

Stanisław Gruszczyński*, Joanna Urbańska**

Aspekty metodyczne klasyfikacji gleboznawczej terenów rekultywowanych***

1. Wprowadzenie

Podstawową trudność w budowie algorytmu klasyfikacji terenów bezglebowych sprawia nawiązanie do obowiązującego obecnie (od ponad 50 lat) zbioru wzorców zawartego w tabeli klas gruntów [14]. Ze względu na silne zróżnicowanie utworów na terenach rekultywowanych występują istotne problemy przy próbie zastosowania analogicznego jak dla gleb uprawnych sposobu wnioskowania. Z tego powodu zasadne wydaje się bardziej elastyczne, alternatywne podejście do wnioskowania o aktualnej i potencjalnej jakości gruntów rekultywowanych.

Istnieją istotne różnice między terenami, które przez stulecia podlegały oddziaływaniu różnych formacji roślinnych, w wyniku czego ukształtowały się poziomy diagnostyczne gleb, a surowymi gruntami, które poddano intensywnym zabiegom umożliwiającym wprowadzenie roślinności i zainicjowanie rozwoju środowiska glebowego. Analiza różnic między glebami naturalnymi i utworami surowymi prowadzi do wskazania wśród nich trzech grup czynników:

- 1) litologiczno-morfologiczne,
- 2) chemiczne,
- 3) składniki normatywne.

Pierwsza z nich, którą można określić mianem litologiczno-morfologicznych, obejmuje uziarnienie, skład mineralny, strukturę porowatości i konfigurację terenu. Wymienione atrybuty w każdym systemie klasyfikacji gleb uznaje się za pierwszoplanowe symptomy ich jakości. Należy uznać, że one same, bądź atrybuty pochodne, muszą znaleźć miejsce w algorytmie oceny jakościowej gleb.

* Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Asystentka na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

*** Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005–2007 jako projekt badawczy 4 T12E 041 29 *Zasady bonitacji gleb przemysłowych na rekultywowanych obiektach bezglebowych*

Do drugiej grupy należy zaliczyć czynniki chemiczne kształtujące żyzność gleb. Nie jest podważana jakaś forma związków funkcyjnych (mających charakter stochastyczny) między dostępnymi zasobami składników pokarmowych a plonowaniem, a ogólniej – dochodem będącym głównym wykładnikiem jakości gruntów, wyrażona zależnością $Y \sim g_i(x_i)$ oznaczającą proporcjonalność oddziaływania zasobów x czynnika i na plon Y . Kształt funkcji $g(\cdot)$, a tym bardziej algorytm łącznego oddziaływania wielu czynników, można w tym miejscu pominąć, przyjmując jednak, że wzrost zasobu czynnika i wpływa dodatnio na wzrost $g(\cdot)$. Zasób składnika i tworzy: część obecna w glebie jako efekt procesów wietrzeniowych oraz wieloletniej akumulacji a_i oraz część b_i dodawana do gleby w formie nawożenia, w celu zrównoważenia powstającego niedoboru i ewentualnie, rozsądnej akumulacji zasobu. Można przyjąć, że na glebach naturalnych, poddawanych wieloletniej uprawie i racjonalnemu użytkowaniu, składnik b_i jest stosunkowo niewielki, uwzględniający granice opłacalności nawożenia w istniejących warunkach glebowych. Na gruntach surowych, rekultywowanych składnik b_i musi być zwykle duży, zwłaszcza gdy celem jest akumulacja substancji pokarmowej oraz uzyskanie plonu odpowiadającego jakości gruntu wyznaczonego przez czynniki litologiczne i morfologiczne. To powoduje, że ocena jakości gruntu w fazie rekultywacji lub zagospodarowania powinna być skorygowana (obniżona) w przypadkach, gdy zmuszeni jesteśmy do utrzymywania zwiększonego, w stosunku do normalnych wymogów wyznaczonych przez klasę bonitacyjną, nawożenia mineralnego. Oznacza to, że łączna ocena gruntu rekultywowanego musi też obejmować składnik zależny od zasobów pokarmowych podstawowych pierwiastków.

Trzecia grupę czynników tworzą składniki normatywne ujęte w standardach czystości ziemi. Są one oczywistym, binarnym elementem dyskryminacyjnym, kwalifikującym grunty do klas utworów zgodnych lub niezgodnych z wymogami środowiskowymi. Czynnikiem ten może wykluczać lub dopuszczać określone formy użytkowania tworząc granicę między użytkowaniem a nieużytkiem. Trudno wyobrazić sobie algorytm oceny jakości gruntów pomijający tę okoliczność.

Podsumowując, można wyróżnić trzy zespoły kryteriów kwalifikacji gruntów poddanych rekultywacji:

- 1) ocenę wynikającą z właściwości litologicznych i morfologicznych, określających aktualny stan gruntów z uwagi na cechy strukturalne i morfologię terenu;
- 2) ocenę skali obniżenia dochodowości ze względu na wyższe koszty nawożenia;
- 3) zgodność ze standardami jakości gleb.

W dalszej części artykułu uwaga zostanie skoncentrowana na problemie oceny jakości gruntów z uwagi na czynniki strukturalne (litologiczne i morfologiczne).

2. Podejścia do oceny jakości gleb

Możliwe są dwa skrajne podejścia do problemu bonitacji gruntów [20]:

- 1) dedukcyjne,
- 2) indukcyjne.

W podejściu dedukcyjnym, którego przykładem jest polska tabela klas gruntów, ustalono dyskretne, nienakładające się na siebie jednostki, charakteryzujące się określonymi, istotnymi z punktu widzenia użytkowania właściwościami. Polska tabela klas klasyfikuje grunty ze względu na ich przydatność w gospodarstwie rolnym, dlatego też głównymi wyróżnikami klas jakości są cechy ważne dla rolnictwa: poziom plonowania, stabilność plonów, rodzaj opłacalnych upraw, łatwość uprawy i inne cechy natury ekonomicznej. Klasy tworzą szereg bonitacyjny, ze ściśle zdefiniowanymi poprzednikami i następnikami. Bazujący na podobnych podstawach system podziału na kompleksy przydatności rolniczej jest uważany [19, 20] za kwalifikację, ponieważ jego celem nie jest ekonomiczna ocena gruntów, zaś jej jednostki nie tworzą ciągłego szeregu. Podobne uwagi można mieć do klasyfikacji siedlisk w państwowym gospodarstwie leśnym.

W podejściu indukcyjnym jakość gruntów określa liczbowy wskaźnik będący wynikiem operacji matematycznych na zmiennych charakteryzujących grunty. Bonitacja jest tu elastyczna, zazwyczaj przyjmuje formę punktacji, zaś jej najbardziej znanym przedstawicielem jest tak zwana niemiecka klasyfikacja 100-punktowa ujęta kartograficznie w formie tak zwanej „Bodenschätzungskarte”.

W Polsce posługujemy się dedukcyjnym systemem bonitowania gleb: wymagania wobec właściwości gleb należących do poszczególnych klas bonitacyjnych zostały sformułowane *a priori*, zaś odpowiednia instrukcja [14] zawiera spis wzorców należących do poszczególnych klas. Klasy tworzą szereg bonitacyjny, czyli skalę porządkową. Wzorce są identyfikowane za pomocą cech użytków i gleb: typu gleby, uziarnienia i jego rozkładu w profilu glebowym, miąższości poziomu próchnicznego, struktury, położenia, uwilgotnienia, zawartości węglanów, odczynu, nowotworów glebowych itp.

Głównym problemem w bonitacji tak zwanych utworów bezglebowych (surowych) jest brak istotnych symptomów rozwoju procesów glebowych. Wobec ich różnorodności litologicznej brakuje istotnych przesłanek dotyczących wysokości, trwałości, równomierności plonowania, kosztów gospodarowania oraz dynamiki poprawy cech użytkowych. Są to informacje niezbędne do określenia jakości gleb oraz przyporządkowania ich do odpowiedniej klasy bonitacyjnej. Równocześnie jednak różnorodność litologiczna i morfologiczna obiektów bezglebowych powoduje znaczne zróżnicowanie plonowania i możliwości użytkowych gruntów rekultywowanych.

Wobec dużej różnorodności utworów (utwory surowe, utwory surowe z zanieczyszczeniami, utwory sztuczne po intensywnej przeróbce mechanicznej itp.)

trudno byłoby skonstruować stosowny system wzorców, analogiczny do bonitacji terenów rolnych, także z powodu dużo większej dynamiki zmian cech gruntów rekultywowanych. Wydaje się uzasadnione dążenie do opracowania algorytmu indukcyjnego, którego końcowym wynikiem byłaby ocena pozwalająca na ulokowanie jednorodnego płata gruntu w skali obowiązującego szeregu bonitacyjnego. Algorytm musi przetwarzać informacje ilościowe i jakościowe, jednoznacznie powiązane z przydatnością gruntów do upraw. Konieczna jest oczywiście kalibracja systemu, w celu identyfikacji jednoznacznego przeliczenia wartości oceny końcowej wynikłej ze stosowania algorytmu na skalę bonitacyjną.

Na marginesie problemów bonitacji należy podkreślić, że współczesne poglądy na problem bonitacji odbiegają od tradycyjnego podejścia „agrocentrycznego”. Gleby pełnią w krajobrazie istotną rolę, także pozaprodukcyjną, wpływając na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń, na stabilność ekosystemów oraz zdrowie ludzi i zwierząt. Oznacza to konieczność bardziej kompleksowego podejścia do kryteriów klasyfikacji, co jednak wymaga wcześniejszego zdefiniowania dodatkowych kryteriów bonitacji.

3. Algorytm oceny

Istnieje kilka modeli, które można rozpatrywać jako alternatywny prototyp algorytmu oceny jakości gruntów rekultywowanych. Niektóre z nich nawiązują do znanych, ogólnych zależności między właściwościami środowiska a plonowaniem.

Można wymienić następujące algorytmy otrzymywania indukcyjnej oceny jakości gruntów:

- podejście addytywne,
- podejście multiplikatywne,
- podejście bazujące na „prawie minimum”.

Zakładamy, że podstawą oceny bonitacji jest algorytm transformujący n -elementowy wektor x reprezentujący n cech ilościowych gruntów istotnych z punktu widzenia jakości gleb: $x=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. Wynikiem działania algorytmu jest punktacja w ustalonej z góry skali lub inna forma pośredniego wskazania miejsca klasyfikowanego obiektu w szeregu bonitacyjnym.

W procedurze addytywnej końcowa ocena punktowa C_{add} jest sumą liniowych lub nieliniowych funkcji składowych wektora wejściowego, według wzoru: $C(x_{add} = a_1(x_1) + a_2(x_2) + a_3(x_3) + \dots + a_n(x_n))$. Symbole a_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) oznaczają ustaloną funkcję transformującą wartości poszczególnych cech w odpowiednią ocenę punktową. Prototypem tego modelu bonitacji gruntów są wielomianowe modele produktywności gleb [9], wykorzystywane w ocenach wpływu czynników chemicznych na plonowanie. Przyjęcie takiego modelu bonitacji oznacza aprobowanie substytucji czynników składowych. Oznacza to, że algorytm generalnie odbiega od „zasady

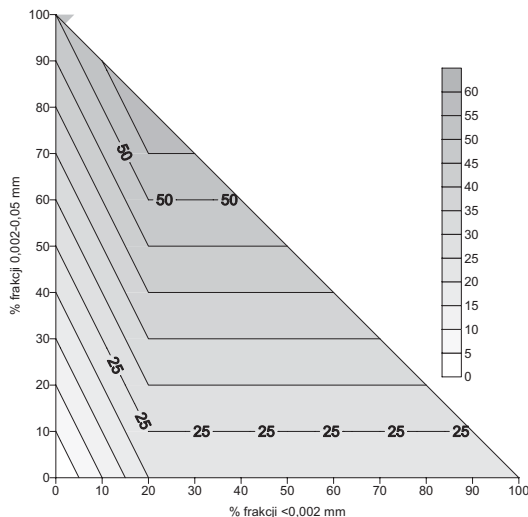
minimum” [1, 9]: oceny negatywne sumują się, obniżając łączną ocenę, natomiast jeden negatywny czynnik nie przekreśla wysokiej oceny wynikającej z wysokiego poziomu pozostałych. Cechą charakterystyczną jest także brak *plateau* obecnego zawsze w modelach minimum.

W rekultywacji używany jest zgodny z opisaną zasadą sposób oceny jakości utworów nadkładu opracowany przez Skawinę i Trafas [18]. Ocena (punktacja nazywana liczbą bonitacyjną LB) jest uzależniona, według wspomnianej metody, od następujących czynników:

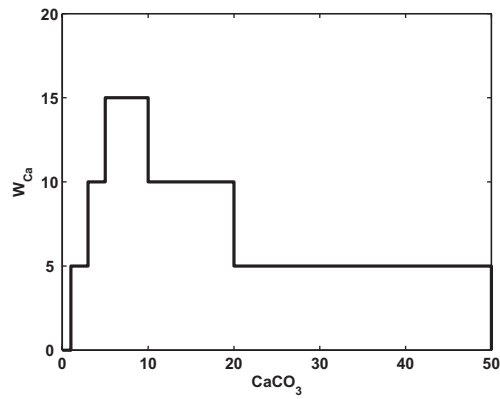
- uziarnienia, reprezentowanego przez zawartość procentową frakcji łu (części ziemiste o średnicy mniejszej niż 0,002 mm) i pyłowej (części ziemiste o średnicy od 0,002 do 0,05 mm) – wskaźnik liczbowy W_L ;
- procentowej zawartości węgla wapnia – wskaźnik liczbowy W_{Ca} ;
- wartości liczbowej wskaźnika plastyczności (różnicy między granicą płynności i plastyczności oznaczanych standardowymi metodami gruntoznawczymi) – wskaźnik liczbowy W_{sp} ;
- sorpcji błękitu metylenowego (sorpcja BM), jako wskaźnika pojemności sorpcyjnej gruntu – wskaźnik liczbowy W_{So} .

Liczba bonitacyjna jest sumą poszczególnych wskaźników, będących z kolei funkcjami wymienionych cech gruntów.

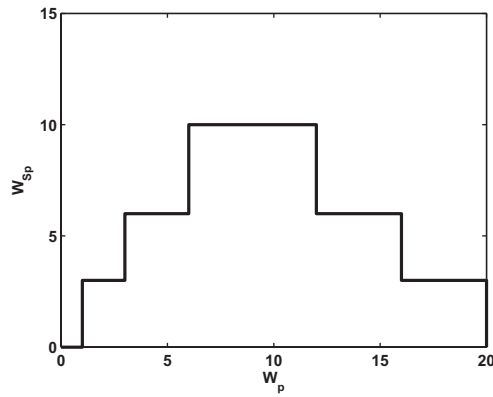
Rysunki 1–4 przedstawiają wykresy zależności między cechami ocenianych gruntów a składnikami tworzącym liczbę bonitacyjną.



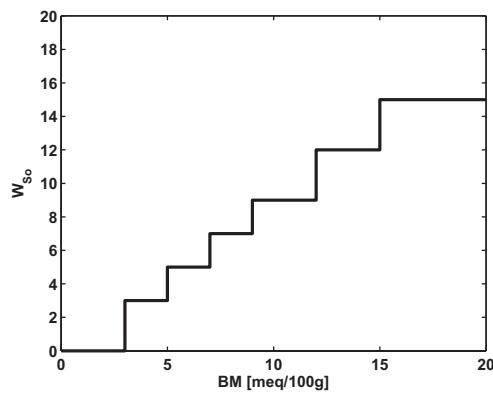
Rys. 1. Rozkład wskaźnika litologicznego W_L w zależności od zawartości frakcji pyłowej i spławialnej w utworze gruntowy



Rys. 2. Rozkład wskaźnika wapniowcowego W_{Ca}



Rys. 3. Rozkład wskaźnika spistości W_{Sp}



Rys. 4. Rozkład wskaźnika sorpcji W_{So}

Uproszczenie podejścia do problemu oceny jakości gruntów zaproponował Żuławski [5, 24]. Wprowadził on pojęcie „czynności glebotwórczej”, określające łatwość zagospodarowania. Jedynym kryterium podziału gruntów na cztery kategorie (od I – najwyższej, do IV – najniższej) jest skład ziarnowy utworu, co Autor ujął w formie siatki na tle trójkątów Fereta, w ujęciu gruntoznawczym i gleboznawczym. Pomija się tutaj wszelkie potencjalne nieregularności w zakresie zależności między różnymi cechami gruntów.

W pewnym sensie podział opracowany przez Żuławskiego jest uproszczonym wariantem klasyfikacji Skawiny–Trafas, w którym pominięto trzy z czterech wskaźników (sorpcji, wapniowcowy, spoistości), zaś pozostawiono tylko wskaźnik bazujący na litologii.

Można przypuszczać, że zaproponowana klasyfikacja może zdawać egzamin w odniesieniu do utworów naturalnych, natomiast zawodzić w przypadku materiałów sztucznych.

W podejściu multiplikatywnym ocena punktowa C_{mpl} jest funkcją iloczynu: $C_{mpl} = f(b_1(x_1) b_2(x_2) b_3(x_3) \dots b_n(x_n))$. Prototypem takiego podejścia do bonitacji, jest analogiczny w formie model Mitscherlicha–Baulego [9, 15, 16], zakładający funkcje eksponencjalne jako odpowiednie do charakterystyki oddziaływania poszczególnych czynników składowych na łączną ocenę.

Także to podejście zakłada aprobowanie substytucji czynników składowych, chociaż lepiej niż algorytm addytywny uwzględnia obecność niekorzystnych czynników w charakterystyce gruntów. Zgodny z tym podejściem jest sposób oceny gruntów rekultywowanych z użyciem wskaźnika bonitacyjnego (WB) [6, 7], wymagającego jednak bardziej wszechstronnych informacji i zaplanowanego do wykorzystania w środowisku GIS/LIS. Podobnie jak metoda Skawiny–Trafas postępowanie jest indukcyjne i polega na ustaleniu punktacji na podstawie: charakterystyki utworu (funkcja uziarnienia i sorpcji błękitu metylenowego), rozmieszczenia różnych utworów w pionie, charakterystyki nachylenia terenu. Punktacja obejmuje skalę 1–10, zaś algorytm ma charakter multiplikatywny, nie addytywny. Można oceniać, że jest on konsekwentny i dobrze umocowany w stosunku do szeregu bonitacyjnego [21]. Można go traktować jako dobry punkt wyjścia do konstruowania metody klasyfikacji bonitacyjnej dla terenów bezglebowych.

Najbardziej znanym prototypem związku cech siedliska z plonowaniem jest model Liebiga–Sprenglera, według oryginalnego pomysłu [22], reprezentujący zależność między zasobami składników pokarmowych a plonowaniem. Zależność ta ma formę: $C_{min} = \min[m_1(x_1), m_2(x_2), m_3(x_3), \dots, m_n(x_n), P]$. Funkcje składowe wyznaczają mniejsze lub większe ograniczenie jakości, zaś o końcowej ocenie gruntu decyduje czynnik ograniczający najsilniej. Wartość P jest poziomem *plateau*, który zamyka maksymalną ocenę. Niektórzy ekonomiści rolni, analizujący przydatność modelu Liebiga–Sprenglera jako zasady ustalania poziomu nawożenia [1–3, 8, 9, 15, 16], za-

kładają, że „prawo minimum” akceptuje wyłączność funkcji LRP (*Linear Response and Plateau* – liniowa odpowiedź i *plateau*) jako jedynej reprezentacji zależności między czynnikiem wzrostu a plonowaniem. Obecnie to założenie jest kwestionowane, tym bardziej że nie wynika ono wprost z przemyśleń von Liebiga i Sprenglera.

Od kilkunastu lat „prawo minimum” Liebiga–Sprenglera, traktowane latami przez agroekonomistów jako „historyczne kuriozum”, jest uważane za poważnego kandydata do pozycji paradygmatu modelowania reakcji roślin na czynniki środowiska. W chwili obecnej jednak nie jest znany sposób klasyfikacji gruntów naturalnych lub rekultywowanych bazujący w pełni na takim sposobie rozumowania.

Obok podstawowych, wspomnianych wyżej, modeli klasyfikacji bonitacyjnej, warto rozważyć także algorytm zbudowany na zasadzie wnioskowania rozmytego. W pewnym sensie jest to najbardziej naturalna metoda alternatywna, blisko powiązana z tradycyjną ścieżką diagnozy klasyfikacyjnej. Głównym elementem łączącym jest zbiór reguł, które w systemach rozmytych przyjmują formę zdań o budowie *jeżeli <warunek1> [lub/i] <warunek2> to konkluzja=<klasa>*. Należy zauważyć, że zdania te mają budowę analogiczną do klucza identyfikacji klas właściwego dla diagnozy bonitacyjnej [14]. Problemem budowy systemu wnioskowania rozmytego jest wybór zmiennych (atrybutów) wejściowych, sformułowanie stosownych reguł oraz dobranie operacji przetwarzających zmienne dających wyniki wyjściowe mieszczące się w granicach oczekiwań zachowania się systemu. W dalszej części artykułu rozważono system wnioskowania rozmytego, bazujący na podejściu Mamdaniego [10], którego konstrukcja ma na celu konfrontację zachowania się modelu z oczekiwaniami istniejącego systemu klasyfikacji. Należy podkreślić, że wnioskowanie rozmyte jest tylko jedną z wielu możliwości rozwiązania problemu diagnozy bonitacyjnej. W grę wchodzi obok niego liczne algorytmy z grupy poszukiwania wiedzy w bazach danych i eksploracji danych: KDD (*Knowledge Discovery in Databases*), DM (*Data Mining*).

4. Kryteria w ocenie rozmytej

Niekwestionowane, podstawowe znacznie w kształtowaniu jakości gleb mają właściwości uzależnione od litologii. Pochodzenie tworzywa mineralnego, wynikające stąd uziarnienie i skład mineralny frakcji spławialnej decydują o kierunku i wydajności procesów wymywania, akumulacji i transformacji składników gleb.

W systemie różnych wskaźników jakości gleb jako istotne można wskazać m.in.:

- uziarnienie,
- porowatość,
- pojemność powietrzną,
- retencję polową,

- retencję trwałego wędnięcia,
- współczynnik filtracji,
- lepkość.

Analizując liczne propozycje dotyczące klasyfikacji jakości gleb [17], jako uzasadnione wskaźniki przyjmuje się następujące cechy statyczne:

- uziarnienie (retencja wody i przepuszczalność wody oraz składników chemicznych, sorpcja wymienna);
- głębokość poziomu akumulacji (*topsoil*);
- głębokość gleby (głębokość swobodnej penetracji systemów korzeniowych upraw);
- gęstość objętościowa (rozwój systemów korzeniowych, przepuszczalność wodna);
- użyteczna pojemność wodna (stopień dostępności wody w przeciętnych warunkach meteorologicznych);
- szorstkość gleby (podatność na erozję, opory uprawy mechanicznej);
- przepuszczalność wodna (bilansowanie w relacji woda – powietrze);
- podatność gleb na zmywanie, zwięzłość gleb (opory uprawy);
- trwałość agregatów glebowych.

Lista właściwości chemicznych wykorzystywanych jako kryterium jakości gleb jest bardzo długa i obejmuje między innymi [17]:

- odczyn (pH);
- zawartość węgla wapnia;
- pojemność wymienną kationów (CEC – *Cation Exchange Capacity*);
- buforowość, wymienny potas, wymienny sól, stopień wysycenia kationami zasadowymi;
- zasolenie;
- zawartość węgla organicznego i substancji organicznej;
- stosunek C/N;
- przyswajalne P, K i Mg;
- liczne wskaźniki zawartości bakterii (bakterie azotowe, amonifikujące, rozkładające celulozę, redukujące, denitryfikujące itp.);
- miary zawartości mikroelementów.

W przypadku większości cech uzależnionych od litologii i genezy nie jest przypuszczalnie możliwa substytucja jednej właściwości przez inną. Oznacza to, że na przykład wadliwa struktura porowatości nie może być zrekompenrowana poprzez poprawę innej cechy. Ważne jest zatem, by na liście czynników analizowanych jako kryteria oceny jakości gruntów znajdowały się właściwości, których zmienność istotnie reguluje możliwość funkcjonowania ekosystemu. Z drugiej strony liczba kryte-

riów oceny nie może być zbyt duża, ponieważ jesteśmy w stanie sformułować poprawną ocenę oddziaływania na plonowanie wobec niektórych tylko czynników.

Biorąc pod uwagę omówione uwarunkowania i kryteria klasyfikacyjne, jak też czynniki uznawane powszechnie za wyznaczniki jakości gleb, można wskazać następujący, alternatywny wobec tradycyjnej diagnozy bonitacyjnej, zbiór informacji będący podstawą oceny jakości gruntów rekultywowanych:

- $EAWC_{top}$: Woda łatwo dostępna w warstwie 0–50 cm, różnica zawartości wody w glebie odpowiadająca rozpiętości ciśnień 34 kPa do 200 kPa wyrażona w m^3/m^3 . W glebach ukształtowanych i uprawianych poziom tej cechy jest kształtowany (poza składem ziarnowym) przez głębokość i zasobność w węgiel organiczny poziomu próchnicznego lub płużnego. W gruntach surowych można z dużą dozą pewności zakładać ograniczenie tego wpływu do uziarnienia i rodzaju tworzywa mineralnego. Interpretacja tej wielkości jest bezpośrednia: duży poziom $EAWC_{top}$ jest korzystny, jego zmniejszanie jest czynnikiem niekorzystnym.
- $EAWC_{sub}$: Woda łatwo dostępna w drugiej warstwie litologicznej poniżej 50–100 cm, różnica zawartości wody w glebie odpowiadająca rozpiętości ciśnień 34 kPa do 200 kPa wyrażona w m^3/m^3 . Wielkość tej cechy zależy od właściwości tworzywa mineralnego. Jest to składnik decydujący o stopniu zdrenowania górnej warstwy gruntu. Większa wartość cechy poprawia jakość gruntów, mniejsza – obniża.
- AIR : Procentowa zawartość porów powietrznych w warstwie 0–30 cm przy podciśnieniu 34 kPa. Cecha strukturalna decydująca o stosunkach powietrzno-wodnych. Zwykle przyjmuje się, że w glebach ornych minimalna zawartość porów powietrznych nie powinna być mniejsza niż 10%. Zmniejszenie tej wartości wpływa na pogorszenie stopnia przewietrzania, zaś wzrost ponad ok. 20% nie poprawia jakości.
- CA : Zawartość węglanów w warstwie 0–30 cm. Buforujące działanie węglanu wapnia ma pozytywne oddziaływanie do zawartości kilku procent. Przekroczenie granicy 20% stwarza problem związany z nadmierną alkaliczacją i sorpcją chemiczną niektórych składników.
- $Slope$: Spadek (nachylenie) powierzchni w stopniach. Nachylenie jest istotnym ograniczeniem wartości użytkowej. Jego duża wartość ogranicza zakres wykorzystania gruntów, wpływa też na zagrożenie erozyjne, obniżając jakość siedliska.
- CEC : Pojemność wymienna w stosunku do kationów w warstwie 0–30 cm w $cmol^{(+)}/kg$ gleby jest to cecha zależna od składu mineralnego, odczynu i zawartości węgla organicznego w glebach. Duża wartość CEC jest cechą generalnie korzystną, poza przypadkami znacznego nasycenia gruntów składnikami zakwaszającymi.

Uzasadnieniem dla tych składowych wektora cech w klasyfikacji terenów bezglebowych jest rola, którą pełnią one w kształtowaniu urodzajności (zapas wody, przewietrzanie strefy korzeniowej, zdolność gromadzenia kationów i zbuforowanie oraz trudności w uprawie spowodowane konfiguracją terenu). Trudno też przesądzać o adekwatności rozważanego wektora cech jak też algorytmu samego wnioskowania. Jako pierwsze przybliżenie systemu wspomagającego ocenę bonitacji gruntów rekultywowanych można przeanalizować system wnioskowania rozmytego.

5. Model klasyfikacji

Wnioskowanie rozmyte znajduje zastosowanie w algorytmach, w których implikacje są sformułowane ogólnie, bazując na zależnościach scharakteryzowanych lingwistycznie [10, 23]. Pedologia jest dobrym polem zastosowania wnioskowania rozmytego ze względu na dotkliwy brak precyzyjnych matematycznych modeli funkcjonowania gleb [4, 11–13]. System wnioskowania rozmytego obejmuje cztery składniki wymagające zdefiniowania: zbiory rozmyte w dziedzinach zmiennych wejściowych, zbiory rozmyte w dziedzinie zmiennej wyjściowej, reguły odwzorowania zmiennych wejściowych w zmienne wyjściowe, zasadę przetwarzania końcowego zbioru rozmytego. Tak zarysowane składniki dotyczą wnioskowania tak zwaną metodą Mamdaniego. Alternatywna metoda Takagi–Sugeno charakteryzuje się wyjściem funkcyjnym [10].

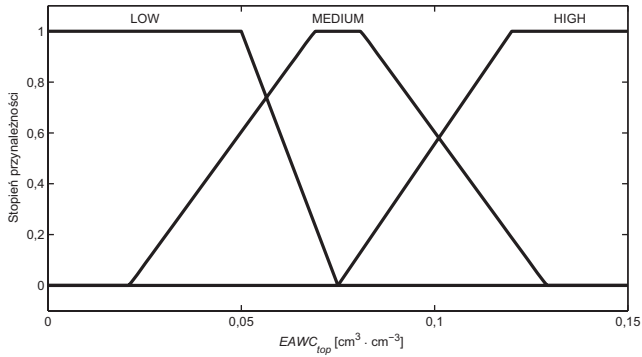
5.1. Wejściowe zbiory rozmyte

Wejściowe zbiory rozmyte określają podział obszaru przestrzeni rozważań poszczególnych zmiennych na części dające się określić lingwistycznie. W celu zbadania zachowania się modelu rozmytego zastosowano możliwie proste rozwiązania w dziedzinie kształtu i liczby zbiorów, przede wszystkim dbając o obrazowość skutków funkcjonowania tego systemu.

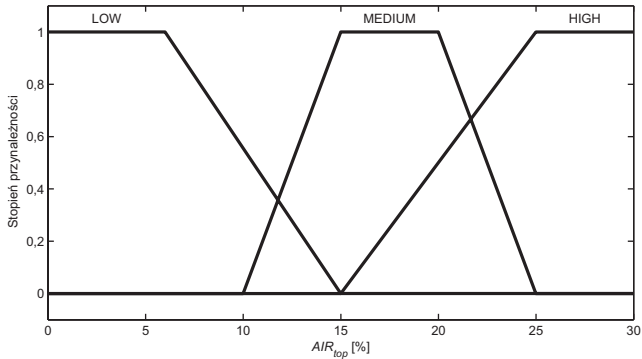
Stopień przynależności poszczególnych odcinków wartości zmiennej wejściowej do określonych zbiorów rozmytych zdefiniowanych lingwistycznie określają tak zwane funkcje przynależności $\mu_A(z)$. Przyjmują one wartość z przedziału $[0; 1]$, przy czym $\mu_A(z) = 1$ oznacza całkowitą przynależność cechy obiektu do zbioru rozmytego A , zaś $\mu_A(z) = 0$ oznacza brak przynależności do zbioru rozmytego A . Poszczególne zbiory rozmyte są zazwyczaj zdefiniowane lingwistycznie określeniami oznaczającymi zgrubną ocenę ilościową lub jakościową.

Rysunki 5–9 prezentują funkcje przynależności do poszczególnych zbiorów rozmytych zmiennych ujętych w modelu klasyfikacji terenów rekultywowanych.

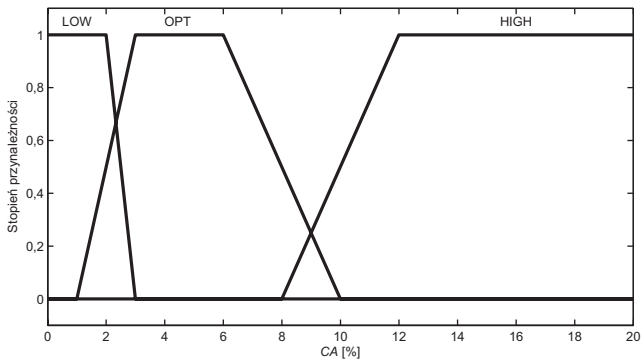
Wyodrębnione zbiory rozmyte są zdefiniowane bardzo ogólnie i nie ma większych trudności ze wskazaniem, jaki zbiór wejściowy jest na ogół powiązany z lingwistycznie zdefiniowanymi zbiorami rozmytymi zmiennych wyjściowych.



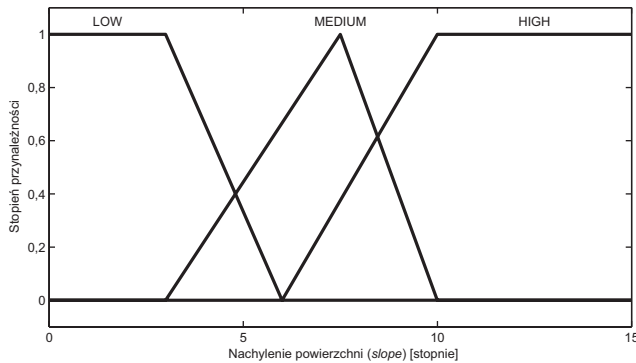
Rys. 5. Funkcje przynależności zbiorów rozmytych charakteryzujących poziom wody łatwo dostępnej w warstwach górnej i dolnej gruntów – $EAWC_{top}$ i $EAWC_{sub}$



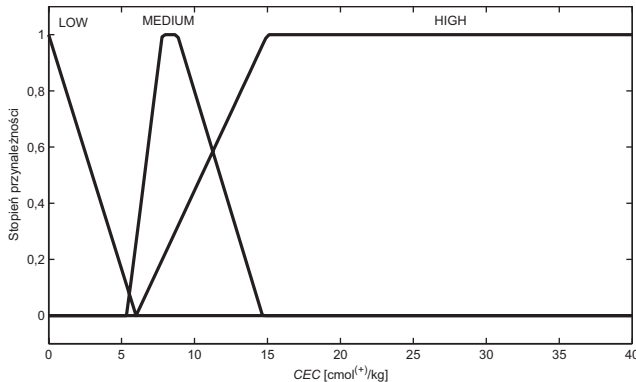
Rys. 6. Funkcje przynależności zbiorów rozmytych charakteryzujących objętość porów powietrznych w gruntach – AIR



Rys. 7. Funkcje przynależności zbiorów rozmytych charakteryzujących zawartość węgla wapnia w gruntach – CA



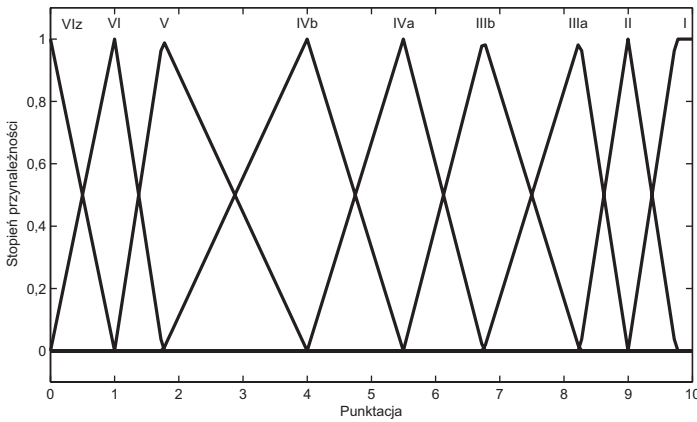
Rys. 8. Funkcje przynależności zbiorów rozmytych charakteryzujących nachylenie powierzchni



Rys. 9. Funkcje przynależności zbiorów rozmytych charakteryzujących pojemność wymienną kationów gruntu

5.2. Zmienna wyjściowa

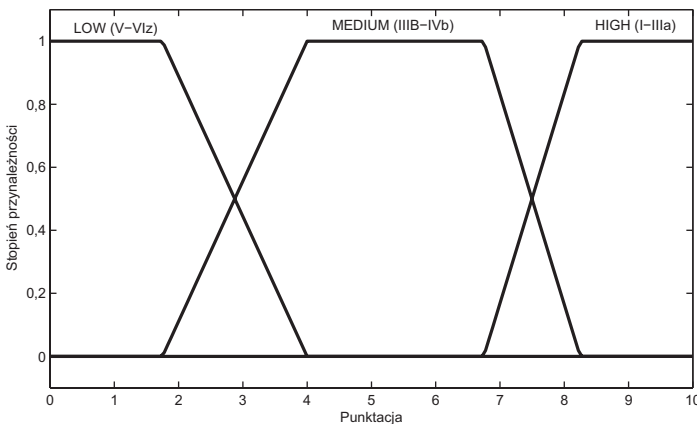
Naturalnymi wyjściowymi zbiorami rozmytymi byłyby w tym wypadku nazwy klas bonitacyjnych używane w polskiej nomenklaturze gleboznawczej. Problemem jest jednak określenie przestrzeni rozważań, która powinna obejmować część osi liczbowej odpowiednią do prezentacji zmienności zbiorów. Pomocne mogą tu być wskaźniki przeliczeniowe wykorzystywane w procedurach porównywania klas bonitacyjnych przy wymiarze podatku gruntowego lub w pracach scaliowych. Transformacja tych wskaźników do skali dziesięciopunktowej [0; 10] prowadzi do układu funkcji przynależności przedstawionego na rysunku 10. Tak rozbudowany zestaw zbiorów rozmytych wymagałby silnego rozdrobnienia zbiorów zmiennych wyjściowych, co musiałoby prowadzić do bardzo obszernego, trudnego do zaprojektowania zbioru reguł przetwarzających.



Rys. 10. Funkcje przynależności zbiorów rozmytych wyjściowej zmiennej określającej punktową wartość gruntów

Tracąc nieco na, iluzorycznej, precyzji odwzorowania poszczególnych klas, można zastosować alternatywny układ zbiorów rozmytych, obejmujących: grunty słabe (LOW, odpowiadające klasom od V do VIz), grunty średniej jakości (MEDIUM, odpowiadające klasom od IIIb do IVb) oraz grunty wysokiej jakości (HIGH, odpowiadające klasom I–IIIa).

Zmodyfikowany układ funkcji przynależności przedstawia rysunek 11. W ten sposób powstaje utrudnienie w ocenie jakości gruntu, jednakże może być ona nieco uściślona w wyniku operacji wyostrzania.



Rys. 11. Zmodyfikowany układ funkcji przynależności zbiorów rozmytych wyjściowej zmiennej określającej punktową wartość gruntów

5.3. Reguły wnioskowania

Każda wartość cechy gruntu, uważanej za kryterium oceny jego jakości, jest przesłanką, czyli wspiera, w mniejszym lub większym stopniu, jakąś konkluzję: pozytywną lub negatywną dotyczącą jego jakości.

Pozytywną konkluzją jest wskazanie listy zbiorów wyjściowych, które charakteryzują się określoną wartością cechy.

Negatywną konkluzją jest lista zbiorów wynikowych, które są wykluczone ze względu na określone wielkości cechy.

Odmienne, niż ma to miejsce w klasyfikacji gleb naturalnych, w przypadku obiektów rekultywowanych, przynajmniej teoretycznie, należy założyć kombinacje warunków, które normalnie nie występują w przyrodzie. W skrajnym przypadku można oczekiwać niezwykle rozbieżnych wskazań zbiorów wynikowych wypływających z przesłanek, co silnie rozmywa ocenę końcową. W tych okolicznościach właściwie należałoby dopuścić wszystkie możliwe kombinacje poszczególnych przesłanek, co samo w sobie byłoby niezwykle trudne do realizacji i uciążliwe z powodu konieczności drobiazgowego rozważania znaczenia każdego warunku dla konkluzji wynikającej z przesłanki. Jednakże biorąc pod uwagę zakładaną swobodę konfiguracji poszczególnych warunków, można wyobrazić sobie skuteczną ocenę na podstawie przesłanek składających się z pojedynczych warunków (tab. 1).

Tabela 1. Zbiór reguł wnioskowania rozmytego o jakości gruntów

Przesłanka	Konkluzja (+)	Konkluzja (-)
$EAWC_{top} = \text{LOW}$	LOW	-
$EAWC_{top} = \text{MEDIUM}$	MEDIUM	-
$EAWC_{top} = \text{HIGH}$	HIGH	-
$EAWC_{sub} = \text{LOW}$	LOW	-
$EAWC_{sub} = \text{MEDIUM}$	MEDIUM	-
$EAWC_{sub} = \text{HIGH}$	HIGH	-
$AIR = \text{LOW}$	-	HIGH
$AIR = \text{MEDIUM}$	-	HIGH
$AIR = \text{HIGH}$	-	-
$CA = \text{LOW}$	-	HIGH
$CA = \text{OPT}$	-	-
$CA = \text{HIGH}$	-	HIGH

Tabela 1 cd.

Przesłanka	Konkluzja (+)	Konkluzja (-)
$Slope = LOW$	-	-
$Slope = MEDIUM$	-	HIGH
$Slope = HIGH$	-	HIGH
$CEC = LOW$	LOW	HIGH
$CEC = MEDIUM$	MEDIUM	-
$CEC = HIGH$	HIGH	-

Pominięcie konkluzji pozytywnych w przypadkach zmiennych *AIR*, *CA* i *Slope* oznacza jedynie, że samoistnie żadna z nich nie zapewnia określonej jakości, choć może oddziaływać na nią ujemnie. Warto zwrócić uwagę, że wzbogacenie operatorów przesłanek o \leq , \geq oraz \neq pozwala na zmniejszenie liczby przesłanek poprzez wprowadzenie:

- $AIR \leq MEDIUM \Rightarrow KLASA \neq HIGH$,
- $CA \neq OPT \Rightarrow KLASA \neq HIGH$,
- $Slope \geq MEDIUM \Rightarrow KLASA \neq HIGH$.

Należy zwrócić uwagę, że nie wszystkie systemy służące do konstruowania narzędzi wnioskowania rozmytego akceptują przesłanki wymienionych wyżej typów.

Wyrażone w ten sposób zależności (wymagające jednak dodatkowej kalibracji polegającej na modyfikacji kształtu i położenia odpowiednich funkcji przynależności przy wykorzystaniu danych obserwacyjnych) generują rozmyty zbiór wyników, według następujących reguł:

- implikacje odnoszące się do tych samych wynikowych zbiorów rozmytych łączone są za pomocą operatora alternatywy LUB (OR), co oznacza zwykle wykonanie operacji maksimum ($\max[(k_1, k_2, \dots, k_n)]$) na wchodzących w skład wyrażenia zbiorach;
- otrzymane w ten sposób zbiory łączone są operatorem sumy logicznej I (AND).

Zgodność wskazań poszczególnych przesłanek (wskazanie na te same lub zbliżone zbiory wynikowe) powoduje utworzenie stosunkowo zwartego zbioru rozmytego, który nie stwarza szczególnych trudności interpretacyjnych. Bardziej złożona sytuacja powstaje w przypadku silnego rozmycia wyniku, na przykład zbioru U-kształtnego, który sygnalizuje znaczne rozbieżności w ocenie poszczególnych atrybutów jakościowych.

5.4. Problem wyostrzania

Niezależnie od kształtu wynikowego zbioru rozmytego potrzebne jest wskazanie pojedynczej, reprezentatywnej dla danej konfiguracji atrybutów wartości określającej jakość siedliska lub gleby. We wnioskowaniu rozmytym oceny takiej wartości dokonuje się w operacji wyostrzania. Wśród istniejących algorytmów tej operacji najczęściej akceptowana jest metoda *Center of Area* wskazująca środek ciężkości zbioru rozmytego jako najlepsze przybliżenie wartości reprezentatywnej. Algorytm ten zdaje egzamin w przypadku zwartego zbioru wynikowego (jednomodalnego), lecz może budzić wątpliwości w zbiorach wielomodalnych (na przykład U-kształtnych), gdzie powstaje ryzyko wskazania na zbiór rozmyty w ogóle nie wskazany przez żadną z aktywnych przesłanek. Ta kłopotliwa okoliczność nie wyklucza możliwości zastosowania algorytmu nawet w tym przypadku, ponieważ uzyskiwany wynik jest w pewnym stopniu analogiczny do wyniku podejścia addytywnego, z różnicami wynikającymi z redukcji zbiorów jednoimiennych.

Jako alternatywne wobec tradycyjnego algorytmu wyostrzania, w tym konkretnym przypadku warte rozważenia są procedury bazujące na wyszukiwaniu maksimum zbioru wynikowego (*First of Maxima*, *Last of Maxima* oraz *Mean of Maxima*). Szczególnie algorytm *First of Maxima*, identyfikujący pierwszy punkt maksimum wzdłuż przestrzeni rozważań zbioru wynikowego, nawiązuje w pewnym stopniu do algorytmu „zasady minimum”.

Konsekwencje przyjęcia poszczególnych rodzajów algorytmu wyostrzania najłatwiej jest prześledzić na przykładzie wyników przetwarzania modelowych wartości zmiennych wejściowych przedstawionych w tabeli 2. Komentarz do zawartych w tabeli 2 wyników musi uwzględniać stopień reagowania wyjścia systemu na zmiany wartości wejściowych.

Tabela 2. Wyniki wyostrzania zbiorów wynikowych uzyskanych dla modelowych wartości zmiennych wejściowych. Wartości zmiennych ustawionych:
Slope = LOW, *CA* = OPT

$EAWC_{top}$	$EAWC_{sub}$	<i>AIR</i>	<i>CEC</i>	<i>CoA</i>	<i>FoM</i>	<i>MoM</i>	<i>LoM</i>
0,03	0,12	20	5	4,88	0	5,00	10,00
0,03	0,07	20	5	3,74	0	3,59	6,70
0,03	0,03	20	5	3,73	0	0,85	1,71
0,03	0,12	20	20	4,91	0	5,00	10,00
0,03	0,07	20	20	4,91	0	5,15	10,00
0,03	0,03	20	20	4,91	0	5,00	10,00
0,12	0,12	10	5	5,60	8,30	9,15	10,00

Tabela 2. cd.

$EAWC_{top}$	$EAWC_{sub}$	AIR	CEC	CoA	FoM	MoM	LoM
0,12	0,07	10	10	5,54	4,00	6,84	10,00
0,12	0,03	10	30	5,40	8,30	9,15	10,00
0,12	0,12	3	5	4,87	0	4,56	10,00
0,12	0,07	3	10	4,87	0	4,56	10,00
0,12	0,03	3	30	4,90	0	4,56	10,00
0,12	0,12	25	30	7,84	8,30	9,15	10,00

Na podstawie przeglądu skutków tego zachowania modelu można następująco sformułować następujące opinie dotyczące charakterystyki poszczególnych metod wyostrzania:

- Wyostrzanie metodą CoA (*Center of Area*, metoda centroidy) ma cechę uśredniania wyniku. Efektem działania algorytmu w przypadku bardzo rozproszonych danych wejściowych jest wygenerowanie zmieniającej się w stosunkowo wąskim przedziale uśrednionej wartości wskaźnika. Nawet gdy większość cech oscyluje wokół wartości zbyt niskich, to jedna cecha mieszcząca się w wyższym zakresie przesuwą ocenę do przedziału średniego. Generalnie skrajne wartości oceny są osiągalne tylko w przypadku pełnej zgodności cech.
- Algorytm wyostrzania FoM (*First of Maxima*) ma tendencję do generowania wyniku skrajnego, minimalnego. Tylko wyjątkowy zbieg okoliczności prowadzi do oceny skrajnie wysokiej lub średniej. Może on być dobrą propozycją jedynie w przypadku pełnej rozbudowy rozmytych zbiorów wynikowych.
- Algorytm MoM (*Mean of Maxima*) wykazuje dużą elastyczność pod względem zakresu generowanych wyników i wydaje się stosunkowo dobrze odzwierciedlać układ wartości wejściowych. Jego niekorzystną cechą jest niewrażliwość na cechy silnie ograniczające.
- Algorytm LoM (*Largest of Maxima*) jest przeciwieństwem FoM. Ma wyraźną tendencję do zawyżania ocen.

6. Podsumowanie

Zaprezentowana próba nie przesądza o stosowalności lub niestosowalności rozmytego algorytmu klasyfikacji gleb. Nade wszystko wymaga on konfrontacji z innymi potencjalnymi modelami, zwłaszcza w kontekście zgodności ich funkcjonowania z obowiązującym w Polsce algorytmem klasyfikacji gleb.

Konfrontacja ta powinna obejmować dwa poziomy:

- Poziom struktury modelu, to znaczy generalnej koncepcji klasyfikacji pod kątem jej nawiązywania do algorytmu addytywnego, multiplikatywnego, rozmytego czy też zgodnego z „zasadą minimum”. Jest prawdopodobne, na co wskazują obserwacje [9, 15], że poszczególne podejścia dają zbliżone rezultaty, a wówczas zapewne racjonalny byłby wybór modelu najprostszego. Konfrontacja modeli może bazować na odpowiednio spreparowanej bazie wyekstrahowanej z obecnej tabeli klas gruntów [14].
- Poziom parametrów modelu, to znaczy wartości liczbowych stałych przetwarzania zapewniających dostateczną zgodność wyników z obowiązującymi zasadami. Obok wyekstrahowanej z tabeli klas gruntów bazy danych, pomocne będą wyniki w rzeczywistych oznaczeniach właściwości gleb poprawnie sklasyfikowanych.

Literatura

- [1] Ackello-Ogutu C., Paris Q., Williams W.A.: *Testing a von Liebig crop response function against polynomial specifications*. American Journal of Agricultural Economics, 67(4), November 1985, 873–880.
- [2] Berck P., Geoghegan J., Stohs S.: *A strong test of the von Liebig hypothesis*. American Journal of Agricultural Economics, 82(4), November 2000, 948–955.
- [3] Berck P., Helfand G.: *Reconciling the von Liebig and differentiable crop production functions*. American Journal of Agricultural Economics, 72(4), November 1990, 985–996.
- [4] Bui L.N.: *Soil survey as a knowledge system*. Geoderma, 120, 2004, 17–26.
- [5] Chwastek J., Żuławski C.: *Rekultywacja terenów zniszczonych przez przemysł wydobywczy*. Liga Ochrony Przyrody, Warszawa 1981.
- [6] Gruszczynski S., Trafas M.: *Evaluation of conditions of post mining waste reclamation*. 4-th International Symposium on the Reclamation Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, University of Agriculture in Kraków, Kraków 1993.
- [7] Gruszczyński S., Trafas M.: *Klasyfikacja poprzemysłowych obiektów bezglebowych dla celów rekultywacji*. Półrocznik AGH Inżynieria Środowiska, t. 6, z. 1, 2001, 67–83.
- [8] Lanzer E.A., Paris Q.: *A new analytical framework for the fertilization problem*. American Journal of Agricultural Economics, 63(1), February 1981, 93–103.
- [9] Llewelyn R.V., Featherstone A.M.: *A comparison of crop production functions using simulated data for irrigated corn in Western Kansas*. Agricultural Systems, 54(4), August 1997, 521–538.

- [10] Łachwa A.: *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*. Problemy Współczesnej Nauki. Teoria i Zastosowania. Informatyka, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Kraków 2001.
- [11] McBratney A., Mendonça Santos M., Minasny B.: *On digital soil mapping*. Geoderma, 117(1–2), November 2003, 3–52.
- [12] McBratney A.B., Minasny B., Cattle S.R., Vervoort R.W.: *From pedotransfer functions to soil inference systems*. Geoderma, 109(1–2), 2002, 41–73.
- [13] McBratney A.B., Odeh I.O.: *Application of fuzzy sets in soli science: fuzzy logic, fuzzy measurments and fuzzy decisions*. Geoderma, (77), February 1997, 85–113.
- [14] *Komentarz do tabeli klas gruntów w zakresie bonitacji gleb gruntów ornych terenów równinnych, wyżynnych i nizinnych wraz z regionalnymi instrukcjami dotyczącymi bonitacji gleb ornych terenów górzystych i komentarzami dotyczącymi bonitacji gleb użytków zielonych i gleb pod lasami dla użytku klasyfikatorów gleb i pracowników kartografii gleb*. Ministerstwo Rolnictwa, Warszawa 1963.
- [15] Paris Q.: *The von Liebig hypothesis*. American Journal of Agricultural Economics, 74(4), November 1992, 1019–1028.
- [16] Paris Q., Knapp K.: *Estimation of von Liebig Response Function*. American Journal of Agricultural Economics, 71(1), February 1989, 178–186.
- [17] . Schoenholtz S.H, Miegroet H. van, Burger J.A.: *A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challanges and opportunities*. Forest Ecology and Management, 138, 2000, 335–356.
- [18] Skawina T., Trafas M.: *Zakres wykorzystania i sposób interpretacji wyników badan geologicznych dla potrzeb rekultywacji*. Ochrona Terenów Górniczych, 16, 1971.
- [19] Strzemski M.: *Racjonalne użytkowanie ziemi w polskiej kartografii gleboznawczej*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne i Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa, Warszawa 1966.
- [20] Strzemski M.: *Przyrodniczo-rolnicza bonitacja gruntów ornych*. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa, Puławy 1972
- [21] Trafas M., Gruszczyński S.: *Określenie relacji wskaźnika bonitacyjnego terenów bezglebowych do jednostek klasyfikacji gleb*. Półrocznik AGH Inżynieria Środowiska, 6(1), 2001, 162–169.
- [22] Ploeg R.R. van der, Böhm W., Kirkham M.: *On the origin of the theory of mineral nutrition of plants and the Law of the Minimum*. Soil Science Society of America Journal, 63:2, 1999, 1055–106
- [23] Zadeh L.A.: *Fuzzy sets*. Information and Control, 8(3), June 1965, 338–353.
- [24] Żuławski C., Eckes T.: *Sozologia dla geodetów*. Wyd. AGH, Kraków 1985.