

Numer projektu: **NN 01 3637**

Tytuł projektu: **Hiperspektralne odbiciowe właściwości gleb Polski**

**Zakład Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb,  
Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego,  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu.**

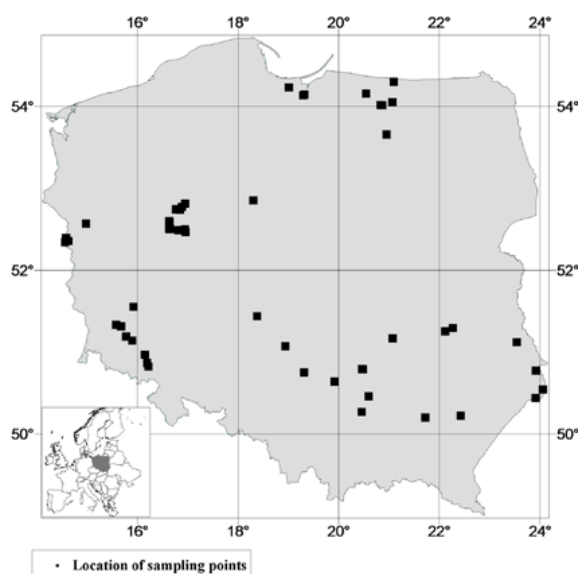
## **SPRAWOZDANIE MERYTORYCZNE**

### **1. METODYKA BADAŃ**

#### **1.1. Badania gleboznawcze**

##### *1.1.1. Badania polowe i pobór prób*

Badania gleboznawcze prowadzono w wybranych regionach Polski: na Dolnym Śląsku, Kujawach, Żuławach, Warmii, Lubelszczyźnie oraz w Wielkopolsce, gdzie zlokalizowano i opisano 78 profile glebowe charakteryzujące się dużym zróżnicowaniem typologicznym (ryc. 1 i tabela 1).



Ryc. 1. Lokalizacja punktów, w których pobrano próby glebowe w ramach projektu „Hiperspektralne odbiciowe charakterystyki gleb Polski”.

W odkrywkach glebowych, z każdego poziomu genetycznego pobrano próby glebowe do oznaczeń fizyko-chemicznych i laboratoryjnych pomiarów spektralnych. Z poziomu powierzchniowego każdego badanego profilu pobrano również duże próby powierzchniowe o masie ok. 30 kg wystarczające do wykonania na nich hiperspektralnych pomiarów goniometrycznych w laboratorium oraz w warunkach polowych przy naturalnym oświetleniu. Poza badaniami charakterystyk glebowych z różnych regionów kraju, wykonano badania mające na celu określenie zmienności właściwości spektralnych pokrywy glebowej w dużej skali, np. jednego pola. W tym wypadku próby powierzchniowe, w liczbie od 20 do 40 pobierano metodą siatki ruchomej z pól o powierzchni od 50 do 200 ha zlokalizowanych w różnych warunkach fizjograficznych. Oprócz prób glebowych pobranych w ramach niniejszego projektu pomiary spektralne w laboratorium wykonywano również na próbach zebranych z terenu całej Polski w ramach programu „Monitoring chemizmu gleb uprawnych 2007” prowadzonego przez Instytut Uprawy i Nawożenia Gleb (IUNG) w Puławach (ryc. 2).

Próby pobierano z wierzchnich poziomów o miąższości 20 cm a każda próba składała się z 10 próbek zebranych z powierzchni 100 m<sup>2</sup> pola.



Ryc. 2. Lokalizacja punktów, w których pobrano próby glebowe w ramach programu "Monitoring chemizmu gleb uprawnych 2007" prowadzonego przez Instytut Uprawy i Nawożenia Gleb (IUNG) w Puławach.

### ***1.1.2. Badania laboratoryjne***

Próby glebowe pobrane do analiz laboratoryjnych doprowadzono do stanu powietrznie suchego, następnie po roztarciu w moździerzu przesiano przez sito o rozmiarach oczek 2 mm oznaczając zawartość części szkieletowych. W częściach ziemistych oznaczono skład granulometryczny metodą sedymentacyjną wg PN 004032. Zawartość węgla organicznego oznaczono metodą oksydacyjno miareczkową na bloku mineralizacyjnym wg Nelsona i Sommersa. Odczyn gleby oznaczono w wodzie i 1n KCl przy stosunku gleba:roztwór wynoszącym 1:1. Kationową pojemność wymienną (KPW) oznaczono metodą Mehlicha w modyfikacji Kociołkowskiego i Ratajczaka. Kwasowość wymienną (Hw) i glin wymienny (Al) oznaczono metodą Sokołowa. Zawartość węglanów wapnia w glebie oznaczono metodą objętościową Scheiblera. W próbkach powierzchniowych z pola testowego w Pokrzywnie oznaczono także zawartość azotu metodą Kieldahl'a, żelaza organicznego metodą pirofosforanową, żelaza organicznego, amorficznego i niekrystalicznego metodą Tamma oraz żelaza organicznego, amorficznego, niekrystalicznego i tlenków żelaza krystalicznego metodą CBD, pojemność wymienną (CEC) i sumę zasad (TEB) metodą Mehlicha.

Próbki zebrane w ramach monitoringu chemizmu gleb zostały przebadane w laboratorium IUNG w Puławach wg metod, które zostały przedstawione w raportach na stronach internetowych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska. ([http://www.gios.gov.pl/chemizm-\\_gleb/index.php?mod=monit](http://www.gios.gov.pl/chemizm-_gleb/index.php?mod=monit)).

### **1.2. Pomiary spektralne gleb**

Pomiary hiperspektralne zebranych prób glebowych wykonano za pomocą radiometru ASD Field Spec 3 Pro wyposażonego w sensor o polu widzenia (FOV) 10° lub 25°, który rejestruje dane z rozdzielczością spektralną 3 nm w zakresie długości fali od 350 do 1000 nm i 10 nm w przedziale od 1000 do 2500 nm. Dane spektralne generalizowano do przedziałów o zakresie 10 nm. Pomiary wykonano w warunkach laboratoryjnych przy wykorzystaniu goniometru i przystawki *High Intensity Mug Probe* (HIMP) oraz w warunkach polowych przy oświetleniu naturalnym.

### **1.2.1. Pomiar spektralny w warunkach laboratoryjnych**

#### **1.2.1.1. Pomiar odbicia rozproszonego (DRS - diffuse reflectance spectroscopy)**

Pomiary hiperspektralne prób glebowych metodą DRS przeprowadzono wykorzystując przystawkę HIMP do radiometru ASD Field Spec 3 Pro. Umieszczona w przystawce próbka gleby o wadze ok. 10 g jest oświetlana pod kątem  $45^\circ$  a czujnik rejestruje odbite promieniowanie z kierunku nadirowego.

#### **1.2.1.2. Pomiar laboratoryjny przy użyciu goniometru**

Pomiary spektralne przeprowadzone w laboratorium przy wykorzystaniu statywu goniometrycznego na powierzchniach glebowych pobranych w stanie nienaruszonym z poletek w Żłotnikach, na których wcześniej wykonano pomiary przy użyciu systemu ROBOT. Odbite promieniowanie mierzono przy użyciu tego samego spektrometri ASD, którym wykonano pomiary polowe. Jego czujnik został zamontowany na jednym z dwóch ramion goniometru w odległości 70 cm od środka mierzonej powierzchni glebowej. Na drugim ramieniu znajdowała się lampa halogenowa o mocy 400 W, która oświetlała powierzchnię z odległości 90 cm. Czujnik o polu widzenia wynoszącym  $10^\circ$  obserwował powierzchnię  $0,012 \text{ m}^2$  przy nadirowym kierunku widzenia oraz  $0,036 \text{ m}^2$  przy kątach zenitalnych obserwacji wynoszących  $70^\circ$ . Badane powierzchnie glebowe były obserwowane i oświetlane przy takich samych kątach zenitalnych i azymutalnych jak w trakcie pomiarów polowych z systemem ROBOT. Sekwencje pomiarowe obejmujące zestaw kątów zenitalnych i azymutalnych czujnika radiometru i lampy ustalono w scenariuszu na podstawnego którego komputer sterował pracą goniometru.

#### **1.2.1.3. Pomiar laboratoryjny odbicia od gleb o zróżnicowanej wilgotności i potencjale wody glebowej**

W celu określenia zmienności odbicia spektralnego gleb wynikającego ze stanu uwilgotnienia i sił wiązania wody w glebie, oznaczono krzywe desorpcji wody (krzywe wodnej retencji) wybranych prób glebowych. Spośród 78 prób wierzchnich poziomów glebowych wybrano 15 reprezentatywnych dla większości analizowanych typów gleb w niniejszym projekcie (tabela 2). Gleby z tych prób zostały przetarte i przesiane przez sito o rozmiarze oczek 2 mm w celu wyeliminowania wpływu na odbicie struktury gleby i zapewnienia jednorodnej powierzchni. Glebę umieszczono w cylinderkach stalowych o średnicy 5 cm z jednej strony zamkniętych siatką nylonową *satiker*. Następnie materiał ten lekko zagęszczono i wyrównano jego górną powierzchnię. W pierwszej serii wykonano pomiar odbicia spektralnego od gleby powietrznie suchej i całość zważono. Pomiary spektralne wykonywano po umieszczeniu czujnika radiometru na statywie, na wysokości 12 cm nad powierzchnią cylinderka. Próba glebowa była oświetlana lampą firmy ProLamp z żarówką o mocy 50 W z odległości 30 cm pod kątem  $45^\circ$  i przy FOV czujnika wynoszącym  $10^\circ$  obserwowana powierzchnia wynosiła  $4,2 \text{ cm}^2$ .

Następnie próbki wysycono wodą dejonizowaną w aparacie piaskowym Ejlekamp, gdzie poziom wody sięgał 5 mm poniżej górnej krawędzi cylinderków. Proces nasycania gleby trwał dwa tygodnie, po upływie których wykonano drugą serię pomiarów spektralnych i próbki zważono. Następnie w aparacie piaskowym próbki kondycjonowano do osiągnięcia stanu równowagi między wilgotnością gleby a potencjałem matrycowym, przy kolejnych wartościach potencjału wynoszących kolejno pF 1,0; pF 1,6 i pF 2,0. Każde z tych ciśnień zadawane było przez 10 dni i po osiągnięciu równowagi wykonywano pomiary spektralne próbek oraz zważono je. Kolejnym etapem badań był pomiar odbicia od prób glebowych przy potencjale matrycowym wynoszącym 1000 cm słupa wody (pF 3). W tym celu cylinderki z glebą umieszczono na jednobarowej płycie ceramicznej *soil moisture equipment* w komorze ciśnienia Richardsa i po upływie dwóch tygodni po raz kolejny przeprowadzono pomiary

spektralne i ważenie prób. Następne pomiary odbicia spektralnego i ważenie prób wykonano po osiągnięciu w komorze ciśnienia 5000 cm słupa wody (pF 3,70). Opisana wyżej procedura pozwoliła określić wpływ składu masy i wilgotności gleby przy pominięciu cech związanych ze strukturą gleby i występowaniem porów glebowych.

### ***1.2.2. Pomiary spektralne w warunkach polowych***

Pomiary polowe przeprowadzono przy użyciu statywu ręcznego oraz automatycznego systemu ROBOT umożliwiającą kierunkową rejestrację odbitego promieniowania.

#### ***1.2.2.1. Pomiary polowe przy użyciu statywu ręcznego***

Dwukierunkowe pomiary spektralne prób zebranych na terenie całej Polski wykonano w warunkach naturalnego oświetlenia przy użyciu statywu umożliwiającego rejestrację odbitego promieniowania w głównej płaszczyźnie słonecznej (GPS) przy 14 kątach zenitalnych widzenia czujnika w zakresie od  $-70^\circ$  do  $+70^\circ$  w odstępach co  $10^\circ$ . Czujnik radiometru ASD Field Spec 3 Pro był umieszczony na wysokości 1,55 m nad badaną powierzchnią i przy każdej zmianie kąta widzenia skierowany na ten sam jej fragment. Pole widzenia czujnika wynoszące  $10^\circ$  obejmowało powierzchnię  $0,058 \text{ m}^2$  przy nadirowym kierunku widzenia oraz  $0,526 \text{ m}^2$  przy kątach obserwacji wynoszących  $70^\circ$ . Sekwencje pomiarowe obejmujące wspomniane pozycje obserwacji, każdorazowo były poprzedzone rejestracją sygnału odbitego od spectralonu, stanowiącego wzorec powierzchni Lambertowskiej, co umożliwiło wyrażenie odbicia spektralnego za pomocą wskaźnika odbicia spektralnego BRF (Bidirectional Reflectance Factor). Pomiary odbicia spektralnego od każdej próby wykonywano przy trzech poziomach szorstkości powierzchni glebowej: s1 - silnie szorstkiej z dużą ilością agregatów glebowych o dużych rozmiarach, s2 - z małą ilością niewielkich agregatów i s3 - wygładzoną i ubitą.

#### ***1.2.2.2. Pomiary polowe przy użyciu automatycznego systemu goniometrycznego ROBOT***

Automatyczny system ROBOT firmy CIMEL umożliwia zmianę kąta zenitalnego i azymutalnego obserwacji sprzężonego z nim czujnika radiometru. Czujnik radiometru znajdował się na wysokości 1,55 m nad badaną powierzchnią i przy każdej zmianie kąta widzenia skierowany był na inny jej fragment. Podczas pomiarów wykonywanych w ciągu dnia przy każdym z pięciu kątów zenitalnych Słońca ( $\theta_s$ ) wynoszących około  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $70^\circ$ , rejestrowano odbicie od gleby przy 15 zenitalnych ( $\theta_v$ ) i 12 azymutalnych ( $\phi_s$ ) kątach widzenia. Pomiary wykonano na polach Zakładu Doświadczalnego Uniwersytetu Przyrodniczego (ZDUP) w Poznaniu w Złotnikach, usytuowanych na glebie płowej zaciekowej (PA<sub>t</sub>) i czarnej ziemi typowej (CZ<sub>t</sub>) oraz na polu gospodarstwa rolnego w Baborówku, na glebie płowej typowej (PW). Pomiary wykonywano w dniach całkowicie bezchmurnych, w siedmiu terminach (28 i 29.06. oraz 14 i 16.07.2010; oraz 19, 24 i 25.05.2012), po zastosowaniu na poletkach następujących zabiegów agrotechnicznych: orki, bronowania, uprawy agregatem i włókania. Z poletek ZDUP w Złotnikach, na których wykonywano pomiary spektralne, pobrano fragmenty powierzchni i w stanie nienaruszonym przewieziono do laboratorium, gdzie dokonywano pomiarów ich kierunkowego odbicia przy sztucznym świetle za pomocą tego samego radiometru ASD Field Spec 3, umieszczonego na prototypowym goniometrycznym statywie.

### **1.3 Pomiary szorstkości powierzchni glebowych**

Pomiary kształtu powierzchni glebowych, od których mierzono odbicie spektralne wykonano za pomocą skanera laserowego Konica–Minolta VIVID-910. Skaner znajdował się na statywie nad stołem obrotowym, na którym umieszczane były mierzone powierzchnie

glebowe. Pomiar kształtu wykonywany z 18 kierunków poprzedzony był kalibracją, której celem było wyznaczenie środka rzutu w lokalnej przestrzeni skaner – stół pomiarowy. Następnie, wykorzystując oprogramowanie Poligon Editing Tools wykonywano łączenie skanów cząstkowych w jeden model przestrzenny powierzchni w postaci chmury punktów o współrzędnych x, y, z. Dalsze przetwarzanie obejmujące redukcję szumów, stworzenie cyfrowego modelu powierzchni (DEM) i obliczenia współczynników szorstkości wykonywano w oprogramowaniu TNT MIPS. Rozdzielczość przestrzenną modelu DEM przyjęto na poziomie 1 mm. Na wstępnym etapie prac szorstkość powierzchni glebowych wyrażano współczynnikiem zaokrąglenia (tortuosity index)  $T_{3D}$ , który definiowany jest jako stosunek powierzchni rzeczywistej (trójwymiarowej) do powierzchni jej rzutu prostokątnego na płaszczyźnie.

### **1.3. Opracowanie strony internetowej z prezentacją wyników projektu**

Na stronie internetowej dostępnej pod adresem: <http://ztg.amu.edu.pl/soilspectral.html> zaprezentowano lokalizację profili glebowych badanych w ramach projektu wykorzystując mapy i obrazy teledetekcyjne udostępniane powszechnie przez firmę Google poprzez [maps.google.com](https://maps.google.com) (lub alternatywnie poprzez [earth.google.com](https://earth.google.com)) i interfejs Google API. Strukturę strony internetowej i dane lokalizacyjne przygotowano wykorzystując oprogramowanie TNTmips (proces Geomashup przeznaczony do tworzenia stron internetowych prezentujących dane przestrzenne w oparciu o Google API).

## **2. WYNIKI BADAŃ**

### **2.1. Właściwości fizykochemiczne gleb**

Uwzględnione w analizie poziomy wierzchnie gleb charakteryzowały się dużą zmiennością wartości liczbowych parametrów fizycznych i fizykochemicznych. Zawartość frakcji piasku zmieniała się w zakresie od 0 do 100%, pyłu od 0 do 71%, a iłu od 0 do 43% (ryc. 3, tabela 2). Poziomy te reprezentują wszystkie podgrupy piasków, cztery z sześciu grup granulometrycznych glin (bez gpi i gpyi), dwa spośród trzech utworów pyłowych (bez pyz) oraz jedną z czterech grup granulometrycznych utworów ilastych (tylko iz). Reprezentowanych było 10 centralnych grup granulometrycznych spośród 16 wydzielonych przez PTG 2008. Odczyn mierzony w KCl mieścił się w szerokim zakresie pH od 2,88 do 7,32, reprezentowane były zatem wszystkie klasy odczynu gleb. Analizowane poziomy były w większości bezwęglanowe, jednak w glebach wytworzonych z wapieni różnej genezy zawartość węglanów wynosiła od 3% do 36%. Duża zmienność zawartości węgla organicznego (Corg), od 0% do 12,5%, wynikała z uwzględnienia w badaniach zarówno materiałów bezglebowych (wydma nadmorska z Łeby), jak i poziomów wierzchnich o cechach murszu i namulów w glebach w Chlebowie i Jegłowniku. Wynikiem dużej zmienności składu granulometrycznego i zawartości Corg była duża rozpiętość wartości kationowej pojemność wymiennej (KPW), od 0 do 45,3  $\text{cmol}\times\text{kg}^{-1}$ . Stopień wysycenia zasadami mieścił się w szerokim zakresie od 4 do 100%, przy czym kwasowość wymienna nie przekraczała 1,2  $\text{cmol}\times\text{kg}^{-1}$ , a udział glinu wymiennego nie przekraczał 1,17  $\text{cmol}\times\text{kg}^{-1}$ . Zbiór analizowanych poziomów wierzchnich stanowi reprezentatywną próbę dla gleb uprawnych Polski.

### **2.2. Pomiary odbicia rozproszonego (DRS - diffuse reflectance spectroscopy)**

#### **2.2.1. Zależność międy odbiciem spektralnym a jednostkami taksonomicznymi**

Opisy 78 profili glebowych, wykonane w 2010 i 2011 roku umieszczono w załączniku 1. Reprezentują one siedem rzędów według piątego wydania Systematyki Gleb Polski. Krzywe spektralne poziomów wierzchnich tych 78 gleb pomierzonych za pomocą metody DRS wykazują dużą zmienność poziomu i kształtu. Ta zmienność jest przede wszystkim następstwem wpływu litologii, genezy i warunków drenażu analizowanych gleb.

Wstępna analiza krzywych spektralnych przedstawionych na ryc. 4a-g wskazuje, że właściwości spektralne gleb inicjalnych (I) i słabo ukształtowanych (S), były zdeterminowane przez charakter materiału macierzystego (ryc. 4a). Przebieg i poziom krzywej spektralnej gleby inicjalnej i arenosolu wytworzonych odpowiednio z piasków wydmy okolic Łeby i Poznania (Radojewo) są niemal identyczne. Rozwój poziomu akumulacji próchnicy powoduje znaczne obniżenie poziomu odbicia w całym analizowanym zakresie spektralnym, tak jak jest to widoczne w przypadku krzywej gleby Kunowice 9. W przebiegu krzywych spektralnych wszystkich gleb (I) i (S) brak wyraźnych pasm absorpcji w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni, co jest spowodowane małą intensywnością procesów pedogenicznych. Najniższym odbiciem we wspomnianych zakresach widma charakteryzowały się gleby wytworzone z materiałów węglanowych: rędzina typowa z Przymiłowic (Jura Krakowsko-Częstochowska) i pararędzina z Doliw (Mazury).

Występujące w glebach brunatnoziemnych (B) intensywne procesy wietrzeniowe powodują zróżnicowanie kształtu krzywych spektralnych (ryc. 4b). Początkowe fragmenty krzywych, obejmujące zakres fal o długościach do około 500 nm, mają kształt wklęsły zmieniający się na wypukły w zakresie fal od 500 do 800 nm. Występowanie wspomnianej wklęsłości w przebiegu krzywej związane jest z troficznością gleby skorelowanej ujemnie z odbiciem fal widzialnych. W zakresie fal dłuższych od 800 nm krzywa spektralna gleb (B) wykazujących cechy oglejenia spłaszcza się i obniża swój poziom wraz z pogarszającymi się warunkami drenażu. Gleby nieoglejone wykazują wzrost poziomu odbicia (Wrony, Bolków i

Wrzoso). W przypadku gleb dystroficznych (Feliksów, Pogorzała), odcinek krzywej spektralnej odpowiadający odbiciu fal o długości do 500 nm jest wypukły i taki kształt ma również krzywa na odcinku od 800 do 1800 nm. Duża intensywność wietrzenia i uwalniania żelaza powoduje wyraźny wzrost odbicia fal czerwonych (Strug i Chęciny).

Krzywe spektralne gleb rdzawoziemnych (R) wyraźnie różnicują się na dwie grupy, obejmujące gleby z rzędu gleb ochrowych (Rubież i Poznań Wola) i gleb rdzawych (Kunowice 17, Trebowiec, Baborówko 1 i Dąbrówka Ludomska) (ryc 4c). Odcinki krzywych obejmujące odbicie fal o długości do 800 nm w grupie gleb R mają kształt prostoliniowy i bardzo podobny poziom. Małe zróżnicowanie poziomu krzywych przy braku pasm absorpcji świadczy o słabym zwietrzeniu materiału macierzystego. Głównym czynnikiem różnicującym odbicie w zakresie powyżej 800 nm jest poziom próchniczności wynikający z odmiennych warunków drenażu. Charakterystyki spektralne gleby rdzawej typowej w Dąbrówce Ludomskiej i Trębowcu są bardzo podobne. Natomiast gleby rdzawe gruntowo glejowe w Baborówku 1 i Kunowicach 17 wykazują nieco niższe poziomy odbicia chociaż pochodzą z innych miejsc.

Głównym czynnikiem powodującym zróżnicowanie spektralne gleb płowoziemnych (P) jest rodzaj materiału macierzystego. Materiał drobnoziarnisty, dominujący w glebach opisanych w Złotorcji, Grodzisku Leżajsku, Czesławowicach, Niezabitowie, Olszaniczy i Zapustkach, powoduje wyższe odbicie fal dłuższych od 600 nm niż od pozostałych gleb z tego rzędu, w których uziarnieniu przeważał materiał gruboziarnisty (ryc. 4d).

Krzywe spektralne gleb bielicoziemnych (L) na odcinku poniżej 800 nm przyjmowały kształt wklęsły a w zakresie fal od 800 do 1800 nm przebieg krzywej był podobny do jej przebiegu dla gleb rdzawoziemnych (ryc. 4e). Zróżnicowanie warunków drenażu; tj. od gleb nadmiernie odwodnionych (trwale za suchych), przez optymalnie odwadniane, do niedostatecznie odwodnionych (długotrwanie nadmiernie uwilgotnionych), nie uwidaczniało się w charakterystykach spektralnych poziomów wierzchnich gleb L. Strefa oddziaływania wód gruntowych była zbyt głęboko położona, aby wpływać na stopień wymycia tlenków lub regulować zawartość próchnicy w glebie. Dlatego, niezależnie od lokalizacji i podtypu analizowanej gleby bielicoziemnej, ich krzywe spektralne poziomów Es są bardzo podobne. W ich przebiegu nie występują pasma absorpcji, co wynika ze specyfiki fazy stałej gleby. Przeważają materiały piaszczyste zbudowane z kwarcu, które nie ulegają wietrzeniu.

Charakterystyki spektralne gleb czarnoziemnych (C) prezentowane na ryc. 4f można podzielić na trzy grupy pod względem kształtu i poziomu. Najwyższym odbiciem w całym analizowanym zakresie spektralnym charakteryzują się czarnoziemy, co wynika z dużej zawartości cząstek ilastych w składzie granulometrycznym tych gleb. Drugą grupę krzywych, o niższym poziomie są krzywe spektralne czarnych ziem (CZ), gleb deluwialnych czarnoziemnych (CY), rędzin czarnoziemnych (CR) i mad czarnoziemnych (CF), w których uziarnieniu ił występował w mniejszych proporcjach. Odrębną kategorię stanowią najniżej położone na wykresie krzywe spektralne gleb murszastych (CU) w Chlebowie 6 i 7, co jest spowodowane specyfiką czarno zabarwionego poziomu murszastego (Au) stanowiącego pozostałość po dawnym poziomie organicznym. Nawet obecność w tych poziomach wybielonych ziaren kwarcu nie wpływała na podniesienie poziomu ich krzywych spektralnych. Bardzo niskie odbicie obserwuje się również od gleby w Słubicach 3. Jest to gleba pod nieużytkiem zielonym położonym ok. 20 m od koryta Odry. Wysoka zawartość węgla organicznego w niej przy częstej podmokłości, związanej z długotrwałym odciekaniem wód zalewowych z basenu madowego oraz możliwością kapilarnego podsiąkania wód gruntowych w ciągu całego roku, powoduje rozwój procesów redukcyjnych. Procesy takie zmieniają barwę gleby i powodują powstawanie barw glejowych, co spektralnie wyrażone jest wklęsłym przebiegiem krzywej w zakresie ok. 1000 nm. Podobne zjawisko wklęsłości krzywej spektralnej obserwowane jest w przypadku gleb wykazujących oglejenie opadowe.

Krzywe spektralne gleb glejoziemnych (G), w większości piaszczystych, nie wykazują wspomnianej wklęsłości w zakresie powyżej 1000 nm, pomimo okresowo silnych warunków redukcyjnych w głębszych partiach profilu (ryc. 4g). Są to gleby w większości piaszczyste o niewielkim wzniosie kapilarnym, powodującym, że nawet przy dużym poziomie wody gruntowej nie występuje podmokłość w poziomach akumulacyjno-próchnicznych. Dlatego poziomy te są dobrze natlenione. W tym rzędzie spektralnie wyróżniają się dwie kategorie gleb: gleby glejowe (GW), spektralnie podobne do rdzawych gruntowoglejowych (RWgg), różniące się od powyższych brakiem poziomu *sideric* przy obecności oksydacyjno-redukcyjnych poziomów glejowych. Drugą grupę stanowią gleby glejowe powstałe w wyniku odwodnienia płytkich gleb organicznych wykazujących cechy murszastości. W tym wypadku, w przeciwieństwie do gleb murszastych (CU), poniżej poziomu murszastego (Au) występują oksydacyjno-redukcyjne poziomy glejowe.

Powyzsza analiza wskazująca, że właściwości spektralne analizowanych gleb są głównie determinowane cechami materiałów macierzystych oraz naturalnymi warunkami drenażu, wpływającymi na poziom akumulacji węgla organicznego i przemiany wietrzeniowe. Sugeruje one ujęcie krzywych spektralnych badanych gleb w cztery grupy nawiązujące do rodzajów materiałów macierzystych (ryc. 5):

- I – gleby wytworzone z piasków luźnych i słabogliniastych różnej genezy (typologicznie są to gleby inicjalne (I), rdzawoziemne (R), bielicoziemne (L), murszaste (CU) oraz glejowe (GW)),
- II - gleby wytworzone z piasków gliniastych i drobniejszych, najczęściej z osadów polodowcowych i zwietrzliny skał masywnych (typologicznie grupa ta ogranicza się do gleb brunatnoziemnych (B) i płowych (PW)),
- III – gleby wytworzone ze skał wapiennych pochodzących z różnych okresów geologicznych lub osadów polodowcowych zasobnych w węglany (typologicznie są to rędziny właściwe (SR) i pararędziny (SX)),
- IV – gleby wytworzone z różnych utworów o uziarnieniu piasków gliniastych lub drobniejsze, jednak kryterium wyróżniającym tę grupę było spełnienie cech diagnostycznych poziomu *mollic* (typologicznie są to czarnoziemy (CW), czarne ziemie (CZ), mady czarnoziemne (CF), rędziny czarnoziemne (CR) i gleby deluwialne czarnoziemne (CY)).

Według kryteriów podziałowych stosowanych w World Reference Base (WRB), badane gleby należą do 11 głównych grup (ryc. 6). Podstawowe różnice w stosunku do polskiej systematyki dotyczyły gleb słabo ukształtowanych (I), czarnoziemnych (C) i rdzawoziemnych (R). Wszystkie gleby zaliczane do bielicoziemnych zostały zakwalifikowane w WRB do grupy *podzols*. Wydzielone wg polskiej systematyki gleby płowe (PW) i płowe zaciekowe (PA) należą odpowiednio do głównych grup glebowych WRB *luvisols* i *albeluvisols*. Wyjątkiem jest jeden profil gleby płowej, w Przybrodzie 422, z poziomem wierzchnim spełniającym kryteria poziomu *mollic*, który zakwalifikowano do *phaeozemów*. Mady należące do różnych typów w różnych rzędach, z wyłączeniem mad czarnoziemnych (CF), zaliczone zostały do grupy *fluvisols*. Podtypy gleb murszastych (CU) w klasyfikacji WRB tworzyły jedną grupę, tj. *gleisoils*. Z kolei gleby zaliczane wg polskiej systematyki do gleb słabo ukształtowanych były klasyfikowane jako *leptosols* (np. rędzina z Przymiłowic), *regosols* (pararędzina z Doliw) lub *arenosols* (Kunowice 9).

W obrębie poszczególnych grup glebowych WRB widoczny jest różny poziom przebiegu krzywych spektralnych. Najbardziej stabilne są krzywe spektralne grup glebowych *czernozems* i *podzols*. Nieco bardziej zróżnicowane, ale bardzo zbliżone pod względem poziomu i kształtu, są krzywe spektralne z poziomów wierzchnich gleb *fluvisols*. W grupach



*luvisols* i *albeluvisols* obserwuje się bardzo zbliżony kształt krzywych przy dużej rozpiętości poziomów odbicia wynikającego z odmiennego rodzaju materiału macierzystego (materiałów lessowych i lessopodobnych wykazujących wyższy poziom odbicia). W obrębie grupy *gleyisols* zaobserwowano zróżnicowany kształt krzywych i duże zróżnicowanie ich poziomu wynikające z różnej zawartości materii organicznej. W grupie *cambisols* uwidacznia się zróżnicowanie kształtu krzywych odpowiadające różnym warunkom oksydacyjno redukcyjnym.

### **2.2.2. Zależność między odbiciem spektralnym i charakterystykami glebowymi**

Analizę możliwości interpretacji wybranych właściwości glebowych na podstawie ich pomiarów spektralnych przeprowadzono wykorzystując dane uzyskane przy użyciu przystawki HIMP na dwóch zbiorach prób: zebranych z terenu całej Polski w ramach programu „Monitoring chemizmu gleb uprawnych 2007” prowadzonego przez Instytut Uprawy i Nawożenia Gleb (IUNG) oraz zebranych z obszaru jednego pola we wsi Pokrzywno. Wymienione dwa zbiory reprezentują różne skale zróżnicowania gleb w zbiorach stosowanych do modelowania.

Krzywe hiperspektralne prób glebowych ze wspomnianych dwóch zbiorów zestawiono z wynikami analiz następujących parametrów fizykochemicznych badanych gleb: udziału frakcji piaszczystej, pylastej i ilastej, zawartości węgla organicznego, żelaza i węglanów wapnia.

#### **2.2.2.1. Zależność między odbiciem spektralnym i charakterystykami glebowymi z Polski**

Wyniki analizy krzywych spektralnych 212 prób zebranych w ramach monitoringu opisano w pracy „*Unsupervised clustering of soil spectral curves to obtain their stronger correlation with soil properties*” (załącznik 2) i zaprezentowano w formie referatu na konferencji „2nd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing”, zorganizowanej w dniach 14 – 16 czerwca 2010 w Reykjavíku. W oparciu o te dane przygotowano także pracę zatytułowaną „*Improved estimation of soil properties via unsupervised clustering of soil reflectance data*”, przyjętą do recenzji w czasopiśmie GEODERMA (załącznik 3) oraz poster zatytułowany: „*Diffuse reflectance spectroscopy for monitoring arable soil chemistry on the national scale*” prezentowany na 4<sup>th</sup> International Congress EUROSIL 2012 Soil Science for the Benefit of Mankind and Environment Fiera del Levante, mający miejsce w Bari w dniach 2-6 lipca 2012 (załącznik 4). Wyniki analiz statystycznych potwierdziły występowanie niewielkiej korelacji między odbiciem spektralnym i charakterystykami glebowymi prób zebranych z terenu całej Polski. Spośród zastosowanych przekształceń krzywych najsilniejszą zależność z analizowanymi parametrami glebowymi uzyskano po transformacji krzywych spektralnych do postaci pierwszej pochodnej absorbancji, drugiej pochodnej surowych danych, wartości transformacji Kubelka-Munk i ich pochodnej oraz continuum removal. Najwyższe wartości współczynników determinacji ( $R^2$ ), wynoszące 0,56 i 0,64 uzyskano odpowiednio z zawartością Fe i iłu (tabela 3). Przeprowadzenie klasyfikacji nienadzorowanej krzywych hiperspektralnych z całego zbioru na podstawie ich kształtu i poziomu metodą Ward’a doprowadziło do wyodrębnienia sześciu klas krzywych a obliczony  $R^2$  dla zależności z Fe i iłem zwiększył się odpowiednio do 0,80 i 0,87. Zależność między odbiciem spektralnym i zawartością węgla organicznego w próbach glebowych zebranych w skali całej Polski była stosunkowo niewielka a wartości  $R^2$  uzyskane dla niej wynosiły odpowiednio przed i po klasyfikacji krzywych spektralnych 0,228 i 0,493.

#### **2.2.2.2. Zależność między odbiciem spektralnym i charakterystykami glebowymi prób zebranych w skali jednego pola**

W przypadku prób glebowych pochodzących ze stosunkowo małego obszaru, obejmującego pojedyncze pole w Pokrzywnie, zależności między zawartością węgla organicznego, pH, TEB i CEC w glebie i danymi spektralnymi były znacznie silniejsze niż w

Tabela 3. Wartości współczynników determinacji ( $R^2$ ) dla zależności między danymi spektralnym i fizykochemicznymi charakterystykami prób glebowych zebranych na terenie całej Polski i z jednego pola w Pokrzywnie.

	Próby glebowe zebrane na terenie całej Polski		Próby glebowe zebrane w Pokrzywnie
	$R^2$ przed klasyfikacją krzywych spektralnych	$R^2$ po klasyfikacji krzywych spektralnych	
<b>Piasek (%)</b>	0,49	0,54	0,65
<b>Pył (%)</b>	0,41	0,47	0,70
<b>H (%)</b>	0,64	0,87	0,33
<b>C<sub>org</sub> (%)</b>	0,22	0,49	0,96
<b>N<sub>kiej</sub> (%)</b>	0,29	0,54	0,86
<b>C/N</b>	0,06	0,24	0,26
<b>pH<sub>H2O</sub></b>	0,15	0,40	0,90
<b>pH<sub>KCL</sub></b>	0,14	0,39	0,90
<b>CaCO<sub>3</sub> (%)</b>	0,96	0,99	0,78
<b>Hw (cmol/kg)</b>	0,25	0,64	0,53
<b>Al (cmol/kg)</b>	0,27	0,66	0,37
<b>TEB (cmol/kg)</b>	0,45	0,65	0,95
<b>CEC (cmol/kg)</b>	0,46	0,66	0,95
<b>Fe<sub>o</sub> (%)</b>	0,56	0,8	0,77

przypadku prób zebranych z całej Polski dając wartości współczynnika determinacji przekraczające 0,9. Wyniki badań zaprezentowano na posterze zatytułowanym „The use of the WorldView2 satellite data to determine several soil properties in post-glacial soils” przedstawionym na 4<sup>th</sup> International Congress EUROSIL 2012 Soil Science for the Benefit of Mankind and Environment Fiera del Levante, który odbył się w Bari w dniach 2-6 lipca 2012 (załącznik 5).

### 2.3. Pomiary laboratoryjne przy użyciu goniometru

Rycina 7 przedstawia zróżnicowanie BRF w funkcji kąta zenitalnego obserwacji w dwunastu płaszczyznach azymutalnych obserwacji wyrażonych kątem  $\phi$ , przy pięciu kątach zenitalnych źródła światła  $\theta$ , od trzech powierzchni glebowych o różnym stopniu szorstkości: s1, s2 i s3. Podobnie jak w przypadku pomiarów polowych wykonanych za pomocą automatycznego systemu goniometrycznego ROBOT, najwyższe wartości współczynników odbicia uzyskano od powierzchni gleby płowej Żłotniki 1 a najniższe od powierzchni czarnej ziemi Żłotniki 2. Również na wszystkich powierzchniach największe zróżnicowanie współczynników odbicia stwierdzono przy niskich kątach  $\theta$ , obserwacji prowadzonej w GPS i płaszczyznach opisanych kątami  $\phi$ , zbliżonymi do niej.

W celu określenia stopnia zróżnicowania wartości wskaźnika BRF tej samej powierzchni glebowej odnoszących się do warunków polowych i laboratoryjnych porównano wartości BRF zabronowanej powierzchni glebowej Żłotniki 1 zmierzone bezpośrednio w polu z ich odpowiednikami zmierzonymi za pomocą goniometru w laboratorium na próbie o szorstkości s2. Wyniki badań przedstawiono w pracy pt.: „Use of undisturbed and artificial soil samples for the BRF laboratory measurements of cultivated soils complementing the measurements acquired in the field” zaprezentowanej w formie posteru na konferencji „The Third Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)”, która odbyła się w Lizbonie w dniach 6 – 9 czerwca 2011 (załącznik 6). Różnice między wartościami BRF uzyskanymi w warunkach polowych i laboratoryjnych

mieściły się w przedziale od 13% do 15% wartości polowej, gdy powierzchnie były oświetlane przy  $\theta_s$  w zakresie od 30° do 50°. Natomiast przy oświetleniu pod kątem  $\theta_s=70^\circ$  różnice te wynosiły około 18%. Zależności między polowymi i laboratoryjnymi wartościami BRF zmieniały się w funkcji długości fali. W zakresie fal o długości od 400 do 500 nm różnice te wzrastały, w zakresie fal o długości około 920 nm nie zmieniały się, a w zakresie fal jeszcze dłuższych malały. Wartości współczynników determinacji ( $R^2$ ) obliczonych dla BRF zmierzonymi w warunkach polowych i laboratoryjnych dla większości analizowanych pionowych płaszczyzn obserwacji przy określonej pozycji źródła światła przekraczały 94%. Wyniki opisanych wyżej badań wskazują więc na możliwość określania dwukierunkowych charakterystyk spektralnych gleb w laboratorium w warunkach, gdy na przykład zachmurzenie uniemożliwia przeprowadzenie pomiarów polowych.

Jak nierówności powierzchni gleby w postaci mikroreliefu bruzdowego oddziałują na efekty widzenia powierzchni gleby przez sensor umieszczony na prototypowym urządzeniu goniometrycznym w warunkach laboratoryjnych przedstawiono w pracy pt. „*Furrow microrelief influence on the directional hyperspectral reflectance of soil at various illumination and observation condition*” opublikowanej w IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (załącznik 7). Analizowano w niej cztery sztucznie powierzchnie glebowe uformowane z tego samego piaszczystego materiału glebowego, gładką i trzech z bruzdami o różnej głębokości. Największy wpływ mikroreliefu bruzdowego na hipespektralne odbicie od badanych powierzchni stwierdzono w płaszczyźnie prostopadłej do przebiegu bruzd przy dużych kątach zenitalnych obserwacji  $\theta_v$ , szczególnie przy wysokich kątach zenitalnych źródła światła  $\theta_s$  i gdy promienie oświetlały bruzdy prostopadle do kierunku ich przebiegu. Ponadto stwierdzono, że pasmo absorpcji mierzonej gleby, przypadające na fale o długości 1420 nm, było mniej wyraźnie widoczne na krzywej spektralnej w miarę wzrostu  $\theta_s$ , niezależnie od szorstkości powierzchni.

#### **2.4. Pomiary polowe przy użyciu statywu ręcznego**

Korzystając z danych odbiciowych zarejestrowanych z kierunku nadirowego w trakcie pomiarów polowych przy użyciu statywu ręcznego zestawiono krzywe spektralne badanych gleb w czterech grupach dokonując ich podziału zgodnie z opisem przedstawionym w poprzednim rozdziale (ryc. 8). Z krzywych spektralnych prezentowanych na rycinach usunięto odcinki w zakresach długości fal 1360 - 1490 nm, 1800-1961 nm i 2310 – 2500 nm odpowiadające zakresom pasm silnej absorpcji promieniowania przez parę wodną zawartą w atmosferze. Krzywe spektralne uzyskane w pomiarach polowych są przebiegiem i poziomem zbliżone do krzywych zarejestrowanych przy wykorzystaniu przystawki HIMP, co potwierdza słuszność podziału badanych gleb na wspomniane wcześniej cztery grupy.

Do wstępnej analizy wpływu szorstkości powierzchni glebowych na wielkość odbicia spektralnego mierzonego w warunkach polowych przy użyciu statywu ręcznego wybrano 23 próby glebowe (tabela 4). Dla każdej próby obliczono wartości współczynnika  $T_{3D}$  przy trzech poziomach szorstkości:  $s_1$ ,  $s_2$  i  $s_3$ . Średnie wartości, dla trzech wspomnianych poziomów szorstkości wynosiły odpowiednio: 1,41; 1,27 i 1,09. Największą szorstkością charakteryzowały się gleby o dużej zawartości frakcji ilastej z Sepopola (30% iłu) i Gacek (17% iłu). W przypadku takich gleb, na ich powierzchni występowały stosunkowo duże agregaty co zwiększało ich szorstkość i powodowało, że współczynnik  $T_{3D}$  przyjmował najwyższe wartości, odpowiednio 2,01 i 1,76 przy poziomie szorstkości  $s_1$ . Najmniejszą szorstkość, na wszystkich trzech poziomach, zarejestrowano na glebach z Kunowic 9, Kunowic 17 i Świątek 1 o uziarnieniu piasku, przy zawartości iłu 0-1%. Dla tych gleb współczynnik  $T_{3D}$  przy poziomie  $s_1$  wynosił odpowiednio 1,06; 1,07 i 1,12.

Tabela 4. Szorstkość powierzchni glebowych wyrażona współczynnikiem zaokrąglenia (tortuosity index) T3D.

Miejscowość	T <sub>3D</sub>		
	s1	s2	s3
Baborówko1/11	1,37	1,23	1,05
Baborówko2/11	1,56	1,18	1,05
Baborówko3/11	1,65	1,21	1,04
Baborówko6/12	1,40	1,20	1,06
Chlebowo6	1,19	-	1,05
Czesławice	1,50	1,28	1,26
Domatków	1,34	1,19	1,05
Feliksów	1,20	1,10	1,04
Gacki	1,76	1,42	1,1
Jegłownik	1,73	1,34	1,14
Krzeszyce	1,27	1,15	1,04
Krzyżowa	1,29	1,16	1,06
Kunowice 8	1,18	1,09	1,05
Kunowice 9	1,06	1,09	-
Kunowice 17	1,07	1,04	-
Moskorzec	1,58	1,35	1,06
Radojewo	1,17	-	1,03
Sępopól	2,01	1,53	1,26
Słubice	1,30	1,78	1,19
Strug	1,56	1,30	1,09
Świątki 1	1,12	-	-
Wągsty	1,58	1,33	1,05
Więclawice3	1,62	1,42	1,08

## 2.5. Pomiary polowe przy użyciu automatycznego systemu goniometrycznego ROBOT

Rycina 9 prezentuje zróżnicowanie wartości dwukierunkowych wskaźników BRF fali o długości 850 nm w funkcji  $\theta_v$  w 12 płaszczyznach azymutalnych obserwacji  $\phi_v$  przy pięciu kątach zenitalnych oświetlenia  $\theta_s$  od trzech powierzchni glebowych poddanych czterem zabiegom uprawowym. Najwyższe wartości odbicia przy wszystkich zenitalnych kątach obserwacji i oświetlenia oraz we wszystkich płaszczyznach azymutalnych obserwacji uzyskano od gleby płowej (Złotniki 1) a najniższe od czarnej ziemi (Złotniki 2). Wyższe odbicie od gleby Złotniki 1 niż od gleby tego samego typu Batorówko 6/12 wynikało z ciemniejszej barwy drugiej z tych gleb powodowanej większą zawartością węgla organicznego, odpowiednio 0,63% i 1,65 %. Największy wzrost odbicia w funkcji  $\theta_v$  obserwowano w GPS dla wszystkich badanych powierzchni. W miarę zwiększania kąta  $\phi_v$  w stosunku do GPS, odbicie malało.

Na rycinie 10 przedstawiono krzywe spektralne zarejestrowane na wspomnianych powierzchniach przy nadirowym kierunku widzenia czujnika oraz przy największych dosłonecznych ( $-70^\circ$ ) i odsłonecznych ( $+70^\circ$ ) kątach widzenia w GPS przy najwyższym ( $30^\circ$ ) i najniższym ( $70^\circ$ ) położeniu Słońca. Krzywe te swoim kształtem są bardzo zbliżone do krzywych tych samych gleb zarejestrowanych w trakcie pomiarów wykonanych przy użyciu statywu ręcznego oraz przystawki HIMP.

Kierunkowe odbicie spektralne stanowi tylko fragment odbitego promieniowania od jakiejś powierzchni wzdłuż określonego kierunku. Albedo natomiast integruje promieniowanie odbite ze wszystkich możliwych kierunków i definiowane jest jako część

krótkofalowego promieniowania (0,3-3  $\mu\text{m}$ ) oświetlającego tę powierzchnię. Efekty wpływu szorstkości powierzchni gleb uprawnych na optymalny czas obserwacji ich średniej dobowej wartości albedo w zależności od ich położenia geograficznego omówiono w pracy: „*Approximating the average daily surfach albedo with respect to soil roughness and latitude*” opublikowanej International Journal of Remote Sensing (załącznik 8). Podobnie jak w eksperymentach wykonywanych w ramach niniejszego projektu, w powyższej pracy analizowano wpływ nierówności powierzchni gleb w odniesieniu do trzech stanów ich szorstkości, tj. gładkiej, średnio szorstkiej i bardzo szorstkiej.

## **2.6. Porównanie charakterystyk spektralnych uzyskanych w pomiarach laboratoryjnych i polowych**

Do porównania między sobą krzywych spektralnych tych samych gleb uzyskanych za pomocą kierunkowych pomiarów odbicia spektralnego w polu i laboratorium oraz pomiarów odbicia dyfuzyjnego w laboratorium za pomocą przystawki HIMP wykorzystano dane kierunkowe zebrane przy nadirowej obserwacji i kątach oświetlenia  $\theta_s$  zbliżonych do  $45^\circ$ . W takich warunkach oświetlenia bowiem, wykonywane są pomiary odbicia rozproszonego od prób glebowych umieszczanych w przystawce HIMP. Na rycinie 11 porównano krzywe spektralne gleb reprezentujących siedem rzędów według nowej Systematyki Gleb Polski. Wyższy poziom odbicia uzyskano w przy użyciu przystawki HIMP co wynika z wyraźnie mniejszej szorstkości prób mierzonych przy jej użyciu. Do pomiarów odbicia promieniowania rozproszonego, w tej przystawce umieszczano próby przetarte i przesiane przez sito, natomiast w warunkach polowych i pod goniometrem w laboratorium mierzono odbicie od gleb o szorstkości zbliżonej do naturalnej w terenie, wynikającej z obecności agregatów o różnej wielkości i trwałości. Obecność agregatów powodowała większe samozacienienie gleby i obniżanie odbicia w całym analizowanym zakresie widma.

Gleby słabo ukształtowane (S), wytworzone z piasków luźnych w Kunowicach 9, Trębowcu i Krzeszycach wykazywały małą strukturalność, tworząc bardzo drobne agregaty, które zacieniały mierzone powierzchnie w stosunkowo małym stopniu. Poziom i kształt krzywych spektralnych tych gleb zarejestrowanych wszystkimi trzema metodami pomiarowymi był bardzo zbliżony (ryc. 11 a, b i g). Gleby wytworzone z materiałów bardziej drobnoziarnistych od piasków słabo gliniastych we Wronach, Niezabitowie, Domatkowie i Więclawicach wykazywały większą strukturalność, przez co efekt zacienienia występujący na mierzonych powierzchniach obniżał poziom odbicia (ryc. 11 c,d,e i f). Wyniki wskazują, że pomiary wykonywane przy użyciu przystawki HIMP mogą stanowić alternatywę dla trudnych w realizacji pomiarów prowadzonych w laboratorium pod goniometrem lub w warunkach polowych.

## **2.7. Zróżnicowanie odbicia spektralnego w zależności od wilgotności i potencjału wody glebowej**

Na rycinie 12 przedstawiono krzywe spektralne zarejestrowane przy różnych stanach nasycenia wodą: od  $pF$  1,0 do  $pF$  3,0. W celu porównania zmian wielkości odbicia spektralnego od różnych typów gleb zależnie od wielkości siły ssącej, dla każdej próby odniesiono wartości wskaźników BRF dla fali o długości 1650 nm ( $R_{1650}$ ) zarejestrowane przy określonym potencjale wodnym ( $R_{pF}$ ) do wartości tego współczynnika dla gleby powietrznie suchej ( $R_{pF} \cdot 100$ )/ $R_{gps}$ . Na rycinie 13 przedstawiono trzy grupy krzywych reprezentujące trzy kategorie relacji między poziomem odbicia a siłą wiązania wody. W przypadku gleb z grupy pierwszej reprezentowanych przez poziomy wierzchnie ochric gleb z Klebanowic i Trębowca, o uziarnieniu piasków luźnych i niskiej zawartości próchnicy (poniżej 1%), wraz ze zmniejszaniem się potencjału matrycowego wzrastał poziom ich odbicia spektralnego (ryc. 13a). W zakresie  $pF$  od 0 do 2 ten wzrost był niewielki, natomiast

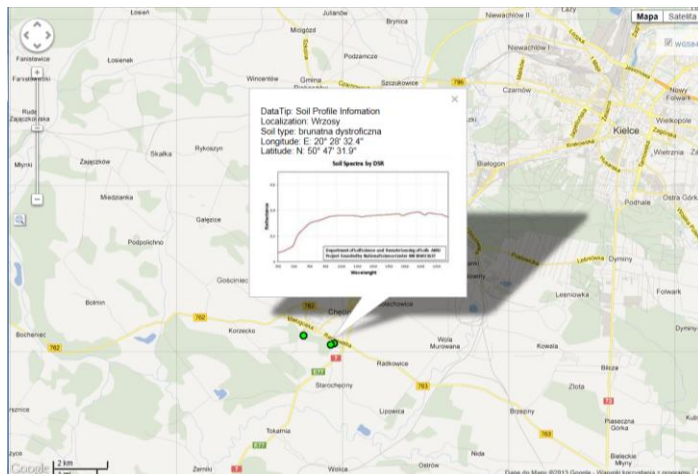
znacznie większy po osiągnięciu wilgotności mniejszych od połowej pojemności wodnej pF 2,0.

Gleby z grupy drugiej spełniały kryteria poziomu diagnostycznego *mollic* i posiadały uziarnienie drobnoziarniste. Poziom odbicia spektralnego od tych gleb był prawie niezmienny w zakresie pF od 0 do 2, natomiast przy spadku wilgotności do pF 3 obserwowany był najniższy poziom odbicia (ryc. 13b).

Grupę trzecią tworzyły, przedstawione na rycinie 13c, krzywe spektralne  $R_{1650}$  gleb o uziarnieniu piasków gliniastych i pyłów piaszczystych i średniej zawartości węgla organicznego (do 1,5%), których poziomy wierzchnie można zaliczyć również do poziomu *ochric*. W zakresie pF od 0 do 3 poziom odbicia spektralnego był niezmienny lub wykazywał niewielki wzrost wraz ze spadkiem wilgotności.

## 2.8. Strona internetowa

W celu upowszechnienia wyników badań zrealizowanych w ramach projektu stworzono stronę internetową, poprzez którą zaprezentowano lokalizację profili glebowych i krzywe spektralne uzyskane za pomocą radiometru ASD Field Spec 3 różnymi metodami pomiarowymi w warunkach laboratoryjnych i polowych. Strona działa w taki sposób iż po kliknięciu wybranej lokalizacji profilu pokazuje się informacja o typie gleby oraz jej krzywa spektralna (ryc. 14).



Ryc. 14. Przykładowa lokalizacja profilu glebowego analizowanego w niniejszym projekcie wraz z krzywą spektralną jej wierzchniego poziomu udostępniana na stronie internetowej Zakładu Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb UAM.

Planowane jest dalsze rozbudowanie strony, umożliwiające stałe zwiększanie udostępnianych informacji.