

Streszczenie

Precyzyjne nawożenie (ang. *variable rate fertilisation*, VRA) podstawowymi makroelementami, jakimi są potas i fosfor oraz precyzyjne wapnowanie, są fundamentem rolnictwa precyzyjnego (ang. *precision farming*, PF). Celem wdrażania PF w gospodarstwach rolnych jest optymalizacja nawożenia z uwzględnieniem efektów ekonomicznych i środowiskowych, czyli nawożenie zoptymalizowane, z uwzględnieniem lokalnej zasobności gleby w składniki pokarmowe i pH. W celu przygotowania precyzyjnych map nawożenia, niezbędne jest pozyskanie wiarygodnych danych dotyczących zmienności pól uprawnych pod względem właściwości fizyko-chemicznych gleby, a w szczególności jej zasobności.

Wyznaczenie stref pobierania próbek gleby jest kluczowym etapem procesu pozyskiwania wiedzy o zasobności gleby, który determinuje precyzję i wiarygodność uzyskanych wyników. Strefy te, nazywane także strefami zarządzania (ang. *management zones*), są obszarami w polu, które charakteryzują się podobnymi właściwościami glebowymi, takimi jak zawartość makro- i mikroelementów, pH, uziarnienie, itp. Dzięki wyznaczeniu tych stref i pobraniu próbek gleby z każdej z nich, można uzyskać bardziej precyzyjne i reprezentatywne wyniki analizy gleby, co pozwoli na lepsze dostosowanie strategii nawożenia i uprawy do indywidualnych potrzeb każdej strefy. Strefy pobierania są zwykle obszarami o powierzchni od 1 do 3 ha które charakteryzują się jednorodnością gleby pod względem jej parametrów fizyko-chemicznych. Strefy te można wyznaczyć na przykład poprzez mapowanie przewodności gleby (ang. *soil electrical conductivity*, EC). Parametr EC wykazuje silną korelację z zawartością łu i piasku, a więc frakcji gleby określających jej kategorię agronomiczną. Wyznaczenie stref pobierania można też uszczegółowić poprzez dodatkowe mapowanie zawartości materii organicznej (ang. *soil organic matter*, SOM) oraz topografii terenu, co dodatkowo zwiększa precyzję mapowania zasobności gleby. W badaniach wykorzystano skanery Geonics EM-38 (EC) oraz VerisTech U3 mierzący parametry:

- EC,
- OM (*Organic Matter*, nazywane również jako SOM – *Soil Organic Matter*),
- RED (pasmo światła czerwonego),
- IR lub NIR (Infra Red – podczerwień lub Near Infra Red – bliska podczerwień),
- pH (odczyn gleby)

W przeprowadzonych badaniach indeksy spektralne dla gleby i roślin, NDVI (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*) i NDWI (ang. *Normalized Difference Water Index*) na podstawie zobrażeń z satelitów Sentinel-2, wykazały silną istotną statystycznie korelację z zawartością fosforu i potasu oraz pH. Podobnie jest również z EC i SOM gleby, gdzie w przypadku EC i potasu stwierdzono silną istotną korelację $r=0,80$, a SOM i potasu: $r=0,66$. Korelacja RED/IR, EC, SOM, pH i fosforu była statystycznie nieistotna. Pomiar NDVI i EC mogą ograniczyć liczbę pobieranych próbek gleby na potrzeby oceny zawartości makroelementów. Wyniki te mogłyby być wykorzystywane w rolnictwie precyzyjnym.

Ponadto kombinacja danych pochodzących ze skanera glebowego oraz zobrazowań satelitarnych, poprawia jakość wyznaczenia homogenicznych stref pobierania próbek gleby. Analiza regresji z łącznym uwzględnieniem EC i NDVI wykazała silny związek z zawartością potasu ($R^2 = 0,663$). W przypadku innej lokalizacji, wykazano również umiarkowanie silną istotną korelację (0,37 - 0,60) pomiędzy NDVI zbóż a średnią zasobnością (okres 3 lat) potasu.

Inną metodą pozyskania informacji o zasobności gleby jest pomiar i analiza odbić spektralnych z poziomu bezzałogowego statku latającego. Różniące się zasobnością gleby poletka doświadczalne żyta ozimego były oceniane z wykorzystaniem kamery multispektralnej zamontowanej na bezzałogowym statku latającym, rejestrującej odbicie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni. Największe różnice w odbiciach spektralnych obserwowano w przypadku deficytu azotu (N), jako głównego czynnika plonotwórczego wpływającego znacząco na kondycję roślin. Deficyty fosforu i potasu były możliwe do detekcji tylko w monokulturze, przy długotrwałym niedoborze danego składnika.

Słowa kluczowe

rolnictwo precyzyjne, nawożenie P i K, strefy pobierania próbek, teledetekcja, przewodność elektryczna gleby

Summary

Variable rate fertilization (VRA) using macronutrients such as potassium and phosphorus, and accurate liming is the foundation of precision farming (PF). The purpose of using PF on farms is to optimize fertilization taking into consideration economic and environmental factors, i.e. site-specific soil conditions, including the availability of nutrients and soil pH. In order to prepare application maps for fertilization, data on soil variability in agricultural fields in terms of the physicochemical properties are necessary.

Designation of soil sampling zones is a key stage in the process of acquiring knowledge about soil fertility, which determines the precision and reliability of the obtained results. These zones, called management zones, are areas in the field that are similar according to soil properties, such as macro- and micronutrient content, soil pH, soil texture, etc. Delineation of these zones and using them for soil sampling allows to obtain detailed and representative analysis results, apply optimized fertilization and adjust crop management for each zone. Management zones are usually areas of 1 to 3 ha, which are homogenous in terms of physicochemical parameters. These zones can be delineated, for example, by mapping the soil electrical conductivity (EC). EC is a parameter correlated with the content of clay and sand, i.e. soil fractions that determine the agronomic class. The determination of the management zones is possible by additional mapping of the soil organic matter (SOM) content and the topography of site, which further increases the precision of the soil mapping. Geonics EM-38 (EC) and VerisTech U3 scanners were used in the study, measuring the following parameters:

- EC,
- OM (Organic Matter, called as well as SOM - Soil Organic Matter),
- RED (red light wavelength),
- IR or NIR (Infra Red or Near Infrared),
- soil pH (soil reaction)

In the research, the spectral indexes for soil and crop, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index), calculated using images from the Sentinel-2 satellites, proved a strong significant correlation with the content of phosphorus and potassium, and soil pH. A correlation was found between soil EC and SOM with the content of soil potassium, for EC with potassium it was $r=0.80$, and for SOM with potassium $r=0.66$. The correlation of RED/IR, EC, SOM, pH with phosphorus was statistically insignificant. NDVI and EC measurements can be used to optimize soil sampling and decrease the number of soil samples for laboratory macronutrient analysis. These results can be used in precision farming.

Data from soil scanner and satellite imagery improve the quality of determining the homogeneous zones for soil sampling. Multiple regression analysis where EC and NDVI were independent variables proved strong association with potassium content ($R^2 = 0.663$). In the

case of another location, a high correlation (0.37 - 0.60) was also found between the NDVI of cereals and the averaged content (during 3 years) of potassium.

Another method of obtaining information about the content of nutrients in the soil is the measurement and analysis of spectral reflectance from the level of an unmanned aerial vehicle. Test plots of winter rye with different soil nutrient availability were assessed using multispectral camera on an unmanned aerial vehicle that registered visible and near light. The greatest differences in the spectral reflectance were observed in the case of nitrogen (N) deficiency, as the most important factor determining the yield and condition of plants. Deficiency of phosphorus and potassium was possible to detect only in the monoculture, with long-term shortage of these nutrients.

Keywords

precision farming, P and K fertilization, soil sampling zones, remote sensing, soil electrical conductivity