i pełnym rolnictwem precyzyjnym (Olszewski, 2010).



Źródło: Olszewski, 2010

Rysunek 5.8 Terminal AFS 600 Pro

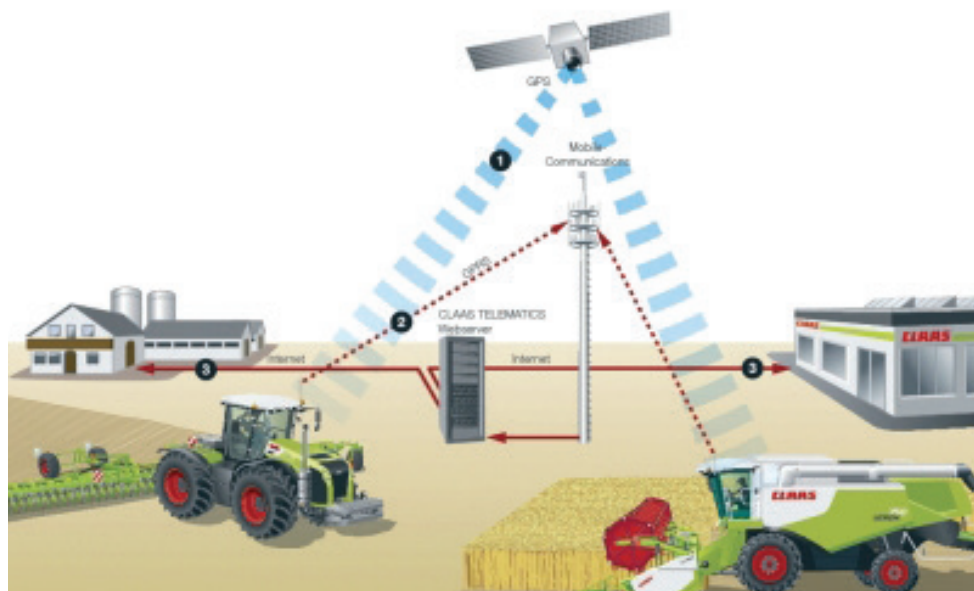
System AgLeader udostępnia możliwość pozyskania informacji o plonie przypadającym na powierzchnię nawet wtedy, gdy praca przebiega z niepełną szerokością roboczą kombajnu. System zbierania informacji o szerokości roboczej w panelach EDGE, VERSA, INTEGRA (rys. 5.9) jest systemem automatycznym i nie ma potrzeby koncentrowania uwagi na utrzymaniu stałej szerokości roboczej maszyny. Panele udostępniają możliwość monitorowania wielu parametrów pracy kombajnu poza zbieraniem informacji o wielkości i wilgotności plonu (<http://www.agrisystem.pl>).



Źródło: <http://www.agrisystem.pl>, <http://www.agleader.com>

Rysunek 5.9. Terminale AgLeader: a) EDGE, b) VERSA, c) INTEGRA

Zbierane dane mogą być następnie przenoszone do komputerów stacjonarnych przy użyciu tradycyjnej metody kart pamięci SD, PCIMCIA lub USB. Najnowsze rozwiązania, które wykorzystują technologię GPRS do połączenia z Internetem, umożliwiają przesył danych z kombajnu do gospodarstwa poprzez serwery producenta danego systemu (rys. 5.10). Oprócz przedstawionego rozwiązania proponowanego przez firmę Claas własne rozwiązania mają też inne firmy np. John Deere, Trimble, które to zostaną przedstawione w kolejnych rozdziałach niniejszego opracowania.



Źródło: <http://www.agrisystem.pl>, <http://www.agleader.com>

Rysunek 5.10. Zasada działania systemu Claas Telematics

6. SYSTEMY TECHNICZNE STOSOWANE W ZMIENNEJ APLIKACJI

Pojęcie zmiennej aplikacji VRA (ang. *Variable Rate Application*) w przypadku technologii rolnictwa precyzyjnego odnosi się do zabiegów agrotechnicznych, wykonywanych podczas uprawy roślin. Dotyczy to zabiegów, w których występuje aplikowanie środka produkcji do gleby, na jej powierzchnię lub na roślinę.

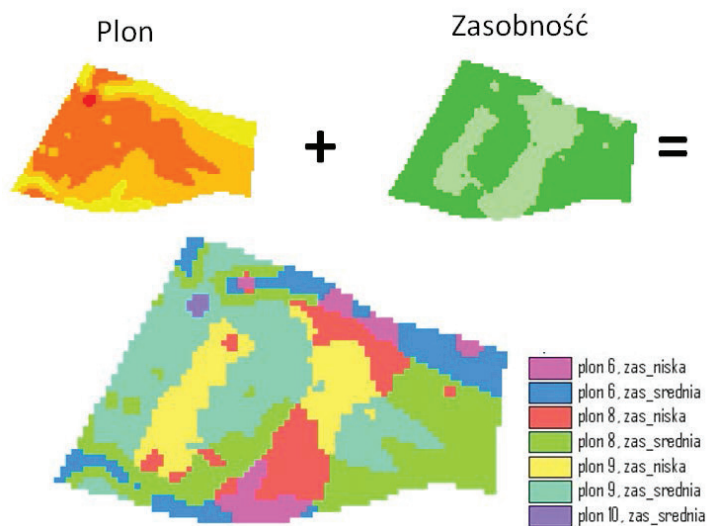
Aplikacja może się odbywać na dwa sposoby: a) *on-line*, kiedy wykonanie zabiegu i oceną warunków na polu przebiegają jednocześnie, b) *off-line*, z wykorzystaniem map aplikacyjnych przygotowanych na podstawie wcześniej wykonanych pomiarów. W przypadku pracy w trybie *on-line* zmienne dawkowanie jest ustalane na podstawie wskazań czujnika. Przykłady takich rozwiązań podano w rozdziale 4. Mimo że tutaj do wykonania zabiegu nie jest potrzebny sygnał GNSS, to z reguły jest on stosowany do rejestracji aplikowanych ilości. Jeżeli zabieg wykonuje się na podstawie map aplikacyjnych, to do wykonania zarówno pomiarów, jak i samego zabiegu niezbędny jest odbiornik GNSS. Ponieważ zarówno techniki wykorzystujące czujniki, jak i mapy aplikacyjne mają swoje wady i zalety, to podczas zmiennego dawkowania w niektórych rozwiązaniach stosuje się połączenie obu metod (Grisso i in., 2011).

6.1. Mapy aplikacyjne

Przygotowanie map aplikacyjnych wykonuje się w oprogramowaniu GIS lub programach, które mają taki moduł. Mapy te mogą powstawać na podstawie jednej lub wielu danych przedstawionych w postaci map przestrzennego zróżnicowania (rys. 6.1).

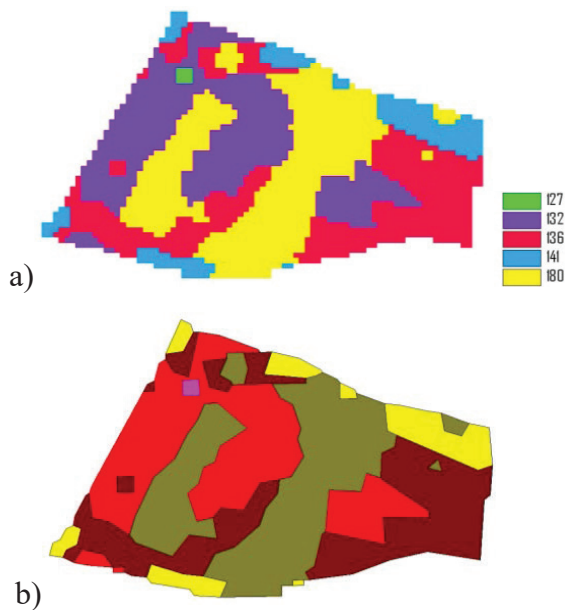
Wynik sumowania lub innego działania może być następnie podstawą do wyznaczenia optymalnej dawki w każdym miejscu pola w postaci mapy rastrowej lub wektorowej (rys. 6.2).

Podczas opracowania zebranych danych, które mogą występować w postaci rastrowej lub wektorowej, przed wczytaniem mapy i wykonywaniem działań na mapach dokonuje się ich wstępnej obróbki dotyczącej dopasowania pod względem układu współrzędnych i formatu (rastrowego lub wektorowego). Wynika to z ograniczeń liczby parametrów mapy aplikacyjnej, jakie nakładają komputery polowe i komputery sterujące dawką. Mniejsze problemy występują w przypadku kompleksowego wyposażenia przedsiębiorstwa rolnego w oprogramowanie i sprzęt pochodzący od jednego producenta. Jeżeli na wyposażeniu znajduje się kilka rozwiązań różnych producentów, to niekiedy potrzebne jest korzystanie z innych programów, aby przygotować dane dla operatora. Specjalistyczne oprogramowanie do RP i zarządzania gospodarstwem ograniczają do minimum konieczność wiedzy z zakresu GIS. Przygotowane algorytmy obróbki danych umożliwiają w łatwy i szybki sposób wykonanie map aplikacyjnych.



Źródło: Walczykova i Zagórda, 2005

Rysunek 6.1. Wynik sumowania informacji przestrzennych z dwóch map



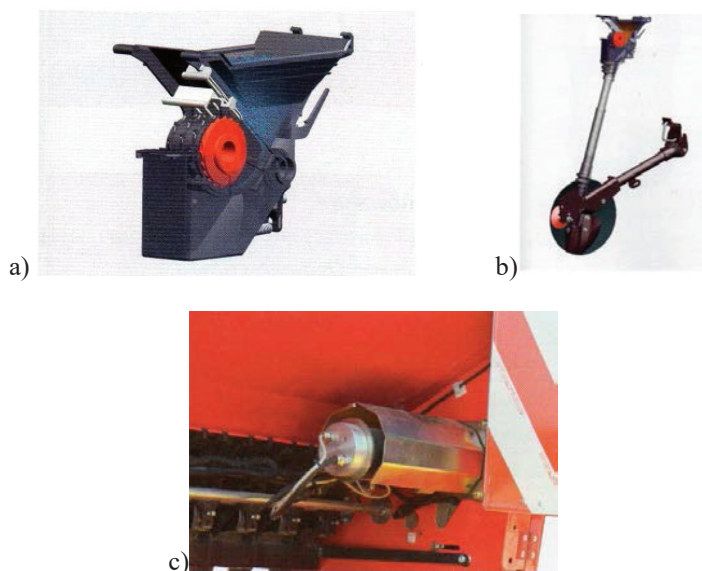
Źródło: Walczykova i Zagórda, 2005

Rysunek 6.2. Mapa aplikacji potasu: a) mapa rastrowa, b) mapa wektorowa

Mapy aplikacyjne w zależności od systemu RP, jakim dysponuje gospodarstwo, mogą być użyte na trzy sposoby. Pierwszy to skopiowanie mapy do komputera poleowego (tabletu, telefonu), podłączonego do komputera sterującego maszyną (za pomocą kabla, Bluetooth, Wi-Fi). Drugi sposób to skopiowanie mapy do panelu nawigacji równoległej, jeżeli jest on przystosowany do pracy w trybie VRA. Trzeci sposób to zapisanie mapy do komputera pokładowego ciągnika sterującego maszyną (standard ISO-BUS), jeżeli funkcja VRA została udostępniona (<https://www.deere.pl>). W niektórych przypadkach jest to uniwersalny komputer pokładowy umożliwiający sterowanie różnymi maszynami i udostępniający również nawigację równoległą np. IsoMatch Tellus dla maszyn firmy Kverneland (<http://pl.kvernelandgroup.com>).

6.2. Systemy techniczne siewników

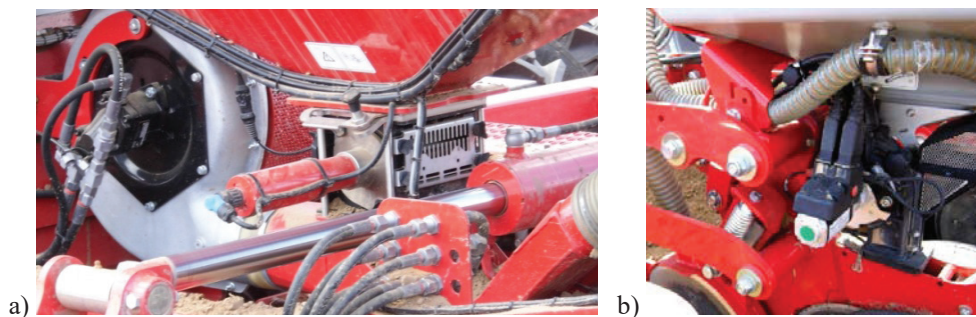
Niezbędnym wyposażeniem siewnika do zmiennego siewu jest komputer lub do którego można podłączyć zewnętrzny komputer z mapą aplikacyjną. Zazwyczaj zmiana dawki jest wykonywana poprzez zmianę prędkości dozowania nasion, a wyłączenie poszczególnych sekcji wykonuje się przez zamknięcie dopływu nasion do wałka wysiewającego (rys. 6.3 a) przy użyciu siłowników elektrycznych lub pneumatycznych. W siewnikach mechanicznych zmiana dawki jest możliwa tylko w przypadku zastosowania elektrycznego napędu (rys. 6.3 c) kół wysiewających wszystkich sekcji siewnika (rys. 6.3).



Źródło: materiały reklamowe firmy Pöttinger

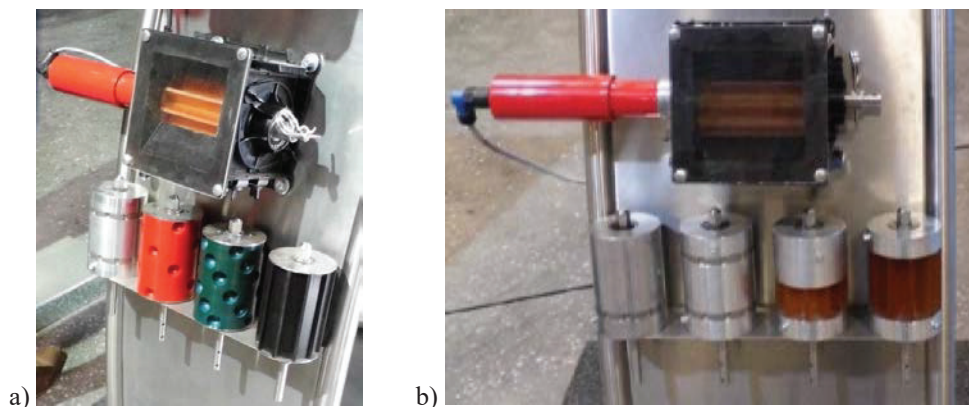
Rysunek 6.3. Budowa siewnika Vitasem firmy Pöttinger: a) wałek wysiewający, b) sekcja siewnika, c) elektryczny napęd wałka wysiewającego

W siewnikach pneumatycznych zmiana dawki wysiewu nasion wykonywana jest przez przesterowanie centralnego dozownika nasion (rys. 6.4a), a w siewnikach punktowych dozownika sekcji wysiewającej (rys. 6.4b). Zastosowanie indywidualnego napędu sekcji siewnika punktowego pozwala na zachowanie jednakowej odległości pomiędzy nasionami podczas siewu na łuku przy dużej szerokości roboczej maszyny. Takie rozwiązanie jest zastosowane w siewnikach Horsch Maestro i nosi nazwę „Horsch ContourFarming” (Terra Horsch, 2015).

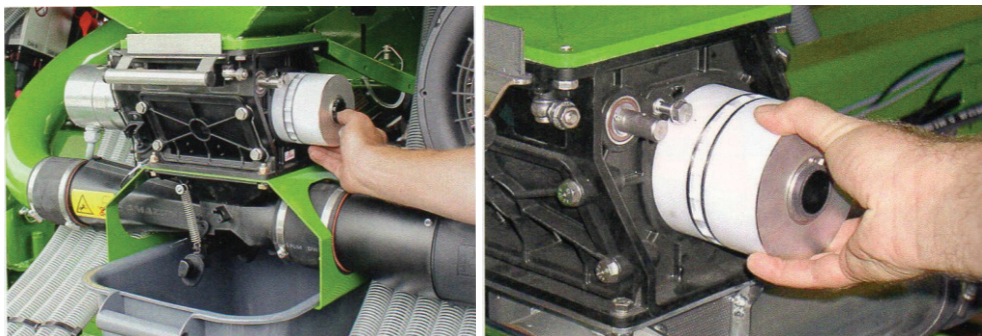


Rysunek 6.4. Rozwiązania konstrukcyjne dozowników ziarna w siewnikach pneumatycznych: a) siewnik rzędowy, b) napęd elektryczny dozownika sekcji siewnika punktowego

W siewnikach pneumatycznych zmienny wysiew nasion najczęściej odbywa się poprzez zmianę ilości podawanego materiału do redlic wysiewających. Ilość materiału może być regulowana poprzez prędkość obrotową walca dozującego oraz objętość komory na ziarno co pokazują rysunki 6.5 i 6.6.



Rysunek 6.5. Dozownik ziarna w siewnikach pneumatycznych firmy Horsch: a) walce wysiewające do nasion, b) walce wysiewające do nawozów



Źródło: materiały reklamowe firmy Amazone

Rysunek 6.6. Dozownik ziarna w siewnikach pneumatycznych firmy Amazone

Obecnie w celu ograniczenia ugniatania gleby i przejazdów po polu do siewu stosuje się agregaty uprawowo-siewne wyposażone dodatkowo w zbiorniki do wysiewu nawozów. Maszyny takie podczas jednego przejazdu uprawiają glebę, aplikują nawóz i wykonują siew nasion (rys. 6.7). Dozowanie nawozów odbywa się w identyczny sposób jak ziarna, a na komputerze sterującym siewnikiem podawane są informacje dotyczące zarówno siewu nasion, jak i rozsiewu nawozu.



Rysunek 6.7. Agregat uprawowo-siewny Horsch Focus 4 TD

Jednoczesny siew nasion z dozowaniem nawozu wymaga, aby mapa aplikacyjna zawierała nie tylko informację o dawce nasion, ale również o dawce nawozu. W niektórych rozwiązaniach jest stosowane dawkowanie 2 nawozów na różnych głębokościach i wtedy z mapy aplikacyjnej jest odczytana informacja dla 3 sterowników. Niektóre będą wymagały zastosowania dodatkowego komputera sterującego lub zmiany oprogramowania umożliwiającego obsługę kilku sterowników.

Zastosowanie elektroniki w siewnikach połączonych z nawigacją i systemem GNSS umożliwia precyzyjny siew na uwrociach i klinach. Ciągła rejestracja miejsc na polu, gdzie już został wykonany zabieg, pozwala na automatyczne wyłączanie poszczególnych sekcji w momencie wjechania na taki obszar i pozwala zaoszczędzić materiał siewny (rys. 6.8).



Źródło: materiały reklamowe firmy Amazone, <https://www.deere.pl>

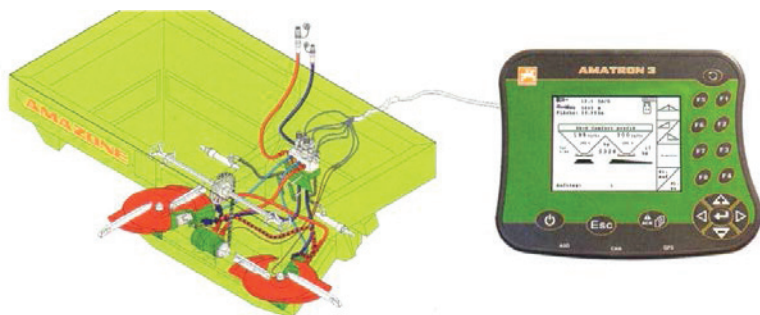
Rysunek 6.8. Precyzyjny siew na uwrociach

6.3. Systemy techniczne do nawożenia

Jednym z podstawowych zabiegów, w których się wykorzystuje systemy GNSS do pozycjonowania agregatów maszynowych na polu i stosowania zmiennej dawki, to nawożenie. Zadaniem tego zabiegu jest dostarczenie roślinom składników pokarmowych w takich ilościach, aby ukierunkować ich rozwój na maksymalny plon, przy założonej przez producenta jakości i zachowaniu zasad ochrony środowiska. Stosowanie nieodpowiednich dawek nawozów niesie ze sobą ryzyko niekorzystnego wpływu zabiegu nawożenia na środowisko glebowe i wodne, szczególnie w przypadku stosowania nawozów łatwo przemieszczających się w profilu glebowym.

Nawożenie najczęściej wykonuje się stosując nawozy mineralne, ale również może to być nawożenie mikroskładnikami podczas oprysku, nawożenie RSM i amoniakiem bezwodnym oraz nawożenie nawozami naturalnymi - obornikiem, gnojówką, i gnojowicą. Nawożenie mikroskładnikami i RSM dokonuje się za pomocą opryskiwaczy. Zastosowanie zmiennej dawki na powierzchni pola jest realizowane identycznie jak przy stosowaniu środków ochrony roślin.

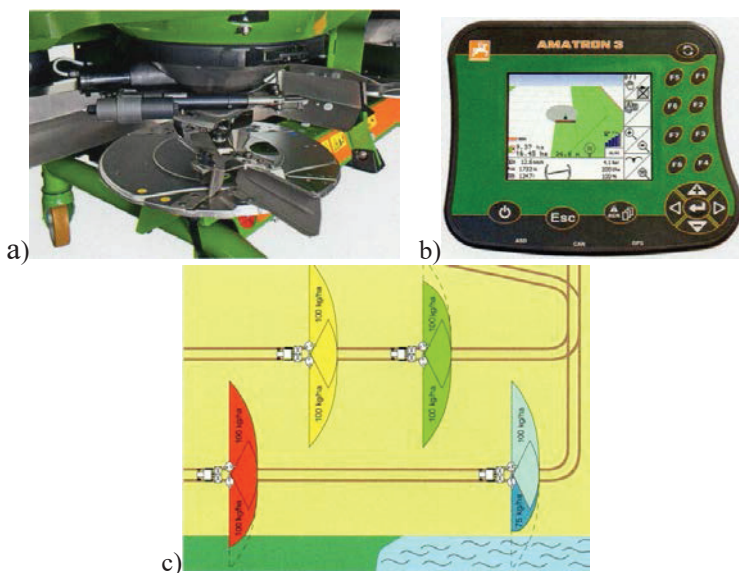
Nawożenie mineralne, przy użyciu nawozów granulowanych i czasami pylistych, wykonuje się przy użyciu rozsiewaczy. Najbardziej popularne są rozsiewacze tarczowe, które za pomocą tarcz z łopatkami rozrzucają nawóz granulowany na szerokość do 54 m. Dzięki temu maszyna ta odznacza się największą wydajnością spośród maszyn stosowanych w produkcji rolniczej. Rozsiewacz do wykonywania przestrzennie zmiennego nawożenia wymaga wyposażenia w komputer sterujący dawką (rys. 6.9) z wgraną mapą aplikacyjną, lub do którego można podłączyć urządzenie zewnętrzne z mapą aplikacyjną. Sterowanie dawką wysiewanego nawozu zazwyczaj odbywa się poprzez zmianę szerokości szczeliny dozującej lub ilości podawanego materiału na tarczę przez przenośnik (np. ślimakowy).



Źródło: materiały reklamowe firmy Amazone

Rysunek 6.9. Schemat połączeń w rozsiewaczu ZA-M Profis Hydro firmy Amazone

Zastosowanie siłowników sterowanych elektrycznie (rys. 6.10 a) do zmiany szerokości szczeliny dozującej i miejsca podawania nawozu na tarczę wykonywane jest przez komputer sterujący (rys. 6.10 b). Najnowsze rozsiewacze mają rozwiązania techniczne umożliwiające zmianę nie tylko samej dawki, ale również zmianę szerokości roboczej i włączania funkcji siewu granicznego na podstawie sygnału GNSS. Na rysunku 6.10 c przedstawiono działanie systemu GPS-Switch stosowanego przez firmę Amazone.



Źródło: materiały reklamowe firmy Amazone

Rysunek 6.10. Zasada działania rozsiewacza ZA-M Profis Hydro firmy Amazone:

- a) system dozowania nawozu, b) komputer sterujący,
- c) automatyczne dopasowanie szerokości roboczej i dawki

Rozwiązania producentów rozsiewaczy umoŹliwiają coraz dokładniejszy rozsiew nawozów przy granicy pola, szczególnie jeżeli ma ona przebieg krzywoliniowy. Jest to realizowane poprzez podział szerokości roboczej maszyn na kilka wirtualnych sekcji, które w zależności od sytuacji są wyłączane. W rozsiewaczach firmy Amazone zastosowany jest podział szerokości roboczej na 6, 8 lub 16 sekcji (rys. 6.11), w przypadku rozsiewaczy firmy Kuhn jest ich 4, firmy Rauch 4 lub 8, a firmy Bogballe 8.



6-stopniowe włączanie sekcji szerokości w rozsiewaczu ZA-M Profis Hydro



8 lub 16 stopniowe włączanie
sekcji szerokości w ZA-TS

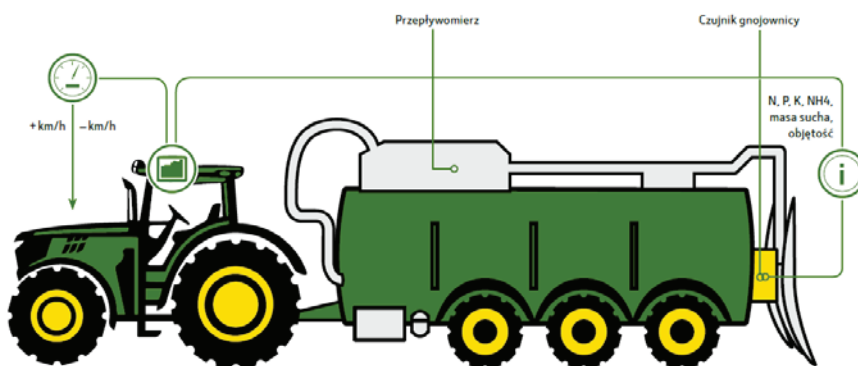
Źródło: materiały reklamowe firmy Amazone

Rysunek 6.11. Sekcje robocze rozsiewaczy firmy Amazone

NawoŹenie amoniakiem bezwodnym, ze względu na bardzo duże koszty związane z przygotowaniem infrastruktury przedsiębiorstwa do składowania i transportowania tego środka w Polsce, nie znajduje zastosowania. Najwięcej gospodarstw aplikujących ten nawóz jest w USA. Zastosowanie tego nawozu wymaga aplikacji na głębokość 25 cm w celu ograniczenia strat azotu. Przestrzennie zmienną aplikację wykonuje się poprzez sterowanie zaworem dozującym. Przykłady gotowych rozwiązań technicznych ma w swojej ofercie firma John Deere.

Od roku 2016 na polskim rynku dostępny jest wóz asenizacyjny firmy John Deere wyposażony w system automatycznej zmiany dawki gnojowicy z uwzględnieniem jej składu chemicznego i zawartości suchej masy (rys. 6.12). Rozwiązanie to nosi nazwę

„John Deere Manure Sensing” i za pomocą oprogramowania wyświetlacza GreenStar 2630 dokonuje zmiany prędkości jazdy agregatu, lub w przypadku dużych oporów, zmiany przepływu gnojowicy. To rozwiązanie może być również zastosowane w przypadku aplikacji obornika z tą tylko różnicą, że zmiana dawki będzie wynikać tylko ze zmiany prędkości jazdy agregatu (<https://www.deere.pl>).



Źródło: <https://www.deere.pl>

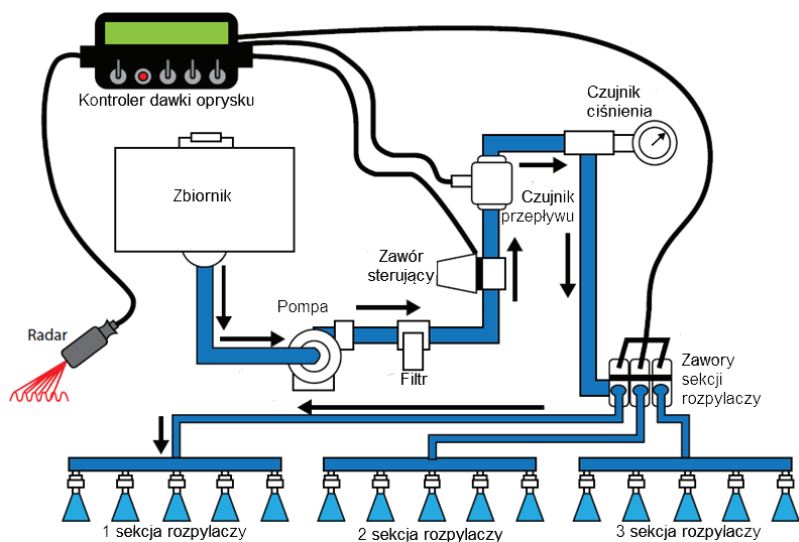
Rysunek 6.12. Schemat działania wozu asenizacyjnego do zmiennej aplikacji gnojowicy i gnojówki

Wymienione powyżej rozwiązania techniczne w przypadku nawożenia azotem mogą być stosowane *on-line*. Podstawą do wprowadzenia zmiennej dawki azotu jest wtedy pomiar zieloności liści i gęstości łanu. Czujniki niezbędne do wykonania takiego pomiaru zostały przedstawione w rozdziale 4.

6.4. Systemy techniczne do oprysku

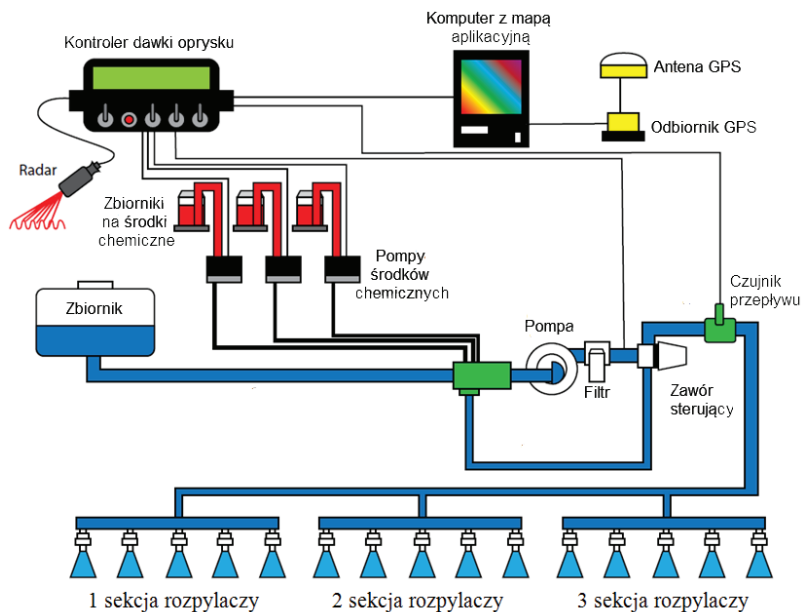
Zastosowanie zmiennej dawki środków ochrony roślin podczas oprysku wymaga opryskiwacza wyposażonego w komputer sterujący zaworem regulacji ciśnienia roboczego w zależności od prędkości jazdy agregatu (rys. 6.13). Dodatkowym elementem, który również pozwala na zmianę dawki, jest rodzaj zastosowanych dysz. Mapa aplikacji środka ochrony roślin może być wgrana do komputera opryskiwacza (rys. 6.13), lub znajdować się w innym komputerze podłączonym do komputera opryskiwacza (rys. 6.14).

W przedstawionym powyżej rozwiązaniu zmianę dawki można zastosować tylko na całej szerokości roboczej opryskiwacza. Ponadto w przypadku korzystania z urządzeń automatycznie zamykających sekcje na uwrociu lub klinach dokładność wykonania takiej operacji jest ściśle uzależniona od szerokości pojedynczej sekcji.



Źródło: Grisso i in., 2011

Rysunek 6.13. Schemat działania klasycznego opryskiwacza



Źródło: Grisso i in., 2011

Rysunek 6.14. Schemat działania opryskiwacza z 3 zbiornikami na środki ochrony roślin

Podobnie jest z opryskiwaczem przedstawionym na rysunku 6.14. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość przygotowywania cieczy roboczej na bieżąco i zmianę jej składu, jeżeli wynika to z mapy aplikacyjnej.

Przy zmiennym aplikowaniu środków ochrony roślin niezbędne jest szybkie wykonanie zmiany rodzaju końcówek rozpylających i może to być przeprowadzone za pomocą elektrozaworów lub zaworów pneumatycznych (rys. 6.15).



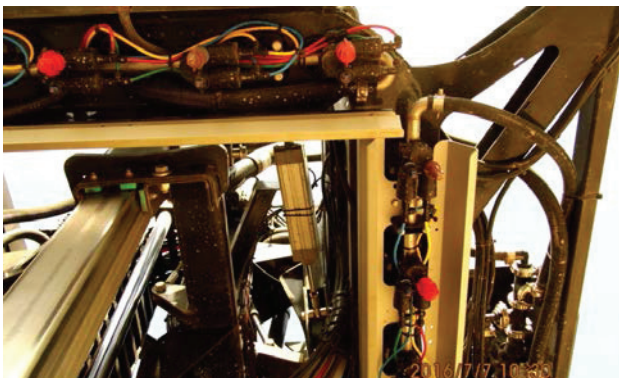
Źródło: materiały reklamowe firmy Horsch

Rysunek 6.15. System Multi-Select

Zwiększenie zakresu zmian dawki cieczy roboczej dla tych samych rozpylaczy można uzyskać poprzez zastosowanie mniejszego rozstawu (rys. 6.16, 6.17).

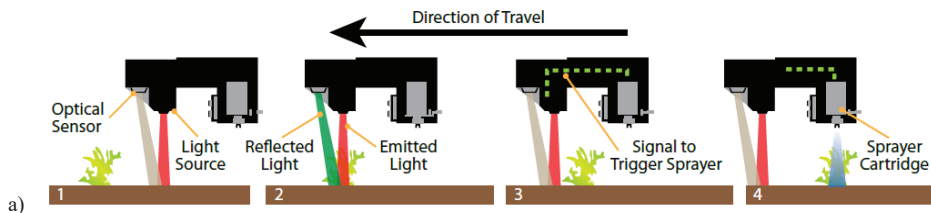


Rysunek 6.16. Rozmieszczenie rozpylaczy co 0,25 m



Rysunek 6.17. Rozmieszczenie rozpylaczy co 0,25 m i 0,5 m

Kolejnym sposobem na ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko środków ochrony roślin podczas oprysków, to wykonywanie zabiegu tylko w miejscu występowania chwastów. Wyposażenie każdego rozpylacza w czujnik WeedSeeker (rys. 6.18) powoduje, że środek nanoszony jest miejscowo. Jest to szczególnie przydatne dla roślin uprawianych w szerokich międzyrzędziach.



Źródło: Grisso i in., 2011



Źródło: <http://www.mcintoshdistribution.com.au>

Rysunek 6.18. Oprysk z użyciem czujników WeedSeeker: a) zasada działania, b) przykład pracy

7. SYSTEMY NAWIGACJI AGREGATÓW MASZYNOWYCH

Według Huyghebeart'a i in. (2007) podczas wykonywania niektórych zabiegów agrotechnicznych agregatem o szerokościach roboczych 8 i 20 m, systemy prowadzenia wykorzystujące nawigację satelitarną pozwalają zmniejszyć powierzchnie nieobrobione dwukrotnie. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i obliczeń dotyczących przejazdów wirtualnego agregatu o szerokości roboczej 20 m Grabaniak i in. (2012) stwierdzili, że przy zastosowaniu automatycznego prowadzenia pojazdu, nieobrobiona część pola stanowiła średnio 0,2% jego powierzchni, zaś przy prowadzeniu manualnym 3,46%, a w wyniku zastosowania prowadzenia automatycznego 0,21% powierzchni pola obrobiono dwukrotnie; przy wykorzystaniu prowadzenia manualnego uzyskano wartość 1,13%. W literaturze można znaleźć informacje, że zastosowanie systemu jazdy równoległej przynosi około 8% oszczędności w zużyciu środków produkcji, czyli nasion, nawozów, środków ochrony roślin oraz paliwa. Powraca więc wizja całkowicie autonomicznego systemu ciągnikowego, która pod koniec XX wieku została opracowana przez niemiecką firmę Geo-Tech (Przybył, 2007). Wg Koźmickego (2008) za system inteligentny uważany jest taki, który zdolny jest do autonomicznego przystosowywania swego działania (bez udziału operatora) do zmieniających się warunków pracy, na podstawie informacji o zmianach zachodzących w otoczeniu, pozyskiwanych autonomicznie w trakcie jego pracy. Maszyna inteligentna różni się od zwykłego automatu wyższym stopniem złożoności zachodzących w niej procesów informacyjnych, wymagających zastosowania wydzielonego, komputerowego podsystemu sterowania.

Prowadzenie agregatu uprawowego w sposób automatyczny lub wspomaganie procesu prowadzenia ciągnika jest powszechne i stanowi standard w przypadku droższych agregatów maszynowych. Współczesne systemy prowadzenia można podzielić na trzy zasadnicze grupy. Pierwszą z nich stanowią systemy, których przesterowanie toru jazdy agregatu odbywa się tradycyjnie (manualnie) za pośrednictwem operatora a sygnał i wskazania dotyczące kierunku oraz wielkości skrętu kierownicy pochodzą z systemu GPS. W przypadku drugiego systemu, cała operacja przeprowadzana jest automatycznie, czyli agregat maszynowy sam jeździ po polu, a operator pełni rolę nadzorującego cały proces. Trzeci systemem prowadzenia agregatów maszynowych nie wymaga zastosowania odbiorników GPS, ale wymaga zastosowania sensorów zazwyczaj optycznych, które w czasie rzeczywistym potrafią wygenerować sygnał pozwalający skorygować i przesterować tor jazdy agregatu.

Technologią w rolnictwie wykorzystującą szczególnie precyzyjną nawigację toru jazdy jest CTF (ang. *Controlled Traffic Farming*), która jest coraz częściej stosowana przez rolników ze względu na wysoką efektywność. Technologia CTF jest oparta na ścieżkach, które są wytyczane na polach i stale użytkowane. W ten sposób powierzchnia gleby pomiędzy ścieżkami nie zostaje naruszona. Ścieżki przejazdu maszyn używanych do prac polowych można odpowiednio dopasować. Przykładowo, aby umożliwić rolnikom stosowanie i pełne wykorzystywanie strategii kontroli ruchu, w rolnictwie są dostępne systemy Case IH RTK, które zapewniają precyzję i niezaw-

wodność z dokładnością do 2,5 cm. W kombajnie Axial-Flow® z zespołem żniwnym o szerokości 12,4 m zastosowano długie, składane przenośniki ślimakowe umożliwiające wyładowywanie zbiorów bezpośrednio do pojazdów transportowych (rys. 7.1), które poruszają się po sąsiedniej stałej ścieżce w odległości 12 m. Wytarczając i konsekwentnie utrzymując stałe ścieżki przejazdu maleje ryzyko zagęszczenia gleby i zmniejsza się koszt orki, a jednocześnie poprawia się przenikanie wody i jej retencja w glebie.



Źródło: materiały firmowe Case IH

Rysunek 7.1. System CTF

Struktura gleby zostaje wzbogacona, co powoduje rozwój żyjących w niej organizmów, a także pobudzenie wzrostu korzeni oraz wchłaniania składników odżywczych i wody przez rośliny. Istnieją naukowe dowody, że ograniczenie powierzchni pola, po której poruszają się maszyny rolnicze, zapewnia zwiększenie plonów w strefach pomiędzy stałymi ścieżkami przejazdu (materiały firmowe Case). Na rysunku 7.2a przedstawiono rozsiewacz nawozowy firmy HORSCH z przystosowanym podwoziem do systemu CTF, natomiast na rysunku 7.2b przedstawiono zmodyfikowany przenośnik ślimakowy kombajnu firmy CLAAS.

Analizując manualne systemy prowadzenia agregatów maszynowych wspomagane GPS należy stwierdzić, że najbardziej przydatnym systemem dla operatora jest system prowadzenia równoległego. W podstawowej wersji wyznaczane są dwa punkty odniesienia, między którymi powstaje linia prosta będąca torem jazdy ciągnika. Od tej linii głównej odchodzą pozostałe linie pomocnicze. Ich wzajemne odległości są zależne od szerokości roboczej używanej maszyny. Istnieje także możliwość rejestracji wszystkich punktów znajdujących się między dwoma głównymi punktami START i STOP.

a

b

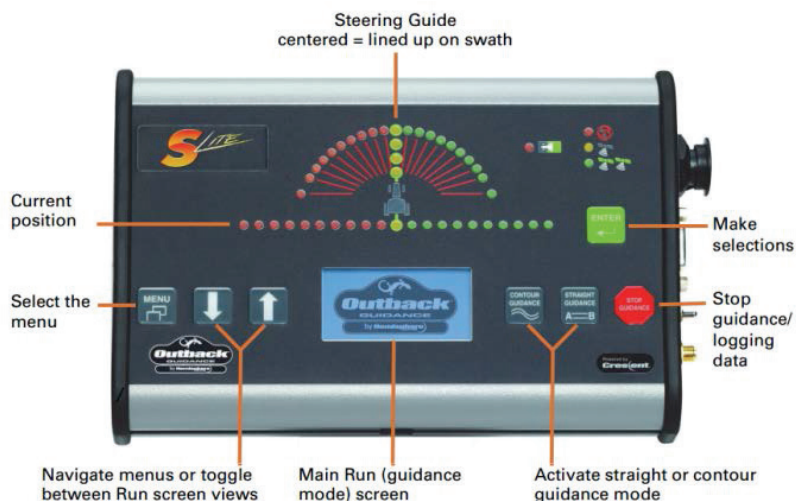


Rysunek 7.2. Maszyny przystosowane do systemu CTF

Takie rozwiązanie uwzględnia odstępstwa od prostoliniowej jazdy spowodowane np. kształtem pola. Wariant ten wykorzystuje się w jeździe konturowej, i jest on zalecany do pracy na polach o nieregularnych kształtach. Podstawowe rozwiązania oparte są na wirtualnym wyznaczeniu pierwszej linii przejazdu i pokazywaniu linii kolejnych przejazdów za pomocą diod na prostym panelu. Przykładem takich rozwiązań jest Outback S-lite firmy Agrom, Lightbar John Deere'a, czy istniejący pod tą samą nazwą Lightbar firmy Topcon oferowany do ciągników grupy AGCO. Te układy składają się praktycznie tylko z dwóch podzespołów: anteny oraz procesora i zestawu diod w jednej obudowie. Do systemu Lightbar John Deere oferuje najczęściej anteny 1 HZ, ale są dostępne układy z antenami nawet 10 Hz. Wyświetlacz z diodami wskazuje kierunek jazdy na podstawie aktualnej pozycji ciągnika. Nie ma żadnego urządzenia korygującego tor jazdy automatycznie. Dlatego w przypadku tego typu rozwiązań operator jest skoncentrowany na utrzymaniu tzw. złotego lub zielonego punktu. Jest to środkowy punkt w linii diod, który pokazuje, że jedzie prawidłowym torem. Jeśli skróci kołami zaczynają się zapalać diody po przeciwnej stronie w stosunku do kierunku skręcenia kół. Wtedy należy skrócić koła w przeciwną stronę, aby wrócić na prawidłowy tor jazdy. Lightbar czy S-lite jest jak nawigacja samochodowa - tylko wskazuje drogę, a operator koryguje jazdę (Towpik, 2010).

System OUTBACK S-Lite (rys. 7.3) ułatwia operatorowi manewrowanie i przejazd ścieżkami technologicznymi. Całość składa się z diodowego wyświetlacza, oraz anteny odbierającej sygnał GPS. Diody ułożone są w taki sposób, że odzwierciedlają odchylenie agregatu od prawidłowego toru jazdy (położenia).

Dodatkową funkcją jest zapamiętywanie punktu na polu i powrotu do niego, gdy wymagana jest przerwa technologiczna, która zazwyczaj spowodowana jest brakiem np. cieczy roboczej w opryskiwaczu lub nawozu w rozsiewaczu. Funkcje szczególnie przydatne dla operatora to Steering Guide, czyli system z wyprzedzeniem informujący operatora o konieczności zmiany kierunku jazdy oraz wskaźnik Current Position, dzięki któremu możliwe jest odczytanie odchylenia od założonej ścieżki.



Źródło: www.outbackguidance.com

Rysunek 7.3. Elementy składowe oraz interfejs operatora systemu OUTBACK S-Lite

System prowadzenia GreenStar Lightbar jest rozwiązaniem firmy John Deere. Pakiet systemu prowadzenia stanowi 27 diod, których sposób świecenia informuje operatora agregatu maszynowego o realizacji zadanego toru jazdy (rys. 7.4). W przypadku gdy tor jazdy ciągnika zaczyna odbiegać od toru zadanego, zapalają się odpowiednie kontrolki.



Źródło: materiały firmy John Deere

Rysunek 7.4. Elementy składowe oraz interfejs operatora systemu GreenStar Lightbar

System Lightbar może być używany w konfiguracji niezależnej z odbiornikiem StarFire lub z wyświetlaczem GreenStar w połączeniu z odbiornikiem GPS.

System Topcon 110 (rys. 7.5) prowadzi operatora agregatu maszynowego w przypadku jazdy równoległej, czyli powielaniu schematu jazdy na wprost, a także po linii krzywej i ruchu po okręgu. Operator obserwując palące się diody wie, w jakim kierunku ma jechać. Diody zapalają się z tej strony, w którą należy skorygować tor jazdy. W skład Topcon System wchodzi również antena Topcon SGR-1 odbierająca sygnały z systemów satelitarnych GPS (amerykański) i GLONASS (rosyjski) oraz kolorowego wyświetlacza.



Źródło: www.agrisystem.pl

Rysunek 7.5. Elementy składowe oraz interfejs operatora systemu Topcon 110

Belka diodowa oraz menu ekranowe są bardzo szeroko programowalne, czego skutkiem jest poprawa widoczności i znaczne wydłużenie efektywnego dnia pracy. System 110 jest uniwersalny, bo można go zastosować zarówno w ciągnikach, jak i maszynach samojezdnych. Jego konsola to panel GX-45, który ma możliwość rozbudowy do systemu prowadzenia automatycznego Topcon System 150, a także wzbogacenia o automatyczną kontrolę opryskiwacza.

Konfiguracja i obsługa urządzeń jest intuicyjna i nie wymaga specjalistycznej wiedzy od operatora agregatu maszynowego. W tabeli 7.1 zestawiono podstawowe parametry wybranych systemów nawigacji.

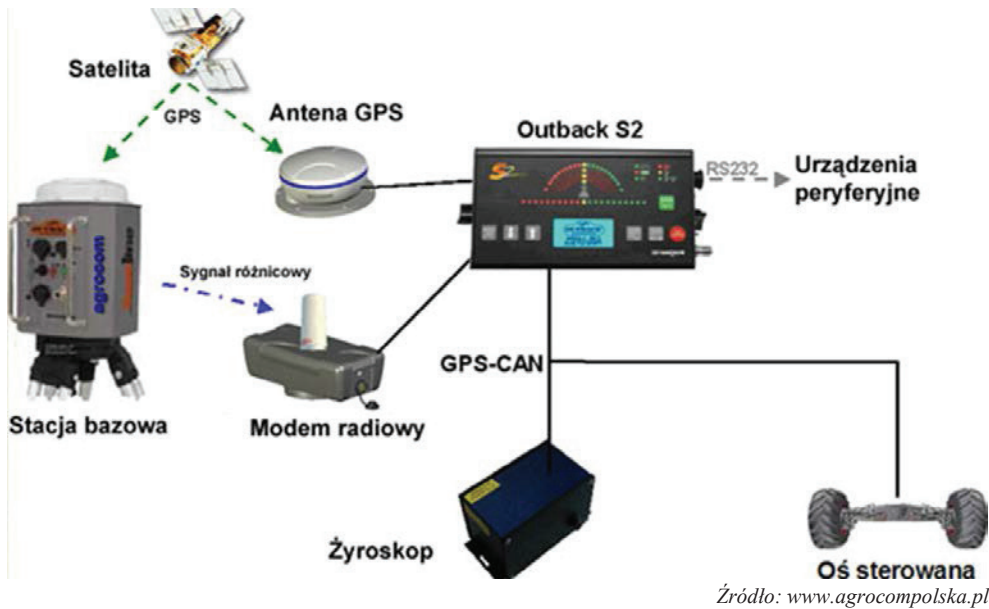
Udoskonaleniem systemu manualnego prowadzenia agregatu maszynowego jest system wykorzystujący również technologię GPS, który automatycznie kieruje maszyną po wyznaczonym torze przejazdu po polu, bez konieczności poruszania kołem kierownicy przez operatora.

Tabela 7.1. Zestawienie wybranych systemów prowadzenia manualnego agregatu maszynowego

Nazwa	Interfejs	Ekran	Ekran dot.	Antena	GPS	GLO-NASS	DGPS	Omni-Star	VRS/RTK
GreenStar Lightbar		brak	brak	zew.	Zależy od użytej anteny, starfire 300 (tylko GPS + EGNOS) lub StarFire 3000 (GPS, GLONASS, EGNOS, RTK, SF1, SF2); brak wsparcia dla OmniStar				
Claas GPS COPILOT		mały, czarno-biały	brak	zew.	tak	nie	tak	bd.	nie
Trimble EZ-Guide 250		4.3" kolorowy	tak	zew.	tak, jednoczęstotliwościowy	nie	tak	nie	nie
TeeJet CenterLine® 220		mały, LED czarno-czerwony	brak	zew.	tak	nie	tak	nie	nie
Müller Elektronik Track-Guide		5.9" TFT, 320x240	brak	zew.	tak, 12 kanałów	nie	tak	nie	nie
Leica mojoMINI 2		4.3" kolorowy, 480x272 TFT LCD	tak	zew., Geo-Spec-tive 2	tak, L1, 14 kanałów	tak	tak	nie	nie

System E-DRIVE jest uzupełnieniem modułowym systemu OUTBACK S2 (patrz rys. 7.3), dzięki któremu jest możliwa pełna automatyzacja prowadzenia równoległego. Do automatycznego prowadzenia ciągnika przez GPS zarówno równolegle po prostej, jak i konturowo w zależności od ustawionej funkcji zainstalowano blok elektrozaworów wraz ze sterownikiem kierowania. Zadaniem elektrozaworów (rys. 7.6) jest automatyczne skręcenie kołami ciągnika lub kombajnu.

Wg Dawidowskiego i in. (2011) do najbardziej rozwiniętych systemów kierowania torem ruchu agregatów rolniczych należą satelitarne systemy prowadzenia „Green-Star”, opracowane przez firmę John Deere, gdzie wykorzystuje się w nich technologię nawigacji satelitarnej GPS z użyciem różnych sygnałów korekcyjnych: EGNOS (ang. *European Geostationary Navigation Overlay Service*) SF1 (StarFire1), SF2 (StarFire2), RTK (ang. *Real Time Kinematic*).



Rys. 7.6. Zestaw wykonawczy systemu E-DRIVE

System prowadzenia równoległego AutoTrac i AutoTrac Universal to automatyczny system sterowania maszyną rolniczą po ścieżkach równoległych (rys. 7.7). W tym przypadku do zadań operatora należy tylko manualne omijanie przeszkód znajdujących się na polu (słupy sieci elektroenergetycznej i inne.). Istnieje możliwość wcześniejszej implementacji przeszkód na polu, które system sam potrafi identyfikować zwalniając z tej operacji operatora agregatu maszynowego. Aby system działał prawidłowo, operator wprowadza do systemu ścieżkę odniesienia (tzw. ścieżkę 0), do której maszyna będzie sama kierować się równolegle. System wspomagania składa się z kilku podstawowych komponentów.

Wyświetlacz znajduje się w kabinie operatora, co umożliwia mu natychmiastowe odczytanie z siedziska informacji o systemie podczas obsługi maszyny. Wyświetlacz nie posiada własnego przełącznika WŁ./WYŁ. zasilania. Jego zasilanie zostaje włączone w momencie włączenia maszyny. Drugim elementem wspomaganego układu kierowania jest mobilny procesor, który jest instalowany z tyłu wyświetlacza i pełni dwie główne funkcje: odczytywanie klucza z karty klucza KeyCard, a także zapisywanie na karcie PC Card danych wykorzystywanych przez oprogramowanie komputera stacjonarnego (rys. 7.8).



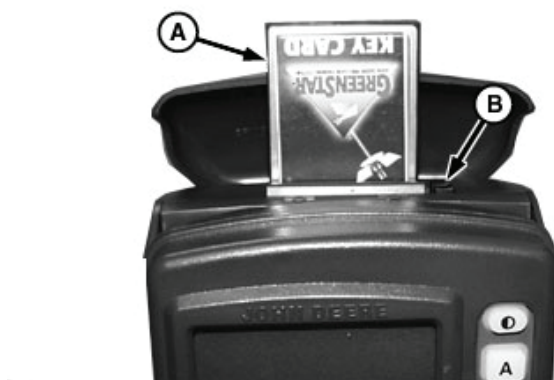
Rys. 7.7. Systemu Auto Trac



Źródło: instrukcja obsługi OMPC20493 wyd. K5

Rys. 7.8. Mobilny procesor

Trzecim komponentem systemu jest karta PC Card, która znajduje się w mobilnym procesorze podczas użytkowania maszyny i może przechować do 250 linii A-B podczas pracy. Kolejną częścią układu jest karta klucza KeyCard, która służy do załadowania informacji operacyjnych dla konkretnego systemu do procesora mobilnego i odblokowania. Kartę klucza KeyCard można zainstalować w przednim bądź w tylnym gnieździe procesora mobilnego (rys. 7.9).



Źródło: instrukcja obsługi OMPC20493 wyd. K5

Rys. 7.9. Karta klucza KeyCard

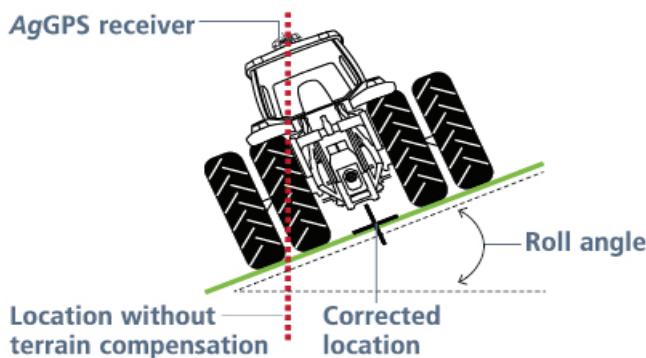
Ostatnim elementem, który wchodzi w skład systemu AutoTrac jest odbiornik pozycji. Jest on umieszczony na kabinie maszyny i służy do odbierania sygnału GPS jak również sygnału korekcji różnicowej, który z kolei jest scalany do dalszego użytku. Do odzyskiwania informacji GPS system AutoTrac potrzebuje odbiornika pozycji StarFire (rys. 7.10).



Rys. 7.10. Elementy systemu AutoTrac

Z odbiornikiem jest zintegrowany moduł kompensacji terenu TCM (ang. *Terrain Compensation Module*). Moduł TCM koryguje skutki dynamiki pojazdu, takie jak przechył spowodowany zmiennymi warunkami podłoża lub bocznym nachyleniem i nierównościami terenu (rys. 7.11).

Kiedy agregat maszynowy znajduje się na końcu rzędu, operator przestawia system do następnego przejazdu. Podczas skrętu kierownicą, jaki wykonuje operator, w trakcie nawrotu następuje dezaktywacja systemu AutoTrac. Ponowna aktywacja systemu polega na ręcznym jego uruchomieniu poprzez przełącznik, lecz przed aktywacją należy spełnić odpowiednie warunki: system należy włączyć, maszyna powinna być w zakresie 40% odstępu między ścieżkami, jeżeli prędkość ciągnika nie przekracza $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, to kurs po ścieżce mieści się w granicach $\pm 80^\circ$, jeżeli prędkość ciągnika jest $\geq 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, to kurs po ścieżce mieści się w granicach $\pm 45^\circ$.



Źródło: materiały firmy John Deere

Rys. 7.11. Schemat działania systemu kompensacji terenu

Pawlicki (2011) opisując ciągniki serii 8R zwrócił uwagę na technologię inteligentnego sterowania wyposażeniem John Deere (system iTEC Pro), gdzie pierwszy stopień automatyzacji pracy ciągnika polega na wykorzystaniu zintegrowanego systemu inteligentnego sterowania wyposażeniem iTEC, który automatyzuje wszystkie operacje związane z narzędziami wykonywane na uwrociach. System iTEC jest integralną częścią ciągników serii 8R i można go łatwo zaprogramować na wyświetlaczu CommandCenter. Drugi stopień automatyzacji polega na wykorzystaniu automatycznego satelitarnego prowadzenia AutoTrac, które nie wymaga ingerencji ze strony operatora. Pełną automatyzację zarówno na polu, jak i na uwrociach, uzyskuje się przez połączenie obydwu systemów AutoTrac oraz iTec, tworząc system iTEC Pro. W zależności od rodzaju sygnału, z jakiego użytkownik będzie chciał korzystać podczas satelitarnego prowadzenia maszyny, ciągnik może pracować z odpowiednimi dokładnościami: $\pm 15 \text{ cm}$ sygnał SF1; $\pm 5 \text{ cm}$ sygnał SF2; $\pm 3 \text{ cm}$ sygnał SF3 oraz $\pm 2,5 \text{ cm}$ (potrzebna stacja RTK) (<https://www.deere.pl>).

Aby korzystać z systemu automatycznego prowadzenia, wystarczy dodać komponenty AccuGuide (monitor AFS, sterownik nawigacji i odbiornik AFS 372), a maszyna będzie automatycznie jechać po wytyczonym torze z dokładnością do 2 cm (rys. 7.12).

Nowa maszyna Case IH jest całkowicie wyposażona fabrycznie w system AccuGuide i można w pełni korzystać z systemu prowadzenia od razu po jej dostawie. Wyświetlacz AFS Pro 700 jest ergonomicznie zintegrowany w podłokietniku. Wszystkie menu są konfigurowane przez użytkownika w 6 oknach roboczych pokazujących mapy pól, ustawienia dotyczące prowadzenia oraz funkcje ciągnika i narzędzi. Aktywacja AccuGuide może być również zawarta w sekwencji na uwrociach, trzymając rękę na dźwigni Case IH Multicontroller, można wcisnąć przycisk załączania (<http://urson.pl>).

Istniejące rozwiązania jazdy automatycznej pozwalają na uniwersalność systemów kierowania, w których nie jest wymagana ingerencja w hydraulikę ciągnika w celu przesterowania kół prowadzących agregat maszynowy, a wystarczy wymiana kierownicy. Firma Claas dysponuje automatyczną kierownicą, stosowaną przez GPS PILOT FLEX (7.12).



Źródło: materiały firmowe Claas

Rys. 7.12. Automatyczna kierownica Claas

Zaletą GPS PILOT FLEX jest wszechstronność jej zastosowań. Łatwo można przełożyć kierownicę do maszyn wykorzystywanych sezonowo, jak kombajny czy sieczkarnie polowe, a następnie użyć GPS PILOT FLEX przy pracach polowych ciągnikiem. Możliwa jest także instalacja w starszych maszynach CLAAS lub w produktach innych producentów. Do dyspozycji jest wiele możliwości. Można korzystać z już posiadanego wyposażenia GPS PILOT w poszczególnych maszynach, wymieniając między maszynami wyłącznie kierownicę lub wszystkie główne komponenty. Za pomocą GPS PILOT FLEX można wykorzystywać wszystkie sygnały korekcyjne dostępne w CLAAS, podawane od EGNOS aż do RTK. W kombinacji z korektą RTK, GPS PILOT FLEX umożliwia bardzo komfortową, precyzyjną pracę. Przy automatycznej kierownicy do dyspozycji są także wszystkie funkcje GPS PILOT S3 takie, jak AUTO TURN, zarządzanie zleceniami czy liniami referencyjnymi.

System EZ-Pilot™ obraca kołem kierownicy dzięki wbudowanemu silnikowi elektrycznemu i może być używany razem z wyświetlaczem FM-750™ lub

FM-1000™, tym samym można prowadzić maszynę bez dotykania koła kierownicy (rys. 7.13).



Źródło: materiały firmowe Case IH

Rys. 7.13. Automatyczna kierownica Case

Silnik zintegrowany z kolumną kierownicy zapewnia łatwy dostęp do wszystkich paneli sterowania i nie redukuje miejsca na nogi w kabinie. Pozwala również na niezależne kierowanie ręczne, gdy wspomagany układ prowadzenia nie jest uruchomiony.

Najprostszym rozwiązaniem i praktycznie nieinwazyjnym, bo niewymagającym demontażu kierownicy jest montaż rolki, która przejmuje kontrolę nad kierunkiem obrotu kierownicy. W przypadku systemu EZ Street (rys. 7.14) kompatybilnym z maszynami wszystkich producentów i współpracującym z RTK.



Źródło: <http://agriculture.newholland.com>, <http://ctfeurope.com/>

Rys. 7.14. System kierowania EZ Street

Ten podstawowy układ kierowania wspomaganego może być używany razem z monitorem EZ-Guide® 250, FM-750™ lub FM-1000™, aby prace w polu mogły być prowadzone bez użycia koła kierownicy.

W tabeli 7.2 Zestawiono podstawowe parametry wybranych systemów nawigacji automatycznej.

Tabela 7.2. Zestawienie wybranych systemów prowadzenia automatycznego agregatu maszynowego

Nazwa	Zdjęcie	Opis
EZ-steer		System kierowania ze wspomaganiem EZ-Steer cechuje się prostotą. System EZ-Steer obraca kierownicę, dzięki połączeniu koła ciernego oraz silnika z nawigacją z każdego wyświetlacza Trimble. Silnik elektryczny obraca kierownicę bez ingerencji w układy hydrauliczne pojazdu, dzięki czemu urządzenie może być stosowane, jako przenośne pomiędzy różnymi pojazdami.
EZ-pilot		Ten uniwersalny system kierowania idealnie sprawdza się w uprawach wymagających dużej dokładności. Instalacja silnika elektrycznego w kolumnie kierownicy pozwala na bardziej dokładne i precyzyjne prowadzenie pojazdu. Nie przeszkadza w prowadzeniu pojazdu przy wyłączonym urządzeniu.
John Deere ATU 200		Zwarta konstrukcja i „czysty” montaż zestawu kierowania AutoTrac Universal 200 oznaczają również, że zamontowany zestaw zajmuje mniej miejsca w kabinie pojazdu. Zestaw kierowania AutoTrac Universal 200 nadaje się do ponad 300 modeli maszyn produkowanych przez firmę John Deere i firm konkurencyjnych.
Topcon AES-25		W maszynach, bez fabrycznego przygotowania do prowadzenia automatycznego, prowadzenie automatyczne można realizować za pomocą unikatowego rozwiązania firmy Topcon AES-25. Współpraca z Systemami 150 i 350.
Claas GPS PILOT FLEX		GPS PILOT S3 można wykorzystywać nie tylko z układem hydraulicznym, lecz także z automatyczną kierownicą GPS PILOT FLEX.
Agleader OnTrac2+		System OnTrac2+ jest zaprojektowaną od nowa ekonomiczną możliwością dodania prowadzenia maszyn na podstawie nawigacji GPS bez potrzeby wpięcia się w hydraulikę maszyn. Szybka i łatwa instalacja.
Leica SteerDirect ES Plus		Leica SteerDirect Plus jest elektrycznym systemem znajdującym zastosowanie w różnych modelach ciągników, opryskiwaczy czy kombajnów.

Współczesne procesy technologiczne wymagają precyzyjnej nawigacji nie tylko ciągnika, ale również zagregatowanej z nim maszyn. Na rysunku 7.15 przedstawiono agregat maszynowy do sadzenia ziemniaków wyposażony w dwie anteny GPS. Jedna umieszczona na ciągniku a druga umieszczona na sadzarce do ziemniaków. Dzięki takiemu układowi maszyna koryguje tor jazdy względem ciągnika zapobiegając jej znoszeniu na pochyłościach pola. System wykorzystywał sygnał korekcyjny z przenośnej stacji referencyjnej. Zastosowanie sygnału GNSS w pracy maszyn przyniosło jeszcze jedno rozwiązanie dotyczące sterowania szerokością roboczą pługa. Rozwiązanie stosowane na przykład przez firmę Kverneland i nazwane FURROWcontrol (<http://pl.kvernelandgroup.com>) umożliwia zmianę szerokości roboczej pługa tak, aby automatycznie wyprostować linię bruzdy po wykonaniu kilku lub kilkunastu przejazd-

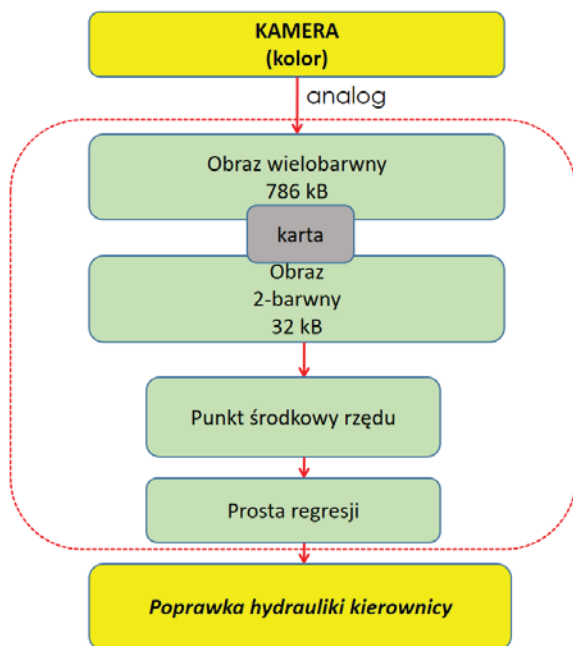
dów. Podobnie wygląda praca z systemem GeoPlughX, który współpracuje z systemem Autopilot firmy Trimble. Rozwiązanie to umożliwia również wcześniejsze zaplanowanie przejazdów po polu przy użyciu oprogramowania Farm Works Mapping (<http://precyzyjnerolnictwo.com>).



Rys. 7.15. Precyzyjne sadzenie ziemniaków

Poza systemami wykorzystującymi sygnał GPS istnieją rozwiązania bazujące na czujnikach, które w czasie rzeczywistym wysyłają impuls, pozwalający agregatowi maszynowemu na korektę toru jazdy. Stosowane czujniki wykorzystują różnorakie elementy środowiska pracy maszyn do nawigowania agregatem maszynowym. Zalew-

ski (2002) opisując doświadczenie Keichera i in. (2000) przedstawił system automatycznego korygowania ustawień kół skrętnych ciągnika, gdzie komputer kabinowy przetwarzał obraz barwny na binarny, oparty na różnicy sygnału kanału zielonego i czerwonego dla rzędu roślin i tła (rys. 7.16).

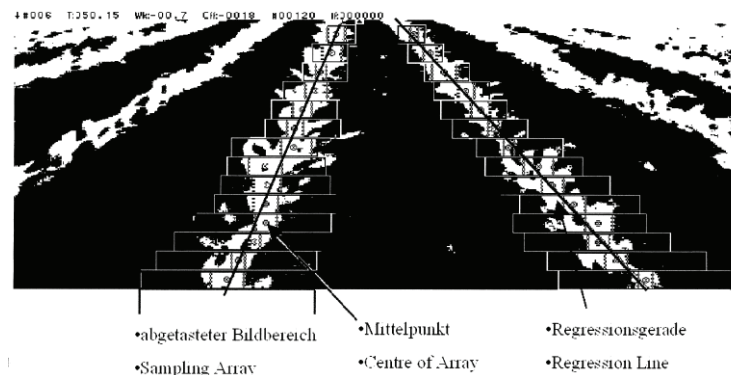


Źródło: Zalewski, 2002

Rysunek 7.16. Schemat blokowy działania systemu optycznego prowadzenia ciągnika między rzędami roślin

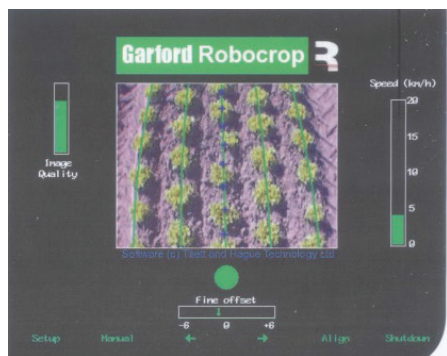
Linie regresji (rys. 7.17) wyliczane z częstotliwością próbkowania 50 Hz, co w czasie doświadczenia poprawiało sterowanie prędkością jazdy ciągnika w odstępach, co 0,07 m przebytej drogi.

To rozwiązanie umożliwiło zwiększenie prędkości jazdy z $8,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ do $11,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Funkcjonującym współcześnie rozwiązaniem jest system Robocrop, gdzie wykorzystywana jest analiza barwnego obrazu do sterowania torem przemieszczania się narzędzia uprawowego (np. pielnika) (rys. 7.18).



Źródło: Keicher, 2000

Rysunek 7.17. Aproksymacja toru jazdy ciągnika na podstawie rosnących roślin

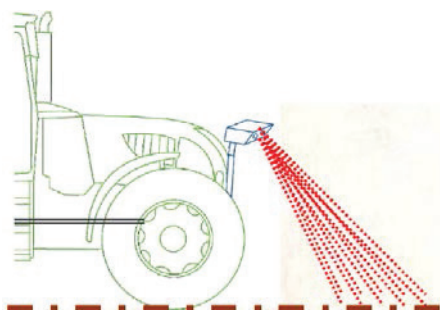


Źródło: <http://garford.com>

Rysunek 7.18. System prowadzenia pielńnika na podstawie kolorowego obrazu z kamery

Rama narzędzia wraz z elementami roboczymi poprzez układ hydrauliczny przesuwają się względem toru jazdy ciągnika pozwalając na utrzymanie bardzo dużej dokładności pracy nawet w przypadku narzędzi o znacznych szerokościach roboczych.

Innymi systemami wykorzystującymi obraz trójwymiarowy zastosowano w rozwiązaniu EYE-DRIVE, dzięki któremu istnieje możliwość prowadzenia agregatu maszynowego po śladzie różnicującym strukturę pola, którym może być m.in. redlina, pokos siana itd. Układ ten prowadzi cały agregat maszynowy pomiędzy ścieżkami jezdowymi, redlinami i rzędami roślin. Kamery AGROCOM EYE-DRIVE systemu lokalnego pozycjonowania rejestruje strukturę pola przed ciągnikiem (rys. 7.19), który z kolei jest przetwarzany w celu wspomagania systemu kierowania ciągnika lub kombajnu.



Źródło: www.agrocompolska.pl

Rysunek 7.19. System prowadzenia prasy na podstawie trójwymiarowego obrazu z kamery

System ten często wykorzystuje się jako pomoc w siewie, sadzeniu, nawożeniu lub pozostałych zabiegach pielęgnacyjnych. Monitor sterujący będący elementem tego systemu pozwala na bieżącą kontrolę przebiegu wykonywanej pracy oraz wprowadzanie działań korekcyjnych. Najlepszy efekt uzyskuje się przy połączeniu systemów opartych na GPS i czujnikach optycznych. Takie połączenie w tym przypadku nosi nazwę DUO-DRIVE i jest zestawieniem dwóch poprzednich systemów E-DRIVE oraz EYE-DRIVE (rys. 7.20).

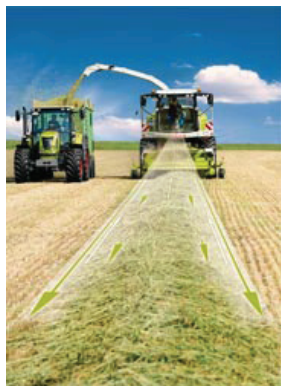


Źródło: materiały firmowe Claas

Rysunek 7.20. System prowadzenia DUO-DRIVE

Obydwa systemy E-DRIVE i EYE-DRIVE są ze sobą połączone w taki sposób, aby ich działanie było niezależne od siebie. Dzięki budowie modułowej można go optymalnie dostosować do potrzeb produkcyjnych.

W technologii zbioru zielonki sieczkarnią JAGUAR stosuje się system CAM PILOT (rys. 7.21) działający identycznie jak ww., który przejmuje kierowanie poprzez dokładne rozpoznanie pokosów, co pozwala na pracę z prędkością do $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.



Źródło: materiały firmowe Claas

Rysunek 7.21. System prowadzenia sieczkarni polowej

Operator pewnie prowadzi maszynę równoległymi przejazdami za pomocą GPS z dokładnością ± 15 do 30 cm także na polach o nieregularnych konturach, korzystając z wolnego od kosztów licencyjnych sygnału satelitarnego EGNOS. CAM PILOT jest uaktywniany przyciskiem w drążku jezdnym. Lekki ruch kierownicą wystarcza, aby operator ponownie przejął kontrolę nad maszyną.

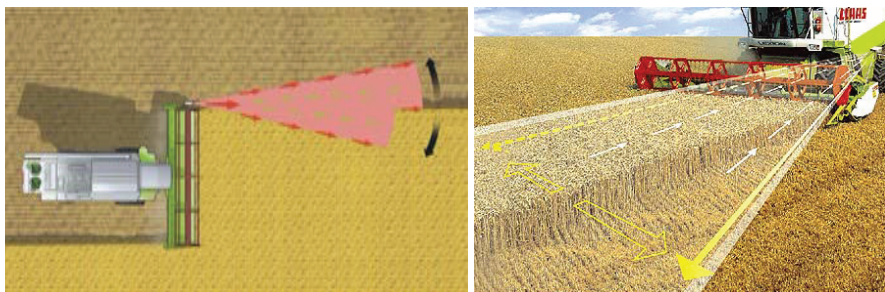
W kombajnach zbożowych stosuje się laserowe systemy nawigacji w czasie pracy, tak aby wykorzystać maksymalnie szerokość roboczą hederu i odciążyć operatora maszyny. W kombajnach firmy Claas zastosowano tzw. LASER PILOT, którego zadaniem jest precyzyjne prowadzenie zespołu tnącego maszyny wzdłuż krawędzi zboża (rys. 7.22). W celu spełnienia wymagań we wszystkich zastosowaniach, oferowany jest również dodatkowy czujnik laserowy dla prawej strony zespołu tnącego.

Ten system odczytuje kontur otoczenia za pomocą promienia laserowego. Promień laserowy wysyłany jest przez jeden z dwóch układów optycznych czujnika i odbierany przez drugi. Różnica w czasie przebiegu sygnału między wysokością ścierniska a polem nieskoszonym zostaje rozpoznana jako krawędź (rys. 7.23). Aby móc śledzić wzajemne przesunięcie i kontury krawędzi, układy optyczne wychylają się stale równolegle pod kątem 12° .



Źródło: materiały firmowe Claas

Rysunek 7.22. Czujnik laserowy LASER PILOT



Źródło: materiały firmowe Claas

Rysunek 7.23. Schemat funkcjonowania systemu laserowego do nawigacji kombajnu

Sygnał napięciowy generowany przez czujnik laserowy zgodnie z odchyleniem maszyny w kierunku krawędzi koszenia analizowany jest w odpowiednim układzie elektronicznym. Na tej podstawie następuje przesterowanie zaworów kierujących w celu korekty kierunku jazdy. Sygnał zwrotny czujnika ustawienia osi prowadzącej zamyka obwód regulacji. W kombajnach firmy Case system Cruise Cut z czujnikiem laserowym zapewnia, że kombajn jedzie wzdłuż krawędzi nieściętego łąnu zboża. Jest to bardzo ważne rozwiązanie w przypadku pracy kilku maszyn z różną szerokością roboczą. Porównując wysokość łąnu i ścierniska, system laserowy Cruise Cut przejmuje kontrolę i kieruje kombajnem. Operator może ustawić skaner laserowy, aby wykrywał krawędź uprawy zarówno po lewej, jak i po prawej stronie hedera, dokonując regulacji z wnętrza kabiny. Elementy systemu Cruise Cut są montowane na kombajnie, dlatego może pracować niezależnie od typu i rodzaju podłączonego hedera.

8. ZDALNA KONTROLA PRACY MASZYN

Rozwój technologii produkcji i związana z tym znaczna minimalizacja jednostkowego czasu pracy maszyn, są możliwe dzięki informacji i wiedzy o danej czynności, którą maszyna wykonuje. Bardzo istotną i niezwykle przydatną technologią umożliwiającą pozyskiwanie danych oraz pozwalającą na sprzężenie zwrotne jest telematyka. Wg Wydro (2005) telematyka oznacza rozwiązania telekomunikacyjne, informatyczne i informacyjne oraz rozwiązania automatycznego sterowania dostosowane do potrzeb obsługiwanych systemów fizycznych – wynikających z ich zadań, infrastruktury, organizacji, procesów utrzymania oraz zarządzania – i zintegrowane z tymi systemami. W tabeli 8.1 przedstawiono wybrane przypadki różnych zastosowań telematyki w kilkunastu miastach Europy.

O rozwoju tej technologii może świadczyć fakt, że Polsce jeździ około 10 tys. pojazdów marki Scania z systemem telematycznym, a na świecie – 170 tys. pojazdów. Coraz więcej nabywców aut ciężarowych korzysta z systemu telematycznego, gdyż pozwala on na racjonalne zarządzanie flotą. W początkowym okresie systemy telematyczne służyły do odczytywania danych z systemów pojazdu, np. prędkości jazdy, obrotów silnika, sposobu, w jaki kierowca zmienia biegi, częstotliwości używania układu hamulcowego. Informacje te wykorzystywano do analizy zużycia paliwa i poprawienia techniki jazdy kierowcy. Tak utworzona baza danych była podstawą dla treningów ekonomicznej jazdy przeprowadzanych w szkole jazdy Scania, uzupełnionych później o coaching, czyli indywidualną opiekę trenera. Doskonalenie techniki jazdy stanowi jeden z kluczowych elementów dzisiejszego pakietu „Ecolution by Scania”. Pakiet ten pozwala przewoźnikowi działającemu w transporcie długodystansowym obniżyć zużycie paliwa o 10-15%, co przy założeniu, że zestaw pokonuje 200 tys. km rocznie, daje oszczędności 10 tys. euro na ciężarówkę. Kolejnym krokiem jest zdalne diagnozowanie pojazdu przez warsztaty autoryzowane podczas awarii na drodze i w celu kontroli stanu technicznego oraz zaplanowanie indywidualnej obsługi serwisowej dla danego pojazdu, w zależności od jego przeznaczenia. Dotychczas jedynym czynnikiem brany pod uwagę między kolejnymi przeglądami serwisowymi była ilość przejechanych kilometrów (<http://truck.intercars.com.pl>).

Systemy telematyczne wykorzystywane są z powodzeniem w monitorowaniu dzikich zwierząt, gdzie lokalizatory umożliwiają śledzenie ich aktywności i wędrówek, a najmniejsze nadajniki telemetryczne tego typu o masie od 6 g, i przy minimalnej średnicy obrotu 30 mm, mogą znaleźć zastosowanie w monitoringu małych zwierząt wielkości drobnych łasicowatych. Możliwość zapamiętania 130 000 pozycji GPS, opcjonalne ładowanie solarne baterii, dodatkowa bateria litowa umożliwiają długoterminowe badanie i śledzenie aktywności zwierząt. Urządzenia te są wykorzystywane przy ochronie gatunków zagrożonych. Podobne urządzenia montowane są również na większych zwierzętach. Przyczynia się to do optymalizacji współistnienia dzikiej przyrody

i człowieka oraz poprawy rozwiązań infrastrukturalnych związanych z ochroną gatunków zagrożonych.

Tabela 8.1. Zastosowanie telematyki w transporcie samochodowym

OBSZAR ZASTOSOWANIA	PRZYPADEK	KLUCZOWE CECHY
Sterowanie ruchem miejskim	Turyń -ZINTEGROWANY SYSTEM STEROWANIA KOMUNIKACJĄ (IRTE) (System 5T) Poznań -SYSTEM STEROWANIA RUCHEM MIEJSKIM (UTCS)	Całościowe podejście do rozwiązania problemów transportu. Oparty na otwartej architekturze IRTE (patrz sąsiednia kolumna), system 5T ma 9 połączonych wzajemnie i współpracujących podsystemów nadzorowanych przez dziesiąty system. Rozszerzenie uniwersalnego urządzenia typu "czarna skrzynka" do rozbudowy sterowników świateł umożliwiająca dynamiczne sterowanie sygnalizacją świetlną i optymalizację sieci.
Zarządzanie transportem publicznym	Monachium -BALANCE (UTCS) Zlin Walencja AUSIAS	System sterowania ruchem miejskim z priorytetem transportu publicznego, obejmujący obsługę jednoczesnych zapotrzebowań tego transportu. System informacyjny oraz sterowania transportem publicznym oparty na radiolatarni. Bieżąca informacja na przystankach autobusowych. Priorytet autobusów na skrzyżowaniach, dynamiczne rozkłady jazdy transportu publicznego, zintegrowana obsługa parku samochodowego. Integracja podsystemów telematycznych we wspólną architekturę.
Usługi transportowe ze zmiennym w czasie zapotrzebowaniem	Göteborg SAMPO "FLEXROUTES"	"Elastyczny" transport publiczny – zarządzanie rezerwacją, planowanie jazdy i rozkładu, monitoring usług, zarządzanie komunikacją, pomoc pasażerom, dialogowa obsługa użytkownika.
Informacja i sterowanie ruchem za pomocą zmiennych znaków komunikacyjnych	Kolonia EUROSCOPE Monachium TABASCO	Informacja dla osób podróżujących. Wykrywanie sytuacji nietypowych za pomocą zmiennych znaków komunikacyjnych. Dynamiczne zmienne znaki komunikacyjne dla informacji „parkuj i jedź”.
Bieżąca informacja w transporcie publicznym	Southampton ROMANSE Infopolis	Bieżąca informacja dotycząca wszystkich sposobów postępowania przed i podczas podróży. Nowoczesny system informacji o usługach w transporcie publicznym obejmujący określanie potrzeb użytkownika.

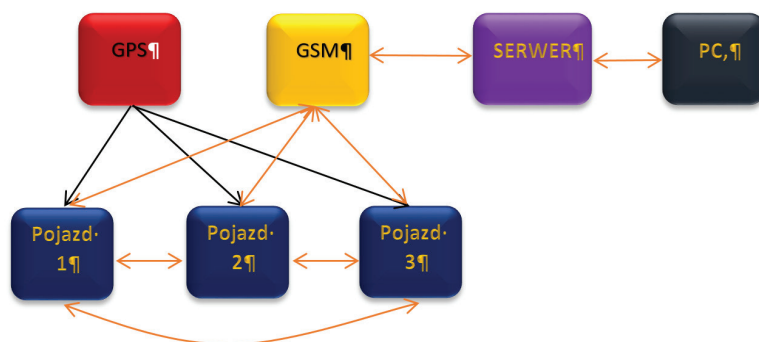
Źródło: Rogge i in., 1999

Biorąc jednak skalę zastosowań przedmiotowej technologii należy stwierdzić, że zdecydowana większość dotyczy szeroko rozumianego transportu kołowego. Liczba różnych opcji w tym systemie jest bardzo duża, podobnie jak firm zajmujących się oprogramowaniem i sprzętem.

Połączenie technologii GPS z technologiami telekomunikacyjnymi, daje wymierne korzyści firmom transportowym. Pozwalając na integrację systemów zarządzania z systemami telematycznymi, zmniejsza czas potrzeby do realizacji: zlecenie - przyjęcie – realizacja. We współczesnym transporcie drogowym istotna jest dostawa towaru „na czas”. Dlatego też nie tylko przewoźnik, ale również zleceniodawca przewozu i odbiorca towaru chcą dysponować wiedzą o czasie i miejscu pobytu pojazdu. To z kolei ma wpływ na wielkość zużycia paliwa oraz wysokość opłat drogowych. Zastosowanie już choćby prostego odbiornika GPS umożliwia kontrolę realizacji przewozu.

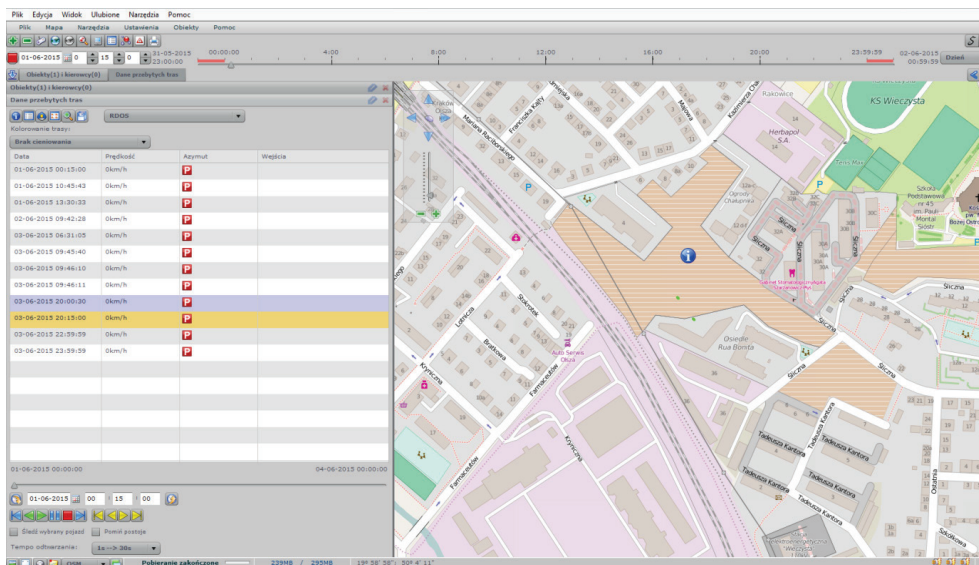
Bardziej profesjonalne rozwiązania umożliwiają precyzyjne kontrolowanie zużycia paliwa, miejsca tankowań, a także eliminowanie wszelkiego rodzaju nadużyć. Ponadto współczesne rozwiązania informatyczne i telematyczne umożliwiają sterowanie wyborem miejsc załadunku i rozładunku, aby uniknąć zbędnego mijania się pojazdów tej samej firmy jadących pod załadunek w przeciwnych kierunkach. Zaawansowany system FMS powinien pozwolić m.in. na odbieranie i wysyłanie dokumentów do komputera pokładowego kierowcy, przesyłanie trasy przejazdu na nawigację wraz z korytarzem alarmującym o zjechaniu pojazdu z trasy oraz informować o technice jazdy kierowcy przez system ECO Drivingu (Wielicki, 2013).

System do śledzenia składa się z urządzenia lokalizacyjnego z odbiornikiem GPS, które musi być zainstalowane w pojeździe i służy gromadzeniu danych dotyczących aktualnej pozycji i wybranych parametrów eksploatacyjnych lub innych. W dalszej kolejności za pomocą sieci GSM/GPRS dane przesyłane są do serwera monitoringu, do którego użytkownik systemu otrzymuje dostęp. Oprogramowanie w zależności od stopnia zaawansowania umożliwia przeprowadzanie różnorodnych analiz informując użytkownika o ich wyniku. Istnieje również możliwość wysyłania wiadomości sms. Uproszczony schemat funkcjonowania systemu przedstawiono na rysunku 8.1. Dzięki integracji wielu technologii cała flota tworzy wspólnie funkcjonujący „organizm”, który potrafi komunikować się między sobą, sygnalizując przede wszystkim stany anormalne, wymagające interwencji. Mając informację o każdym pojeździe można w czasie rzeczywistym optymalizować całość procesu związanego, np. czasem przejazdu koniecznym do wykonania założonego zadania transportowego, minimalizując czas przejazdu poprzez korektę trasy już zrealizowanej przez inny połączony z systemem pojazd. Jest to szczególnie istotne w planowaniu postojów technologicznych i technicznych.

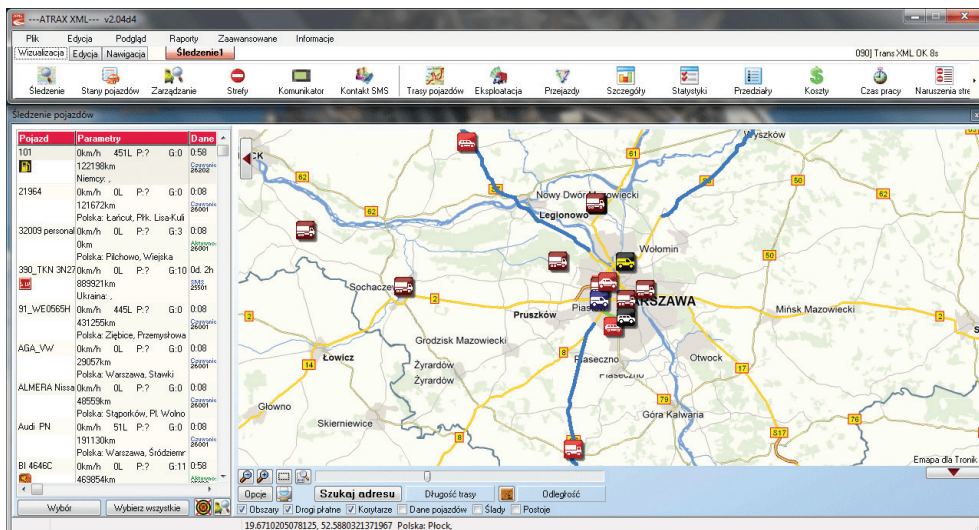


Rysunek 8.1. Schemat funkcjonowania systemu śledzenia pojazdów

Rozwiązania interfejsów w przypadku śledzenia samochodów są bardzo podobne (rys. 8.2, 8.3). Użytkownik ma dostęp do mapy terenu, w którym operuje dany pojazd i jest widoczny w postaci edytowalnego punktu. W celu uzyskania szczegółowych informacji o parametrach pojazdu należy je edytować.



Rysunek 8.2. Interfejs użytkownika systemu „Smok GPS”

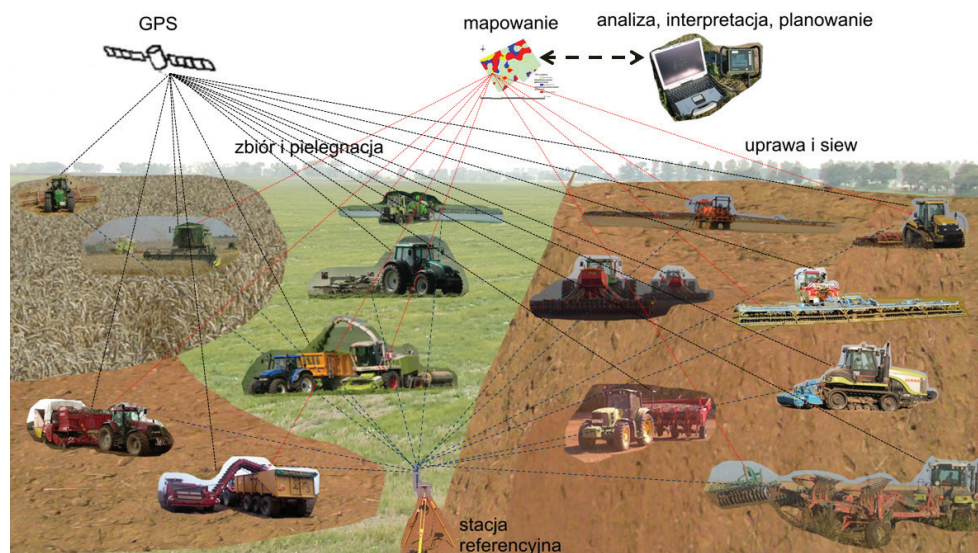


Źródło: www.trucks.com.pl

Rysunek 8.3. Interfejs użytkownika systemu ATRAX

Dużo bardziej skomplikowany system wymagany jest w rolnictwie, gdzie należy wziąć pod uwagę specyfikę produkcji, mnogość stosowanych środków technicznych wykonujących czynności pod kątem różnych funkcji celu, co znacznie utrudnia specy-

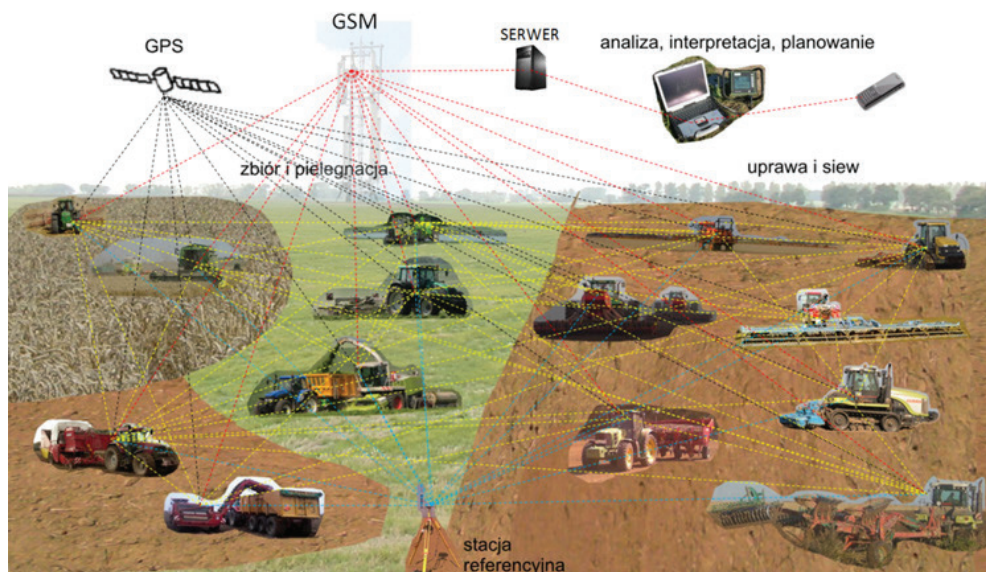
fikację systemu. Współczesne technologie wykorzystują maszyny, które pracują z dużymi wydajnościami, pozwalającymi obniżyć koszty jednostkowe produkcji. Stopień precyzji w organizacji pracy maszyn wymusza szczegółową analizę każdej składowej czasu pracy, a następnie jego minimalizację. Możliwości techniczne pozwalają na śledzenie maszyny w czasie rzeczywistym i generowanie informacji o szacowanym ekonomicznym wyniku jej pracy. Wg Juliszewskiego (2013) sukces (lub porażka) zarządzania działalnością produkcyjną zależy od umiejętnego wykorzystania informacji, jakie pozyskuje osoba kierująca danym gospodarstwem. Coraz bardziej jest to biznes (agrobiznes), w którym reguły prowadzenia podobne są do biznesu w przemyśle, handlu czy usługach. Jednym ze źródeł informacji do zarządzania gospodarstwem są używane telemetrycznie parametry pracy ciągników, maszyn i kontrola personelu, który je obsługuje. Takie parametry eksploatacyjne, jak wydajność pracy, zużycie paliwa, czas napraw i przeglądów, stan techniczny, możliwe są do uzyskania za pomocą komputerów pokładowych maszyn (board computer) i techniki satelitarnej, która umożliwia, np. określenie położenia danej maszyny i jej operatora w czasie i przestrzeni. Współczesny rolnik powinien być jednocześnie biologiem, technikiem, handlowcem, ale i informatykiem. Schemat funkcjonowania rolnictwa precyzyjnego wykorzystującego tylko sygnał pozycjonowania satelitarnego z udziałem naziemnej stacji referencyjnej przedstawiono na rysunku 8.4 (kolor czerwony połączeń – implementacja do systemu informatycznego maszyny przed czynnością technologiczną).



Źródło: Juliszewski i in., 2013

Rys. 8.4. Schemat zintegrowanego systemu produkcji roślinnej wykorzystującego technologie satelitarne

Systemy takie są juŹ standardem we współczesnym rolnictwie, gdzie maszyny wykonując czynnořci technologiczne uwzględniają przestrzenną zmiennořć pól pod względem róŹnych parametrów. Obecnie wprowadzane są systemy podobne do systemów stosowanych w transporcie drogowym, ale o innej specyfice, która dostosowana jest do potrzeb parku maszynowego gospodarstwa. System telematyczny stosowany w gospodarstwie kompleksowo administruje maszynami analizując jednocześnie efekt ekonomiczny. Ma to szczególne znaczenie w czasie spiętrzenia się prac polowych, gdzie sprane zarządzanie pozwala wykonać wszystkie czynnořci produkcyjne w okresie agrotechnicznym. W stosunku do wcześniejszych stosowanych technologii system telematyczny wykorzystuje równieŹ sygnał GPRS (rys. 8.5).



Źródło: Zmodyfikowano na podstawie Juliszewski i in., 2013

Rys. 8.5. Schemat zintegrowanego systemu telematycznego w gospodarstwie

W tym systemie maszyny muszą być wyposażone w czujniki zbierające informację o parametrach eksploatacyjnych pracy poszczególnych podzespołów i innych informacji związanych z procesem pracy. Informacje te są przesyłane poprzez sieć telefonii komórkowej GSM, umożliwiającą wykorzystanie Internetu, do serwera. Dane są tu analizowane i przetwarzane, uŹytkownik ma do nich dostęę poprzez wymagającą uwierzytelnienia hasłem stronę internetową. Dzięki takiemu rozwiązaniu uŹytkownik ma dostęę do danych z dowolnego miejsca oraz przy wykorzystaniu wszystkich narzędzi technicznych potrafiących przeglądać strony www. W zaleŹności od skonfigurowania systemu istnieje równieŹ moŹliwość automatycznego wysyłania informacji sms, jeŹeli wcześniej zaprogramowany stan zostanie osiągnięty, np. mała ilořć paliwa w ciągniku.

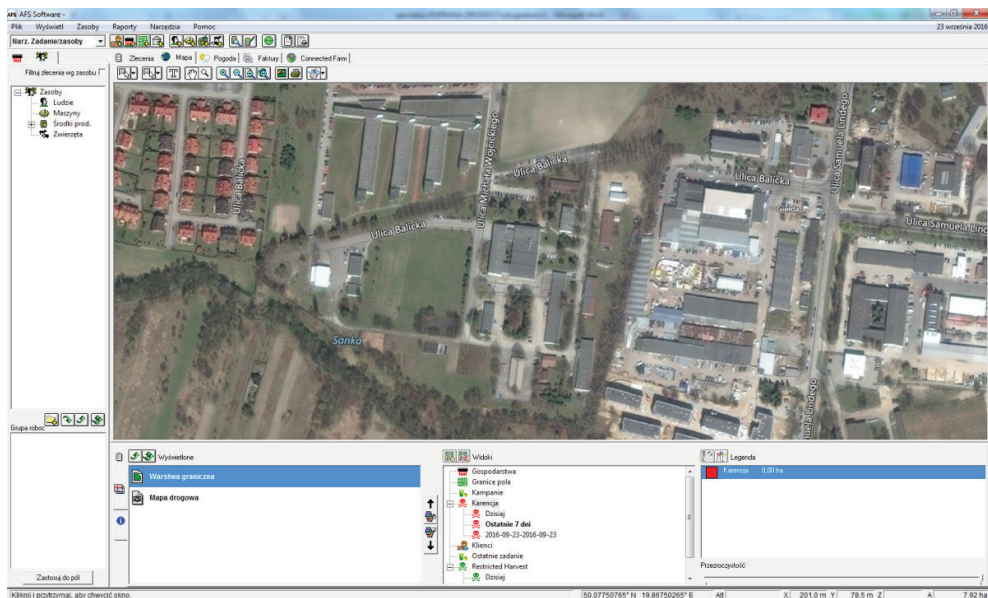
Prekursorem systemów telematycznych w rolnictwie jest firma Claas, która w celu poprawy wydajnořci maszyn wdroŹyła system Claas Telematics. Systemy umożliwia-

jące kontrolę pojazdów w gospodarstwie oferują także inni czołowi producenci maszyn: Case (AFS Connect™), John Deere (J D Link) oraz New Holland (PLM Connect).

Układ telematyki AFS Connect™ Case IH wykorzystuje globalne systemy pozycjonowania i technologię telefonii komórkowej do wysyłania i odbierania danych dotyczących maszyn, danych agronomicznych i informacji o pracach wykonywanych w danym miejscu pola. System umożliwia dostęp do wybranych parametrów, istotnych ze względu na technologię danego procesu i związanych bezpośrednio z pracą maszyny, np. ustawień eksploatacyjnych, które w czasie rzeczywistym przesyłane są do jednostki centralnej. Dzięki temu istnieje możliwość wsparcia merytorycznego w czasie rzeczywistym przez specjalistę obsługującego system w celu skorygowania wykrytych nieprawidłowości lub konsultacji. System Case IH AFS Connect™ obejmuje dwa poziomy specyfikacji:

- pakiet AFS Connect Basic oferuje funkcje zarządzania flotą, śledzenia lokalizacji maszyn i podglądu stanu roboczego. Znając dokładną lokalizację ciągnika albo kombajnu – tzn. wiedząc, na którym polu, i w którym miejscu pola się znajduje – można precyzyjnie kierować ruchem przyczep i dostaw paliwa, zapewniając maksymalną wydajność pracowników i maszyn. Narzędzie AFS Connect™ Manager informuje o wyjechaniu maszyny poza wyznaczony obszar. Zapewnia to bezpieczeństwo, a dodatkowo pozwala prowadzić operatorów do zalecanych tras i obszarów. Jest to szczególnie pomocne w przypadku niedoświadczonych operatorów i kontraktowych pracowników. Pakiet pozwala na Zarządzanie flotą, w tym mapowanie maszyn i historii ich lokalizacji.
- pakiet AFS Connect Advanced obejmuje wszystkie funkcje pakietu AFS Connect Basic, a dodatkowo oferuje wiele innych możliwości w zakresie zarządzania i prowadzenia analiz (porównanie danych pochodzące z różnych maszyn i identyfikując obszary, w których maszyny mają różną wydajność, a zatem możliwe jest wprowadzenie udoskonaleń). Mając do dyspozycji aktualne dane robocze oraz informacje dotyczące wydajności i konfiguracji z poprzednich okresów roboczych dla tych samych lub podobnych maszyn, można zwiększyć wydajność, szczególnie w przypadku niedoświadczonych operatorów. Funkcja AFS Connect Messaging umożliwia właścicielom lub osobom zarządzającym gospodarstwami, a także technikom pracującym w punktach dealerskich Case IH, wyświetlanie porad bezpośrednio na ekranie zamontowanym w maszynie.

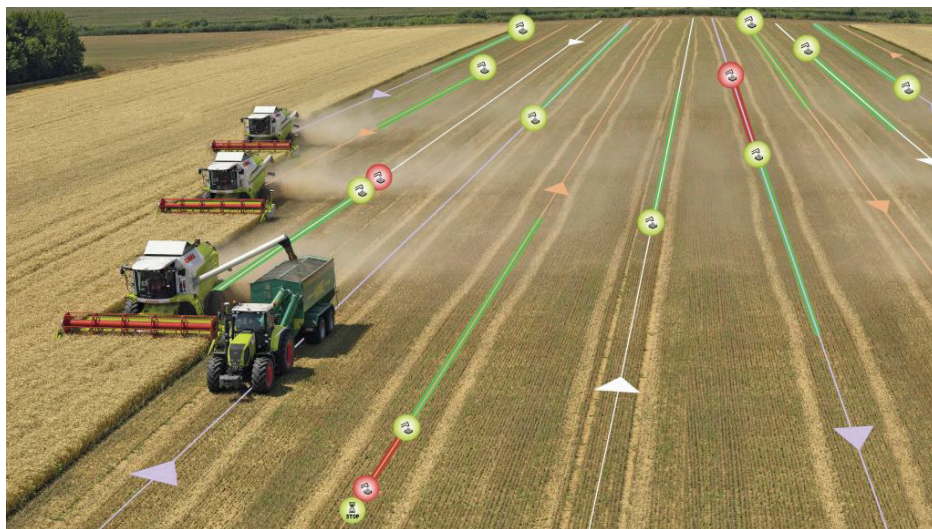
Do obsługi systemu i zarządzania gospodarstwem służy oprogramowanie AFS (rys. 8.6) obsługujące wszystkie procesy w gospodarstwie. Oprogramowanie AFS Case IH umożliwia wyświetlanie, edytowanie, kontrolowanie, analizowanie i wykorzystywanie danych dotyczących rolnictwa precyzyjnego.



Rys. 8.6. Widok okna oprogramowania AFS

Tworzy mapy plonów, mapy dawkowania i inne dostosowane do własnych potrzeb narzędzia wspierające zarządzanie za pomocą jednego zintegrowanego pakietu oprogramowania. Można też generować mapy próbek gleby, tworzyć i drukować raporty, a także importować obrazy satelitarne. Korzystając z oprogramowania AFS, można łatwo importować dane oraz zarządzać nimi bez względu na to, skąd pochodzą – z monitora AFS Pro 700, od konsultanta ds. plonów, od sprzedawcy produktów rolniczych czy od innego dostawcy. Za pomocą oprogramowania AFS do zarządzania gospodarstwem można łatwo zmieniać i kontrolować ścieżki przejazdu wytyczone na polach, a następnie przysyłać odpowiednie dane z powrotem do wyświetlaczy (AFS Pro 300/700, FM-750™ i FM-1000™). Oferowane przez Case IH oprogramowanie obejmuje wiele skutecznych narzędzi służących do administracji, oceny i adaptacji danych do elektronicznych ksiąg pola, które zostały utworzone przez urządzenia AFS, a także danych pochodzących z innych źródeł w zakresie rolnictwa precyzyjnego, dodatkowo pozwala przygotowywać i drukować mapy, raporty oraz wykresy. Oprogramowanie współpracuje ze wszystkimi głównymi systemami rolnictwa precyzyjnego, między innymi Trimble, Ag Leader czy Green Star.

Systemu Claas Telematics wspiera użytkownika przy analizie i optymalizacji procesów pracy w gospodarstwie (rys. 8.7).

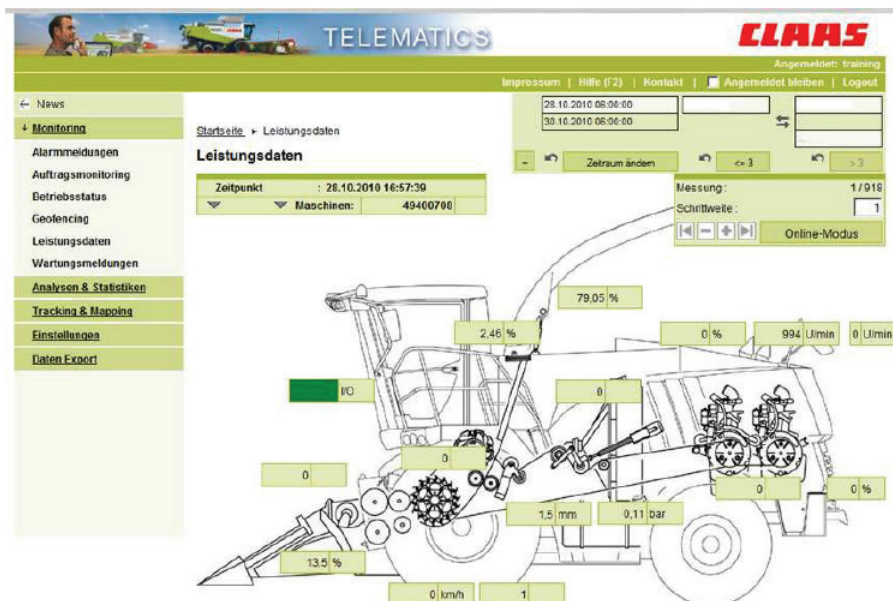


Źródło: www.weeklytimesnow.com.au

Rys. 8.7. Widok okna podglądu pracy maszyny

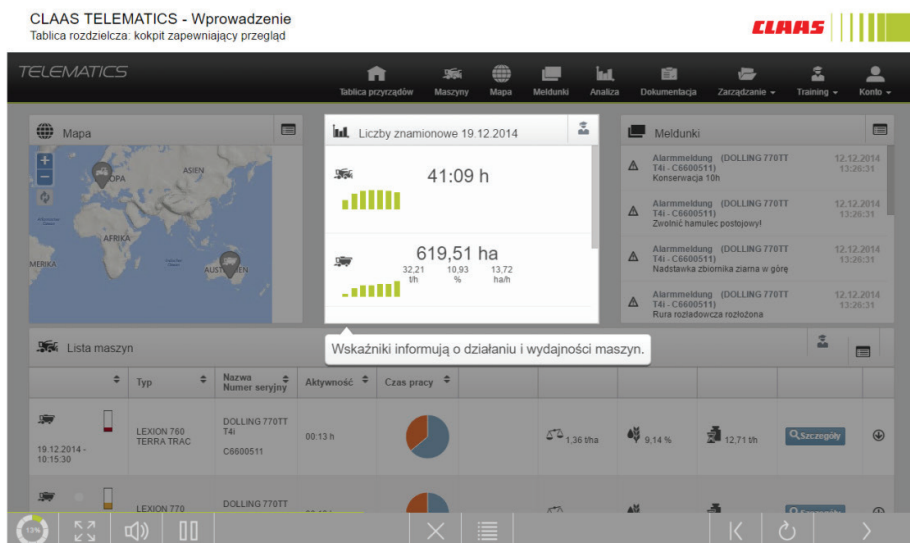
Sygnaly z zamocowanej w dachu anteny GSM docierają w ten sposób z kombajnu do stacji telefonii komórkowej, skąd dane wędrują poprzez sieć internetową do serwera firmy Claas. Po zarejestrowaniu się i zalogowaniu w systemie na stronie firmy Claas można za pomocą przeglądarki internetowej w czasie rzeczywistym z niewielkim poślizgiem czasowym monitorować wybrane parametry pracy maszyny (rys. 8.8) z częstotliwością co 15 sekund.

Liczba odczytywanych parametrów jest oczywiście uzależniona od wyposażenia maszyny. Obejmują one nie tylko aktualne miejsce pobytu sprawdzanej jednostki, ale dają też pełny przegląd jej danych i wydajności. Możliwe jest tu także wywołanie informacji serwisowych, a także postawienie pierwszej zdalnej diagnozy. Możliwość zdalnego diagnozowania. Automatycznie i w regularnych odstępach czasu TELEMATICS wysyła drogą radiową do serwera sieci TELEMATICS informacje obejmujące ponad 200 różnych parametrów. Daje to właścicielowi oraz uprawnionemu partnerowi serwisowemu możliwość wywołania przez Internet wszelkich istotnych informacji oraz ich oceny. Przekaz danych jest kodowany i tym samym zabezpieczony przed niepożądanym dostępem (kodowanie 128 bitowe SSL). Wszystkie dane dotyczące wydajności i kampanii żniwnej kombajnów, siewczarni polowych oraz ciągników można na bieżąco wywołać podczas całego okresu ich pracy (rys. 8.9).



Źródło: www.researchgate.net

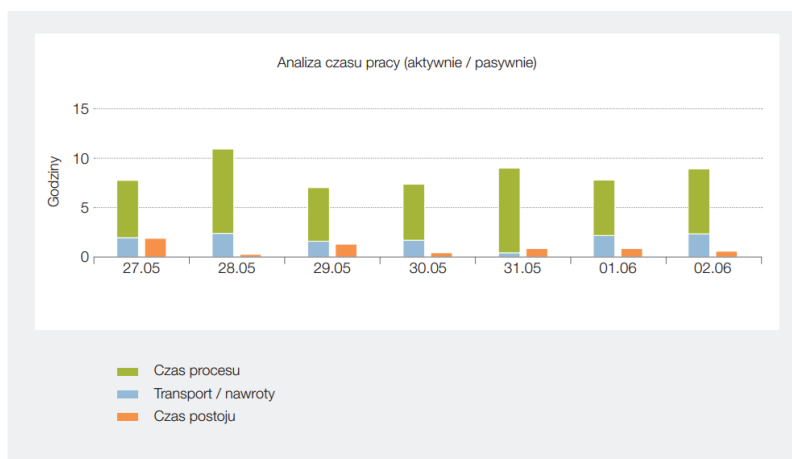
Rys. 8.8. Widok okna podglądu parametrów pracy maszyny



Źródło: www.content-academy.claas.com

Rys. 8.9. Widok okna podglądu parametrów wydajności pracy maszyny

W razie potrzeby możliwe staje się dopasowanie ustawień maszyny do panujących aktualnie warunków. CLAAS TELEMATICS tworzy bazę do celowego zarządzania flotą maszyn. Pozwala odkryć kosztowne czasy przestojów oraz możliwe, „wąskie gardła” logistyki transportu (rys. 8.10).



Źródło: CLAAS Polska Sp. z o.o.

Rys. 8.10. Widok okna podglądu parametrów wydajności pracy maszyny

Za pomocą wskazania śladów przejazdów w Google Earth widoczne stają wszystkie szczegóły pracy włącznie z protokołem zdarzeń. Dysponując funkcją zdalnego nadzoru, użytkownik może online porównać dane dotyczące nastaw i wydajności do trzech maszyn oraz niezwłocznie je dostosowywać. W przypadku niedoświadczonego lub nowego operatora, pozwala to na poprawę ustawień maszyny i osiągnięcie wyższej efektywności.

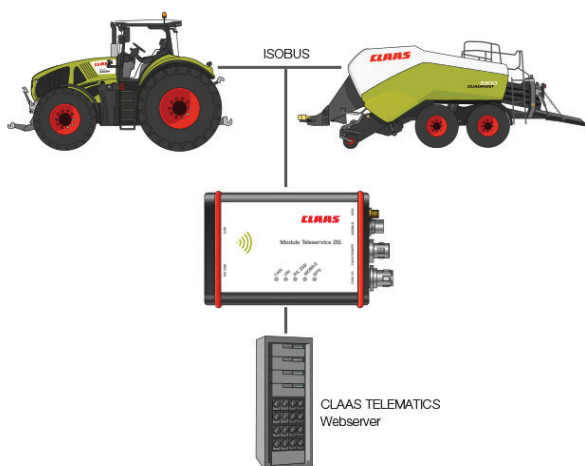
System można dopasować do potrzeb użytkownika wybierając jedną z wersji:

- TELEMATICS basic - pakiet obejmuje informacje najważniejsze dla logistyki na polach oraz wsparcie ze strony partnera serwisowego CLAAS. Na mapach dostępne są pozycje i ślady przejazdów maszyn, status roboczy i aktualny stan paliwa. Do zarządzania powierzchniami można pobrać tu granice pól z systemu zewnętrznego lub bezpośrednio z TELEMATICS. Korzystanie z TELEMATICS App obejmuje najważniejsze funkcje podstawowe oraz nawigację na polach. Możliwe jest dołączenie do tego funkcji „Automatyczna dokumentacja” wspólnie z eksportem danych.
- TELEMATICS advanced - oferuje wszystkie funkcje do obserwacji oraz optymalizacji aktualnych procesów. W „TELEMATICS advanced” znajdują się takie parametry, jak ślady przejazdów, przepustowości, plony i wiele innych pozwalające optymalizować pracę maszyny w czasie rzeczywistym. Poza tym jest wgląd we wszystkie dane zgromadzone przez ostatnie 72 godziny pracy.

Oprócz tego są do dyspozycji wszystkie funkcje aplikacji mobilnej TELEMATICS App. Do tego pakietu można także zamówić funkcję "Automatyczna dokumentacja".

- TELEMATICS professional - obejmuje funkcje „TELEMATICS advanced” oraz wszystkie dane maszyn roboczych. Dodatkowo pakiet zawiera funkcje analizy i optymalizacji maszyn względnie wykorzystania ich floty jak też bieżące analizy pozwalające odpowiedzieć na zadawane, specyficzne pytania. Wszystkie dane historyczne są dostępne do oceny w pełnym zakresie. Pakiet ten obejmuje także TELEMATICS App. Funkcja „Automatyczna dokumentacja” może być zamówiona dodatkowo.

Bardzo istotny ze względu na kontrolę pracy maszyn współpracujących jest system TONI, którego funkcje uzupełniają dane ciągnika o zapis informacji z dołączonej maszyny roboczej. Aby zebrać i udokumentować dane z maszyny roboczej, TONI wykorzystuje złącze ISOBUS (zintegrowany system odpowiedzialny za połączenie ciągnika i maszyny oraz sprawną komunikację między nimi) między ciągnikiem a maszyną (rys.8. 11).



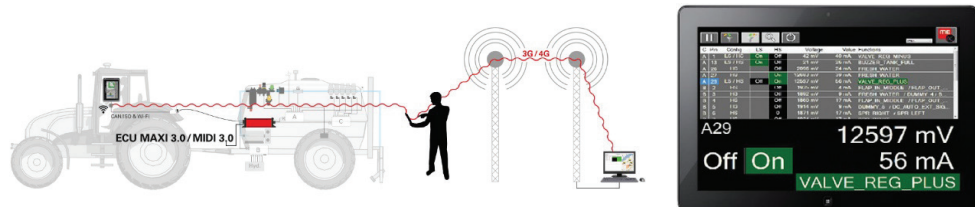
Źródło: www.content-academy.claas.com

Rysunek 8.11. Schemat funkcjonowania systemu TONI

Zbiór danych obejmuje np. w prasach QUADRANT liczbę wykonanych bel, wilgotność materiału roślinnego oraz inne parametry specyficzne dla pras QUADRANT. Ciągniki CLAAS serii AXION i XERION są fabrycznie przygotowane do pracy z systemem TONI. Informacja jest zbierana z częstotliwością 0,2 Hz, a następnie przesyłana co 2-3 min przez sieć GSM do systemu Claas-Telematics. Od roku 2014 funkcja TONI została zintegrowana w oficjalnym standardzie ISOBUS. W kombinacji z funkcją TONI TELEMATICS jest jedynym systemem telematycznym, obejmującym w zależności od producenta wizualizację, dokumentację i optymalizację kompletnego

zestawu roboczego w czasie rzeczywistym. Firma CLAAS Agrosystems opracowała ten program we współpracy z firmami: Amazone, Horsch, Kamps de Wild BV, Lemken, SGT Schoenebeck i Zunhammer. Inne przedsiębiorstwa partnerskie także przygotowują swoje maszyny do wykorzystania systemu TONI.

Müller-Elektronik oferuje system diagnostyczny dla maszyn pracujących w oparciu o system ISOBUS. System funkcjonuje w oparciu o złącze diagnostyczne CAN (CAN/ISO 11783). System pozwala poprzez odpowiednie oprogramowanie (rys. 8.13) połączyć się z maszyną za pomocą tabletu czy smartfona.

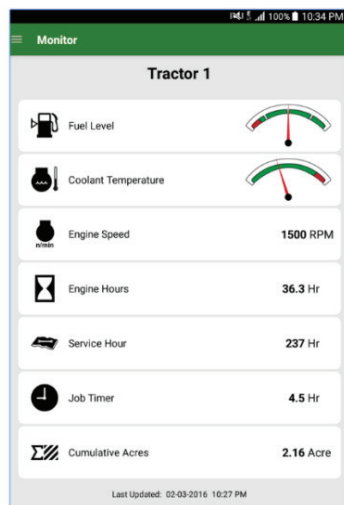


Źródło: www.mueller-elektronik.de

Rysunek 8.12 Schemat funkcjonowania systemu TONI

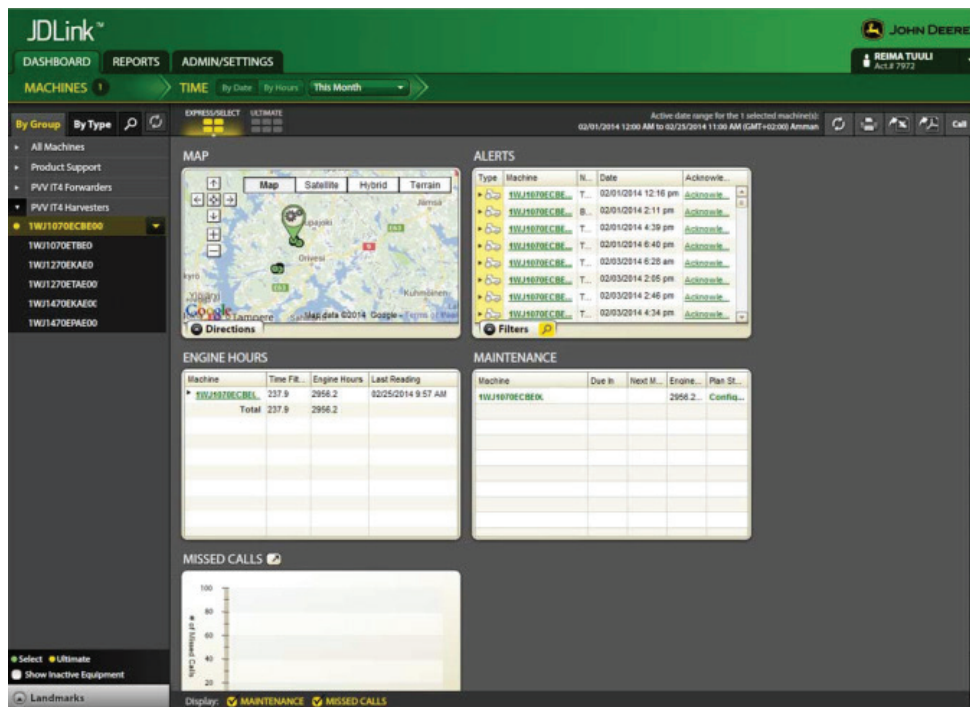
Obsługa diagnostyczna maszyny może odbywać się zdalnie niezależnie od położenia danej maszyny nawet z odległości kilkuset kilometrów poprzez sieć WiFi lub GSM.

JDLink to system telematyczny John Deere, umożliwiający połączenie wszystkich maszyn w polu z urządzeniami biurowymi i mobilnymi (rys. 8.13).



Rysunek 8.13. Widok interfejsu użytkownika urządzenia mobilnego z aplikacją JDLink

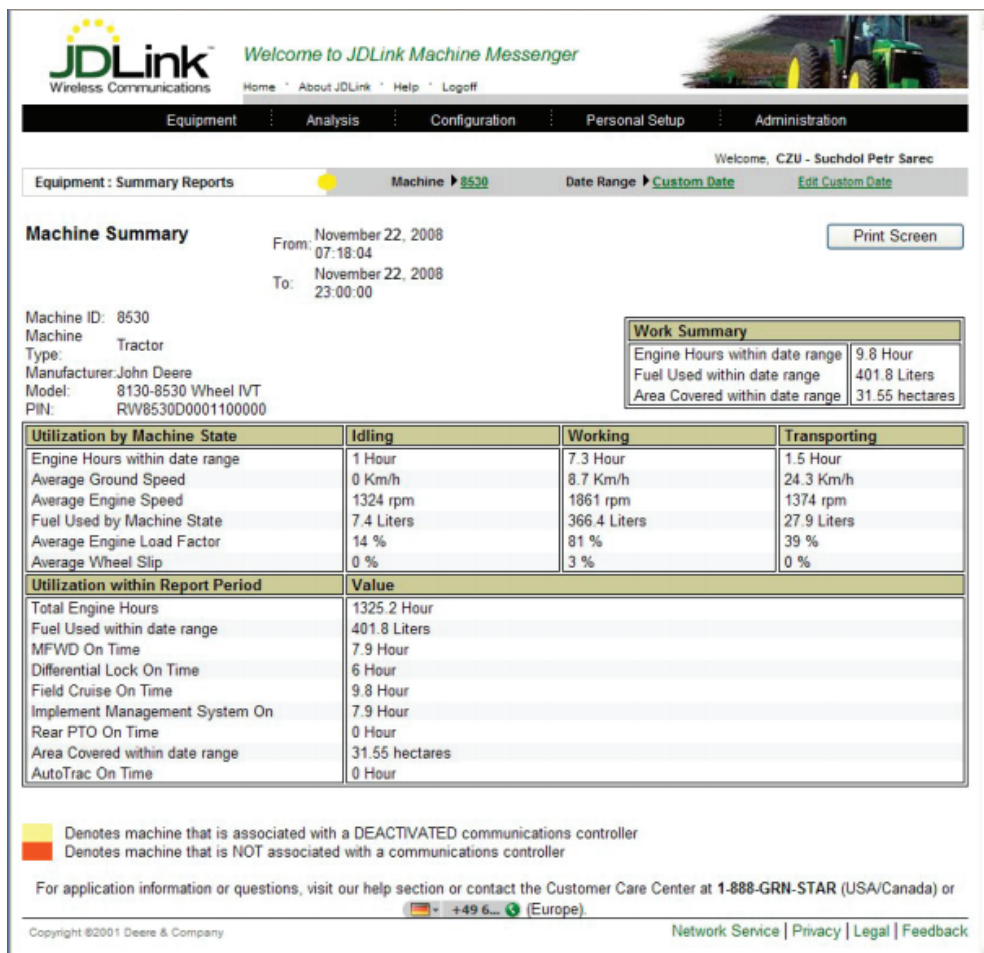
Technologia ta oparta jest na zastosowaniu sterownika modułowego wejścia telematycznej (MTG), który gromadzi i przesyła dane za pośrednictwem sieci komórkowej. Rozwiązanie to umożliwia monitorowanie parku maszynowego i postępu pracy, zarządzanie logistyką, dostęp do istotnych informacji o maszynie, analizę i optymalizację osiąǳów maszyn, odbiór powiadomień SMS lub wiadomości e-mail, zdalną pomoc operatorom czy automatyczną wymianę danych (rys. 8.14).



Źródło: <https://www.deere.co.uk>

Rysunek 8.14. Widok interfejsu użytkownika urządzenia aplikacji JDLink

Pakiet usług FarmSight dodatkowo umożliwia klientom korzystanie z zalet wydłużonego czasu pracy maszyny dzięki możliwości korzystania ze zdalnych usług dealera, takich jak diagnostyka, śledzenie danych CAN, aktualizacje oprogramowania i pomoc techniczna dla operatora (rys. 8.15). Na podstawie tych danych można oceniać wykorzystanie i wydajność maszyn, a ponadto można uzyskać dostęp do rejestru danych o parametrach pracy ciągnika (np. zużyciu paliwa, obciążeniu silnika), szczegółowych zapisach serwisowych, dokładnym umiejscowieniu ciągnika na polu itp.



Źródło: Šarec i in., 2009

Rysunek 8.15. Przykład zbiorczego sprawozdania z JDLink Machine Monitoring System Server

Informacje i funkcje dostępne są za pośrednictwem Centrum Operacyjnego (w przypadku codziennych czynności) lub w zakładce JDLink na stronie MyJohnDeere.com (gdy wymagana jest szczegółowa analiza maszyny), a także w aplikacji JDLink.

Można skorzystać z dwóch rodzajów subskrypcji: JDLink Access i JDLink Connect:

- JDLink Access pozwala śledzić maszyny oraz ich osiągi, dodatkowo istnieje możliwość otoczyć maszyny wirtualnym ogrodzeniem lub monitorować godziny ich pracy. Pozostałe funkcje zapewniają optymalizację wydajności maszyny poprzez śledzenie i analizę zużycia paliwa, obciążenia silnika i wykorzystania

maszyny. Maszyny John Deere z możliwością śledzenia danych CAN zapewniają dodatkowe korzyści, takie jak: a) możliwość zdalnego wykonywania diagnostyki i śledzenia danych CAN, b) aktualizacje oprogramowania drogą radiową za pośrednictwem zdalnego ServiceADVISOR, c) plan konserwacji z możliwością ustawiania alarmów, d) poprawienie ogólnych osiąǳów i wydajności pracy dzięki zdalnemu wyświetlaniu i porównywaniu ustawień (wydajności i innych istotnych danych maszyny, takich jak poziom paliwa w zbiorniku, jego zużycie, czas pracy na biegu jałowym czy wykorzystanie systemu AutoTrac).

- JDLINK Connect to połączenie w jednym pakiecie danych dotyczących lokalizacji maszyny i jej osiąǳów oraz funkcji John Deere Remote Display Access i John Deere Wireless Data Transfer, które umożliwia optymalizację maszyny, zdalne wsparcie operatora i bezzakłóceniovą transmisję danych agronomicznych. Funkcja John Deere Remote Display Access pozwala zarządcóm gospodarstw, dealerom czy nawet producentom narzędzi ISOBUS zdalnie pomagać operatorom w konfigurowaniu maszyny, optymalizacji jej pracy i rozwiązywaniu problemów, tak jakby byli rzeczywiście obecni w kabinie. John Deere Wireless Data Transfers eliminuje potrzebę czasochłonnnych i niepraktycznych ręcznych transferów danych za pomocą pamięci USB, oferując w zamian bezzakłóceniovą zdalną wymianę danych dotyczących konfiguracji czy dokumentacji upraw.

Współczesne technologie wykorzystują maszyny, które pracują z dużymi wydajnościami pozwalającymi obniżyć jednostkowe koszty produkcji. Stopień precyzji w organizacji pracy maszyn wymusza szczegółową analizę kaųdej składowej czasu pracy a następnie jego minimalizację. Możliwości techniczne pozwalają na śledzenie maszyny w czasie rzeczywistym i generowanie informacji o szacowanym ekonomicznym wyniku jej pracy. Stopień informatyzacji pozwala sterować ustawieniami maszyn zdalnie poprzez wirtualny terminal odciaǳając tym samym operatora, który ma dostęp do interaktywnej pomocy ze strony dyspozytora, dodatkowo może wykorzystywać doświadczenia innych operatorów. Powszechny dostęp do Internetu sieci GSM oraz systemu GPS pozwolił praktycznie zautomatyzować technologie przyczyniając się do optymalizacji procesu pracy.

Prawdopodobnie przyszłość technologiczną systemów produkcji będą wyznaczać pojazdy bezzałogowe podobne do pojazdu koncepcyjnego Case IH (rys. 8.16) zaprezentowanego w sierpniu 2016 roku na Farm Progress Show.

Wg informacji producenta Case IH i CNH Industrial's Innovation Group oparły swój bezprzewodowy autonomiczny pojazd koncepcyjny na istniejącym ciągniku Case IH Magnum, odmieniając jego stylistykę. Pojazd został skonstruowany do współpracy z całkowicie interaktywnym interfejsem, który umożliwi zdalne monitorowanie zaprogramowanych operacji. System pokładowy automatycznie oblicza najbardziej efektywne ścieżki przejazdu dla danej szerokości narzędzia i parceli, w zależności od ukształtowania terenu, przeszkód oraz innych maszyn użytkowanych na tym samym polu. Pracujący zdalnie operator może nadzorować i modyfikować ścieżki przejazdów za pośrednictwem interfejsu w komputerze stacjonarnym lub przenośnym tablecie.

Dzięki wykorzystaniu radaru, Lidaru (Light Detection and Ranging) oraz pokładowych kamer wideo, pojazd może wykrywać statyczne lub poruszające się przeszkody na swojej drodze i zatrzymać się samodzielnie na swojej ścieżce dopóki operator, zawiadomiony przez dźwiękowe i świetlne komunikaty alarmowe, nie wyznaczy nowej ścieżki. Pojazd zatrzyma się niezwłocznie również po utracie sygnału GPS lub danych dotyczących położenia, tudzież po ręcznym wciśnięciu przycisku stop. Zadania wykonywane przez maszynę mogą również być modyfikowane w czasie rzeczywistym za pośrednictwem zdalnego interfejsu lub automatycznych komunikatów pogodowych.



Źródło: materiały firmowe Case IH

Rysunek 8.16. Przykład zbiorczego sprawozdania z JDLink Machine Monitoring System Server

9. OPROGRAMOWANIE DO OPRACOWANIA INFORMACJI W ROLNICTWIE PRECYZYJNYM

Rolnictwo precyzyjne to technologia, która bazuje na dużej ilości danych przestrzennych. Pozyskanie takich danych nie jest trudne i do tego celu można wykorzystać różne programy współpracujące z odbiornikami GNSS. Jest wiele rozwiązań w tym zakresie - od komercyjnych po aplikacje darmowe dla systemów Android. Programy te zostały wymienione przy omawianiu przenośnych komputerów polowych (rozdz. 3.2). Opracowanie zebranych informacji, często z okresu kilku lat, wymaga wydajnych programów GIS wspomagających analizę danych. Aby efektywniej zarządzać gospodarstwem, oprócz wspomagania zabiegów technologicznych (nawożenie, oprysk, siew itp.), oprogramowanie może również pełnić funkcję rejestratora zdarzeń finansowych i gospodarczych, wspomagać w wykonywaniu prac biurowych, bądź planowaniu procesów technologicznych. W dostępie do informacji coraz większego znaczenia nabierają technologie informacyjne, które dostarczają użytkownikowi narzędzi, za pomocą których można dane pozyskiwać, selekcjonować, analizować, przetwarzać i zarządzać nimi (Sławiński i Grieger, 2009). W niektórych programach do zarządzania możliwa jest również zdalna komunikacja z instytucjami zewnętrznymi lub doradcami (Sławiński i Grieger, 2009; Rybacki i in., 2011).

Nowe technologie w produkcji rolniczej oraz zaawansowane maszyny nakładają na właściciela gospodarstwa konieczność posiadania wiedzy dotyczącej programów ułatwiających pracę oraz wspomagających zarządzanie gospodarstwem rolnym. Stosowanie programów komputerowych do przygotowania map aplikacyjnych, zestawienia danych dotyczących wykonanych zabiegów, poniesionych kosztów, przyczynia się do wzrostu efektywności zarządzania produkcją i pozwala zaoszczędzić wiele czasu. Na podstawie nakładów, kosztów i zysków można ocenić zasadność prowadzenia danej uprawy, czy uniknąć w przyszłości ujawnionych nieprawidłowości, odnoszących się do podejmowanych decyzji. Przygotowywane raporty m.in. w postaci map przestrzennego rozmieszczenia poniesionych kosztów produkcji danej uprawy mogą posłużyć do zmian w planowaniu upraw na kolejne lata.

Na rynku dostępnych jest wiele programów wspomagających zarządzanie w gospodarstwie rolnym, lecz niewiele z nich zawiera moduł przeznaczony do opracowania danych dla rolnictwa precyzyjnego. Jeżeli jednak nie potrzeba oprogramowania, które zestawi wszystkie koszty produkcji, a jedynie wykona obróbkę danych i umożliwi przygotowanie mapy aplikacji środków produkcji, to skorzystać można z programów GIS. Wymaga to jednak od użytkownika posiadania znacznej wiedzy, nie tylko w zakresie pracy w takim programie, ale również wiedzy rolniczej.

Podstawowymi programami do obróbki danych przestrzennych mogą być programy GIS ogólnego przeznaczenia. Można do nich zaliczyć takie programy jak: ArcGIS for

Desktop (ESRI), IDRISI GIS Analysis (Clark Labs), Surfer 13 (Golden Software), QGIS Enterprise, QGIS i wiele innych.

Kolejną grupą są programy specjalistyczne przeznaczone dla rolnictwa, umożliwiające opracowanie danych połączone z przygotowywaniem raportów z przebiegu procesów produkcji. Oprogramowanie to jest oferowane przez czołowych producentów maszyn rolniczych i sprzętu nawigacyjnego. Na rynku dostępne są między innymi programy: Farm Works Office, Agrar-Office, JD-Office, CLAAS E-Systems, Case IH AFS Desktop, New Holland Mapowanie PLM. Wymienione aplikacje mają podobne funkcje, różnice pojawiają się przy wprowadzaniu danych i ich prezentowaniu w postaci raportów. W związku z tym funkcje takiego programu zostaną przedstawione na przykładzie aplikacji Farm Works Office, a w szczególności części dotyczącej opracowania danych przestrzennych - Farm Works Mapping.

Farm Works Mapping to oprogramowanie, które umożliwia tworzenie map plonu, zasobności gleby w składniki pokarmowe i pozostałych analiz oraz aplikacji nawożenia. W programie zachowano intuicyjność i prostotę obsługi oraz znacząco poprawiono funkcjonalność, dostępne narzędzia analityczne i moduły do raportowania. (<http://rolnictwoprecyzyjne.com.pl>)

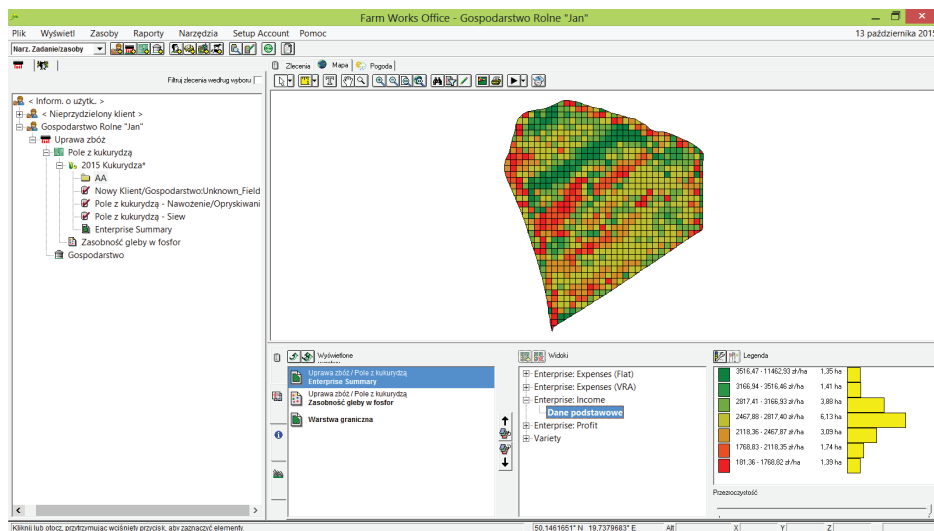
W module *Mapowanie* można realizować bardzo różnorodne zadania wymagające georeferencyjnego zobrazowania elementów w przestrzeni. Dostarcza nielimitowanej liczby warstw do mapowania plonów, rodzaju gleby, wyników próbkowania gleby; wyników pomiaru zieloności liści itp. Jest więc odpowiednim narzędziem do realizacji zadań z zakresu rolnictwa precyzyjnego, opartego na uwzględnieniu zmienności przestrzennej upraw polowych (Walczykova i Zagórda, 2015).

Program umożliwia również analizę map, czyli dostarcza narzędzi do uśredniania plonów w skali kilku lat, mapowania zysków/strat oraz tworzenia map zmiennego nawożenia opartych na formułach, które można w programie generować według własnych potrzeb.

Zarejestrowane wyniki przeprowadzonych zabiegów dla każdej uprawy, oprócz karty pracy, dostępne są w postaci mapy warstwowej arealu z różnymi widokami (rys. 9.1).

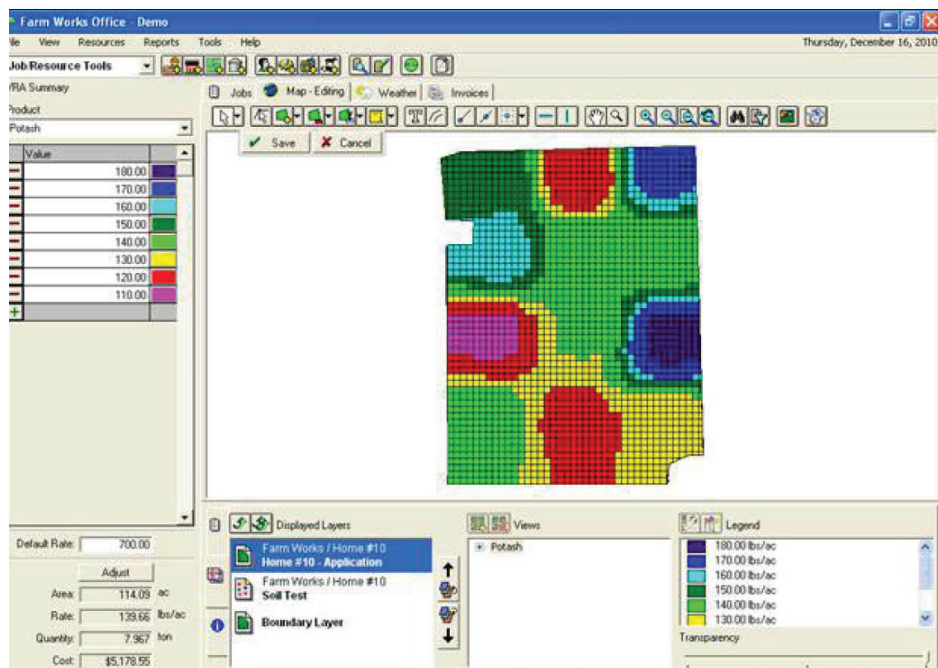
Mapa Enterprise Summary zawiera informacje dotyczące wydatków, dochodów i zysków z danego pola uprawnego. Dzięki tej opcji, czyli mapowaniu wyników, możliwe jest uzyskanie informacji o obszarach mniej i bardziej rentownych (Walczykova i Zagórda, 2015).

Odnosnie do tworzenia map aplikacji nawożenia mineralnego, w oprogramowaniu jest kilka algorytmów do wyboru, w których dodaje się zmienne, czyli uzyskane z analiz glebowych wyniki zawartości N, P, K, pH. Istnieje też możliwość tworzenia własnych formuł dla danej rośliny, plonu, gleby i zasobności. Na ich podstawie można dla poszczególnych obszarów pola określić dawkę nawozu. Można w ten sposób zróżnicować również inne środki (nasiona, oprysk) (rys. 9.2).



Źródło: Walczykova i Zagórda, 2015

Rysunek 9.1. Mapa kosztów produkcji



Źródło: Walczykova i Zagórda, 2015

Rysunek 9.2. Mapa aplikacyjna

W większości programów występuje możliwość zdalnego przesyłania danych. Oprogramowanie Farm Works Office ma moduł Connected Farm (CF), który umożliwia bezprzewodowe przesyłanie danych, łącząc działania terenowe z oprogramowaniem biurowym. Narzędzie to współpracuje z kompatybilnymi urządzeniami przenośnymi oraz z panelami sterująco-kontrolnymi na ciągniku (rys. 9.3), obsługującymi technologie bezprzewodowe, wykorzystując serwer sieciowy do ładowania i pobierania danych (Walczykova i Zagórda, 2015).



Źródło: Walczykova i Zagórda, 2015

Rysunek 9.3. Komputer polowy Trimble Juno 5D z kartą SIM (a) oraz panel nawigacyjny FmX z modemem telekomunikacyjnym DCM 300 (b)

Komunikacja z serwerem CF odbywa się zazwyczaj co minutę, łąduje nowe informacje przesyłane z tych urządzeń do miejsca przechowywania danych (dane dotyczące klientów, gospodarstw, pól, zużytych środków, zadań planowanych, zadań zakończonych, mapy poboru próbek gleby, itp.). Umożliwia też przesyłanie zleceń z komputera stacjonarnego na urządzenia przenośne poprzez obszar przechowywania danych narzędzia *Connected Farm* na serwerze (Walczykova i Zagórda, 2015).

10. BIBLIOGRAFIA

- Adamchuk V. 2011. On-the-go sensors – are we there yet? Proceedings of The Second Global Workshop on Proximal Soil Sensing – Montreal, 160-163.
- Adamchuk V.I. 2010. Precision Agriculture: Does it make sense? *Better Crops* 94, 3, 4-6.
- Adamchuk V.I., Hummel J.W., Morgan M.T., Upadhyaya S.K. 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 44, 71-91.
- Adamchuk V.I., Lund E.D., Reed T.M., Fergusson R.B. 2007. Evaluation of on-the-go technology for soil pH mapping. *Precision Agriculture* 8, 139-149.
- Adamchuk V.I., Lund E.D., Sethuramasamyraja B., Morgan M.T., Dobermann A., Marx D.B. 2005. Direct measurement of soil chemical properties on-the-go using ion-selective electrodes. *Computers and Electronics in Agriculture* 48, 271-294.
- Adamchuk V.I., Morgan M.T., Ess D.R. 1999. An automated sampling system for measuring pH. *Transactions ASAE*, 42, 885-891.
- Adamchuk V.I., Viscarra Rossel R.A. 2010. Development of on-the-go proximal soil sensor systems. W: *Proximal soil sensing, Progress in soil science*. Springer Science+Business Media B.V., 15-28.
- Adamchuk V.I., Viscarra Rossel R.A., Sudduth K.A., Schulze Lammers P. 2011b. Sensor fusion for precision agriculture. W: *Sensor Fusion - Foundation and Applications*, Ed. Ciza Thomas, 28 – 40. <http://www.intechopen.com/books/sensor-fusion-foundation-and-applications> Dostępny w Internecie 19.07.2016
- Adams M. 2008. Tools for spatially quantifying soil properties. *Precision Ag News*. March 2008. Advances in soil data collection. [http://spaa.com.au/files/catalog/March%202008\(Tools%20for%20spatially%20quantifying%20soil%20properties\).pdf](http://spaa.com.au/files/catalog/March%202008(Tools%20for%20spatially%20quantifying%20soil%20properties).pdf) Dostępny w Internecie 19.07.2016
- Agüera J., Carballido J., Gil J., Gliever Ch. J., Perez-Ruiz M. 2013. Design of a soil cutting resistance sensor for application in site-specific tillage. *Sensors* 13, 5945-5957.
- Ali M.M., Al-Ani A., Eamus D., Tan D.K.Y. 2016. Leaf nitrogen determination using non-destructive techniques - a review. *Journal of Plant Nutrition*. <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01904167.2016.1143954> Dostępny w Internecie 19.07.2016
- Allred B. 2011. Agricultural Geophysics: Past/Present Accomplishments and Future Advancements. Keynote Presentation. Proceedings of The Second Global Workshop on Proximal Soil Sensing – Montreal, 24-31.
- Allred B.J., Groom D., Ehsani M.R., Daniels J.J. 2008. Resistivity methods. W: Allred B.J., Ehsani M.R., Daniels J.J. (Ed.). *Handbook of Agricultural Geophysics*, CRC Press, rozdz. 5, 85-108.
- Ancev T., Whelan B., McBratney A. 2005. Evaluating the benefits from precision agriculture: the economics of meeting traceability requirements and environmental targets. *Precision Agriculture'05*. Wageningen Academic Publishers, 985-992.
- Andrade-Sanchez P., Upadhyaya S.K., Jenkins B.M. 2007. Development, construction and field evaluation of a soil compaction profile sensor. *Trans. ASABE* 50, 3, 719-725.
- ASAE EP542 (R2013) Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer.
- ASAE S313.2 FEB99, Soil Cone Penetrometer.
- Bah A., Balasundram S.K., Husni M.H.A. 2012. Sensor technologies for precision soil nutrient management and monitoring. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 7, 1, 43-49.

- Bannari A., Morin D., Bonn F. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Review* 13, 95-120.
- Barbarosa R.N., Overstreet Ch. What is soil electrical conductivity? LSU Ag Center Pub. 3185. <http://www.lsuagcenter.com/~media/system/2/8/b/4/28b48bc918928ec583933dc84919de3a/pub3185whatissoilelectricalconductivitylowres.pdf> Dostępny w Internecie 19.07.2016
- Basso B., Cammarono D., De Vita P. 2004. Remotely sensed vegetation indices: theory and applications for crop management. *Rivista Italiana di Agrometeorologia* 36-53, 1, 36-49.
- Bellinaso H., Melo Dematte J.A., Araújo Romeiro A. 2010. Soil spectral library and its use in soil classification. *R. Bras. Ci. Solo* 34, 861-870.
- Berry J.K. 2004. Map analysis: Procedure and Application in GIS Modelling [online]. [dostęp 22-08-2016]. Dostępny w Internecie: <http://innovativegis.com/basis/MapAnalysis/Default.htm>.
- Berry J.K. 1999. Precision farming primer [online]. [dostęp 22-08-2016]. Dostępny w Internecie: <http://www.innovativegis.com/basis/pfprimer/Default.html>.
- Biermacher J.T., Epplin F.M., Brorsen B.W., Solie J.B., Raun W.R. 2009. Economic feasibility of site-specific optical sensing for managing nitrogen fertilizer for growing wheat. *Precision Agriculture* 10, 3, 213-230.
- Bogrecki I., Lee W. S. 2005. Spectral phosphorus mapping using diffuse reflectance of soil and grass. *Biosystems Engineering* 91, 305-312.
- Boling A.A., Tuong T.P., van Keulen H., Bouman B.A.M., Suganda H. and Spiertz J.H.J. 2010. Yield gap of rainfed rice in farmers' fields in Central Java, Indonesia. *Agricultural Systems*. June 2010. Volume 103. Issue 5. s. 307-315.
- Boll J., vanRijn R.P.G., Weiler K.W., Ewen J.A., Daliparthi J., Hebert S.J., Steenhuis T.S. 1996. Using ground penetrating radar to detect layers in sandy field soil. *Geoderma* 70, 117-132.
- Boon N.E., Yahya A., Kheiralla A.F., Wee B.S., Gew S.K. 2005. A tractor mounted, automated soil penetrometer-shearometer unit for mapping soil mechanical properties. *Biosystems Eng.* 90, 4, 381-396.
- Brevik E.C., Fenton T.E., Lazari A. 2006. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. *Precision Agriculture*, 7, 393-404.
- Brodský L., Klement A., Penížek V., Kodešová R., Borůvka L. 2011. Building soil spectral library of the Czech soils for quantitative digital soil mapping. *Soil & Water Res.* 4, 165-172.
- Brown D. J., Shepherd K.D., Walsh M. G., Mays M. D., Reinsch T.G. 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 132, 273-290.
- Capała W., Jadczyzyn J. 2000. Perspektywy wykorzystania teledetekcji w praktyce rolniczej. *Biuletyn Informacyjny IUNG*, 12, 37-43.
- Carrara M., Comparetti A., Febo P., Morello G., Orlando S. 2003. Mapping soil compaction measuring cone penetrometer resistance. https://www.researchgate.net/publication/263847286_Mapping_soil_compaction_measuring_cone_penetrometer_resistance , Dostępny w Internecie 19.07.2016
- Castrignanò A., Landrum C., De Benedetto D. 2015. Delineation of management zones in precision agriculture by integration of proximal sensing with multivariate geostatistics. Examples of sensor data fusion. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 80, 1, 39-45.
- Castrignanò A., Wong M.T. F., Stelluti M., De Benedetto D., Solitto D. 2012. Use of EML, gamma-ray, emission and GPS height as multi sensor data for soil characterisation. *Geoderma* 175-176, 78-89.
- Cerovic Z.G., Masdoumier G., BenGhozlen N., Ltouche G. 2012. A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. *Physiologia Plantarum* 146, 3, 251-260. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1399-3054.2012.01639.x/epdf> Dostępny w Internecie 19.07.2016
- Christy C., D. 2008. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 10-19.

- Chung S.O., Sudduth K.A., Hummel J.W. 2006. Design and validation of an on-the-go soil strength profile sensor. *Trans. ASABE* 49, 1, 5-14.
- Collins K., Christy C., Lund C., Drummond E. 2003. Developing an automated soil pH mapping system. Paper No. MC03-205, ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Corwin D.L., Lesch S.M. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles and guidelines. *Agronomy Journal*, 95, 3, 455-471.
- Corwin D.L., Lesch S.M. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 11-43.
- Corwin D.L., Lesch S.M. 2010. Delineating site-specific management units with proximal sensors. W: *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*, Oliver M. (Ed.) Springer Science+Business Media B.V., rozdz. 6, 139-165.
- Coventry R.J., Hughes J.R., McDonnell P.A. 2011. Operations manual for apparent soil electrical conductivity mapping: A guide to collecting, analysing and interpreting soil EC_a data in precision sugarcane agriculture. Technical Report, 2011-13, Soil Horizons, Townsville.
- Czarnecka-Skubina E., Nowak D. 2012. System śledzenia ruchu i pochodzenia żywności jako narzędzie zapewnienia bezpieczeństwa konsumentów. *ŻYWNOSĆ. Nauka, Technologia, Jakość* 5, 84, 20-36.
- Daniels J., Ehsani M.R., Allred B.J. 2008a. Electromagnetic induction methods. W: Allred B.J., Ehsani M.R., Daniels J.J. (Eds.). *Handbook of Agricultural Geophysics*, CRC Press, rozdział 6, 109-128.
- Daniels J., Ehsani R.M., Barry J.A. 2008b. Ground-penetrating radar methods (GPR). W: Allred B.J., Ehsani M.R., Daniels J.J. (Ed.) . *Handbook of Agricultural geophysics*. CRC Press, rozdz. 7, 129-145.
- Dawidowski J., Dobek T., Jurga J. 2011. Rolnictwo precyzyjne. Współczesna inżynieria rolnicza – badania. PTIR monografia, s. 65-85. ISBN 978-83-930818-1-3.
- De Benedetto D., Castrignanò A., Sollitto D., Modugno F., Buttafuoco G., Papa G. 2012. Integrating geophysical and geostatistical techniques to map the spatial variation of clay. *Geoderma* 171-172, 53-63.
- De Benedetto D., Castrignanò A., Sollitto D., Campi P., Modugno F. 2008. Non-intrusive Mapping of Subsoil Properties in Agricultural Fields with GPR and EMI. *Proceedings First global workshop on high resolution digital soil sensing and mapping*, Sydney –Australia, ss. 6.
- De Benedetto D., Castrignanò A., Rinaldi M., Ruggieri S., Figorito B., Gualano S., Diacono M., Tamborrino R. 2013. An approach for delineating homogeneous zone by using multi sensor data. *Geoderma* 199, 117-127.
- De Benedetto D., Quarto R., Castrignanò A., Palumbo D. A. 2015. Impact of data processing and antenna frequency on spatial structure modelling of GPR data. *Sensors* 15, 16430-16447.
- De Moraes M.T., da Silva V. R., Zwirter A. L.; Carlesso R. 2014. Use of penetrometers in agriculture: A review. *Eng. Agric.* 34, 1, ss.15.
- Dhawale N.M., Adamchuk V.I., Prasher O., Viscarra Rossel R.A. 2015. Proximal soil sensing of soil texture and organic matter with a prototype portable mid-infrared spectrometer. *European Journal of Soil Science* 66, 661-669.
- Domsch H., D. Ehlert D., Giebel A., Witzke K., Boess J. 2006. Evaluation of the soil penetration resistance along a transect to determine the loosening depth. *Precision Agriculture* 7, 309-326.
- Doolittle J.A., Minzenmayer F.E., Waltman S.W., Benham E.C., Tuttle J.W., Peaslee S.D. 2007. Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States. *Geoderma* 141, 416-421.
- Doolittle J.A., Brevik E.C. 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma* 223-225, 33-45.
- Doolittle J.A., Collins M. E. 1995. Use of soil information to determine application of ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 33, 101-108.

- English B.C., Roberts R.K., Larson J. 2005. Multiple variable rate input application: a decision framework. *Precision Agriculture* '05. Wageningen Academic Publishers, 193-200.
- Faber A. 1998a. System rolnictwa precyzyjnego. I. Mapy pól. Praca przeglądowa. *Fragmenta Agronomica* (XV) Nr 1 (57), s. 4-15.
- Faber A. 1998b. System rolnictwa precyzyjnego. II. Analiza i interpretacja map pól. Praca przeglądowa. *Fragmenta Agronomica* (XV) Nr 1 (57), s. 16-27.
- FAO. 2005. Impact of Climate Change, Pests and diseases on Food Security and Poverty Reduction- Background Document, Rome. [ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/meeting/009/j5411e.pdf](http://ftp.fao.org/docrep/fao/meeting/009/j5411e.pdf)
- Fountas S., Paraforos D., Cavalaris Ch., Karamoutis CH., Gemtos T. A., Abu-Khalaf N., Tagarakis A. 2013. A five point penetrometer with GPS for measuring soil compaction. *Computers and Electronics in Agriculture* 96, 109-116.
- Fountas S., Pedersen S., Sørensen C., Chatzinikos A., Pesonen L., Basso B., Vougioukas S., Nash E., Gemtos T., Blackmore S. 2009. Management strategies and practices for precision agriculture operations. *Precision Agriculture* '09. Wageningen Academic Publishers, 893-898.
- Freeland, R. S.; Sorochan, J. C.; Goddard, M. J.; McElroy, J. S. 2008. Using ground-penetrating radar to evaluate soil compaction of athletic turfgrass fields. *Applied Engineering in Agriculture* 24, 4, 509-514.
- Friedman Sh. P. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 45-70.
- Ganeshan A. S., Satish S. V., Kartik A., Nirmala S., Ramesh G. 2016. India's Satellite-Based Augmentation System, GAGAN-Redefining Navigation over the Indian Region. *InsaidGNSS*. January/February 2016. Volume 11. Number 1. s. 42-48. Dostępny w Internecie 10.09.2016 r. www.insidegnss.com/node/4712
- Garbiak, K., Jurga, J. 2012. Porównanie wybranych błędów przejazdów agregatu rolniczego prowadzonego manualnie oraz automatycznie. *Inżynieria Rolnicza*, 4(139), 55-63.
- Gebbers R. 2014. Current crop and soil sensors for precision agriculture. http://www.atb-potsdam.de/uploads/feupload/Gebbers_SensorsPrecisionAgriculture_ConBAP2014_v04.pdf Dostępny w Internecie 19.07.2016.
- Gebbers R., Adamchuk V.I. 2010. Precision agriculture and food security. *Science* 327, 828-831.
- Gebbers R., Lück E. 2008. Comparison of geoelectrical instruments in different soils. 2008. W: Allred B.J., Ehsani M.R., Daniels J.J. (Ed.) *Handbook of Agricultural Geophysics*, CRC Press, rozdz. 23, 295-302.
- GEOPROSPECTOR- TSM information package. 2015.
- Godwin R.J., Wood G.A., Taylor J.C., Knight J.P., Welsh J.P. 2003. Precision farming of cereal crops: a review of a six year experiment to develop management guidelines. *Biosystems Engineering* 84 (4), s. 375-391.
- Goffart J.P., Olivier M., Frankinet M. 2008. Potato crop nitrogen status assessment to improve N fertilization management and efficiency: past-present-future. *Potato Research* 51, 355-383.
- Görücü S., Khalilian A., Han Y. J., Dodd R. B. 2011. Variable-depth Tillage based on Geo-referenced Soil Compaction Data in Coastal Plain Soils. *International Journal of Applied Science and Technology*, 1(2), 22-32.
- Görücü S., Khalilian A., Han Y.J., Dodd R.B., Smith B.R. 2006. An algorithm to determine the optimum tillage depth from soil penetrometer data in Coastal Plain soils. *Appl. Eng. Agric.* 22, 5, 625-631.
- Goulas Y., Cerovic Z.G., Cartelat A., Moya I. 2004. Duallex: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence. *Applied Optics* 43, 23, 4488-4496.
- Gozdowski D., Samborski S., Sioma S. 2007. *Rolnictwo Precyzyjne*. Wydawnictwo SGGW. Warszawa. ISBN 978-83-7244-858-3

- Gradjean G., Cerdan O., Richard G., Cousin I., Lagacherie P., Tabbagh A., Van Wesemael B., Stevens A., Lambot S., Carre F., Maftai R., Hermann T. 2010. DIGISOIL: AN integrated system, of data collection technologies for mapping soil properties. W: Proximal sensing, Springer-Verlag, NY, 89-101.
- Grisso R., Alley M., Thomason W., Holshouser D., Roberson G. T. 2011. Precision Farming Tools: Variable-Rate Application. Virginia Cooperatif Extension. Publication 442-505 (dostępne w Internecie 22.08.2016 r.) https://pubs.ext.vt.edu/442/442-505/442-505_PDF.pdf
- Gysi M. 2000. Soil compaction due to heavy agricultural wheel traffic. Diss. ETH (Swiss Federal Institute of Technology) No.13910, ss. 97.
- Hall H.E., Raper R.L. 2005. Development and conceptual evaluation an on-the-go soil strength measurement system. Trans. ASAE 48, 2, 469-477.
- Hanquet H., Sirjacobs D., Destain M.F., Frankinet M, Verbrugge J.C. 2004. Analysis of soil variability measured with a soil strength sensor. Precision Agriculture 5, 3, 227-246.
- Heege H. J., Reusch S., Thiessen E. 2008. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. Precision Agriculture 9, 115-131.
- Hemmat A., Adamchuk V.I., Jasa P. 2008. Use of an instrumented disc coulter for mapping soil mechanical resistance. Soil Till. Res. 98, 2, 150 -163.
- Hemmat A., Adamchuk V.I.2008. Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. Computers and Electronics in Agriculture 63, 89-103.
- Hornick S.B. 1992. Factors affecting the nutritional quality of. crops. American Journal of Alternative Agriculture 7, 1-2, 63-68.
- [http://www.ipni.net/publication/ssmg.nsf/0/EEE8C6465711713F852579E50077ACDC/\\$FILE/SSMG-34.pdf](http://www.ipni.net/publication/ssmg.nsf/0/EEE8C6465711713F852579E50077ACDC/$FILE/SSMG-34.pdf) Dostępny w Internecie 19.07.2016.
- Huyghebaert B., Dubois G., Bienfait P. 2007. Comparative study of the precision of six GPS guiding systems in agriculture. II International Symposium Farm Machinery and Process
- Jackson R.D., Huete A.R. 1991. Interpreting vegetation indices. Preventive Veterinary Medicine 11, 185-200.
- Jahn B., R., Linker R., Upadhyaya S.K., Shaviv A., Slaughter D. C., Shmulevich I. 2006. Mid-infrared spectroscopic determination of soil nitrate content. Biosyst. Eng. 94, 505-515.
- Jakliński L. 2006. Model propagacji nacisków uwzględniający podszwę płuzną. Problemy Eksploatacji 3, 165-172.
- Janik L.J., Merry R.H., Forrester S., T., Lanyon D.M., Rawson A. 2007a. Rapid prediction of soil water retention using mid infrared spectroscopy. Soil Sci. Soc. Am. Journal, 71, 507-514.
- Janik L.J., Skjemstad O., Shepherd K.D, Spouncer L.R. 2007b. The prediction of soil carbon fractions using mid-infrared partial least square analysis. Aust. J. Soil Res. 45, 73-81.
- Januszewski J. 2014. BeiDou - chiński globalny nawigacyjny system satelitarny wchodzi na rynek światowy. Wydawnictwo SIGMA-NOT. Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne. nr 11/ 2014. s. 1379-1386. Dostępny w Internecie 25.07.2016 r. https://www.polsa.gov.pl/images/edu/Edukacja_BeiDou_chinski_globalny_nawigacyjny_system_satelitarny_wchodzi_na_rynek_swiatowy.pdf.
- Johnson C.E., Bailey A.C. 2002. Soil compaction. Advance in soil Dynamics 2, ASAE, St. Joseph, MI, 155-178.
- Johnson C.K., Doran J.W., Duke H.R., Weinhold B.J., Eskridge K.M., Shanahan J.F. 2001. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. Soil Sci. Soc. Am. J. 65, 1829-1837.
- JRC of the EC; MARS Unit H04; Zarco-Tejada P.J., Hubbard N., Loudjani Ph. 2014. Precision agriculture: An opportunity for EU farmers – potential support with the CAP 2014-2020. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT\(2014\)529049_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT(2014)529049_EN.pdf) Dostępny w Internecie 19.07.2016.

- Juliszewski T., Kiełbasa P., 2013 (czerwiec). Technika satelitarna w rolnictwie. Biuletyn Informacyjny Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, nr 3 (83), str. 25-26, ISSN 1899-7775.
- Keicher R., Seufert H., Knechtges H., Brunner D. 2000. Lenkungsautomatisierung zur mechanischen Unkrautbekämpfung. Landtechnik, nr 2., s. 150-151.
- Kiełbasa P. 2011. Zintegrowana metoda oceny nakładów energetycznych na uprawę podstawową w aspekcie mozaikowości gleby. Rozprawy habilitacyjne Nr 33. Inżynieria Rolnicza 3 (128).
- Kim H.J., Sudduth K. a., Hummel J. W. 2009. Soil macronutrient sensing for precision agriculture. J. Environ. Monit. 11, 1810-1824.
- Kim Y., Glenn D.M., Park J., Ngugi H.K., Lehman B.L 2012. Characteristics of active spectra sensor for plant sensing. Transactions of the ASABE 55, 1, 293-301.
- King J.A., Dampney P.M.R., Lark R.M., Wheeler H.C., Bradley R.I., Mayr T., Russil N. 2003. Evaluation of non-intrusive sensors for measuring soil physical properties. HGCA Project Report No. 302, ss.82.
- Kipp S., Mistele B., Schmidhalter U. 2014. Active sensor performance – depending on measuring height, device temperature and light intensity. Computers and Electronics in Agriculture 100, 24-33.
- Klonowski, J., Lisowski, A. 2005. Metody monitorowania i mapowania plonu roślin kukurydzy zbieranych siewkami polową. Inżynieria Rolnicza, 2(62), 57-67.
- Kornel B. Wydro. 2005. Telematyka – znaczenia i definicje terminu. Telekomunikacja i techniki informacyjne, nr 1-2., s. 116-130.
- Koźmicki Z. 2008. Kierunki rozwoju techniki rolniczej. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna, nr 1.
- Kuang B., Tekin Y., Waine T., Mouazen A.M. 2014. Variable rate lime application based on on-line visible and near infrared (vis-NIR) spectroscopy measurement of soil properties in Danish field. Proceedings Int. Conf. of Agricultural Engineering, Zurich, ss. 9.
- Lee K.S., Lee D.H., Sudduth K.A., Chung S.O., Kitchen N.R., Drummond S.T. 2009. Wavelength identification and diffuse reflectance estimation for surface and profile soil properties. Trans. ASABE 52, 683-695.
- Lencsés E., Takács I., Takács-György K. 2014. Farmers' perception of precision farming technology among Hungarian farmers. Sustainability 6, 8452-8465.
- Lisowski A. 2005. Technologie rolnictwa precyzyjnego. Postępy Nauk Rolniczych, nr 6, s. 51- 61.
- Lisowski A., Klonowski J. 2005. Monitorowanie plonu roślin trawy przez pomiar grubości warstwy materiału roślinnego między walcami wciągająco-zgniatającymi siewkami polowej. Inżynieria Rolnicza, 2, s. 83-91.
- Lobsey C.R., Viscarra Rossel R. 2015. Developments in proximal soil sensing. 18th Precision agriculture Symposium in AUSTRALIASIA. http://www.spaa.com.au/pdf/317_Lobsey.pdf Dostępny w Internecie 19.07.2016.
- Lobsey C.R., Viscarra Rossel R., McBratney A.B. 2010. Proximal soil nutrients sensing using electrochemical sensors. W: Proximal soil sensing, Progress in soil science, Springer Science+Business Media B.V., rozdz. 6, 77-88.
- Ludger Rogge, Paul Riley, Silvana Atanasescu, Janet Walker, Jan Kasik. 1999. Końcowy wykaz właściwych praktyk (telematyka transportowa). *Przegląd zastosowań telematyki w krajach europejskich*. Projekt CAPE (TR 4101/ IN 4101) Raport D 3.3.
- Management in Sustainable Agriculture, Lublin
- Mazzetto F., Calcante A., Salomoni F. 2009. Development and first tests of a farm monitoring system based on a client-server technology. Precision Agriculture'09. Wageningen Academic Publishers, 389-396.
- McBratney A., Whelan B., Ancev T., Bouma J. 2005. Future directions of precision agriculture. Precision Agriculture 6, 7-23.
- Mikuła A. 2012. Bezpieczeństwo żywnościowe Polski. Roczn. Ekonomii Rolnictwa i Rozwoju Obszarów Wiejskich 99, 4, 38-48.

- Minasny B., McBratney A.B., McKenzie N.J., Grundy M.J. Predicting soil properties using pedo-transfer functions and environmental correlation. Guidelines for surveying soil and land resources, 349-367. www.academia.edu/1196619 Dostępny w Internecie 22.04.2016
- Moraes M.T., Vanderlei R. da Silva, Anderson L. Zwirtes; Reimar Carlesso. 2014. Use of penetrometers in agriculture: a review. Eng. Agríc. vol.34 no.1.
- Mouzen A.M., Roman H. 2006. Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture. Soil Till. Res. 86, 218 -229.
- Munack A. 2004. Rolnictwo w trzecim tysiącleciu- bieżące trendy i nowe wyzwania w inżynierii rolniczej. Postępy Nauk Rolniczych. 5, s. 3-12.
- Muñoz-Huerta R. F., Guevara-Gonzalez R.G., Contrera-Medina L.M., Torres-Pacheco I., Prado-Olivarez J., Ocampo-Velazquez R. V. 2013. A review of methods for sensing the nitrogen status on plants: advantages, disadvantages and recent advances. Sensors 13, 10823-10843.
- Narkiewicz J. 2003. GPS Globalny System Pozycyjny. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. ISBN 83-206-1493-7
- Narkiewicz J. 2007. GPS i inne satelitarne systemy nawigacyjne. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. ISBN 978-83-206-1642-2
- Nash E., Nikkilä R., Pesonen L., Sørensen C.G. 2009. Technology requirement for a standard information infrastructure to assist compliance with crop production standards. Precision Agriculture'09. Academic Publishers, 935-942.
- Neményi M., Mesterházi P.A., Miles G. 2006. An application of tillage force mapping as a cropping management tool. Biosyst. Eng 93. 3, 351-357.
- Oerke E.C. 2006. Crop losses to pests. Journal of Agricultural Sciences 144, 31-43.
- Oliver M.A., Bishop T.F.A., Marchant B.P. 2013. Precision Agriculture for sustainability and Environmental Protection. Routledge, ss. 31.
- Olszewski P. 2010. Plon z satelity. Rolniczy Przegląd Techniczny. 11 (141). s. 66-69.
- Ortiz B., Shaw J., Fulton J. 2011. Basic crop sensing. ANR-1398, Alabama Cooperative Extension System, ss. 6.
- Park Y.L., Krell R. K., Carroll M. 2007. Theory, technology and practice of site-specific insect pest management. Journal of Asia-Pacific Entomology 10, 2, 89-101.
- Pawlicki T., Feder S. 2010. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. Vol. 55(2) 68 – 7.
- Pedersen S.M., Ørum J.E., Sørensen C.G., Fountas S., Pesonen L., Blackmore B.S., Basso B. 2009. Potential savings and economic benefits in arable farming from better precision farming and information management. Precision Agriculture'09. Wageningen Academic Publishers, 919-926.
- Petersen H., Fleige H., Rabbel W., Horn R. 2005. Applicability of geophysical prospecting methods for mapping of soil compaction and variability of soil texture on farm land. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 168 (1), 68-79.
- Pimentel D. , Burges M. 2014. Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. W: Integrated Pest Management, Springer Science+Business Media Dordrecht, 48-66.
- Pitla S.K., Wells L.G. 2006. Development of an electro-mechanical system to identify & map adverse soil compaction using GIS&GPS. ASABE Paper No. 061056. ASABE, St. Joseph, MI.
- Povh F.P., dos Anjos W.P.G. 2014. Optical sensors applied in agricultural crops. <http://www.intechopen.com/books/optical-sensors-new-developments-and-practical-applications/optical-sensors-applied-in-agricultural-crops> Dostępny w Internecie 19.07.2016.
- Pretty J. 2008. Agricultural sustainability: concepts, principles, and evidence. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 363, 1491, 447-465.
- Price R.R., Hummel J.W., Birell S.J., Ahmad I.S. 2003. Rapid nitrate analysis of soil cores using ISFETs. Trans. ASAE 30, 3, 601-610.

- Przybył J. 2007. Czy roboty podbiją rolnictwo. Akt. Techniki Roln. Express, wyd. Boomgaarden Medien sp. o.o., nr. 1-2.
- Qiao Y., Zhang S. 2012. Near-Infrared spectroscopy technology for soil nutrients detection based on LS-SVM. Computers and Computing Technologies in Agriculture, IFIP AICT 368, 325-335.
- Raper R.L., Reeves D.W., Shaw J., van Santen E., Mask P.L. 2007. Benefits of site-specific subsoiling for cotton production in Coastal Plain soils. Soil Till. Res. 96, 174-181.
- Rataj V., Galambošová J., Macák M., Nozdrovický L. 2014. Presné poľnohospodárstvo. Systém – Stroje – Skúsenosti. Profi Press, ss. 156.
- Reckleben Y. 2011. Optimierung der Stickstoffdüngung auf gutem Weg. Bauernblatt, Dezember, 46-49.
- Reckleben Y. 2014. Sensoren für die Stickstoffdüngung- Erfahrungen in 12 Jahren praktischem Einsatz. Journal für Kulturpflanzen 66 (2), 42-47.
- Reeves J.B., McCarty G.W., Hively W.D. 2010. Mid- versus near infrared spectroscopy for on-site analysis of soil. W: Proximal soil sensing, Springer Verlag, NY, 133-142.
- Reichardt M., Jürgens C. 2007. Adoption and perspective of precision farming (PF) in Germany: results of several surveys among the different agricultural target groups. Precision Agriculture '07. Wageningen Academic Publishers, 843-850.
- Robert P.C. 1993. Characterization of soil conditions at the field level for soil specific management. Geoderma 60, 57-72.
- Robert P.C. 2002. Precision farming: a challenge for crop nutrition management. Plant and Soil 247, 143-149.
- Roberts T.L. 2007. Right product, right rate, right time, and right place – the foundation of best management practices for fertilizer. Better Crop 91, 4, 14-15.
- Robinson D.A., Lebron I., Lesch S.M., Shouse P. 2004. Minimizing drift in electrical conductivity measurements in high temperature environment using the EM-38. Soil Sci. Soc. Am. J. 54, 46-54.
- Rodrigues Jr. F. A., Bramley R.G.V., Gobbett D.L. 2015. Proximal soil sensing for precision agriculture: simultaneous use of electromagnetic induction and gamma radiometrics in contrasting soils. Geoderma 243-244, 183-195.
- Rodriguez D., Fitzgerald G.J., Belford R., Christensen L.K. 2006. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts. Australian Journal of Agricultural Research 57, 781-789.
- Rooney D., Stelford M., Landolt D. 2000. Site-specific soil compaction mapping using a digital penetrometer. Site-Specific Management Guidelines.
- Rybacki P., Rzeźnik C., Durczak K., 2011. Ocena przydatności typowych programów komputerowych w gospodarstwach rolnych. Journal of Research and Application in Agricultural Engineering 56 (1): 118-120.
- Samborski S., Rozbicki J. 2004. Kalibracja chlorofilometru do oceny odżywienia zbóż azotem. Postępy Nauk Rolniczych 5, 27 – 37.
- Samborski S.M., Tremblay N., Fallon E. 2009. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. Agronomy Journal 101, 4, 800-812.
- Samouëlian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richard G. 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. Soil Till. Res. 83, 173 -193.
- Šařec, P., Šařec, O., Klain, P. (2009). Monitorowanie wykorzystania ciągnika – bezprzewodowa transmisja danych. Inżynieria Rolnicza, 9(118), 227-234.
- Schieffer J., Dillon C. 2015. The economic and environmental impacts of precision agriculture and interactions with agro-environmental policy. Precision Agriculture 16, 46-61.
- Schirman M., Gebbers R., Kramer E. 2013. Performance of automated near-infrared reflectance spectrometry for continuous in situ mapping soil fertility at field scale. abstract, copyright Soil Science Society of America.

- Schirman M., Gebbers R., Kramer E., Seidel J. 2011a. Evaluation of soil sensor fusion for mapping macronutrients and soil pH. The 2nd Global Workshop on Proximal Soil Sensing, Montreal.
- Schirman M., Gebbers R., Kramer E., Seidel J. 2011b. Soil pH mapping with an on-the-go sensor. *Sensors* 11, 573-598.
- Shaddad S.M., Madrau S., Castrignanò A., Mouazen A.M. 2016. Data fusion for delineation of site-specific management zones in a field in UK. *Precision Agriculture* 17, 2, 200-217.
- Shapiro Ch. A., Francis D. D., Ferguson R. B., Hergert G. W., Shaver T. M., Wortmann Ch. S., 2006 (rev. 2013). Using a Chlorophyll Meter to Improve N Management. <http://extensionpublications.unl.edu/assets/pdf/g1632.pdf> Dostępny w Internecie 19.07.2016.
- Sharifi A., Godwin R.J., O'Dogherty M.J., Dresser M.L. 2007. Evaluating the performance of a soil compaction sensor. *Soil Use Management* 23, 171-177.
- Shepherd K.D., Walsh M.G. 2002. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. Journal* 66, 988-998.
- Shi Z., Wang Q., Peng J., Ji W., Liu H., Li X., Viscarra Rossel R.A. 2014. Development of a national VNIR soil-spectral library for soil classification and prediction of organic matter concentrations. *Science China. Earth Sciences* 57, 1671-1680.
- Sibley K.J., Brewster G.R., Astatkie T., Adsett J.F., Struik P.C. 2010. In-field measurement of soil nitrate using an ion selective electrode. *Advances in Measurement Systems*, Milind Kr Sharma (Ed.), ss. 27. <http://cdn.intechweb.org/pdfs/9958.pdf> Dostępny w Internecie 19.07.2016.
- Silleos N.G., Alexandridis T.K., Gitas I.Z., Perakis K. 2006. Vegetation Indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. *Geocarto International* 21, 4, 21-28.
- Sims N.C., Culvenor D., Newnham G., Coops N.C., Hopmans P. 2014. Towards the operational use of satellite hyperspectral image data for mapping nutrient status and fertilizer requirements in Australian plantation forest. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing* 6, 2, 320-328.
- Sirjacobs D., Hanquet H., Lebeau F., Destain M.F. 2002. On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. *Soil Till. Res.* 64, 231-323.
- Sławiński K., Grieger A. 2009. Ocena wykorzystania technologii informacyjnych w wybranych gospodarstwach rolnych województwa zachodniopomorskiego. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 9 (118). s. 241-244. ISSN 1429-7264
- Soane B.D., van Ouerkerk. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. W: *Soil compaction in crop production*, Elsevier, 1-21.
- Specht C. 2007. *System GPS*. Wydawnictwo Bernardinum. ISBN 978-83-7380-469-2
- Spoor G. 2006. Alleviation of soil compaction: requirements equipment and techniques. *Soil Use Management* 22, 113-122.
- Stenberg B., Viscarra Rossel R.A., Mouazen A.M., Wetterlind J. 2010. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. W: Donald L. Sparks (Ed.); *Advances in Agronomy* 107, 163-215.
- Stoorvogel J., Bouma J. 2005. Precision agriculture: the solution to control nutrient emissions? *Precision Agriculture'05*. Wageningen Academic Publishers, 47-55.
- Sudduth K.A., Drummond S.T., Kitchen N.R. 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 31, 239-264.
- Sudduth K.A., Kitchen N.R., Wiebold W.J., Batchelor W.D., Bollero G.A., Bullock D.G., Clay D.E., Palm H.L., Pierce F.J., Schuler R.T., Thelen K.D. 2005. Relating apparent electrical conductivity top soil properties across the North-Central USA. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 263-283.
- Sudduth K.A., Sun-Ok Chung, Andrade-Sanchez P., Upadhyaya S.K. 2008. Field comparison of two prototype soil strength profile sensors. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 20-31.

- Sulkiewicz M., Ciereszko I. 2016. Fluorescencja chlorofilu *a* – historia odkrycia i zastosowania w badaniach roślin. *Problemy Nauk Biologicznych KOSMOS* 65, 1, 103-115.
- Sun Y., Ma D., Schulze Lammers P., Schmittmann O., Rose M. 2006. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil Till. Res.* 86, 209-217.
- Szymczyk P., Marczak H., Tomecka-Suchoń S., Szymczyk M., Gajer M., Gołębiowski T. 2015. Komputerowe przetwarzanie i analiza danych georadarowych. Monografia, Kraków.
- Talebpoor B., Turker U., Yegil U. 2015. The role of precision agriculture in the promotion of food security. *Intern. Journal of Agric. and Food Research* 4, 1, 1-23.
- Taylor J. A., McBratney A., Viscarra Rossel R., Minasny B., Taylor H., Whelan B., Short M. 2006. Development of a multisensory platform for proximal soil sensing. <https://a-c-s.confex.com/crops/wc2006/techprogram/P15183.HTM>
- Taylor J., Whelan B., THylen B., Gilbertsson M., Hassaall J. 2005. Monitoring wheat protein content on-harvester: Australian experiences. *Precision Agriculture* 5, 369-375.
- Taylor J.A., Short M., McBratney A.B., Wilson J. 2010. Comparing the ability of multiple soil sensors to predict soil properties in a Scottish potato production system. W: Viscarra Rossel R.A., McBratney A.B., Minasny B. (Ed.), *Proximal Soil Sensing: Progress in Soil Science*, Springer Science + Business Media B.V., Netherlands, rozdz. 5, 1, 387-396.
- Terhoeven-Urselmans T., Vagen T., Spaargaren O., Shepherd K.D. 2010. Prediction of soil fertility properties from globally distributed soil mid-infrared spectral library. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 1792-1799.
- TerraHorsch 2015. Agritechnika 2015: Mocne wejście. Horsch Maschinen GmbH. 11/2015. s. 9.
- Thomasson J.A., Sui R., Cox M.S., Al-Rajehy A. 2001. Soil reflectance sensing for determining soil properties in precision agriculture. *Transactions of the ASAE* 44, 6, 1445-1453.
- Topakci M., Unal I., Canakci M., Celik H.K., Karyael D. 2010. Design of a horizontal penetrometer for measuring on-the-go soil resistance. *Sensors* 10, 9337-9348.
- Towpik T. 2010. Precyzyjny ciągnik, *Rolniczy przegląd techniczny*. Nr 11.
- TSM Information Package. GEOPROSPECTORS.
- Van Bergeijk J., Goense D., Speelman L. 2001. Soil tillage resistance as a tool to map soil type differences. *J. agric. Engng Res.* 79, 371-387.
- Verhulst N., Govaerts B. 2010. The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeekerTM handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concept and case studies, ss.16. <http://plantstress.com/methods/Greenseeker.PDF> Dostępny w Internecie 19.07.2016.
- Viscarra Rossel R.A., Adamchuk V.I., Sudduth K.A., McKenzie N.J., Lobsey C. Proximal soil sensing: An effective approach for soil measurements in space and time. 2011. *Advances in Agronomy* 113, 237-282.
- Viscarra Rossel R.A., Jeon Y.S., Odeh I.O.A., McBratney A.B. 2008b. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. *Australian Journal of Soil Research* 46, 1-16.
- Viscarra Rossel R.A., McBratney A.B. 2008a. Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping. W: Hartemink i in. (Ed.) *Digital Soil Mapping with Limited Data*, 165- 172.
- Viscarra Rossel R.A. oraz 39 współautorów. 2016. A global spectral library to characterize the world's soil. *Earth-Science Reviews* 155, 198-230.
- Viscarra Rossel R.A., Cattle S., Ortega A., Fouad Y. 2009. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. *Biosyst. Eng.* 100, 149-159.
- Viscarra Rossel R.A., McGlynn R.N., McBratney A.B. 2006a. Determination the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 137, 70-82.
- Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O. 2006b. Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131, 59-75.

- Voicea I., Pirnă I., Vlăduț V., Matache M., Bungescu S. 2011. Experimental models of agricultural productivity maps obtained with the help of an information and satellite measurement system adaptable for different types of combines. *PROCEEDINGS OF THE 39 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AGRICULTURAL ENGINEERING "Actual Tasks on Agricultural Engineering"*. s. 333-342.
- Walczykova M., 2012. Wybrane aspekty rolnictwa precyzyjnego. Inżynieria rolnicza w dobie innowacyjnej gospodarki. Monografia PTIR, Kraków, 321-332, ISSN 978-83-930818-9-9.
- Walczyk M., Zagórda M. 2009. Korelacja wybranych właściwości gleby z plonami. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 543, 377-385.
- Walczykova M. 2011a. Farmers' access to information and know-how concerning precision agriculture. Utilization of Agricultural and Forest Machinery in Research and Teaching. Monograph, Vol. 3, Polish Academy of Arts and Sciences, 359-366.
- Walczykova M. 2011b. An economic analysis of the precision fertilization. Vienna, XXXIV CIOSTA CIGR Conference, ss. 8.
- Walczykova M., Zagórda M. 2015. Features of the FarmWorks software supporting the crop production management on the farm. Polish Academy of Arts and Sciences. Nr 22, s. 307-316.
- Walczykova M. Zagórda M. 2007. Analiza właściwości gleby dla potrzeb rolnictwa precyzyjnego. *Zesz. Naukowe UP we Wrocławiu*, VI, 552, 35-40.
- Walczykova, M., Zagórda, M. 2005. Zmienne nawożenie mineralne pszenicy ozimej z wykorzystaniem map przestrzennego rozmieszczenia plonów. *Inżynieria Rolnicza*, 10(70), 375-384.
- Walther S.T., Schüle T., Köller K. 2007. Precision tillage: Online variation of tillage depth. *Bulletin USAMV-CN*, 63, 34-39.
- Werban U., Behrens T., Cassiani G., Dietrich P. 2009. iSoil – An EU-level project to integrate geophysics, digital soil mapping and soil science. W: *Proximal soil sensing: Progress in Soil Science*, Springer-Verlag, 103-110.
- Whiting M. L., Li L., Ustin S.L. 2004. Predicting water content using Gaussian model on soil spectra. *Remote Sens. Environ.* 89, 535-552.
- Wiegand C.L., Richardson A.J., Escobar D.E., Gerbermann A.H. 1991. Vegetation indices in crop assessment's. *Remote Sens. Environ.* 35, 105-119.
- Wielicki, P. 2013. Flota pod nadzorem. Pozyskano z <http://www.log24.pl/artykuly/flota-pod-nadzorem>, 3345
- Wong M.T.F., Wittwer., liver Y.M., Robertson M.J. 2010. Use of EM38 and gamma ray spectrometry as complementary sensors for high-resolution soil property mapping. W: *Proximal Soil Sensing: Progress in Soil Science*, Springer Science, 343-349.
- Woods S. 2013. Soil mapping technologies (EM38 and Veris) for identifying soil management zones. [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$Department/deptdocs.nsf/all/crop14324/\\$FILE/au-2013-woods-effectiveness-of-em38-and-veris-soil-ec-technologies.pdf](http://www1.agric.gov.ab.ca/$Department/deptdocs.nsf/all/crop14324/$FILE/au-2013-woods-effectiveness-of-em38-and-veris-soil-ec-technologies.pdf) Dostępny w Internecie 19.07.2016.
- Zagórda M., Walczyk M., Mazurek R. 2008. Wykorzystanie GIS do wizualizacji przestrzennej zmienności parametrów gleby w powiązaniu z plonem. *Inżynieria Rolnicza* 7, 105, 229- 236.
- Zagórda M., Walczykova M. 2007. Correlation of the spatial distribution of the crop yield with the soil physical properties. XXXII CIOSTA-CIGR Section V Conference Proceedings. Nitra, Slovakia, ss.8.
- Zagórda, M., Walczyk, M. 2008. Ocena zgodności map aplikacji z mapami dawek zarejestrowanych w przestrzennie zmiennym nawożeniu mineralnym. *Inżynieria Rolnicza*, 11(109), 263-270.
- Zagórda, M., Walczyk, M., Kulig, B., 2007. Precyzyjne nawożenie azotem pszenicy ozimej na podstawie pomiarów SPAD. *Inżynieria Rolnicza* 7, 95, 249-256.
- Zalewski P. 2000. Problemy rolnictwa precyzyjnego. *Inżynieria Rolnicza*, 8 (19), s. 15- 23.
- Zalewski P. 2002. Specyficzna rola barwy zielonej we współczesnych technologiach rolnictwa polskiego. *Inżynieria Rolnicza*, 6(39), 265-272.

- Zeng Q., Sun Y., Schulze Lammers P., Ma D., Lin J., Hueging H. 2008. Improvement of a dual-sensor horizontal penetrometer by incorporating an EC sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* 64, 333-337.
- Zhang Y., Li M., Zhao Y., Pei X. 2016. Soil nitrogen content forecasting based on real-time NIR spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 29-36.

Netografia (dostępne w Internecie od kwietnia do września 2016 r.)

<http://agriculture.newholland.com>,
<http://content-academy.claas.com/>
<http://content-academy.claas.com/WBT/telematics/pl/wbt-00/#toni-fur-anbaugerate>
<http://ctfeurope.com/>
<http://docplayer.pl/10987381-Wspolczesne-metody-badan-instrumentalnych.html>
<http://ecotone-telemetry.com/pl/oferta/obroze-telemetryczne>
<http://ftp.dynamax.com/DynamaxPDF/Dualex.pdf>
<http://geoforum.pl/?menu=46813,46834&link=gnss-systemy-nawigacyjne>
<http://geoforum.pl/?menu=46813,46834,47148&link=gnss-systemy-nawigacyjne-sbas>
http://home.agh.edu.pl/~galia/students/NS/teledetekcja_w_skrocie.pdf
<http://home.agh.edu.pl/~karcz/zasadaDzialania.html>
http://mediaelettra.com/m0z12_4.jpg
<http://rolnictwoprecyzyjne.com.pl/oferta/oprogramowanie-farmworks/farmworks-mapping>
<http://sklep.navigate.pl/index.php/gis/odbiorniki-z-systemem-android>
<http://sklep.navigate.pl/index.php/gis/odbiorniki-z-systemem-windows-mobile>
<http://sklep.navigate.pl/index.php/laptopy-tablety>
<http://truck.intercars.com.pl/pl/wiedza/ciekawostki/Telematyka-juz-dziala>
<http://www.agleader.com/blog/versa-display-free-to-a-good-home/>
<http://www.agrisystem.pl>
http://www.agrisystem.pl/viewpage.php?page_id=25
<http://www.ambrozy.com.pl/telemetria/>
http://www.asgeupos.pl/index.php?wpg_type=news_show&news_id=214
<http://www.beidou.gov.cn>
http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/07/30-satellite_Galileo_constellation
<http://www.geospectrum.pl/pl/badania-geofizyczne/georadarowe/profilowania>
<http://www.gisplay.pl/nawigacja-satelitarna/gps.html>
<http://www.gprsystem.pl/pl/metoda-georadarowa,10049>
<http://www.gps.gov/multimedia/images/constellation.jpg>
<http://www.mueller-elektronik.de/en/products/diagnose-2/>
<http://www.omnistar.com/SubscriptionServices>
[http://www.outbackguidance.com/Portals/3/Documentation/875-0194-000_D1%20\(MNL,UG,S-LITE\)%20web.pdf](http://www.outbackguidance.com/Portals/3/Documentation/875-0194-000_D1%20(MNL,UG,S-LITE)%20web.pdf)
http://www.pimr.poznan.pl/trol1_2008/ZK1_2008.pdf
<http://www.polski-farmer.pl/monitoring-plonu>
<http://www.sac.gov.in/SACSITE/IRNSS-1A.html>
<http://www.sensoft.ca/FAQ.aspx>
http://www.tendencias21.net/La-Comision-Europea-pone-en-marcha-EGNOS-para-mejorar-la-seguridad-aerea_a5884.html
<http://www.thehindu.com/sci-tech/science/irNSS-launch-indias-own-regional-navigation-satellite-system-takes-shape/article8531388.ece>
<http://www.trucks.com.pl>
<http://www.weeklytimesnow.com.au>

http://www.wiak.imsi.pl/e-books/mechatronika1/rozdzial_8.pdf
https://ud.interia.pl/html/getattach,mid,10004,mpid,8,uid,71fc37efe35b0e17,min,0,nd,1?f=FW_Mobile_Polish.pdf
<https://www.deere.co.uk>
https://www.deere.pl/pl_PL/products/equipment/agricultural_management_solutions/jdlink_telematics/jdlink_access/jdlink_access.page
https://www.deere.pl/pl_PL/products/equipment/combines/s_series/s660/s660.page?
<https://www.glonass-iac.ru/en/guide/>
www.researchgate.net/figure/273064222_fig1_Figure-1-CLAAS-Telematics-Web-GUI
<https://piorin.gov.pl/publikacje/metodyki-ip/>
<https://pl.wikipedia.org/wiki/GLONASS#/media/File:Glonass-plan.jpg>
<http://www.insidegnss.com/aboutcompass>
<http://www.claas.pl/swiat-claas/prad/wiadomosci/rtk-field-base/911960>
<http://pl.kvernelandgroup.com/Aktualnosci-Kverneland-Group/Aktualnosci/Archiwum/Inteligentne-wydajne-i-latwe-rolnictwo>
<http://www.mcintoshdistribution.com.au/machinery/show/weedseeker-australia>

POZYSKANIE I WYKORZYSTANIE INFORMACJI W ROLNICTWIE PRECYZYJNYM

Streszczenie. Pośród innowacyjnych technologii, jakie powstały w ostatnich dekadach, rolnictwo precyzyjne można uznać za najważniejsze, co zostało w pracy krótko uzasadnione. Koncepcja ta zrodziła się z przekonania, że zmienność warunków wzrostu roślin jest jednym z tych czynników, które najbardziej przyczyniają się do zmienności plonowania w skali pola i w związku z tym byłoby korzystne dostosować wysokość nakładów do miejscowych warunków glebowych, a więc wykonać właściwe zabiegi, we właściwym miejscu i czasie. Wobec tego wiele uwagi zwraca się na poszukiwanie najbardziej efektywnych metod, które pozwolą na wyznaczenie na polu obszarów różniących się warunkami produkcyjnymi, wśród których najważniejsze są właściwości gleby. Jak wiadomo, niektóre z tych właściwości są zmienne w czasie i przestrzeni i uchwycenie tej zmienności metodami tradycyjnymi jest czasochłonne, pracochłonne i kosztowne. Z tego powodu powstało wiele technologicznie zaawansowanych urządzeń, dzięki którym w trybie pomiaru ciągłego (*on-the-go*) z wykorzystaniem detekcji zbliżeniowej (*proximal sensing*), można w czasie rzeczywistym pozyskać duże ilości danych w warunkach polowych. W opracowaniu przedstawiono trzy grupy czujników w aspekcie zasady ich działania i obecnie możliwości ich stosowania. Pierwsza grupa to czujniki mechaniczne, stosowane do oceny stanu zagęszczenia gleby, do wykrycia podeszwy płuźnej czy zagęszczenia podglebia. Opisane zostały urządzenia oparte na pomiarze oporu ścinania elementem w kształcie narzędzia uprawowego lub oporu penetrometrycznego, jaki gleba stawia podczas próby rozklinowania stożkiem. Jednym z użytkowych aspektów wykrywania różnego zagęszczenia gleby na różnych obszarach pola i głębokościach jest możliwość dostosowania głębokości uprawy do miejscowych warunków, jak również miejscowe usuwanie tzw. podeszwy płuźnej w celu zmniejszenia nakładów energetycznych. W grupie czujników elektrycznych opisano trzy rodzaje urządzeń: (1) konduktometrię do pomiaru przewodności/oporności elektrycznej, na którą ma wpływ tekstura badanej gleby; (2) georadar, pracujący na zasadzie rozchodzenia się fal elektromagnetycznych z zakresu mikrofal i fal radiowych i jego możliwości w zakresie wykrywania zmian zagęszczenia w profilu glebowym oraz (3) czujniki elektrochemiczne w postaci elektrod jonoselektywnych, pokazujących napięcie powstające na skutek działania wybranych jonów, do wyznaczania zawartości składników odżywczych w glebie oraz odczynu pH. W grupie trzeciej przedstawiono czujniki optyczne, wykorzystujące fale elektromagnetyczne do wykrywania poziomu absorbowanej/odbitej energii poprzez glebę lub roślinę. W odniesieniu do gleby przedstawiono możliwości wykorzystania spektroskopii do wyznaczania wielu właściwości gleby, zaś w odniesieniu do roślin do rozpoznawania ich zapotrzebowania na azot. Za pomocą opisanych w opracowaniu metod geofizycznych można przy niskich kosztach i bezinwazyjnie pozyskać duże ilości pośrednich i dokładnych informacji na temat fizycznych właściwości gleby zarówno warstwy ornej, jak też podornej, jednakże wyniki z pojedynczych urządzeń nie muszą być odpowiednie do zastosowania w systemie wspierającym decyzje, ponieważ mogą być rezultatem wpływu więcej niż jednej właściwości agrotechnicznej. Zintegrowanie różnych pomiarów w jeden system mapowania właściwości gleby jest jednym z aktualnych problemów badawczych. Przewiduje się, że badania geofizyczne z zastosowaniem jednocześnie większej liczby czujników staną się standardem, ze względu na dużą różnorodność informacji o polu niezbędnych do właściwego zarządzania.

Systemy techniczne konieczne do realizacji postawionych przed nimi zadań stały się bardzo skomplikowane i zaawansowane, a jednocześnie uniwersalne. Stopień informacji, który jest możliwy do uzyskania w czasie procesu technologicznego jest ogromny i dotyczy różnych obszarów wpływających na efekt końcowy, co wymaga zaawansowanego analitycznego systemu informatycznego.

Współczesne gospodarstwo, a w szczególności technologie produkcji są monitorowane poprzez zastosowanie systemów telematycznych i oprogramowania umożliwiającego w czasie rzeczywistym analizować, a następnie symulować wynik ekonomiczny danej czynności czy procesów, co w konsekwencji prowadzi do ich optymalizacji. Ponadto połączenie całego parku maszynowego w jedną sieć umożliwia automatyczne planowanie usług serwisowych oraz pozwala na bezpośrednią informację do punktów serwisowych w przypadku awarii. Możliwości informatyczne pozwalają zarządzać gospodarstwem nie tylko z poziomu komputera usytuowanego w gospodarstwie, ale również z urządzeń mobilnych np. telefonu komórkowego. Wydaje się, że w przyszłości nastąpi rozwój autonomicznych środków technicznych, które bez ingerencji człowieka będą wykonywały czynności robocze, a ich wzajemne powiązanie komunikacyjne pozwoli optymalizować daną technologię.