

ACTA AGROPHYSICA



KRYTERIA OCENY JAKOŚCI FIZYCZNEJ GLEB UPRAWNYCH POLSKI

Jan Paluszek

191

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny – Józef Horabik
Zastępca Redaktora Naczelnego – Grzegorz Józefaciuk
Sekretarz Redakcji – Wanda Woźniak

Rada Redakcyjna

Dorota Witrowa-Rajchert – przewodnicząca

Ryszard Dębicki	Jerzy Lipiec
Bohdan Dobrzański	Piotr P. Lewicki
Danuta Drozd	Stanisław Nawrocki, czł. rzecz. PAN
Franciszek Dubert	Edward Niedźwiecki
Tadeusz Filipek	Viliam Novák, Słowacja
Józef Fornal	Josef Pecen, Czechy
Jan Gliński, czł. rzecz. PAN	Jan Siewewiesiuk
Eugeniusz Kamiński	Witold Stępniewski
Andrzej Kędziora	Bogusław Szot
Tadeusz Kęsik	Zbigniew Ślipek
Krystyna Konstankiewicz	Jerzy Weres
Janusz Laskowski	

Opiniował do druku

Prof. dr hab. Jerzy Lipiec

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Wydawnictwo
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, tel. (81) 744-50-61, www.ipan.lublin.pl

Streszczenia i pełne teksty prac dostępne są na stronie internetowej czasopisma
www.acta-agrophysica.org

Czasopismo jest umieszczone w następujących bazach:

Thomson Scientific Master Journal List

Polish Scientific Journals Contents – Life Sci.

Biblioteka Główna i Centrum Informacji Naukowej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu
Instytut Bibliotekoznawstwa i Informacji Naukowej Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach
Lonicera – serwis botaniczny

©Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2011

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2011 jako projekt badawczy
N N310 3088 34

ISSN 1234-4125, ISBN 978-83-89969-51-4

Acta Agrophysica są do nabycia w dziale Wydawnictw Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie. Prenumeratę instytucjonalną można zamawiać w dziale Wydawnictw Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie oraz w oddziałach firmy Kolporter S.A. na terenie całego kraju. Informacje pod numerem infolinii 0801-205-555 lub na stronie internetowej <http://www.kolporter-spolka-akcyjna.com.pl/prenumerata.asp>

Wydanie I. Nakład 200 egz., ark. 10,2

Skład komputerowy: Wanda Woźniak

Druk: ALF-GRAF, ul. Abramowicka 6, 20-391 Lublin

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	5
2. PRZEGLĄD LITERATURY	7
2.1. Jakość gleb według polskiej klasyfikacji bonitacyjnej	7
2.2. Jakość chemiczna i biologiczna gleb	12
2.3. Jakość fizyczna gleb	14
2.3.1. Skład granulometryczny	16
2.3.2. Struktura agregatowa	17
2.3.3. Wodoodporność agregatów glebowych	22
2.3.4. Gęstość gleby	25
2.3.5. Porowatość ogólna	29
2.3.6. Pojemność wodna	30
2.3.7. Rozkład porów i retencja wody glebowej	33
2.3.8. Przewodnictwo wodne	38
2.3.9. Przepuszczalność powietrzna	41
2.3.10. Wskaźnik jakości S	42
3. MATERIAL I METODY	44
3.1. Badania terenowe	44
3.2. Analizy laboratoryjne i opracowanie wyników	49
4. WYNIKI I DYKUSJA	54
4.1. Skład agregatowy	60
4.2. Wodoodporność agregatów glebowych	69
4.3. Gęstość i porowatość ogólna gleby	77
4.4. Połowa pojemność wodna i punkt trwałego wędnięcia	86
4.5. Rozkład porów glebowych i retencja wody użytecznej dla roślin	92
4.6. Przewodnictwo wodne nasycone	99
4.7. Przepuszczalność powietrzna w stanie połowej pojemności wodnej	103
4.8. Wskaźnik jakości S	106
4.9. Charakterystyka jakości fizycznej gleb według klas bonitacyjnych i kompleksów przydatności rolniczej	110
5. WNIOŚKI	123
6. PIŚMIENICTWO	126
7. STRESZCZENIE	136
8. SUMMARY	137

1. WSTĘP

Pojęcie „jakość gleby” jest pojęciem szerszym od takich pojęć, jak „żyźność gleby” i „wartość użytkowa gleby”, stosowanych przeważnie do gleb użytkowanych rolniczo lub gleb leśnych. Jakość gleby jest definiowana jako zdolność danej gleby do funkcjonowania w obrębie naturalnych lub przekształconych rolniczo ekosystemów, do utrzymywania produktywności roślinnej i zwierzęcej, do zachowania lub polepszenia jakości wody i powietrza oraz do zapewnienia zdrowotności ludzi i ich środowiska (Karlen i in. 1997). Nie można jej mierzyć bezpośrednio, natomiast można oceniać pośrednio – na podstawie cech samej gleby lub cech ekosystemu, którego jest częścią. Ocena jakości pozwala rejestrować zmiany stanu gleby powodowane przez czynniki naturalne i działalność człowieka. W literaturze gleboznawczej jako wskaźniki jakości i zdrowotności gleb wymienia się wiele cech morfologicznych oraz właściwości fizycznych, chemicznych, fizykochemicznych i biologicznych związanych z warunkami panującymi w glebie i jej funkcjami (Seybold i in. 1998, Wander i in. 2002, Erkossa i in. 2007, Zornoza i in. 2007, Bastida i in. 2008). Zależnie od rodzaju użytkowania gleby – ornego, łąkowego lub leśnego, poszczególne wskaźniki odgrywają większą lub mniejszą rolę (Schoenholtz i in. 2000, Brożek 2007, Reynolds 2008).

Stan fizyczny gleby jest rozumiany jako ogół tych cech i właściwości gleby, które wynikają ze zjawisk fizycznych i które można mierzyć metodami fizycznymi. Do najważniejszych właściwości fizycznych gleb należą: skład granulometryczny, struktura, gęstość gleby, porowatość, zwięźłość, pęcznienie i kurczenie oraz właściwości funkcjonalne: wodne, powietrzne i cieplne (Dexter 1997, Pabin 1999, Romano 1999, Usowicz i in. 2001, Warrick 2002).

Właściwości fizyczne gleb mają duże znaczenie dla wzrostu i plonowania roślin uprawnych. W warunkach polowych trwała struktura agregatowa gwarantuje najkorzystniejszy stan fizyczny gleby. Zapobiega ona nadmiernemu zagęszczeniu gleby, zapewnia glebie korzystną zawartość porów kapilarnych (o średnicy równoważnej 0,2-20 μm) dla retencjonowania wody użytecznej dla roślin i odpowiednią zawartość makroporów o średnicy $>20 \mu\text{m}$, które warunkują przewodnictwo wodne oraz pojemność i przepuszczalność powietrzną (Amézketa 1999, Bronick i Lal 2005, Rząsa i Owczarzak 2005, Lipiec i in. 2007). Dzięki temu korzenie roślin mają swobodny dostęp zarówno do wody, jak i do tlenu zawartego w powietrzu glebowym. Trwałość agregatów wpływa na rozwój mikroorganizmów glebowych, zwiększa aktywność biologiczną gleby, stwarza odpowiednie warunki dla kiełkowania, wschodów i rozwoju roślin, wpływa na długość ich

korzeni i gęstość łanu. Ponadto wodoodporna struktura agregatowa chroni glebę przed zaskorupieniem powierzchniowym, zwiększa infiltrację wody opadowej, zmniejsza szybkość spływu powierzchniowego i erozję wodną (Rejman i in. 1994, Le Bissonnais 1996, Zanini i in. 1998, Barthès i Roose 2002, Singh i Khara 2009).

Właściwości wodne gleb, zwłaszcza retencja wody użytecznej dla roślin oraz przewodnictwo wodne, kształtują bilans wodny gleb oraz mają decydujący wpływ na warunki wzrostu, rozwoju i plonowania roślin. Determinują dostępność wody do systemu korzeniowego rośliny oraz przemieszczanie się jej wraz z rozpuszczonymi składnikami pokarmowymi do głębszych poziomów genetycznych. Prowadzące w glebach warunki wilgotnościowe w zasadniczy sposób wpływają na ich właściwości cieplne i decydują o efektach oddziaływań mechanicznych na gleby podczas stosowania zabiegów agrotechnicznych. Znajomość właściwości wodnych i powietrznych jest niezbędna do interpretacji i przewidywania przebiegu wszystkich procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych zachodzących w glebach (Dexter 1997, Walczak i in. 2002, Kutilek 2004).

Właściwości fizyczne gleb uprawnych są bardzo zmienne w sezonie wegetacyjnym, ponieważ zależą nie tylko od składu granulometrycznego, składu mineralicznego gleby i zawartości materii organicznej, ale również od prowadzonych zabiegów agrotechnicznych, gatunku roślin uprawnych i warunków meteorologicznych. Wyniki badań tych właściwości są często trudne do porównania, ze względu na wybór różnych terminów badań, stosowanie różnych metod badawczych i różnych jednostek pomiarowych (Słowińska-Jurkiewicz 1989, Walczak i in. 2002, Paluszek 2001, Pranagal i in. 2005). Charakterystyka stanu fizycznego gleb odbywa się przy pomocy różnorodnych parametrów, z których wiele nie ma ustalonych i sprecyzowanych liczb granicznych, pozwalających na ocenę jakości fizycznej gleb.

Ustalenie jednolitych wartości kryteriów jakości fizycznej gleb Polski jest bardzo potrzebne, zarówno dla badań naukowych, jak i dla praktyki rolniczej. W wielu pracach autorzy charakteryzujący właściwości gleb nie mogą ocenić ich stanu fizycznego. Ma to szczególne znaczenie w przypadku oceny degradacji fizycznej gleb, np. pod wpływem zanieczyszczeń przemysłowych, ugniatania kołami ciągników i maszyn rolniczych, w przypadku pogorszenia właściwości pod wpływem erozji wodnej i wietrznej, pod wpływem monokultur zbożowych, uproszczeń uprawowych, itp. Również niekorzystny jest brak ścisłych mierników dla oceny skuteczności zabiegów ulepszających właściwości gleby, np.: rekultywacji gleb zanieczyszczonych przez przemysł, stosowania zabiegów przeciwozyjnych na glebach erodowanych, wprowadzania zabiegów agromelioracyjnych,

wnoszenia do gleb niekonwencjonalnych nawozów organicznych i syntetycznych polimerów (Licznar i in. 2000, Paluszek 2003, 2009, 2010c, Reynolds 2009).

Celem niniejszej monografii jest ustalenie kryteriów oceny jakości fizycznych właściwości gleb należących do wybranych jednostek systematycznych gleb gruntów ornych Polski na podstawie przeglądu literatury przedmiotu i wieloletnich badań własnych. Szczegółowe cele badań są następujące:

- ocena składu agregatowego, wodoodporności agregatów glebowych, gęstości gleby, porowatości ogólnej, pojemności wodnej, rozkładu porów glebowych i retencji wodnej wybranych gleb płowych, czarnych ziem i czarnoziemów, zaliczanych do I-IVb klasy bonitacyjnej oraz do 1-5 i 8-9 kompleksu rolniczej przydatności gleb gruntów ornych,
- ocena przydatności badanych właściwości jako kryteriów oceny jakości fizycznej wybranych jednostek glebowych,
- ustalenie granicznych wartości liczbowych dla ustalonych kryteriów oceny stanu fizycznego gleb.

Wyznaczenie liczb granicznych dla wymienionych właściwości gleb umożliwia obiektywną ocenę ich jakości fizycznej. Liczby graniczne będą podstawą do ustalenia dla wybranych typów gleb optymalnej struktury i optymalnych właściwości wodno-powietrznych, zapewniających wysokie plony roślin uprawnych.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Jakość gleb według polskiej klasyfikacji bonitacyjnej

W gleboznawstwie polskim potencjalną użytkowo-produkcyjną wartość gleb ocenia się na podstawie klasyfikacji bonitacyjnej. Bonitacja gleby jest to podział gleb na umowne klasy według porównawczej ilościowej oceny ich możliwości produkcyjnych (Nawrocki i Terelak 2004, Skłodowski i Bielska 2009). Powszechna bonitacyjna klasyfikacja gleb Polski została przeprowadzona w latach 1956-1967 na podstawie Uchwały Prezydium Rady Ministrów z dnia 4 VI 1956 r. Klasyfikację tę wykonano zgodnie z Tabelą Klas Gruntów, stanowiącą załącznik do rozporządzenia Rady Ministrów z 8 stycznia 1957 r., w której opracowaniu brał udział zespół gleboznawców. Tabela ta uwzględnia systematykę gleb Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego z roku 1956 i obejmuje następujące kategorie użytków: grunty orne, użytki zielone, grunty pod lasami, grunty pod wodami i nieużytki (Ministerstwo Rolnictwa 1963). Zaliczenie poszczególnych gleb do odpowiedniej klasy bonitacyjnej następowało według ich potencjalnej produkcyj-

ności przy odpowiednim użytkowaniu. Słowem „grunt” określono zarówno glebę, jak i fragment ziemi użytkowanej rolniczo, wykazujący pewną jednolitość.

Bonitacja gleb gruntów ornych opiera się wyłącznie na terenowych badaniach odkrywek glebowych, ze szczególnym uwzględnieniem cech morfologicznych i fizycznych gleb, jak: położenie, miąższość poziomu próchnicznego, głębokość profilu, struktura, nowotwory glebowe oraz na terenowej ocenie niektórych właściwości (składu granulometrycznego, przepuszczalności wodnej, stosunków wodnych gleby, odczynu i zawartości CaCO_3). Klasę bonitacyjną ustala się na podstawie syntetycznej oceny wszystkich charakterystycznych cech (Ministerstwo Rolnictwa 1963). Grunty orne podzielono na 9 klas: I-VI, z tym, że klasy III i IV dzielą się na podklasy IIIa i IIIb oraz IVa i IVb, a w klasie VI wydzieliła się jeszcze klasę VI RZ (pod zalesienie).

Klasa I obejmuje gleby orne najlepsze. Gleby te występują na równinach lub na bardzo łagodnych stokach, są zasobne we wszystkie składniki pokarmowe roślin, posiadają naturalną strukturę agregatową nawet na znacznej głębokości, są łatwe do uprawy, czynne biologicznie, przepuszczalne i przewiewne, dostatecznie wilgotne, nie zaskorupiają się, charakteryzują się dobrze wykształconym poziomem próchnicznym, nie wykazują większego zakwaszenia, mają dobre stosunki wodno-powietrzne i nie wymagają melioracji (Ministerstwo Rolnictwa 1963). Gleby klasy I wchodziły w skład kompleksu pszennego bardzo dobrego. Na glebach tej klasy można osiągać wysokie plony najbardziej wymagających roślin uprawnych, takich jak buraki cukrowe, pszenica, lucerna, rzepak, koniczyna czerwona i warzywa (Strzemski i in. 1973). Do klasy I zaliczane są najlepsze czarnoziemy, najlepsze mady pyłowe i próchniczne, najlepsze czarne ziemie utworzone z glin marglistych i utworów pyłowych, najlepsze gleby deluwialne, najlepsze gleby brunatne utworzone z lessów, utworów lessopodobnych i glin.

Klasę II stanowią gleby orne bardzo dobre. Gleby te są zbliżone właściwościami do gleb klasy I, ale występują w nieco gorszych warunkach fizjograficznych, lub mają mniej korzystne właściwości fizyczne, na przykład gorsze stosunki wodne, są mniej przepuszczalne, mniej przewiewne i nieraz trudniejsze do uprawy (Ministerstwo Rolnictwa 1963). Gleby te wchodziły w skład kompleksu pszennego bardzo dobrego (Strzemski i in. 1973). Udają się na nich te same rośliny uprawne, co na glebach klasy I, ale osiągnięte na nich plony są niższe. Do klasy II zalicza się bardzo dobre czarnoziemy, czarne ziemie utworzone z glin marglistych, najlepsze gleby deluwialne, rędziny czarnoziemne i właściwe utworzone z wapieni kredowych, mady brunatne i próchniczne, gleby brunatne utworzone z lessów, utworów pyłowych wodnego pochodzenia, glin i ilów pylastych, a także

najlepsze gleby płowe wytworzone z lessów, glin i utworów pyłowych wodnego pochodzenia.

Klasa IIIa obejmuje gleby orne dobre. Gleby te mają wyraźnie gorsze właściwości fizyczne i chemiczne lub występują w mniej korzystnych warunkach fizjograficznych od gleb klasy I i II. Poziom wód gruntowych może w nich podlegać znacznym wahaniom. Dlatego gleby te cechuje mniejszy wybór roślin uprawnych niż gleby I i II klasy, a wysokość plonów waha się w szerokich granicach, w zależności od stopnia kultury, umiejętności uprawy i nawożenia, a także od warunków atmosferycznych. Większość gleb tej klasy wykazuje już pewne oznaki procesu degradacji, lecz ujemne cechy występują w stopniu nieznacznym (Ministerstwo Rolnictwa 1963). Na lżejszych odmianach tych gleb osiąga się wysokie plony żyta, jęczmienia, owsa i ziemniaków, a w warunkach wysokiej kultury oraz na glebach cięższych dobre plony buraków cukrowych, pszenicy, warzyw i koniczyny czerwonej. Gleby tej klasy przeważnie wchodzi w skład kompleksu przydatności rolniczej pszennego dobrego, a w niektórych przypadkach stanowią najlepsze gleby kompleksu żytniego bardzo dobrego (Strzemski i in. 1973). Do klasy IIIa zaliczane są gleby brunatne i płowe wytworzone z piasków gliniastych, lessów, innych utworów pyłowych, glin lekkich i ilów pylastych, średnio dobre czarnoziemy, czarne ziemie wytworzone z glin, ilów, utworów pyłowych i piasków gliniastych a także najlepsze rędziny kredowe brunatne i właściwe, średnio dobre rędziny kredowe próchniczne, najlepsze rędziny gipsowe, średnio dobre mady pyłowe, najlepsze mady ciężkie i piaszczyste oraz gleby deluwialne.

Klasa IIIb określa gleby orne średnio dobre, które są zbliżone właściwościami do gleb klasy IIIa, ale w jeszcze większym stopniu zaznaczają się w nich gorsze właściwości fizyczne, chemiczne lub gorsze warunki fizjograficzne. Poziom wód gruntowych ulega w glebach klasy IIIb większym wahaniom, a plony w jeszcze większym stopniu uzależnione są od warunków atmosferycznych. Niekiedy bywają to gleby okresowo za suche, niekiedy mogą być okresowo za mokre. Gleby tej klasy mogą być narażone na erozję, niektóre są trudniejsze do uprawy (Ministerstwo Rolnictwa 1963). Oznaki procesu degradacji są w nich zazwyczaj wyraźnie zaznaczone. Na glebach klasy IIIb przy wysokiej kulturze i pomyślnym przebiegu warunków atmosferycznych można osiągnąć dobre plony pszenicy, buraków cukrowych i koniczyny czerwonej. Gleby tej klasy wchodzi przeważnie w skład kompleksu żytniego bardzo dobrego, natomiast cięższe spośród nich – w skład kompleksu pszennego dobrego lub zbożowo-pastewnego mocnego (Strzemski i in. 1973). Do klasy IIIb zaliczane są gleby brunatne, płowe i opadowo-glejowe wytworzone z piasków gliniastych na cięższych podłożach, glin lek-

kich, ilów i utworów pyłowych wodnego pochodzenia, gorsze odmiany czarnoziemów, średnio dobre czarne ziemie wytworzone z glin, ilów, utworów pyłowych wodnego pochodzenia i piasków gliniastych, a także średnio dobre mady i rędziny.

Klasa IVa obejmuje gleby orne średniej jakości. Są to gleby o zdecydowanie mniejszym wyborze roślin uprawnych niż gleby wyższych klas. Plony na ogół są na nich średnie, nawet przy dobrej agrotechnice w znacznym stopniu uzależnione od ilości i rozkładu opadów atmosferycznych w okresie wegetacyjnym. Gleby te nieraz występują na stokach o większych spadkach i często narażone są na erozję. Gleby ciężkie tej klasy są zasobne w składniki pokarmowe, charakteryzuje je duża żyzność potencjalna, lecz są słabo przewiewne, zimne, mało czynne biologicznie, przeważnie trudne w uprawie i w okresach upałów zyschają się (Ministerstwo Rolnictwa 1963). W sprzyjających warunkach atmosferycznych i przy dobrej kulturze gleby klasy IVa mogą dać nawet wysokie plony pszenicy, buraków cukrowych i koniczyny czerwonej. Znaczna część gleb klasy IVa ma poziom wód gruntowych okresowo za wysoki i wymaga drenowania. Gleby te wchodziły w skład kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego lub pszennego wadliwego (Strzemski i in. 1973). Na glebach lekkich klasy IVa w wysokiej kulturze i przy dobrych warunkach wilgotnościowych udaje się jęczmień, pszenica i owies, a buraki pastewne dają plony zadowalające. Wchodzi one w skład kompleksu żytniego bardzo dobrego bądź dobrego. Do klasy IVa należą gleby brunatne i płowe wytworzone z piasków i żwirów gliniastych, całkowite i niecałkowite na zwięźlejszym podłożu, gleby płowe, brunatne i opadowo-glejowe wytworzone z glin, ilów i utworów pyłowych o gorszych stosunkach wodnych, gleby płowe podlegające dość silnej erozji, niektóre czarnoziemy i czarne ziemie, położone w gorszych warunkach fizjograficznych, średniej jakości mady pyłowe i piaszczyste, mady ciężkie wytworzone z ilu oraz średniej jakości rędziny właściwe i brunatne.

Klasę IVb stanowią gleby orne średniej jakości, gorsze. Gleby te zasadniczo zbliżone są swymi właściwościami do gleb klasy IVa, ale są bardziej od nich wadliwe – zbyt suche, albo zbyt wilgotne (Ministerstwo Rolnictwa 1963). Plony wahają się na nich w szerokich granicach i uzależnione są od warunków atmosferycznych. Do klasy IVa zaliczne są gleby ciężkie, najczęściej podmokłe i trudne do uprawy, gleby położone na silnie erodowanych stokach, na szczytach wzgórz i w zagłębieniach terenu. Niektóre z tych gleb są płytko podścielone przepuszczalnym podłożem i wskutek tego są zbyt suche. W innych glebach poziom wód gruntowych jest przez dłuższy czas zbyt wysoki i wymagają drenowania. Gleby cięższe w tej klasie wchodziły w skład kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego, gdyż najlepiej udają się na nich pszenica jara, mieszańki, owies, koniczyna, kapu-

sta i inne pastewne, natomiast oziminy najczęściej zawodzą. Gleby cięższe i płytkie na przepuszczalnych podłożach wchodzi w skład kompleksu żytniego dobrego (Strzemski i in. 1973). Gleby lekkie klasy IVb są często wrażliwe na suszę i wchodzi w skład kompleksu żytniego słabego. Do klasy IVb należą takie same typy, rodzaje i gatunki gleb jak do klasy IVa, jednak charakteryzujące się gorszymi właściwościami.

Klasa V obejmuje gleby orne słabe. Gleby te są mało żyzne i nieurodzajne, lekkie, za suche, przydatne do uprawy żyta i łubinu, a w latach obfitujących w opady – ziemniaków i seradeli. Gleby lekkie w tej klasie wchodzi najczęściej w skład kompleksu przydatności rolniczej żytniego słabego. Do klasy V zalicza się również gleby płytkie i kamieniste, najczęściej ubogie w materię organiczną oraz gleby zbyt mokre (Ministerstwo Rolnictwa 1963). Gleby ciężkie i podmokłe w tej klasie są najbardziej przydatne pod brukiew i kapustę, mieszanki traw oraz niektóre pastewne i wchodzi w skład kompleksu zbożowo-pastewnego słabego (Strzemski i in. 1973). Do klasy V zaliczane są głównie gleby rdzawe i bielcowe wytworzone ze żwirów gliniastych i piasków słabogliniastych, czarne ziemie wytworzone z piasków słabogliniastych, pararzędziny wytworzone z marglistych żwirów gliniastych, mady bardzo lekkie oraz rędziny bardzo płytkie właściwe lub brunatne.

Klasę VI stanowią gleby orne najslabsze. Gleby te są wadliwe i zawodne, dają plony niskie i niepewne (Ministerstwo Rolnictwa 1963). Należą do nich gleby za suche i luźne, na których udaje się łubin, natomiast żyto tylko w latach sprzyjających daje średnie plony, gleby bardzo płytkie lub silnie kamieniste, trudne do uprawy, gleby za mokre, o stałe za wysokim poziomie wód gruntowych. Gleby suche tej klasy należą do kompleksu żytniego słabego (Strzemski i in. 1973). Podmokłe gleby klasy VI nie nadają się do uprawy zbóż i okopowych i powinny być wykorzystywane raczej jako pastwiska. Do klasy VI zaliczane są głównie gleby rdzawe, bielcowe, rankery i pararzędziny wytworzone ze żwirów piaszczystych i piasków luźnych oraz bardzo płytkie rędziny inicjalne wytworzone z twardych wapieni.

Klasę VI RZ stanowią gleby przeznaczone pod zalesienie. Są to gleby zbyt suche i nieprzydatne do prowadzenia upraw polowych. (Ministerstwo Rolnictwa 1963). Do tej klasy zaliczane są gleby rdzawe, bielice i rankery, wytworzone ze żwirów piaszczystych i piasków luźnych.

Dotychczasowe wydzielanie klas bonitacyjnych gleb oraz kompleksów ich przydatności rolniczej opiera się na ogólnej, bardzo nieprecyzyjnej ocenie ich właściwości fizycznych (Ministerstwo Rolnictwa 1963, Strzemski i in. 1973). Zarówno klasyfikacja bonitacyjna, jak i klasyfikacja przydatności rolniczej gleb

wymagają sprecyzowania i powinny być udoskonalone (Paluszek i Słowińska-Jurkiewicz 2004). Dynamiczny rozwój badań gleboznawczych w ostatnim półwieczu pozwala już na sprecyzowanie wartości liczbowych kryteriów wyróżniania klas bonitacyjnych oraz kompleksów rolniczej przydatności gleb należących do poszczególnych typów genetycznych.

2.2. Jakość chemiczna i biologiczna gleb

Najważniejszym wskaźnikiem jakości chemicznej i biologicznej gleb jest zawartość węgla organicznego, względnie zawartość materii organicznej. Materia organiczna bierze udział w tworzeniu gleb i kształtuje ich właściwości chemiczne, sorpcyjne, buforowe i biologiczne. Jest dla roślin źródłem składników pokarmowych, dostarcza mikroorganizmom glebowym energii i węgla, bierze udział w wymianie jonowej, oddziałuje na wzrost i rozwój roślin, wiąże pierwiastki toksyczne dla roślin i pestycydy oraz hamuje rozwój niektórych patogenów roślin (Andrzejewski 1993, Dziadowiec 1993). Związki zawarte w materii organicznej biorą udział w łączeniu cząstek gleby w wodoodporne agregaty. Zawartość węgla organicznego wywiera również pośredni wpływ na gęstość gleby, porowatość, pojemność i retencję wodną oraz właściwości powietrzne (Olness i Archer 2005).

Gleby mineralne w Polsce są uznawane w większości za słabo próchniczne. Gleby rdzawe i bielcowe wytworzone z piasków luźnych i słabogliniastych zawierają np. średnio 1,59% materii organicznej, gleby płowe wytworzone z lessów 2,05%, a czarnoziemy 2,57% (Pondel i in. 1985, Brożek i Zwydak 2003). Uchodzące w Polsce za gleby najzasobniejsze w próchnicę czarne ziemie wytworzone z glin średnich, piasków gliniastych i pyłów zawierają średnio 2,78-2,93% materii organicznej, czarne ziemie wytworzone z glin ciężkich 3,38%, mady próchniczne 3,58%, a rędziny czarnoziemne 3,73%. Natomiast jako optymalną zawartość C org. dla gleb uprawnych przyjmuje się 5%, czyli 8,6% materii organicznej (Craul 1999). Jako dolną krytyczną granicę Greenland (1981) uznał zawartość C org. 2,3% (4,0% materii organicznej), poniżej której może występować degradacja struktury gleby, spowodowana przez zabiegi agrotechniczne. Za górną granicę krytyczną Craul (1999) przyjął około 6% C org., ponieważ powyżej tej wartości gleba może być podatna na nadmierne zagęszczanie.

Do ważniejszych wskaźników jakości chemicznej gleby zaliczane są również: zawartość N ogólnego i N potencjalnie mineralizowalnego, zawartość łatwo przyswajalnych dla roślin makroskładników P, K, Mg, Ca i S, odczyn (pH KCl), pojemność wymiany kationów, stopień wysycenia kationami o charakterze zasado-

wym (Ca^{2+} , Mg^{2+} i K^{+}), zawartość zdolnych do ekstrakcji Cu i Zn, zasolenie i przewodnictwo elektryczne (Seybold i in. 1998, Arshad i Coen 1992, Vargas Gil i in. 2009, Aziz i in. 2011).

Ocena zawartości składników pokarmowych – łatwo przyswajalnych dla roślin fosforu, potasu i magnezu, jako wskaźników żyzności gleb mineralnych Polski została opracowana przez IUNG (1990). Jako kryteria oceny zawartości składników pokarmowych przyjęto wzrost i plonowanie głównych gatunków roślin uprawnych. Liczby graniczne dla zawartości fosforu oznaczonego metodą Egnera-Riehma w glebach mineralnych wynoszą ($\text{mg P} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$): $\leq 2,2$ – zawartość bardzo niska, 2,3-4,4 – zawartość niska, 4,5-6,6 – zawartość średnia, 6,7-8,8 – zawartość wysoka i $\geq 8,9$ zawartość bardzo wysoka. Dla zawartości przyswajalnych form potasu i magnezu liczby graniczne uwzględniają zróżnicowanie w składzie granulometrycznym gleb mineralnych i są oddzielnie ustalone dla gleb bardzo lekkich, lekkich, średnich i ciężkich (tab. 1 i 2).

Tabela 1. Liczby graniczne dla zawartości przyswajalnego potasu oznaczonego metodą Egnera-Riehma w $\text{mg K} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (IUNG 1990)

Table 1. Limit numbers for content of available potassium determined with Egner-Riehm method in $\text{mg K } 100 \text{ g}^{-1}$ (IUNG 1990)

Zawartość – Content	Gleby – Soils			
	bardzo lekkie very light	lekkie light	średnie medium	ciężkie heavy
Bardzo niska – Very low	$\leq 2,1$	$\leq 4,1$	$\leq 6,2$	$\leq 8,3$
Niska – Low	2,2-6,2	4,2-8,3	6,3-10,4	8,4-12,5
Średnia – Medium	6,3-10,4	8,4-12,4	10,5-16,6	12,6-20,7
Wysoka – High	10,5-14,5	12,5-16,6	16,7-20,7	20,8-24,9
Bardzo wysoka – Very high	$\geq 14,6$	$\geq 16,7$	$\geq 20,8$	$\geq 25,0$

Jako optymalny odczyn dla wzrostu większości roślin uprawnych powszechnie przyjmuje się odczyn obojętny (pH 6,6-7,2) lub słabo kwaśny (pH 5,6-6,5). Takie wartości pH w glebie zapewniają roślinom korzystne warunki pobierania składników pokarmowych. Natomiast w glebach silnie kwaśnych zmniejsza się aktywność biologiczna bakterii i promieniowców, pogarsza się skład kompleksu sorpcyjnego, a do roztworu glebowego uwalniają się duże ilości toksycznego glinu i manganu, co skutkuje obniżeniem plonów roślin i pogorszeniem ich jakości. Według danych z literatury optymalna proporcja wysycenia kompleksu sorp-

cyjnego gleb kationami o charakterze zasadowym Ca^{2+} , Mg^{2+} i K^{+} wynosi odpowiednio: 65%, 10% i 5% (Kopittke i Menzies 2007).

Tabela 2. Liczby graniczne dla zawartości przyswajalnego magnezu oznaczonego metodą Schachtschabela w $\text{mg Mg} \cdot 100\text{g}^{-1}$ (IUNG 1990)

Table 2. Limit numbers for content of available magnesium determined with Schachtschabel method in $\text{mg K } 100 \text{ g}^{-1}$ (IUNG 1990)

Zawartość – Content	Gleby – Soils			
	bardzo lekkie very light	lekkie light	średnie medium	ciężkie heavy
Bardzo niska – Very low	$\leq 1,0$	$\leq 2,0$	$\leq 3,0$	$\leq 4,0$
Niska – Low	1,1-2,0	2,1-3,0	3,1-5,0	4,1-6,0
Średnia – Medium	2,1-4,0	3,1-5,0	5,1-7,0	6,1-10,0
Wysoka – High	4,1-6,0	5,1-7,0	7,1-9,0	10,1-14,0
Bardzo wysoka – Very high	$\geq 6,1$	$\geq 7,1$	$\geq 9,1$	$\geq 14,1$

Do biologicznych wskaźników jakości gleby zaliczane są m. in.: plony roślin, liczebność fauny glebowej (dżdżownic, wazonkowców, owadów i in.), liczebność mikroorganizmów, zawartość C i N w biomase mikroorganizmów, oddychanie mikrobiologiczne gleby i aktywność enzymatyczna (Visser i Parkinson 1992, Knoepp i in. 2000, Hofman i in. 2003, Quintern 2006, Vargas Gil i in. 2009).

2.3. Jakość fizyczna gleb

Jakość fizyczna gleb jest głównym pojęciem dla ilościowej oceny degradacji gruntów i do oceny stosowania zabiegów agrotechnicznych zgodnie z zasadami dobrej praktyki rolniczej. Pojęcie to jest zwykle stosowane do następujących celów (Arshad i Martin 2002, Reynolds i in. 2007, 2008, 2009):

- identyfikacji jednej lub wielu właściwości gleby jako wskaźników fizycznej jakości gleby,
- oceny optymalnych zakresów wartości oraz dolnej i górnej granicy krytycznej dla tych wskaźników,
- ilościowej oceny aktualnego stanu fizycznego gleb przez porównanie wartości ich wskaźników do optymalnego zakresu i krytycznych granic,
- oceny kierunku zmian właściwości fizycznych (czy jakość fizyczna gleb polepszyła się, uległa pogorszeniu, czy pozostała względnie trwała i niezmienną względem poprzednich warunków lub użytków?).

Do wskaźników oceny jakości i zdrowotności gleby zaliczanych jest wiele jej cech fizycznych, silnie związanych z jej funkcjami: głębokość gleby i strefy korzeniowej, miąższość poziomu próchnicznego, barwa gleby, skład granulometryczny, struktura gleby, wodoodporność agregatów glebowych, zagęszczenie, zaskorupienie, pojemność wodna, retencja wody użytecznej, infiltracja, aeracja, spływ powierzchniowy wody, erozja żłobinowa, łatwość uprawy, warunki wschodów roślin i in. (Cockroft i Olsson 1997, Karlen i in. 1997, Reynolds i in. 2002, Shukla i in. 2006, McKenzie i in. 2011). Niektóre z tych właściwości są stałe i nie mogą być zmienione przez użytkowanie, np. skład granulometryczny, inne można polepszyć poprzez odpowiednie zabiegi uprawowe. Dla precyzyjnej oceny jakości gleby bardzo potrzebnym, ale niełatwym zadaniem jest wprowadzenie wskaźników liczbowych dla cech uznanych za decydujące dla jakości gleby.

Problem ustalenia liczb granicznych dla kryteriów oceny struktury i właściwości wodno-powietrznych gleb jest zagadnieniem, którym badacze interesują się od dawna (Arshad i in. 1996, Le Bissonnais 1996, Walczak i in. 2002, Dexter 2004, Reynolds 2009). Jest to zagadnienie złożone i trudne do kompleksowego zrealizowania, ze względu na dużą zmienność właściwości fizycznych gleb uprawnych w sezonie wegetacyjnym, zwłaszcza w poziomie Ap, spowodowanych zabiegami agrotechnicznymi. Obok oceny poszczególnych właściwości jako wskaźników jakości fizycznej gleby niektórzy autorzy próbują opracowywać zintegrowane wskaźniki jakości gleb. Należy do nich między innymi zaproponowany przez Canarache (1991) tzw. „wskaźnik agrofizyczny” (AI), który jest średnią ważoną dziesięciu cech fizycznych gleby.

Najbardziej miarodajnym kryterium bardzo dobrej jakości fizycznej gleby jest uzyskanie wysokiego plonu, zbliżonego do potencjalnych możliwości najplenniejszych odmian roślin uprawianych w określonych warunkach agrometeorologicznych. Wymagania roślin uprawnych w stosunku do właściwości fizycznych gleby są następujące (Ślusarczyk 1985, Walczak i in. 1997, Pabin 1999, Bengough i in. 2006):

- wielkość, forma i układ geometryczny cząstek i agregatów glebowych powinny zapewniać swobodny ruch korzeni, przewodnictwo roztworów, gazów i temperatury oraz odporność na szkodliwe deformacje powodowane przez koła ciągników i maszyn rolniczych,
- zdolności retencyjne wody muszą łagodzić jej niedobór w okresach suszy i zmniejszać amplitudę wilgotności gleby,

- układ właściwości wodno-powietrznych powinien zapewniać pełne wykorzystanie składników pokarmowych.

Optymalne wartości parametrów fizycznej jakości gleby, maksymalizujące plonowanie roślin uprawnych przy zachowaniu zdrowotności środowiska są ciągle jeszcze niedostatecznie poznane. Obecnie plony roślin uprawnych w największym stopniu zależą od plenności wysiewanych odmian roślin oraz od dawek nawożenia mineralnego, zwłaszcza azotowego. Dlatego najwyższe plony nie zawsze odpowiadają najbardziej korzystnej strukturze i najlepszym właściwościom wodno-powietrznym. Jednak ustalone kryteria optymalnego stanu fizycznego wybranych typów gleb, powinny zapewniać uzyskanie wysokich plonów dowolnych odmian roślin uprawnych, przy zachowaniu zasad poprawnej agrotechniki.

2.3.1. Skład granulometryczny

Skład granulometryczny jest podstawową cechą fizyczną gleby. Obecnie obowiązujący w Polsce podział Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego na frakcje i grupy granulometryczne (PTG 2009) został dostosowany do podziału międzynarodowego United States Department of Agriculture. Podział gleb i utworów mineralnych obejmuje cztery grupy granulometryczne i 16 podgrup granulometrycznych. W grupie granulometrycznej piasków wyróżnia się: piasek luźny, słabogliniasty i gliniasty. Grupa granulometryczna glin obejmuje: glinę piaszczystą, lekką, piaszczysto-ilastą, zwykłą, ilastą i pylasto-ilastą. Grupa pyłów dzieli się na pył gliniasty, zwykły i ilasty, a grupa ilów na il piaszczysty, pylasty, zwykły i ciężki.

Na podstawie składu granulometrycznego określone są kategorie ciężkości agrotechnicznej gleb. Wyróżniono pięć podstawowych kategorii ciężkości agrotechnicznej (PTG 2009):

- gleby bardzo lekkie: piaski luźne i piaski słabogliniaste,
- gleby lekkie: piaski gliniaste,
- gleby średnie: gliny piaszczyste, gliny lekkie, pyły gliniaste i pyły zwykłe,
- gleby ciężkie; gliny piaszczysto-ilaste, gliny zwykłe, gliny ilaste, gliny pylasto-ilaste i pyły ilaste,
- gleby bardzo ciężkie: ily piaszczyste, ily pylaste, ily zwykłe i ily ciężkie.

Gleby bardzo lekkie i lekkie mogą być ogólnie traktowane jako kategoria gleb lekkich, natomiast gleby ciężkie i bardzo ciężkie jako kategoria gleb ciężkich. Dla celów bardziej szczegółowej charakterystyki gleb o dużej zawartości frakcji pyłowej (0,05-0,002 mm) dopuszcza się wyróżnianie dodatkowych kategorii: gleby średnie pyłowe (pyły gliniaste, pyły zwykłe) i gleby ciężkie pyłowe (pyły ilaste).

Jako najbardziej korzystne do uprawy i najbardziej urodzajne uznaje się przeważnie gleby o średnim składzie granulometrycznym (Ministerstwo Rolnictwa 1963, Strzemiński i in. 1973, Witek 1979). Ślusarczyk (1979) na podstawie badań gleb, na których uzyskano najwyższe plony roślin, ocenił najbardziej korzystną zawartość ilu ($<0,002$ mm) i frakcji $<0,02$ mm. Dla pszenicy ozimej optymalna zawartość ilu wynosi w poziomie Ap 11-18%, a w poziomach głębszych 13-23%, dla jęczmienia jarego odpowiednio 9-13% i 11-19%, dla buraka cukrowego 10% i 10-15%, dla żyta 7-9% i 8-15% oraz dla ziemniaków 6-9% i 7-14%.

Skład granulometryczny wywiera wpływ na wszystkie właściwości fizyczne gleby. Na podstawie znanej zawartości poszczególnych frakcji granulometrycznych możliwe jest przybliżone obliczenie niektórych parametrów fizycznych, np. gęstości fazy stałej, gęstości gleby, porowatości ogólnej i pojemności wodnej w punkcie trwałego więdnięcia (Brogowski 1990, Wojtasik 1995).

2.3.2. Struktura agregatowa

Struktura gleby, definiowana jako rodzaj i sposób wzajemnego powiązania oraz przestrzenny układ elementarnych cząstek fazy stałej i porów glebowych, jest jedną z najważniejszych cech decydujących o żyzności i urodzajności gleb (Dexter 1988, PTG 1989, Kay 1998, Rząsa i Owczarzak 2004). Struktura badana nie uzbrojonym okiem nazywana jest makrostrukturą, natomiast struktura badana pod mikroskopem – mikrostrukturą. Wśród makrostruktur gleb mineralnych wyróżniamy struktury proste: rozdzielnicząstkową (ziarnistą) i spoistą (masywną) oraz struktury agregatowe. W strukturze rozdzielnicząstkowej ziarna glebowe nie są sklejone żadnym lepiszczem i występują oddzielnie. Struktura spoista stanowi jednolitą, sklejoną masę glebową bez pęknięć i trwałych szczelin. W strukturach agregatowych poszczególne elementarne cząstki fazy stałej gleby są ze sobą połączone w elementy strukturalne, zwane agregatami a pomiędzy nimi występują naturalne płaszczyzny odspojenia.

Tworzenie i stabilizacja agregatów glebowych jest rezultatem współdziałania wielu czynników fizycznych, chemicznych i biologicznych, przy czym wstępnym warunkiem agregacji jest obecność i flokulacja minerałów ilastych (Dexter 1988, De Boodt 1995, Amézketa 1999). Fizycznymi czynnikami tworzenia agregatów są następujące kolejno procesy nawilżania i wysychania oraz zamarzania i rozmrażania. Są one wspomagane przez czynniki biologiczne: działanie korzeni roślin, mikroorganizmów oraz mezofauny glebowej, głównie dżdżownic (Degens 1997, Schrader i Zhang 1997, Lehrsch 1998, Owczarzak 2002, Cosentino i in. 2006).

Nieorganiczne stabilizujące środki obejmują głównie minerały ilaste, wielowartościowe kationy metali (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}), tlenki i wodorotlenki żelaza i glinu, węglany wapnia i magnezu. Wśród organicznych związków stabilizujących glebę, wyróżniane są przejściowe lepiszcza, szybko rozkładane przez mikroorganizmy i obejmują mikrobiologiczne i roślinne polisacharydy. Tymczasowymi lepiszczami są korzenie roślin, strzępki grzybni i niektóre grzyby (Oades i Waters 1991, Kay 1998, Amézketa 1999, Malamoud 2009). Trwałe wiążące środki składają się z odpornych aromatycznych substancji humusowych, związanych z wielowartościowymi kationami metali i silnie sorbujących polimerów. Są one silnie związane wewnątrz agregatów, a pochodzą z odpornych fragmentów korzeni, strzępków grzybni i komórek bakterii.

Opracowane modele agregacji cząstek wyróżniają wieloetapową, hierarchiczną kolejność tworzenia się różnej wielkości agregatów glebowych (Oades i Waters 1991, Golchin i in. 1994, De Boodt 1995, Jastrow i Miller 1998, Abiven i in. 2007). Hierarchiczna natura struktury glebowej wskazuje, że różne mechanizmy agregacji działają w różnych klasach wielkości agregatów. Najmniejsze hierarchicznie elementy strukturalne stanowią rozproszone cząstki ilu koloidalnego o wymiarach poniżej $0,2\ \mu\text{m}$. Cząstki ilu, połączone z substancją organiczną przez wielowartościowe kationy elektrostatycznymi wiązaniami, tworzą mikroagregaty o wymiarach poniżej $2\ \mu\text{m}$. Połączenia wielu mikroagregatów o wymiarach $<2\ \mu\text{m}$ wiązane przez trwałe organiczne wiązania (resztki roślin i grzybów, inkrustowane nieorganicznymi związkami) tworzą mikroagregaty o średnicy $2\text{--}20\ \mu\text{m}$. Mikroagregaty o średnicy $2\text{--}20\ \mu\text{m}$ z kolei łączą się w mikroagregaty $20\text{--}250\ \mu\text{m}$, przez różne spoiwa zawierające trwałe organiczne substancje, krystaliczne tlenki i minerały ilaste (Oades i Waters 1991, Golchin i in. 1994). Następną hierarchiczną kolejnością jest powiązanie mikroagregatów o wymiarach $20\text{--}250\ \mu\text{m}$ i powstanie makroagregatów o wymiarach $>250\ \mu\text{m}$ ($0,25\text{--}10\ \text{mm}$). Makroagregaty większe od $0,25\ \text{mm}$, a zwłaszcza o średnicy większej od $2\ \text{mm}$, są wiązane przez drobne korzenie i strzępki grzybni. Wielkość agregatów glebowych określa ich cechy fizyczne, do których należy trwałość (odporność) mechaniczna, która zapobiega rozpylaniu gleby podczas zabiegów uprawowych i chroni ją przed erozją wietrzną.

Zabiegi agrotechniczne wywierają duży wpływ na powstawanie i dynamiczne zmiany struktury agregatowej gleby w rezultacie rozkruszenia spójnej masy glebowej, nawożenia organicznego i mineralnego, zmianowania roślin, poprzez stabilizujące oddziaływanie korzeni roślin uprawnych, zwłaszcza motylkowatych i traw (Yang i Wander 1998, Amézketa 1999, Lenart 2002, Pagliai i in. 2004, Bronick i Lal 2005). W poziomach Ap gleb użytkowanych rolniczo obok agrega-

tów powstałych w sposób naturalny, występują agregaty typu okruchów, tworzące się w wyniku kruszącego działania elementów roboczych narzędzi uprawowych (pługa, brony, kultywatora i in.). Okruchy mają kształt nieregularnych wielokątów, często o ostrych krawędziach. W wyniku mechanicznej uprawy gleb zbyt suchych okruchy osiągają wymiary brył 10-200 mm (Dexter i Birkas 2004). Także w wyniku mechanicznej uprawy gleb zbyt wilgotnych makroagregaty o wymiarach 0,25-10 mm mogą zostać sklejone w bryły o wymiarach >10 mm. Struktura agregatowa powstała w rezultacie mechanicznej uprawy roli jest strukturą krótkotrwałą, która pod wpływem wody z opadów atmosferycznych przechodzi stopniowo w strukturę spoistą. Narzędzia uprawowe powodują również rozkruszenie makroagregatów >0,25 mm na mikroagregaty <0,25 mm. Intensywne użytkowanie gleb i związane z nim wielokrotne przejazdy ciężkiego sprzętu powodują degradację fizyczną struktury gleby (Domżał i Pranagal 1994).

Pieri (1992) na podstawie uzyskanych wyników badań zaproponował przyjęcie wskaźnika stabilności struktury (*SI*) do oceny ryzyka degradacji struktury gleb uprawnych, na podstawie ich składu granulometrycznego i zawartości materii organicznej:

$$SI = 1,724 \cdot \%C \text{ org.} / (\% \text{ pyłu} + \% \text{ iłu}) \cdot 100\% \quad (1)$$

Wartości wskaźnika *SI* >9% oznaczają trwałą strukturę, wartości 7-9% wskazują na małe zagrożenie degradacją struktury, 5-7% – na duże zagrożenie degradacją struktury, natomiast <5% na zdegradowaną strukturę gleby.

W glebie następują nieustanne zmiany polegające na tworzenie się jednych i rozpadzie innych agregatów strukturalnych. Wyróżniane są cztery główne mechanizmy rozpadu agregatów pod wpływem wody opadowej, różniące się między sobą rodzajem sił powodujących destrukcję, intensywnością rozdrabniania i końcowymi produktami rozpadu (Le Bissonnais 1996):

- rozpad makroagregatów na mikroagregaty poprzez uwalnianie uwiecznionego powietrza podczas szybkiego nawilżania,
- mechaniczny rozpad przez uderzenia kropli deszczu o odpowiedniej energii kinetycznej, połączony z rozbryzgiem cząstek glebowych,
- fizykochemiczna dyspersja cząstek glebowych, wynikająca z redukcji sił międzycząsteczkowych podczas nawilżania, spowodowana przez jednowartościowe kationy Na^+ i napężenie osmotyczne,
- mikrospeknięcia w wyniku zróżnicowanego pęcznienia i kurczenia minerałów ilastych.

Rezultatem rozpadu agregatów jest powstawanie skorupy powierzchniowej, poprzez zatykanie porów glebowych przez cząstki pyłu i ilu a następnie spływ powierzchniowy i erozja wodna powierzchniowa (Le Bissonnais 1996, Barthès i Roose 2002, Singh i Khera 2009).

W badaniach struktury glebowej stosowane są różne metody i techniki badawcze. W warunkach terenowych podaje się opis makroskopowy struktury przy charakterystyce morfologicznej pedonów glebowych (PTG 1989). Badania laboratoryjne struktury rozkruszonego materiału glebowego prowadzone są w oparciu o pomiary metodami fizycznymi. Skład agregatowy gleb określany jest procentowym udziałem poszczególnych frakcji agregatów, o określonej średnicy w mm, po przesianiu powietrznie suchej gleby na zestawie sit o wymiarach 0,25-10 mm (Walczak i Witkowska 1976, Braunack i Dexter 1989, Paluszek 2004, 2010b, Witkowska-Walczak i in. 2004). Może to być np. zawartość powietrznie suchych agregatów o wymiarach >10 mm, 0,25-10 mm, 1-10 mm lub 1-5 mm. Ocena agregacji często jest dokonywana przy użyciu specjalnych wskaźników, np. średniej ważonej średnicy agregatów powietrznie suchych (*mean weight diameter* – MWD_{dry}) (Youker i McGuinness 1957).

Dobra struktura gleby zależy od obecności trwałych agregatów o wymiarach 0,25-10 mm, a zwłaszcza 1-5 mm (Braunack i Dexter 1989, Amézketa 1999, Bronick i Lal 2005). Braunack i Dexter (1989) na podstawie przeglądu literatury ustalili, że w glebie przygotowanej do siewu roślin uprawnych korzystna wielkość agregatów wynosi:

- ze względu na małe parowanie: 0,25-8 mm (optymalna 0,5-2 mm),
- ze względu na duże wewnątrzagregatowe napowietrzenie: 0,1-8 mm (optymalna 0,5-2 mm),
- ze względu na duże międzyagregatowe napowietrzenie: 0,5-16 mm (optymalna 1-16 mm),
- ze względu na najmniejszą erozję wodną i wietrzną: 0,5-16 mm (optymalna 2-16 mm),
- ze względu na małą podatność na zagęszczenie: 0,5-16 mm.

Wymieniona wielkość agregatów glebowych zapewnia roślinom najlepsze warunki do kiełkowania nasion, wzrostu korzeni i rozwoju roślin. Różnice w wymaganiach pomiędzy poszczególnymi gatunkami roślin wynikają z wielkości ich nasion. Dla siewu głównych zbóż optymalna wielkość agregatów glebowych wynosi 1-4 mm, dla kukurydzy 1-8 mm, a dla buraków cukrowych <1 mm. Wewnętrzne

części agregatów dużych, zwłaszcza zagęszczonych i wilgotnych brył >10 mm, są w małym stopniu zasiedlane przez korzenie roślin (Gliński i Lipiec 1991).

Poszczególne typy, rodzaje i gatunki gleb mogą charakteryzować się znacznym zróżnicowaniem pod względem zdolności gleby do agregacji (Domżał i Słowińska-Jurkiewicz 1988, Lipiec i Dębicki 1989, Paluszek 2004, 2010b). Szczególnie duże możliwości uzyskania korzystnej struktury agregatowej mają czarne ziemie, mady rzeczne próchniczne i rędziny czarnoziemne (PTG 1989, Bouma i in. 1999, Orzechowski i Smólczyński 2010). Jednak w warunkach intensywnej uprawy polowej jakość struktury glebowej może ulegać pogorszeniu (Domżał i Pranagal 1994, Boix-Fayos i in. 2001).

Domżał i Słowińska-Jurkiewicz (1988) przebadali 22 profile gleb rdzawych, brunatnych, płowych, czarnoziemów i czarnych ziem wytworzonych z różnych skał macierzystych. Stwierdzili, że zawartość agregatów powietrznie suchych o wymiarach 1-10 mm nie była bezpośrednio związana z przynależnością do określonego typu genetycznego, natomiast korelowała dodatnio z zawartością ilu koloidalnego. Lipiec i Dębicki (1989) analizowali zawartość agregatów powietrznie suchych w poziomach Ap 31 gleb obsianych zbożami, zróżnicowanych pod względem typologicznym i składu granulometrycznego. Badaniami objęli gleby bielcowe, płowe, brunatne, czarnoziemny, czarne ziemie i rędziny kredowe. Wyniki tej pracy wykazały, że stopień agregacji gleb zależał przede wszystkim od ich składu granulometrycznego, niezależnie od typu genetycznego gleb. Stwierdzono, że zawartość agregatów o średnicy >1 mm była wynikiem współdziałania ilości frakcji granulometrycznej $<0,02$ mm, próchnicy i tlenków żelaza. Najwięcej agregatów powietrznie suchych o wymiarach >1 mm zawierały gleby o składzie glin średnich i ciężkich (88-88%), mniej gleby o składzie pyłów (67-83%), glin lekkich (49-68%), piasków gliniastych (43-77%), a najmniej o składzie piasków słabogliniastych (9-49%) i piasków luźnych (11%). Badania autora (Paluszek 2004) porównujące skład agregatowy czarnych ziem i gleb płowych wytworzonych z różnych skał macierzystych oraz mad rzecznych wykazały brak istotnych różnic pomiędzy typami gleb, natomiast istotne różnice pomiędzy grupami granulometrycznymi. Średnia ważona średnica agregatów powietrznie suchych w glebach gliniastych i ilastych wynosiła 12,8 mm, podczas gdy w glebach piaszczystych i pyłowych 6,3-6,6 mm.

2.3.3. Wodoodporność agregatów glebowych

Najbardziej istotną właściwością agregatów glebowych, przyjmowaną za miarę jakości struktury agregatowej, jest ich wodoodporność, czyli zdolność do zachowania formy i budowy w wodzie. Odporność agregatów na destrukcyjne działanie wody jest cechą zmieniającą się pod wpływem czynników fizycznych, chemicznych i biologicznych oraz procesów glebowo-typologicznych (Amézketa 1999, Paluszek 2004). Wodoodporność agregatów ma swoją własną dynamikę sezonową, związaną głównie ze zmianami wilgotności i temperatury gleby (Lehrsch 1998, Kay 1998, Yang i Wander 1998, Paluszek 2002). O okresowych zmianach trwałości gruzelków decydują cykliczne procesy nawilżania – osuszania i zamarzania – rozmarzania oraz działalność mikroorganizmów glebowych. Najmniejsza trwałość agregatów jest pod koniec zimy a największa pod koniec lata.

Trwałość agregatów glebowych jest zwykle mierzona przesiewaniem w wodzie za pomocą zestawu sit, zamontowanych w specjalnych aparatach, lub metodą symulowanego opadu deszczu, przy użyciu symulatorów opadów. Wodoodporność agregatów można charakteryzować za pomocą procentowego udziału poszczególnych frakcji, o określonych wymiarach w mm, za pomocą sumy wodoodpornych frakcji o wymiarach 0,25-10 mm lub 1-10 mm (Paluszek 1995, 2004) oraz na podstawie różnorodnych wskaźników (Walczak i Witkowska 1976, Le Bissonnais 1996, Amézketa 1999, Witkowska-Walczak 2000). Należy do nich: średnia ważona średnica agregatów wodoodpornych – MWD_{wet} , średnia geometryczna średnica agregatów – GMD, agregacja wodoodporna – WSA (Kemper i Rosenau 1986), wskaźnik trwałości agregatów – ASI (Niewczas i Witkowska-Walczak 2005), znormalizowany wskaźnik trwałości – NSI (Six i in. 2004) i całkowity wskaźnik trwałości gleby – WSSI (Nichols i Moro 2011).

Według Kuzniecovej (1978) zawartość wodoodpornych agregatów o wymiarach $>0,25$ mm może służyć jako kryterium do oceny budowy warstwy ornej gleb i prognozowania jej zmian w zależności od różnych systemów uprawy roli. Autorka na podstawie wpływu trwałości agregatów glebowych na gęstość gleby i plony roślin uprawnych wyróżniła następujące przedziały zawartości wodoodpornych agregatów o wymiarach $>0,25$ mm w czarnoziemach typowych o średnim i ciężkim składzie granulometrycznym:

- zawartość $<10\%$ – struktura gleby niewodoodporna, gleba podatna na szybkie zagęszczenie,

- 10-20% – wodoodporność niedostateczna, gleba podatna na szybkie zagęszczenie,
- 20-30% – wodoodporność dostateczna, budowa warstwy ornej zależy od warunków meteorologicznych i zabiegów agrotechnicznych,
- 30-40% – wodoodporność średnia (zadowalająca), budowa warstwy ornej zależy od warunków meteorologicznych i zabiegów agrotechnicznych, lecz w mniejszym stopniu, niż w poprzednim przypadku,
- 40-60% – wodoodporność dobra, budowa warstwy ornej i zagęszczenie korzystne dla uprawy uproszczonej i zminimalizowanej,
- 60-75 (80)% – wodoodporność bardzo dobra, budowa warstwy ornej i zagęszczenie optymalne dla uprawy zminimalizowanej,
- >75 (80)% – wodoodporność nadmiernie wysoka, budowa warstwy ornej zbyt pulchna, powodująca nieproduktywną utratę wody w wyniku parowania.

Klasyfikacja ta, dostosowana dla zasobnych w materię organiczną gleb wytworzonych z utworów pyłowych i ilów, nie jest odpowiednia do oceny trwałości agregatów w glebach wytworzonych z glin i piasków gliniastych.

Le Bissonnais (1996) badał zależności pomiędzy wodoodpornością agregatów glebowych a zaskorupianiem powierzchniowym i erozją wodną. Na podstawie średniej ważonej średnicy agregatów wodoodpornych (MWD_{wet}) przedstawił klasyfikację trwałości agregatów glebowych i podatności gleb na zaskorupianie:

- przy $MWD_{wet} < 0,4$ mm – agregaty są bardzo nietrwałe, następuje systematyczne tworzenie skorupy powierzchniowej,
- 0,4-0,8 mm – agregaty nietrwałe, częste zaskorupienie,
- 0,8-1,3 mm – średnia trwałość agregatów, umiarkowane zaskorupienie,
- 1,3-2,0 mm – agregaty trwałe, rzadkie zaskorupienie,
- powyżej 2,0 mm – agregaty bardzo trwałe, brak zaskorupienia.

Zaskorupienie powierzchniowe gleby spowodowane słabą wodoodpornością agregatów skutkuje zmniejszeniem szybkości infiltracji wody opadowej i zwiększeniem podatności gleb na erozję wodną (wrażliwości gleby na odrywanie i transport przez krople deszczu i spływ powierzchniowy).

Dilkova i in. (2002) jako kryterium oceny jakości gleby zastosowali wskaźnik MWDR obliczany jako stosunek średniej ważonej średnicy agregatów po przesianiu w wodzie do średniej ważonej średnicy agregatów przed przesiewaniem. Wartość wskaźnika MWDR $< 0,25$ autorzy ocenili jako słabą, wartość 0,25-0,50 jako dobrą, a $> 0,50$ jako bardzo dobrą. Do ustalania powyższych liczb granicznych

posłużyły autorom obliczone współczynniki korelacji pomiędzy MWDR a gęstością gleby i retencją wody użytecznej dla roślin.

Niewczas i Witkowska-Walczak (2005) zaproponowali przyjęcie wskaźnika trwałości agregatów (*ASI*) obliczanego na podstawie wartości funkcji liniowej, której argumentami są elementy macierzy przejścia, a jej współczynnikami odpowiednio dobrane wagi. Wskaźnik *ASI* wzrasta wraz ze zwiększeniem się trwałości agregatów glebowych i może przyjmować wartości od 1,0 do 32,0.

W literaturze gleboznawczej niewiele jest prac porównujących stan agregacji i wodoodporność agregatów w różnych typach gleb (Domżał i Słowińska-Jurkiewicz 1988, Lipiec i Dębicki 1989, Rząsa i Owczarzak 1992, Paluszek 2004). Domżał i Słowińska-Jurkiewicz (1988) stwierdzili, że zawartość agregatów wodoodpornych o wymiarach 0,25-10 mm w poziomie Ap gleb brunatnych wytworzonych z glin (56,6-83,0%) i czarnych ziem wytworzonych z glin i pyłów (50,7-90,0%) była większa niż w poziomach Ap gleb płowych wytworzonych z pyłów wodnego pochodzenia (16,6-64,1%) i czarnoziemów wytworzonych z lessów (11,8-73,7%). Lipiec i Dębicki (1989) stwierdzili, że wodoodporność agregatów glebowych o wymiarach >1 mm z gleb płowych, brunatnych, czarnoziemów, czarnych ziem i rędzin kredowych była istotnie skorelowana z zawartością frakcji granulometrycznej <0,02 mm, próchnicy i Fe_2O_3 . Gleby o składzie glin średnich i ciężkich charakteryzowały się większą wodoodpornością agregatów >1 mm (16-37%), niż gleby o składzie pyłów (8-27%) i glin lekkich (14-18%). Rząsa i Owczarzak (1992, 2004) badali wodoodporność struktury agregatowej z 55 gleb najważniejszych typów, rodzajów i gatunków z różnych regionów Polski. Analizując odporność agregatów naturalnych i kształtowanych w warunkach laboratoryjnych, stwierdzili, że odporność agregatów glebowych na dynamiczne działanie wody zależy przede wszystkim od zawartości frakcji ilu <0,002 mm. Niekiedy istotny wpływ wywiera również zawartość pyłu i piasku, a także zawartość próchnicy. Paluszek (2004) stwierdził, że zawartość wodoodpornych agregatów o wymiarach 0,25-10 mm w poziomach Ap czarnych ziem wytworzonych z różnych skał macierzystych (80,3%) i mad rzecznych (71,4%) była istotnie większa niż w glebach płowych (62,5%). Średnia ważona średnica agregatów wodoodpornych wynosiła odpowiednio: 2,29 mm, 1,84 mm i 1,11 mm. Powyższe wartości charakteryzujące wodoodporność agregatów glebowych są trudno porównywalne, ze względu na niejednorodną metodykę, stosowane różne terminy badań, zróżnicowanie zabiegów uprawowych i różnorodność gatunków uprawianych roślin.

Wodoodporna struktura agregatowa zapewnia umiarkowaną gęstość gleby, korzystną zawartość porów kapilarnych o średnicy równoważnej 0,2-20 μm , dla retencjonowania wody użytecznej dla roślin i zawartość makroporów o średnicy $>20 \mu\text{m}$, które warunkują przewodnictwo wodne oraz pojemność i przepuszczalność powietrzną (Witkowska-Walczak 2000, Amézqueta 1999, Bronick i Lal 2005). Mała wodoodporność agregatów glebowych decyduje o podatności gleb na erozję wodną (Rejman i in. 1994, Le Bissonnais 1996, Barthès i Roose 2002, Darboux i Le Bissonnais 2007, Vermang i in. 2009) oraz jest wskaźnikiem postępującej degradacji gleb (Boix-Fayos i in. 2001).

2.3.4. Gęstość gleby

Gęstość gleby suchej jest jednym z najważniejszych wskaźników stanu fizycznego gleb, a przy tym właściwością bardzo zróżnicowaną i zmienną w czasie. Gęstość gleby jest właściwością zależną od składu mineralnego i granulometrycznego materiału glebowego, zawartości materii organicznej, struktury glebowej oraz zabiegów agrotechnicznych i innych czynników spulchniających lub ugniatających glebę (Baranowski 1980, Wojtasik 1989, 1995, Czyż 2004, Logsdon i Karlen 2004).

Gęstość gleby jest najmniejsza w powierzchniowej warstwie poziomu próchnicznego i stopniowo zwiększa się wraz z głębokością warstwy pedonu. W poziomach Ap gleb uprawnych gęstość jest najmniejsza po siewie roślin i zazwyczaj wzrasta do końca sezonu wegetacyjnego. W glebach Polski o składzie granulometrycznym utworów pyłowych, o strukturze agregatowej gęstość przyjmuje najczęściej wartości od 1,30 do 1,40 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach Ap i 1,40-1,60 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych (Licznar 1985, Słowińska-Jurkiewicz 1989, Paluszek 2001), a w glebach o składzie piasków i glin, oraz o strukturze rozdzielnocząstkowej lub spoistej ma wartości wyższe – najczęściej w poziomie Ap od 1,50 do 1,70 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Miatkowski 2001, Kobierski i Dąbkowska-Naskręt 2003, Logsdon i Karlen 2004). W dolnej części profilu gęstość gleb wytworzonych z glin zwałowych osiąga nawet wartości 1,80-1,98 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Ślusarczyk 1979, Wojtasik 1989, 1995, Kaczmarek i in. 2007).

W glebach drobnoziarnistych (gliniastych i ilastych) proponowana optymalna gęstość gleby dla maksymalnej produktywności polowej roślin wynosi 0,9-1,2 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Olness i in. 1998, Reynolds i in. 2007, Drewry i in. 2008). Wartości powyżej 1,25-130 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ mogą potencjalnie powodować straty plonu roślin uprawnych, spowodowane zmniejszoną aeracją gleby (Drewry i in. 2001). Nato-

miast wartości $<0,9 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ potencjalnie mogą powodować straty plonu z powodu niedostatecznego zakorzenienia się roślin, zmniejszenia retencji wody użytecznej dla roślin i zmniejszenia przewodnictwa nienasyconego wody glebowej z rozpuszczonymi składnikami pokarmowymi (Wojtasik 2002a, Mueller i in. 2008, Reynolds i in. 2008).

Arshad i in. (1996) ustalili wartości gęstości gleb zaliczanych do różnych grup granulometrycznych biorąc pod uwagę aerację, wzrost korzeni roślin uprawnych, plon roślin, wypłukiwanie składników pokarmowych i erozję wodną. W miarę zwiększenia zawartości frakcji łu i pyłu zarówno wartości optymalne gęstości gleby, jak i wartości krytyczne dla wzrostu korzeni roślin zmniejszają się (tab. 3).

Tabela 3. Wpływ gęstości gleby na wzrost korzeni roślin (Arshad i in. 1996)

Table 3. Effect of bulk density on root growth of plants (Arshad *et al.* 1996)

Skład granulometryczny Soil texture	Gęstość gleby doskonała Ideal bulk density ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Gęstość gleby, która może wpłynąć na wzrost korzeni Bulk density that may affect root growth ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Gęstość gleby, która ogranicza wzrost korzeni Bulk density that restricts root growth ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Piaski, piaski gliniaste Sands, loamy sands	$<1,60$	1,69	$>1,80$
Gliny piaszczyste, gliny Sandy loams, loams	$<1,40$	1,63	$>1,80$
Gliny piaszczysto-ilaste, gliny ilaste Sandy clay loams, clay loams	$<1,40$	1,60	$>1,75$
Pyły, gliny pylaste Silt, silt loams	$<1,30$	1,60	$>1,75$
Gliny pylasto-ilaste Silty clay loams	$<1,40$	1,55	$>1,65$
Iły piaszczyste, ily pylaste, niektóre gliny ilaste (35-45% łu) Sandy clays, silty clays, some clay loams (35-45% clay)	$<1,10$	1,49	$>1,58$

Inni autorzy określali na podstawie plonów roślin jako optymalne dla różnych gleb zakresy gęstości w granicach $1,30$ - $1,75 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Ślusarczyk 1979, Jones 1983, Wojtasik 1995, Pabin i in. 1999). Pabin i Włodek (1990) ustalili na podstawie doświadczeń polowych, że optymalna gęstość gleby wytworzonej z piasku

gliniastego dla jęczmienia jarego wynosi $1,57 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pabin i in. (1999) za pomocą empirycznych wzorów obliczyli optymalne zakresy gęstości gleby o składzie glin $1,38\text{-}1,53 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, a dla piasku słabogliniastego $1,48\text{-}1,65 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

W niektórych pracach podkreśla się zróżnicowane wymagania poszczególnych gatunków roślin uprawnych w stosunku do gęstości gleby (Ślusarczyk 1979, Roszak i in. 1990, Wojtasik 1995). Roszak i in. (1990) w doświadczeniach polowych i modelowych ustalili optymalną gęstość gleby wytworzonej z gliny piaszczystej dla produktywności pszenicy ozimej $1,50\text{-}1,60 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, dla zbóż jarych $1,40\text{-}1,50 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, a dla roślin strączkowych $1,15\text{-}1,30 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Ślusarczyk (1979) jako optymalną gęstość gleby dla plonowania pszenicy ozimej uznał $1,40\text{-}1,50 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i $1,55\text{-}1,64 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych, dla jęczmienia jarego odpowiednio $1,37\text{-}1,52 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ i $1,42\text{-}1,58 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, dla żyta $1,48\text{-}1,55 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ i $1,53\text{-}1,72 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, a dla buraka cukrowego $1,45 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ i $1,56\text{-}1,63 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Wartości optymalne zależą również od warunków meteorologicznych w poszczególnych latach, zwłaszcza od sumy opadów w sezonie wegetacyjnym. Inne badania Ślusarczyka (1990) wykazały, że dla plonowania jęczmienia jarego optymalna gęstość gleby wytworzonej z piasku gliniastego wynosi $1,62 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, gęstość gleby lessowej $1,35\text{-}1,45 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, a mady rzecznej bardzo ciężkiej $1,30\text{-}1,35 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Gęstość jest najczęściej stosowanym parametrem do oceny stanu zagęszczenia gleby. Jest ona uważana również za pośredni wskaźnik struktury glebowej, zwiększenia, porowatości, aeracji oraz zdolności gleby do magazynowania i transportu wody glebowej (Reynolds 2008). Zwiększenie gęstości gleby powoduje proporcjonalne zwiększenie oporu mechanicznego, zmniejszenie porowatości ogólnej, zawartości makroporów, przewodnictwa wodnego i przepuszczalności powietrznej, pogorszenie natlenienia i właściwości biologicznych gleb (Domżał i in. 1984, 1992, Domżał i Hodara 1990, Wojtasik 1995, Lipiec 2002, Assouline 2006). Wraz ze wzrostem zagęszczenia i ściślejszym upakowaniem cząstek glebowych zwiększa się przewodnictwo cieplne i pojemność cieplna gleby.

Stan nadmiernego zagęszczenia gleby wywiera niekorzystny wpływ na system korzeniowy roślin. Powoduje on zmniejszenie długości i głębokości systemu korzeniowego oraz odległości między korzeniami (Lipiec i Håkansson 2000, Lipiec 2002, Lipiec i in. 2003, Lipiec i Hatano 2003). W glebie bardzo zagęszczonej występuje nierównomierność rozmieszczenia przestrzennego korzeni, a nawet brak korzeni w niektórych fragmentach gleby. Dlatego wraz ze wzrostem zagęszczenia zmniejsza się dostępność i pobieranie wody i składników pokarmowych, ponieważ ich absorpcja ma miejsce przede wszystkim z warstwy gleby $2\text{-}8 \text{ mm}$ wokół korzeni. Wzrost korzeni w profilu glebowym jest ograniczony przez war-

stwy zbite, takie jak podeszwa płuzna i poziom genetyczny Bt. W latach suchych dominującym czynnikiem ograniczającym wzrost korzeni jest nadmierny opór mechaniczny, a w latach mokrych niedotlenienie strefy korzeniowej. W glebie silnie zagęszczonej nawet niewielkie zmiany uwilgotnienia prowadzą do znacznych zmian oporu mechanicznego i natlenienia (Håkansson i Lipiec 2000, Lipiec i Håkansson 2000).

Silne zagęszczenie gleby w strefie korzeniowej ogranicza również rozwój części nadziemnych roślin. Sygnały o niekorzystnych warunkach w warstwie korzeniowej przenoszone są prawdopodobnie przez hormony wzrostu do części nadziemnych i powodują zwiększenie oporu dyfuzyjnego liści i zmniejszenie fotosyntezy. W rezultacie nadmierna gęstość gleby zmniejsza plony roślin uprawnych (Wojtasik 1995, 2002b, Lipiec 2002, Lipiec i Hatano 2003). Z kolei przy bardzo małym zagęszczeniu, mimo znacznej długości korzeni występuje zmniejszenie powierzchni kontaktu korzeni roślin z glebą, co skutkuje zmniejszonym pobieraniem wody i składników pokarmowych, a zwłaszcza azotu (Lipiec 2002).

Do porównania stanu zagęszczenia gleb o różnym składzie granulometrycznym bardzo przydatne jest zagęszczenie relatywne, w których gęstość wyrażana jest w procentach w stosunku do gęstości standardowej (w przybliżeniu maksymalnej) danej gleby (Håkansson i Lipiec 2000). Gęstość standardową można wyznaczyć za pomocą edometru stosując na glebę moką ciśnienie 200 kPa.

Wojtasik (1995) wprowadził do terminologii gleboznawczej pojęcie wyrażające najbardziej charakterystyczny stan gęstości gleby, o nazwie „gęstość naturalna gleby” (ρ_n). Gęstość naturalna jest to wielkość zależna od wskaźnika uziarnienia, zawartości węgla organicznego i węglanu wapnia oraz głębokości w profilu, do której gleba samoczynnie dąży ze stanu spulchnienia lub zagęszczenia. Wyznaczenie ρ_n odbywa się za pomocą empiryczno-rachunkowej formuły w oparciu o oznaczenia zawartości C org. metodą Tiurina, zawartości CaCO_3 metodą Scheiblera i składu granulometrycznego metodą areometryczną Prószyńskiego. Sumując wpływy czynników o stałym oddziaływaniu na gęstość gleby autor otrzymał formułę w ogólnej postaci:

$$\rho_n = \rho_o + f(g) - f(c) + f(z) + f(w) \quad (2)$$

gdzie:

ρ_n – gęstość naturalna gleby w $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,

ρ_o – gęstość gleby w warunkach brzegowych, gdy $g = 0$, $c = 0$, $z = 0$, $w = 0$,

g – granulometryczny wskaźnik gęstości naturalnej gleby, wyrażony stosunkiem procentowej zawartości cząstek o średnicy 0,5-0,1 mm do mniejszych od

0,002 mm, a także odwrotnością tej liczby lub funkcją obu tych wartości dla niektórych gleb zawierających więcej niż 35% frakcji 0,1-0,02 mm,

c – zawartość C org. w % wagowych oznaczona metodą Tiurina,

z – głębokość pobrania próbek w profilu gleby w dm (od 0 do 13 dm),

w – zawartość CaCO_3 w % wagowych oznaczona metodą Scheiblera.

Po oznaczeniu wyznaczonych parametrów funkcji równanie powyższe przybiera ostateczną postać:

$$\rho_n = 1,266 + 0,464 \cdot g^{0,818} - 0,208 \cdot g^{1,205} + 0,01 \cdot g^{2,665} - 0,058 \cdot c + 0,021 \cdot z + 0,00003 \cdot w^3 - 0,0019 \cdot w^2 + 0,2619 \cdot w - 0,048 \quad (3)$$

Wskaźnik gęstości naturalnej może być wykorzystany do porównania jakości fizycznej gleb należących do różnych jednostek systematycznych.

2.3.5. Porowatość ogólna

Porowatość gleby obejmuje objętość trójwymiarowej sieci wolnych przestrzeni w glebie w stosunku do całkowitej objętości gleby. Do wolnych przestrzeni należą pory „macierzyste” – wewnątrzagregatowe i międzyziarnowe, uzależnione od uziarnienia i pory „strukturalne” – międzyagregatowe, mikrospeknięcia i szczeliny oraz kanaliki zoogeniczne (Brewer i Sleeman 1960, Konstankiewicz 1985, Rząsa i Owczarzak 1992, Emerson i McGarry 2003).

Porowatość ogólna jest właściwością uzależnioną od tych samych czynników, które wpływają na gęstość gleby: od składu mineralnego i granulometrycznego, zawartości materii organicznej, struktury glebowej oraz zabiegów agrotechnicznych, jednakże oddziaływanie ich jest odwrotne. Wartości porowatości ogólnej w glebach mineralnych mieszczą się w szerokim przedziale od $0,200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ do $0,750 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i zmniejszają się wraz ze wzrostem głębokości (Rząsa i Owczarzak 1992, Emerson i McGarry 2003, Eynard i in. 2004, Głab i Kulig 2008). Najmniejszą porowatość ogólną wykazują silnie zagęszczone gleby wytworzone z glin zwałowych oraz gleby wytworzone z piasków luźnych, o strukturze rozdzielno-cząstkowej. Porowatość czarnych ziem wytworzonych z glin wynosi $0,376\text{-}0,435 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach Ap i $0,280\text{-}0,468 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych, natomiast gleb płowych wytworzonych z glin $0,346\text{-}0,400 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i $0,283\text{-}0,381 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych (Kobierski i Dąbkowska-Naskręt 2003).

Największą porowatością charakteryzują się gleby o składzie utworów pyłowych, zasobne w materię organiczną, wykazujące trwałą strukturę agregatową. W poziomie Ap gleb płowych wytworzonych z lessu porowatość wynosiła $0,460\text{-}$

0,489 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, a w poziomach podpowierzchniowych 0,423-0,464 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Paluszek 2001). Porowatość czarnoziemów wytworzonych z lessu w poziomie Ap mieściła się w przedziale 0,496-0,530 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ a w poziomach podpowierzchniowych 0,441-0,487 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Paluszek 1995).

Jako optymalne wartości porowatości dla plonu pszenicy ozimej Ślusarczyk (1979) uzyskał 0,470-0,480 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i 0,380-0,420 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych, dla plonu jęczmienia jarego odpowiednio 0,430-0,480 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i 0,380-0,430 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, dla plonu żyta 0,440-0,460 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i 0,360-0,380 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, a dla plonu buraka cukrowego 0,460 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i 0,410 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

2.3.6. Pojemność wodna

Do najważniejszych właściwości wodnych gleb zaliczane są: wilgotność aktualna, pojemność wodna, retencja wody użytecznej dla roślin i przewodnictwo wodne (Romano 1997, Kutilek 2004). Wilgotność aktualna gleby charakteryzuje zawartość wody w momencie pobierania próbek glebowych. Dostateczna ilość wody w glebie jest niezbędna dla życia roślin i mikroorganizmów glebowych. Wilgotność aktualna jest właściwością najbardziej dynamiczną w glebie, zmieniającą się głównie pod wpływem opadów atmosferycznych, transpiracji i wyparowania wody z powierzchni gleby oraz zabiegów uprawowych (White 2006). Tylko w okresach suchych wykazuje zależność od składu granulometrycznego, struktury glebowej i stanu zagęszczenia.

Pojemność wodna charakteryzuje zawartość wody glebowej dla określonych wartości potencjału, przy których woda zmienia w znaczący sposób swe właściwości, przede wszystkim dostępność dla roślin. Pojemność wodną gleb można być obliczana w stosunku do masy gleby suchej lub w stosunku do objętości gleby. W pierwszym przypadku jednostką miary są procenty wagowe (%w/w) lub $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a w drugim przypadku – procenty objętościowe (%v/v) lub $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Pełna pojemność wodna przy potencjale wody glebowej $-0,1 \text{ kPa}$ (pF 0) jest to maksymalna ilość wody, którą gleba może w sobie pomieścić (Trzecki i in. 1971, Walczak 1984). Pełna pojemność wodna obliczana w stosunku do objętości gleby (w $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) teoretycznie równa jest porowatości ogólnej i tak często bywa przyjmowana w wielu pracach. W praktyce laboratoryjnej wartości pełnej pojemności wodnej, oznaczonej metodą podsiąku kapilarnego, mogą się różnić od wartości porowatości ogólnej obliczanej na podstawie gęstości fazy stałej i gęstości gleby, w następstwie pęcznienia minerałów ilastych.

Według Walczaka i in. (2002a), którzy badali właściwości wodne gleb uprawnych Polski za pomocą próbek zgromadzonych w tzw. banku próbek glebowych, pełna pojemność wodna w profilach mineralnych gleb Polski waha się w szerokim przedziale od 0,250 do 0,550 m³·m⁻³. W glebach pławowych wytworzonych z piasków gliniastych i glin wynosi najczęściej 0,350-0,400 m³·m⁻³ w poziomie Ap i 0,300-0,400 m³·m⁻³ w poziomach podpowierzchniowych. W czarnych ziemiach wytworzonych z piasków wynosi 0,450-0,500 m³·m⁻³ w poziomie Ap i 0,350-0,400 m³·m⁻³ w poziomach podpowierzchniowych. W czarnych ziemiach wytworzonych z glin lekkich i pyłów osiąga wartości 0,400-0,450 m³·m⁻³ w poziomach Ap i 0,350-0,400 m³·m⁻³ w poziomach głębszych. Z kolei w glebach pławowych wytworzonych z pyłów wodnego pochodzenia pojemność pełna wynosi 0,400-0,450 m³·m⁻³ w poziomach Ap i 0,350-0,450 m³·m⁻³ w poziomach głębszych. W glebach pławowych wytworzonych z lessu i utworów lessopodobnych wynosi 0,450-0,500 m³·m⁻³ w poziomie Ap i 0,400-0,500 m³·m⁻³ w poziomach podpowierzchniowych. Najwyższe wartości pełnej pojemności wodnej, wynoszące 0,500-0,550 m³·m⁻³ w poziomie Ap i 0,400-0,550 m³·m⁻³ w poziomach głębszych stwierdzili autorzy w czarnoziemiach wytworzonych z lessu.

Pojemność wodna w zakresie potencjału wody glebowej od -0,1 do -49,0 kPa (pF 0-2,7) zależy głównie od składu granulometrycznego, struktury, gęstości gleby i jej porowatości (Walczak 1984, Emerson 1995, Romano 1998, Stange i Horn 2005). Pojemność wodna w zakresie potencjału wody glebowej od -155,4 do -1554 kPa (pF 3,2-4,2) zależy przede wszystkim od zawartości frakcji ilastej, składu mineralogicznego tej frakcji i zawartości materii organicznej (Domżał 1979, Emerson 1995, Romano 1998). Wyróżniamy połowę pojemność wodną przy potencjale wody glebowej -15,5 kPa (pF 2,2), pojemność wodną w punkcie początku hamowania wzrostu roślin przy -49 kPa (pF 2,7), pojemność w punkcie silnego hamowania wzrostu roślin przy -155,4 kPa (pF 3,2), pojemność w punkcie całkowitego zahamowania wzrostu roślin przy -490 kPa (pF 3,7) i pojemność w punkcie trwałego wędnięcia roślin przy -1554 kPa (pF 4,2) (Trzecki i in. 1971, Domżał 1979).

Polowa pojemność wodna (PPW) przy potencjale wody glebowej -15,5 kPa (pF 2,2) odpowiada tej ilości wody, którą może gleba zatrzymać po swobodnym odcieku wody grawitacyjnej z próbki całkowicie nasyconej wodą, w warunkach braku kontaktu z wodą gruntową i wyeliminowaniu parowania powierzchniowego. Polową pojemność wodną przy potencjale -15,5 kPa (pF 2,2) gleb kształtuje zwłaszcza zawartość mezoporów i mikroporów glebowych. Zawartość materii organicznej tylko pośrednio wpływa na połowę pojemność wodną, poprzez polepszenie agregacji i zapobieganie nadmiernemu zagęszczeniu masy glebowej.

Według Walczaka i in. (2002a,b) w glebach uprawnych Polski połowa pojemność wodna mieści się w szerokim przedziale od 0,039 do 0,455 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Najmniejszą połową pojemność wodną ($-15,5$ kPa) mają gleby bielcowe i rdzawe wytworzone z piasków luźnych i słabogliniastych (0,050-0,100 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w całym profilu). Gleby płowe wytworzone z piasków gliniastych oraz z glin lekkich i średnich charakteryzują się pojemnością połową najczęściej 0,200-0,250 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i 0,050-0,300 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych. W czarnych ziemiach wytworzonych z piasków PPW wynosi 0,200-0,250 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i 0,050-0,150 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach podpowierzchniowych, natomiast w czarnych ziemiach wytworzonych z glin lekkich i pyłów 0,250-0,300 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w całym profilu. W glebach pławowych wytworzonych z pyłów wodnego pochodzenia pojemność połowa wynosi 0,300-0,350 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach Ap i 0,250-0,300 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych. Z kolei w glebach pławowych wytworzonych z lessu i utworów lessopodobnych PPW osiąga wartości 0,300-0,350 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i 0,300-0,400 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach podpowierzchniowych, a w czarnoziemach 0,300-0,350 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ we wszystkich poziomach. Najwyższe wartości połowej pojemności wodnej, wynoszące 0,350-0,400 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w całym profilu stwierdzili autorzy w glebach pławowych wytworzonych z ilów i w madach ciężkich. Na podstawie obszernej bazy danych analitycznych autorzy sugerują podział gleb na trzy schematyczne grupy: o niskich wartościach połowej pojemności wodnej ($<0,200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), o średnich wartościach (0,200-0,300 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) i o wysokich wartościach ($>0,300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

Reynolds i in. (2008) wprowadzili pojęcie względnej pojemności połowej, rozumianej jako stosunek połowej pojemności wodnej do porowatości ogólnej gleby i wskazującej na zdolność gleby do zatrzymywania wody i powietrza względem całkowitej objętości porów. Dla zasilanych opadami mineralnych gleb uprawnych optymalna równowaga pomiędzy pojemnością wodną strefy korzeniowej gleb a pojemnością powietrzną występuje wtedy, kiedy względna pojemność połowa jest równa 0,6-0,7. Przy tej wielkości w glebie jest największa mikrobiologiczna nityfikacja. Wartości względnej pojemności połowej $<0,6$ zmniejszają intensywność nityfikacji z powodu niedostatku wody glebowej, natomiast wartości $>0,7$ zmniejszają wytwarzanie azotanów z powodu niedostatku powietrza glebowego (Skopp i in. 1990).

Pojemność wodna w punkcie trwałego wędnięcia przy potencjale -1554 kPa (pF 4,2) określa stan, w którym w glebie pozostaje woda adsorpcyjna zawarta w mikroporach i związana siłami przewyższającymi siłę ssącą korzeni, co warunkuje jej niedostępność dla roślin. Wilgotność gleby w punkcie trwałego wędnięcia roślin osiąga najwyższe wartości w glebach silnie próchnicznych o składzie

granulometrycznym ilów i glin ciężkich, które zatrzymują w mikroporach najwięcej wody niedostępnej dla roślin. O retencjonowaniu dużej ilości wody niedostępnej dla roślin decyduje zdolność adsorbowania jej na powierzchni cząstek koloidalnych, charakteryzujących się największą powierzchnią właściwą (Domżał 1979, Emerson 1995, Romano 1998).

Pojemność wodna w punkcie trwałego wędnięcia (PTW) według Walczaka i in. (2002a) jest najmniejsza w glebach bielcowych i rdzawych wytworzonych z piasków luźnych i słabogliniastych ($<0,050 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). W glebach pławowych i czarnych ziemiach wytworzonych z piasków gliniastych wynosi $0,050\text{--}0,100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i $<0,050 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach podpowierzchniowych. W glebach pławowych wytworzonych z glin lekkich i średnich, pyłów wodnego pochodzenia i lessów oraz w czarnoziemach wynosi $0,050\text{--}0,100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach Ap i $0,050\text{--}0,150 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach podpowierzchniowych. Wyższe wartości osiąga PTW w czarnych ziemiach powstałych z glin i pyłów ($0,100\text{--}0,150 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i $0,100\text{--}0,200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych). Najwyższe wartości PTW przyjmuje w glebach wytworzonych z ilów ($0,200\text{--}0,250 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i $0,300\text{--}0,350 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych).

2.3.7. Rozkład porów i retencja wody glebowej

Podział porów glebowych według wielkości ich średnicy równoważnej uwzględnia ich zdolność do zatrzymywania określonych form wody glebowej i powietrza. Makropory o średnicy równoważnej $>20 \text{ }\mu\text{m}$ są zwykle wypełnione powietrzem glebowym i tylko przez krótki okres po opadach atmosferycznych utrzymują wodę grawitacyjną. Mezopory (pory kapilarne) o średnicy równoważnej $20\text{--}0,2 \text{ }\mu\text{m}$ stanowią bardzo cenną grupę porów, gdyż w nich jest retencjonowana woda użyteczna dla roślin. Mikropory o średnicy $<0,2 \text{ }\mu\text{m}$, nazywane są również porami mikrokapilarnymi, w których woda wiązana jest zbyt dużymi siłami, aby mogła być wykorzystana przez rośliny (wypełnia je woda niedostępna dla roślin). Zawartość poszczególnych grup porów glebowych jest uzależniona przede wszystkim od składu granulometrycznego, składu mineralogicznego, zawartości substancji organicznej, składu agregatowego i stanu zagęszczenia gleby (Domżał 1979, Witkowska-Walczak (2000) Lebron i in. 2002, Guber i in. 2003, Pranagal i in. 2005). Dobry wzrost i funkcjonowanie korzeni roślin uprawnych wymagają odpowiedniej zdolności gleby do retencjonowania wody dostępnej dla roślin i utrzymywaniu powietrza. Dlatego w rozkładzie porów glebowych korzystna jest odpowiednio duża zawartość mezoporów o średnicy $0,2\text{--}20 \text{ }\mu\text{m}$, re-

tencjonujących wodę użyteczną dla roślin i makroporów $>20\ \mu\text{m}$, zapewniających napowietrzenie. Natomiast zawartość mikroporów $<0,2\ \mu\text{m}$, utrzymujących wodę silnie związaną siłami międzycząsteczkowymi i niedostępną dla roślin, powinna być jak najmniejsza.

Zawartość makroporów o średnicy równoważnej $>20\ \mu\text{m}$ określa pojemność powietrzną gleb przy połowym nasyceniu wodą, po odsączeniu wody grawitacyjnej. Pojemność powietrzna obliczana jest jako różnica między pełną pojemnością wodną a połową pojemnością wodną, wyrażoną w $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ (White 2006).

Powietrze glebowe w pierwszej kolejności zajmuje makropory $>20\ \mu\text{m}$, a przy małej wilgotności gleby również część mezoporów. Objętość porów zajętych przez powietrze, zawartość tlenu w powietrzu glebowym i zdolność do jego wymiany mają ogromny wpływ na rozwój systemu korzeniowego roślin, pobieranie składników pokarmowych przez rośliny, aktywność biologiczną mikroorganizmów glebowych, intensywność oraz kierunek przebiegu procesów utleniania i redukcji występujących w glebie (Gliński i Stępniewski 1984, 1985, Skopp i in. 1990). Makropory umożliwiają korzeniom ominięcie stref gleby o nadmiernym oporze mechanicznym, zwłaszcza w głębszych poziomach genetycznych, gdzie makropory stanowią często jedyne ścieżki wzrostu korzeni roślin (Lipiec 2002).

Prawidłowy rozwój korzeni roślin w glebie wymaga odpowiedniej pojemności powietrznej. Niedobór powietrza spowodowany zwiększeniem gęstości gleby, wzrostem wilgotności i zmniejszeniem się ilości makroporów prowadzi do zahamowania wzrostu i rozwoju roślin. Najczęściej ma to miejsce, gdy pojemność powietrzna kształtuje się poniżej wartości $0,100\text{--}0,150\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, którą można uznać za wartość krytyczną dla większości roślin i typów gleb mineralnych (Cockroft i Olsson 1997). Tradycyjnie przyjmuje się wartość $0,100\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, jako minimalną pojemność powietrzną chroniącą przed deficytem powietrza w strefie korzenienia się roślin, który powoduje zmniejszenie plonów. Niektórzy autorzy oceniają, że w glebach o składzie glin dla odpowiedniego natlenienia wymagana jest pojemność powietrzna $\geq 0,140\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ (Drewry 2006, Mueller i in. 2008).

Walczak i in. (2002a) na podstawie uzyskanych wyników badań 290 profili gleb uprawnych z całej Polski podzielili zawartość makroporów o średnicy równoważnej $>20\ \mu\text{m}$ (równą retencji wody grawitacyjnej) na trzy grupy: niską $<0,120\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, średnią $0,120\text{--}0,210\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i wysoką $>0,210\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Największy udział makroporów stwierdzili w glebach bielcowych i rdzawych wytworzonych z piasków luźnych, słabogliniastych i żwirów ($0,270\text{--}0,300\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach Ap i $0,300\text{--}0,360\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach podpowierzchniowych). W czarnych ziemiach wytworzonych z piasków wynosiła ona $0,210\text{--}0,240\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomie Ap

i $0,240\text{--}0,300\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych. W czarnoziemach udział makroporów stanowił $0,150\text{--}0,180\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w Ap i $0,090\text{--}0,210\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach podpowierzchniowych. W glebach płowych wytworzonych z piasków gliniastych wynosiła najczęściej $0,180\text{--}0,210\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i $0,090\text{--}0,210\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych. W glebach płowych wytworzonych z glin lekkich i średnich, pyłów wodnego pochodzenia i lessów wynosiła $0,120\text{--}0,150\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i $0,060\text{--}0,150\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach podpowierzchniowych. Najmniejsza zawartość makroporów występuje w glebach wytworzonych z ilów ($0,060\text{--}0,090\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w Ap i $0,030\text{--}0,060\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych).

Wyznaczenie optymalnej pojemności powietrznej jest trudne, ponieważ pojemność wodna i pojemność powietrzna są właściwościami przeciwstawnymi. Olness i in. (1998) na podstawie własnych badań zaproponowali przyjęcie tezy, że optymalna równowaga między zdolnością do zatrzymywania wody w powierzchniowej warstwie gleby a aeracją jest zachowana wtedy, kiedy połowa pojemność wodna stanowi 0,66 porowatości ogólnej, a pojemność powietrzna 0,34.

Spośród makroporów wydzielane są największe pory o średnicy $>300\text{ }\mu\text{m}$, które dzielą się na pory powstałe z upakowania fazy stałej (*packing voids*), kanałiki (*channels*) i spękania (Brewer i Sleeman 1960). Pory z upakowania fazy stałej są to wolne przestrzenie w glebie, powstające przy luźnym ułożeniu agregatów i ziaren glebowych. Mają one nieregularne kształty i zmienną szerokość, ich przeciwległe ściany nie są przystające, a ich wymiary mogą się zmniejszać w wyniku nawilżania i osiadania masy glebowej. Kanałiki tworzą się w wyniku działania fauny glebowej, głównie dżdżownic i wazonkowców, przy współudziale korzeni roślin (Trojan i Linden 1998, VandenBygaart i in. 2000). Mają one najczęściej cylindryczne kształty o nieprzystających przeciwległych ścianach, charakteryzują się różnokierunkowym przebiegiem a ich przekroje poprzeczne uwidaczniają się jako koła lub elipsy. Spękania (szczeliny i szparki) powstają w wyniku procesu kurczenia się materiału glebowego podczas wysychania oraz na skutek naprężeń mechanicznych. Przeciwległe ściany spękań są przystające, a ich przekroje mają kształt długich linii o zmiennej szerokości. Szczeliny mogą się zamykać podczas nawilżania gleby i ponownie otwierać po osuszeniu.

Zawartość makroporów o średnicy równoważnej $>300\text{ }\mu\text{m}$ określana jest w literaturze jako tzw. „makroporowatość” (Francis i Fraser 2005, Reynolds 2008, 2009). Jest definiowana i oznaczana jako różnica pomiędzy pełną pojemnością wodną (przy potencjale $-0,1\text{ kPa}$) a pojemnością wodną przy potencjale $-0,98\text{ kPa}$ (pF 1,0). Obecność porów $>300\text{ }\mu\text{m}$ decyduje o zdolności gleby do szybkiej infiltracji wody glebowej, dużej przepuszczalności powietrznej i ułatwia ukorzenianie

się roślin (Trojan i Linden 1998, Lipiec i in. 2006). Szczególne znaczenie mają makropory zoogeniczne skierowane pionowo, gdyż nie są one na ogół niszczone przez przejazdy ciągników i maszyn rolniczych. Z tego względu ich zawartość jest ważnym wskaźnikiem fizycznej jakości gleby.

Makroporowatość $<0,040 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ stwierdzona była w glebach zdegradowanych w wyniku nadmiernego ugniatania, natomiast wartość $0,050\text{--}0,100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ była określana w literaturze jako optymalna (Drewry i in. 2001, Drewry i Paton 2005). Natomiast Reynolds i in. (2008, 2009) przyjęli wartość $0,040 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ jako dolną krytyczną granicę, a $\geq 0,070 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ jako optymalną zawartość porów $>300 \text{ }\mu\text{m}$ dla zapewnienia korzystnego przewodnictwa wodnego i ukorzenienia się roślin.

Woda użyteczna dla roślin zawarta jest w przedziale potencjału od $-15,5$ do -1554 kPa (pF_{2,2-4,2}), wypełniając pory kapilarne – mezopory o średnicy równoważnej $20\text{--}0,2 \text{ }\mu\text{m}$. Retencja wody użytecznej dla roślin zależy od składu granulometrycznego, zawartości materii organicznej, zagęszczenia oraz wielkości i wodoodporności agregatów glebowych (Romano 1998, Czachor 2001, Pachepsky i in. 2001, White 2006). Ogólnie przyjmuje się, że najlepszymi właściwościami retencyjnymi charakteryzują się gleby o składzie utworów pyłowych zasobne w próchnicę, o trwałej strukturze agregatowej, nie ulegające nadmiernemu zagęszczeniu. Wyjątkowo korzystny jest wpływ zawartości frakcji pyłu ($0,05\text{--}0,002 \text{ mm}$) na zdolność retencyjną gleb. Taka wielkość ziaren glebowych gwarantuje największą zawartość wewnątrzagregatowych porów kapilarnych o średnicy równoważnej $20\text{--}0,2 \text{ }\mu\text{m}$ (Romano 1998, Warrick 2002, White 2006). Natomiast duża zawartość ilu koloidalnego $<0,002 \text{ mm}$ wywiera decydujący wpływ na zwiększenie wilgotności trwałego wędnięcia roślin i tym samym na zmniejszenie retencji wody użytecznej (Zawadzki 1973, Domżał 1979, Hudson 1994, Emerson 1995). Zawartość materii organicznej pośrednio wpływa na retencję wody użytecznej, poprzez polepszenie agregacji i zapobieganie nadmiernemu zagęszczeniu. Oddziaływanie wielu czynników decydujących o zróżnicowaniu granulometrycznym i typologicznym gleb wpływa na znaczną przestrzenną zmienność ich zdolności retencyjnej (Pachepsky i in. 2001).

Według Witowskiej-Walczak (2000), badającej specjalnie przygotowane próbki gleb o różnym składzie granulometrycznym, najwięcej wody użytecznej retencjonują agregaty o wymiarach $0,25\text{--}0,5 \text{ mm}$ i mikroagregaty $<0,25 \text{ mm}$. Zwiększenie gęstości gleby suchej, będącej miarą upakowania cząstek glebowych, zwiększa zawartość porów kapilarnych i retencji wody użytecznej tylko w glebach piaszczystych. W glebach o cięższym składzie granulometrycznym wzrost gęstości gleby zmniejsza zawartość mezoporów, utrzymujących wodę użyteczną dla roślin,

a zwiększa ilość mikroporów $<0,2 \mu\text{m}$, utrzymujących wodę bardzo silnie związaną z fazą stałą gleby (Domżał 1979, Walczak 1984, Słowińska-Jurkiewicz 1989).

Retencja wody użytecznej dla roślin $<0,100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ jest uważana za słabą, $0,100\text{--}0,150 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ za ograniczoną (średnią), $0,150\text{--}0,200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ za dobrą (Craul 1999, Warrick 2002, White 2006), a $\geq 0,200 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ jako doskonałą dla maksymalnego wzrostu i funkcjonowania korzeni roślin oraz uzyskiwanych plonów (Cocroft i Olson 1997).

Wartości retencji wody użytecznej w użytkowanych rolniczo glebach mineralnych Polski wahają się w szerokim przedziale od $<0,021$ do $0,300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Pałuszek 1995, 2001, 2010a, Walczak i in. 2002c). Według Walczaka i in. (2002c) najmniejszą retencją charakteryzują się gleby bielcowe i rdzawe wytworzone ze żwirów, piasków luźnych i słabogliniastych ($0,060\text{--}0,090 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach Ap i od $<0,030$ do $0,060 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych). Gleby płowe i czarne ziemie wytworzone z piasków gliniastych, glin lekkich i średnich mają retencję $0,120\text{--}0,180 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i od $0,060$ do $0,180 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych w zależności od uziarnienia. Gleby płowe wytworzone z ilów i mady ciężkie mają retencję podobną ($0,150\text{--}0,180 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i $0,120\text{--}0,150 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach podpowierzchniowych). Najwyższe wartości retencji wody użytecznej ($0,240\text{--}0,270 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomie Ap i $0,270\text{--}0,300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach podpowierzchniowych) stwierdzili autorzy w glebach płowych wytworzonych z pyłów wodnego pochodzenia i lessów oraz w czarnoziemach.

Na podstawie uzyskanych wyników badań 290 profili Walczak i in. (2002c) przyjęli następujący podział wartości retencji dla całych profili gleb: $<0,120 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – niska retencja wody użytecznej, $0,120\text{--}0,210 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – średnia retencja wody użytecznej i $0,210\text{--}0,300 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – wysoka retencja wody użytecznej.

Zdolność gleb do retencionowania wody użytecznej decyduje o zaopatrzeniu roślin w wodę i składniki pokarmowe. Najkorzystniejszą kategorią retencji wodnej jest retencja wody produkcyjnej zawarta w przedziale potencjału od $-15,5 \text{ kPa}$ do $-490,3 \text{ kPa}$ (pF 2,2–3,7), w tym zwłaszcza retencja wody bardzo łatwo dostępnej, zawarta w przedziale od $-15,5 \text{ kPa}$ do $-98,1 \text{ kPa}$ (pF 2,2–3,0) i łatwo dostępnej dla roślin od $-98,1 \text{ kPa}$ do $-155,4 \text{ kPa}$ (pF 3,0–3,2) (Domżał 1979, Słowińska-Jurkiewicz 1989). Ponadto wyróżniono retencję wody trudno dostępnej od $-155,4 \text{ kPa}$ do $-490,3 \text{ kPa}$ (pF 3,2–3,7) i bardzo trudno dostępnej dla roślin od $-490,3 \text{ kPa}$ do -1554 kPa (pF 3,7–4,2). W innych badaniach retencję wody użytecznej podzielono na wodę łatwo dostępną dla roślin, zawartą w przedziale potencjału od $-15,5 \text{ kPa}$ do $-155,4 \text{ kPa}$ (pF 2,2–3,2) i wodę trudno dostępną w przedziale od $-155,4 \text{ kPa}$ do -1554 kPa (pF 3,2–4,2) (Pranagal 2007).

Walczak i in. (2002a) za wodę łatwo dostępną dla roślin przyjęli wodę zawartą w przedziale potencjału od pF 2,2 do pF 3,0, a za wodę trudno dostępną – zawartą w przedziale potencjału pF 3,0-4,2. Według tych kryteriów retencja wody łatwo dostępnej dla roślin była najniższa w glebach brunatnych wytworzonych ze skał masywnych oraz w madach średnich i ciężkich ($0-0,030 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). W glebach bielcowych, rdzawych, płowych i czarnych ziemiach wynosiła ona $0,030-0,060 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Najwyższa retencja tej kategorii wody była w czarnoziemach i glebach wytworzonych z utworów pyłowych wodnego pochodzenia ($0,060-0,090 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Natomiast retencja wody trudno dostępnej dla roślin (w przedziale potencjału pF 3,0-4,2) najniższa była w glebach bielcowych i rdzawych wytworzonych ze żwirów i piasków luźnych ($0,030-0,060 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), a najwyższa w czarnoziemach i glebach płowych wytworzonych z lessów i utworów pyłowych wodnego pochodzenia ($0,180-0,210 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

Retencję wodną w określonej warstwie gleby, np. w warstwie korzenienia się roślin (0-100 cm), można przedstawić w mm słupa wody. Według Ślusarczyka (1979) optymalna retencja wody użytecznej dla roślin w warstwie 0-100 cm dla plonu ziarna pszenicy ozimej wynosi 203-223 mm, dla plonu jęczmienia jarego 222-238 mm, dla plonu buraka cukrowego 230 mm, dla plonu żyta 178-184 mm, a dla plonu ziemniaków 171-184 mm.

2.3.8. Przewodnictwo wodne

Zaopatrzenie roślin w wodę i rozpuszczone w niej składniki pokarmowe zależy również od zdolności gleb do filtracji, czyli przewodnictwa wodnego gleb, (przepuszczalności wodnej). Wyróżniane jest przewodnictwo wodne w strefie nasyconej, kiedy wszystkie pory glebowe są wypełnione wodą oraz przewodnictwo wodne w stanie nienasyconym, kiedy pory glebowe są tylko częściowo wypełnione wodą, a częściowo powietrzem (Lipiec 1983, Walczak i in. 2002d, Iwanek 2005, 2008, Touma 2009).

Przewodnictwo wodne nasycone określa szybkość ruchu wody w glebie będącej w stanie maksymalnej pojemności wodnej przy potencjale wody glebowej – 0,1 kPa (pF 0). Przy całkowitym nasyceniu gleby woda przemieszcza się stosunkowo szybko pod działaniem sił grawitacji, a szybkość filtracji jest dodatnio skorelowana z natężeniem opadów atmosferycznych. Gleby zbyt przepuszczalne szybko pozbawiane są wody i składników pokarmowych roślin. Natomiast w glebach o niskim współczynniku przepuszczalności woda stagnuje, powodując proces oglejenia opadowego lub przy nachyleniu terenu spływa po powierzchni,

wywołując erozję wodną. Przewodnictwo wodne w strefie nasyconej zależy od składu mineralogicznego, granulometrycznego, zawartości materii organicznej, węglanu wapnia i tlenków żelaza (Nemes i in. 2005). W szczególności jest uwarunkowana rodzajem struktury glebowej, wielkością, kształtem i wodoodpornością agregatów, gęstością gleby i zawartością makroporów, a zwłaszcza obecnością skierowanych pionowo zoogenicznych kanalików (Keren i Ben-Hur 2003, Aimrun i in. 2004, Lado i in. 2004, Niedźwiecki i in. 2006). Przewodnictwo wodne w strefie nienasyconej oprócz wymienionych powyżej czynników, jest uwarunkowane potencjałem wody glebowej i związaną z nim wilgotnością gleby (Lipiec 1983, Assouline 2001, Niedźwiecki i in. 2006).

Przewodnictwo wodne w poziomach uprawno-próchnicznych gleb zmienia się pod wpływem różnych narzędzi i systemów uprawowych oraz działalności korzeni roślin, mezo- i makrofauny glebowej, warunkującej obecność dużych porów (van Vliet i in. 1998, Francis i Fraser 2005, Lipiec i in. 2006). Różnorodność czynników wpływających na właściwości przewodzące gleb powoduje bardzo dużą zmienność przestrzenną i czasową uzyskiwanych wartości (Perrone i Madramootoo 1994, Mohanty i Mousli 2000, Iwanek i Widomski 2005).

Do wyznaczania współczynnika filtracji w strefie nasyconej, który opisuje przewodnictwo wodne w jednostkach prędkości ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ lub $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$), stosowane są metody polowe i laboratoryjne (Wieczysty 1982, Iwanek 2005, 2008). Do najczęściej stosowanych metod należą pomiary za pomocą aparatu Wita, z wykorzystaniem próbek pobranych do standardowych cylinderków o objętości 100 cm^3 . Na podstawie wartości oznaczonego współczynnika filtracji w strefie nasyconej można zaliczyć badane gleby do poszczególnych klas przepuszczalności wodnej (Stryjewski 1978). Ocena przepuszczalności wodnej gleb jest podstawą dla projektowania przedsięwzięć z zakresu melioracji wodnych i zabiegów przeciwerozrywających (tab. 4).

Walczak i in. (2002a,d) przewodnictwo wodne nasycone podzielili na trzy schematyczne grupy: niskie $5\text{--}500\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$, średnie $500\text{--}1000\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ i wysokie $>1000\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$. Według autorów niskie przewodnictwo wodne nasycone ($5\text{--}500\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$) występuje w glebach rdzawych i bielcowych wytworzonych z piasków słabogliniastych, w glebach brunatnych wytworzonych z glin i w glebach pławowych wytworzonych z pyłów wodnego pochodzenia. Średnie przewodnictwo wodne ($500\text{--}1000\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$) stwierdzono m. in. w glebach pławowych i czarnych ziemiach wytworzonych z piasków gliniastych oraz w czarnoziemach wytworzonych z lessu. Natomiast wysokie przewodnictwo wodne nasycone ($>1000\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$) występuje m.in. w glebach rdzawych i bielcowych wytworzonych z piasków luźnych i żwirów, w glebach

plowych wytworzonych z glin lekkich, lessów i pyłów lessopodobnych oraz w czarnych ziemiach wytworzonych z glin i pyłów.

Tabela 4. Klasyfikacja przepuszczalności wodnej (Stryjewski 1978)

Table 4. Classification of water permeability (Stryjewski 1978)

Klasa przepuszczalności wodnej Water permeability class	Współczynnik filtracji Coefficient of filtration k (cm·d ⁻¹)
Bardzo duża – Very high	>950
Duża – High	300-950
Dość duża – Fairly high	100-300
Średnia – Medium	20-100
Mała – Low	5-20
Bardzo mała – Very low	<5

Iwanek i Widomski (2005) badając profile erodowanych gleb pływowych wytworzonych z lessu dla celów melioracji przeciwozyjnych stwierdzili przewodnictwo wodne nasycone w przedziale od 8,6 do 86,4 cm·d⁻¹. Tylko w pojedynczych przypadkach uzyskali wartości przewodnictwa wodnego >2,0 m·d⁻¹.

Przewodnictwo wodne nienasycone przy potencjale wody glebowej –15,5 kPa (pF_{2,2}) według Walczaka i in. (2002a) wynosiło w większości badanych gleb 0,1-0,5 cm·d⁻¹ (w glebach pływowych wytworzonych z piasków gliniastych, glin, pyłów wodnego pochodzenia i lessów oraz w czarnych ziemiach wytworzonych z piasków). Niższe wartości (0,05-0,1 cm·d⁻¹) przyjmowało m. in. w czarnych ziemiach wytworzonych z glin i pyłów oraz w glebach wytworzonych ze żwirów. Najmniejsze przewodnictwo wodne przy pF 2,2 (0,01-0,05 cm·d⁻¹) stwierdzono w glebach wytworzonych z ilów oraz w madach średnich i ciężkich.

Wyniki uzyskane przez innych autorów badających współczynnik filtracji w glebach są trudno porównywalne bez matematycznych przeliczeń, ze względu na to, że używali oni innych jednostek miary, np. cm·s⁻¹, mm·s⁻¹ (Gajewski i in. 2007), cm·min⁻¹, a nawet μm·s⁻¹.

2.3.9. Przepuszczalność powietrzna

Cennym wskaźnikiem stanu fizycznego gleby jest jej przepuszczalność powietrzna, która określa zdolność gleby do wymiany gazowej. Wymiana gazowa między glebą a atmosferą odbywa się przede wszystkim pod wpływem gradientu stężenia (przepływ dyfuzyjny) oraz w mniejszym stopniu pod wpływem gradientu ciśnienia (przepływ lepki). Przepuszczalność powietrzna jest szczególnie ważna w przypadku uprawy roślin okopowych wymagających dobrego natlenienia gleby. Właściwość ta jest ściśle związana z objętością drożnych porów glebowych, którymi najczęściej odbywa się ruch powietrza, zwłaszcza z długością, kształtem i ciągłością kanalików zoogenicznych. Istnieje również ścisła zależność między przepuszczalnością powietrzną a stanem wysycenia gleby wodą (Turski i in. 1978, Słowińska-Jurkiewicz 1986, 1989, Iversen i in. 2001). Przepuszczalność powietrzną można mierzyć w różnych jednostkach. W Polsce przyjęto za Instytutem Odlewnictwa w Krakowie, producentem aparatu do pomiaru przepuszczalności powietrznej mas formierskich, jednostkę $10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Wartości przepuszczalności powietrznej gleby zawierają się w bardzo szerokich granicach, od $1,8 \times 10^{-8}$ do $4000 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Zależą one pośrednio od składu granulometrycznego, struktury gleby, działalności mezofauny glebowej i korzeni roślin oraz zabiegów uprawowych (Turski i in. 1978, Słowińska-Jurkiewicz 1986). Turski i in. (1978) w badaniach polowych i laboratoryjnych ocenili zależność przepuszczalności powietrznej pięciu typów gleb wytworzonych z różnych skał macierzystych od gęstości gleby, porowatości ogólnej, wilgotności aktualnej i pojemności powietrznej. Na podstawie uzyskanych korelacji autorzy ustalili jako korzystną przepuszczalność powietrzną wartość $>20 \text{ cm}^4 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, co odpowiada wartości $>35 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Taka przepuszczalność powietrzna zapewnia odpowiednią wymianę gazową pomiędzy powietrzem glebowym a atmosferą.

Przy dużej wilgotności gleb (w stanie potencjału od $-0,98$ do $-3,1 \text{ kPa}$) przepuszczalność powietrzna osiąga najczęściej niskie wartości, ponieważ znaczna część makroporów jest zamknięta przez meniski wodne i nie może brać udziału w wymianie powietrza (Turski i in. 1978, Paluszek 1995). Wyraźny wzrost przepuszczalności powietrznej następuje wówczas, gdy potencjał wody glebowej osiągnie wartość od $-9,8$ do $-15,5 \text{ kPa}$.

Przepuszczalność powietrzna przy polowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) zależy bezpośrednio od zawartości drożnych makroporów o średnicy $>20 \mu\text{m}$, zdolnych do wymiany gazowej (Turski i in. 1978, Słowińska-Jurkiewicz 1986, Roseberg i McCoy 1992, Poulsen i in. 2001). Dalszy wzrost pojemności po-

wietrznej gleby spowodowany odwodnieniem wywołuje niemal zawsze mniejsze lub większe zwiększanie przepuszczalności powietrznej. Natomiast spadek pojemności powietrznej związany ze wzrostem gęstości gleby nie zawsze powoduje zmniejszenie przepuszczalności powietrznej. Niekiedy przy zmniejszeniu pojemności powietrznej gleby następuje wzrost przepuszczalności powietrznej. W glebach płowych wytworzonych z lessu przepuszczalność powietrzna przy PPW wynosiła w poziomie Ap od $8,8 \cdot 10^{-8}$ do $14,1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, a w poziomach podpowierzchniowych od $9,6 \cdot 10^{-8}$ do $48,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (Paluszek 2001). W poziomach Ap czarnoziemów wytworzonych z lessu przepuszczalność powietrzna osiągała wartości od $25 \cdot 10^{-8}$ do $80 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, a w poziomach głębszych od $15 \cdot 10^{-8}$ do $60 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (Paluszek 1995). W pararendzinach wytworzonych z glin zwałowych przepuszczalność powietrzna przy PPW wynosiła w poziomie Ap od $8,3 \cdot 10^{-8}$ do $82,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, a w poziomach podpowierzchniowych od $11,9 \cdot 10^{-8}$ do $175,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (Turski i in. 1997).

Zmiany przepuszczalności powietrznej w funkcji zagęszczenia gleby przy wilgotności mniejszej od polowego nasycenia (w przedziale potencjału od $-31,0$ do $-49,0 \text{ kPa}$) mają przebieg zgodny ze zmianami objętości poszczególnych grup porów (Turski i in. 1978, Słowińska-Jurkiewicz 1989). W makroporach ruch powietrza odbywa się swobodnie, natomiast w mezoporach powietrze ma przepływ bardzo utrudniony. Im bardziej objętość aktywnych makro- i mezoporów wzrasta, tym silniejsza jest zależność przepuszczalności powietrznej od pojemności powietrznej i stanu zagęszczenia gleby. W przypadku aktualnej przepuszczalności powietrznej gleb o małej wilgotności ważną rolę odgrywają także drobne mezopory o średnicy równoważnej $0,2\text{--}20 \text{ }\mu\text{m}$. W czarnoziemach wytworzonych z lessu przepuszczalność powietrzna przy potencjale wody glebowej -49 kPa (pF 2,7) wynosiła od $40 \cdot 10^{-8}$ do $200 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ w poziomie Ap i od $30 \cdot 10^{-8}$ do $80 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ w poziomach podpowierzchniowych (Paluszek 1995).

2.3.10. Wskaźnik jakości *S*

Jako kryteria oceny jakości fizycznej gleby proponowano również syntetyczne wskaźniki, obliczane metodami matematycznymi. Jednym z nich jest opracowany przez Dextera (2004a) wskaźnik *S*. Dexter (2004a,b,c) na podstawie wieloletnich badań zaproponował przyjęcie wskaźnika jakości fizycznej gleby *S* jako uniwersalnej metody oceny stanu fizycznego wszystkich gleb. Według autora wskaźnik ten, definiowany jako tangens kąta nachylenia krzywej retencji wodnej gleby w punkcie jej przegięcia, jest ściśle uzależniony od struktury glebowej,

która wpływa na większość fizycznych właściwości gleb. Wykres krzywej retencji wodnej powinien przedstawiać zależność logarytmu naturalnego potencjału wody glebowej do grawimetrycznej zawartości wody ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Punkt przegięcia krzywej retencji wodnej oznacza granicę pomiędzy tzw. porowatością „strukturalną” (uwarunkowaną szczelinami, kanalikami biogenicznymi i porami międzyagregatowymi uzależnionymi od użytkowania) a porowatością „macierzystą” (wewnątrzagregatową i międzyziarnową), uzależnioną od składu granulometrycznego gleby. Autor zaproponował następujące kategorie jakości fizycznej gleby według obliczonej wartości wskaźnika S : $<0,020$ – jakość bardzo słaba, $0,020-0,035$ – jakość słaba, $0,035-0,050$ – jakość dobra, $>0,050$ – jakość bardzo dobra (Dexter i in. 2007). Wartość $S = 0,035$ uznana za granicę pomiędzy dobrą a słabą jakością została wyznaczona na podstawie wartości maksymalnych gęstości różnych typów gleb. Dopasowanie krzywej retencji wodnej do równania van Genuchtena (1980) ma zapewniać standardową i obiektywną procedurę określania punktu przegięcia oraz obliczania wskaźnika jakości fizycznej gleby S . Wskaźnik S można obliczyć za pomocą programu komputerowego RETC (Retention Curve Program) do opisywania właściwości wodnych gleb nienasyconych.

Użycie wskaźnika S dla badania jakości fizycznej gleby Dexter (2004a) proponuje nazwać „teorią S ”. Według autora, bezpośrednio z wartości wskaźnika S można ocenić inne fizyczne właściwości gleb, np.: łatwość uprawy, zbrylanie, przewodnictwo wodne nienasycone, przewodnictwo wodne nasycone i zwięzłość gleby (Dexter 2004a, b, c, Dexter i in. 2004, 2007). Autor stwierdza, że wskaźnik S może stanowić ważne narzędzie oceny degradacji lub poprawy jakości fizycznych właściwości gleby, a także służyć ocenie fizycznej jakości globalnych zasobów glebowych. Równocześnie przyznaje, że S jest jedną z metod oceny liczbowej fizycznej jakości gleby i nie uwzględnia wszystkich możliwych przypadków, np. gleb zabagnionych nie nadających się do uprawy przez znaczną część roku oraz niektórych piasków (Dexter 2004a).

Przedstawione powyżej ustalenia różnych autorów zostały oparte na niejednolitej metodyce badań. Są bardzo cenne, ale niewystarczające dla oceny jakości stanu fizycznego podstawowych jednostek systematycznych i klasyfikacji użytkowych gleb. Stanowią jednak ważną inspirację dla systematycznych i ujednoliconych metodycznie badań, uściślających wartości liczbowe kryteriów oceny stanu fizycznego gleb. W ostatnich dziesięcioleciach unowocześnieniu uległy metody badań stanu fizycznego gleb, dzięki upowszechnieniu nowoczesnej aparatury laboratoryjnej produkcji Eijkelkamp i Soil Moisture Equipment Corporation (1985).

3. MATERIAŁ I METODY

3.1. Badania terenowe

Badania terenowe w celu wybrania reprezentatywnych gleb prowadzono w różnych jednostkach fizycznogeograficznych na obszarze wschodniej i środkowej Polski w sierpniu w latach 2008-2010 r. Wstępnego wyboru mezoregionów fizycznogeograficznych do badań dokonano na podstawie map glebowo-rolniczych. Natomiast dokładną lokalizację pedonów wybrano na podstawie sondowań sondą glebową Eijkelkamp i wykopanych odkrywek glebowych.

Do badań wybrano po 4 gleby z poszczególnych kompleksów rolniczej przydatności gleb gruntów ornych, pod uprawą zbóż (głównie pszenicy ozimej i pszenżyta ozimego). Badaniami objęto łącznie 100 pedonów: 48 gleb płowych, 40 czarnych ziem i 12 czarnoziemów położonych w różnych makroregionach i mezoregionach fizycznogeograficznych Polski (Kondracki 2001).

Lokalizacja wybranych gleb według typów, rodzajów i kompleksów przydatności rolniczej – nr pedonów, miejscowości i mezoregiony fizycznogeograficzne:

A. Gleby płowe wytworzone z utworów pyłowych różnej genezy:

a). Gleby płowe wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych, zaliczane do kompleksu pszennego bardzo dobrego (1) i klasy bonitacyjnej II:

- 12. Zosin (Wyniosłość Giełczewska),
- 13. Podole (Wyniosłość Giełczewska),
- 14. Jaroszewice (Równina Bełżycka),
- 53. Kajetanówka (Płaskowyż Świdnicki).

b). Gleby płowe wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych, zaliczane do kompleksu pszennego dobrego (2) i klasy bonitacyjnej IIIa-IIIb:

- 5. Obsza (Płaskowyż Tarnogrodzki),
- 7. Jabłonna (Wyniosłość Giełczewska),
- 9. Piotrków (Wyniosłość Giełczewska),
- 52. Janowice 3 (Płaskowyż Świdnicki).

c). Gleby płowe wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych, zaliczane do kompleksu pszennego wadliwego (3) i klasy bonitacyjnej IVa-IVb:

- 8. Osowa (Wyniosłość Giełczewska),
- 10. Sachalin (Wyniosłość Giełczewska),
- 11. Wolnica (Wyniosłość Giełczewska),
- 15. Zadworze (Wzniesienia Urzędowskie).

d). Gleby płowe wytworzone z utworów pyłowych wietrzeniowych, zaliczane do kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego (8) i klasy bonitacyjnej IIIb:

1. Księżpol (Płaskowyż Tarnogrodzki),
3. Łukowa (Płaskowyż Tarnogrodzki),
4. Babice (Płaskowyż Tarnogrodzki),
6. Wola Różaniecka (Płaskowyż Tarnogrodzki).

B. Czarne ziemie wytworzone z utworów pyłowych różnej genezy:

a). Czarne ziemie wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych i wietrzeniowych, zaliczane do kompleksu pszennego bardzo dobrego (1) i I-II klasy bonitacyjnej:

37. Teresin Gaj (Równina Łowicko-Błońska),
47. Świdnik Duży 1 (Płaskowyż Świdnicki),
50. Janowice 1 (Płaskowyż Świdnicki),
54. Krężnica Okrągła 1 (Wyniosłość Gielczewska),

b). Czarne ziemie wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych i wietrzeniowych, zaliczane do kompleksu pszennego dobrego (2) i klasy bonitacyjnej IIIa:

36. Paprotnia (Równina Łowicko-Błońska),
48. Świdnik Duży 2 (Płaskowyż Świdnicki),
51. Janowice 2 (Płaskowyż Świdnicki),
55. Krężnica Okrągła 2 (Równina Bełżycka),

c). Czarne ziemie wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych, zaliczane do kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego (8) i klasy bonitacyjnej IVa:

49. Kolonia Świdnik (Płaskowyż Świdnicki),
56. Zagórze (Równina Bełżycka),
99. Łysołaje (Płaskowyż Świdnicki),
100. Kolonia Łysołaje (Płaskowyż Świdnicki).

C. Gleby płowe wytworzone z lessów:

a). Gleby płowe wytworzone z lessów, zaliczane do kompleksu pszennego bardzo dobrego (1) i II klasy bonitacyjnej:

67. Piotrawin (Płaskowyż Nałęczowski),
68. Jastków Kolonia Podleśna (Płaskowyż Nałęczowski),
81. Tomaszowice (Płaskowyż Nałęczowski),
82. Ługów (Płaskowyż Nałęczowski).

b). Gleby płowe wytworzone z lessów, zaliczane do kompleksu pszennego dobrego (2) i klasy bonitacyjnej IIIa-IIIb:

85. Gutanów (Płaskowyż Nałęczowski),
86. Ludwinów (Płaskowyż Nałęczowski),

- 96. Wólka Kraśniczyńska (Działy Grabowieckie),
- 97. Drewniki Skierbieszowskie (Działy Grabowieckie).
- c). Gleby płowe wytworzone z lessów, zaliczane do kompleksu pszennego wadliwego (3) i klasy bonitacyjnej IVa-IVb:
 - 83. Kolonia Ługów (Płaskowyż Nałęczowski),
 - 84. Kolonia Gutanów (Płaskowyż Nałęczowski),
 - 93. Poturzyn (Grzęda Sokalska),
 - 98. Majdan Skierbieszowski (Działy Grabowieckie).
- D. Czarnoziemy wytworzone z lessów:**
 - a). Czarnoziemy wytworzone z lessów, zaliczane do kompleksu pszennego bardzo dobrego (1) i I-II klasy bonitacyjnej:
 - 63. Bidziny (Wyżyna Sandomierska),
 - 64. Grochocice (Wyżyna Sandomierska),
 - 87. Żulice (Grzęda Sokalska),
 - 88. Łykoszyn (Grzęda Sokalska).
 - b). Czarnoziemy wytworzone z lessów, zaliczane do kompleksu pszennego dobrego (2) i klasy bonitacyjnej IIIa:
 - 65. Zajączkowice (Wyżyna Sandomierska),
 - 66. Prusinowice (Wyżyna Sandomierska),
 - 89. Kryszyn (Grzęda Sokalska),
 - 91. Telatyn (Grzęda Sokalska).
 - c). Czarnoziemy wytworzone z lessów, zaliczane do kompleksu pszennego wadliwego i klasy bonitacyjnej IVa:
 - 90. Franusin (Grzęda Sokalska),
 - 92. Wasylów (Grzęda Sokalska),
 - 94. Radostów (Grzęda Sokalska),
 - 95. Kułakowice (Grzęda Horodelska).
- E. Gleby płowe wytworzone z glin zwałowych:**
 - a). Gleby płowe wytworzone z glin zwałowych, należące do kompleksu pszennego bardzo dobrego (1) i II klasy bonitacyjnej:
 - 40. Karolew (Równina Kutnowska),
 - 41. Kozia Góra (Równina Kutnowska),
 - 42. Muchnice (Równina Kutnowska),
 - 73. Marcinkowo Górne (Pojezierze Gnieźnieńskie).
 - b). Gleby płowe wytworzone z glin zwałowych, należące do kompleksu pszennego dobrego (2) i klasy bonitacyjnej IIIa-IIIb:
 - 23. Wolica (Wysoczyzna Lubartowska),
 - 24. Dębiny (Wysoczyzna Lubartowska),

25. Wielkolas (Wysoczyzna Lubartowska),

57. Kock (Równina Łukowska).

c). Gleby płowe wytworzone z glin zwałowych, należące do kompleksu pszennego wadliwego (3) i klasy bonitacyjnej IVa:

70. Wszedzień (Pojezierze Gnieźnieńskie),

72. Gąsawa (Pojezierze Gnieźnieńskie),

76. Sobiejuchy (Pojezierze Gnieźnieńskie),

77. Wenecja (Pojezierze Gnieźnieńskie).

F. Czarne ziemie wytworzone z glin zwałowych:

a). Czarne ziemie wytworzone z glin zwałowych, należące do kompleksu pszennego bardzo dobrego (1) i I-II klasy bonitacyjnej:

38. Elżbietów (Równina Łowicko-Błońska),

45. Siedlec (Równina Łowicko-Błońska),

46. Piątek (Równina Łowicko-Błońska),

78. Strzelno Klasztorne (Pojezierze Gnieźnieńskie).

b). Czarne ziemie wytworzone z glin zwałowych, należące do kompleksu pszennego dobrego (2) i klasy bonitacyjnej IIIa:

16. Zalesice Kolonia (Przedgórze Ilżeckie),

19. Gaworzyna (Przedgórze Ilżeckie),

39. Strzelce (Równina Kutnowska),

44. Szarowizna (Równina Łowicko-Błońska).

c). Czarne ziemie wytworzone z glin zwałowych należące do kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego (8) i klasy bonitacyjnej IVa:

17. Polany (Przedgórze Ilżeckie),

60. Żerdź (Wysoczyzna Lubartowska),

79. Starczewo (Pojezierze Gnieźnieńskie),

80. Bachorce (Pojezierze Kujawskie).

G. Gleby płowe wytworzone z piasków:

a). Gleby płowe wytworzone z piasków gliniastych, niecałkowicie na glinie zwałowej, należące do kompleksu żytniego bardzo dobrego (4) i klasy bonitacyjnej IIIa-IIIb:

21. Sycyna (Równina Radomska),

59. Niwa Babicka (Wysoczyzna Żelechowska),

61. Michów (Wysoczyzna Lubartowska),

71. Szubinek (Pojezierze Gnieźnieńskie).

b). Gleby płowe wytworzone z piasków gliniastych, należące do kompleksu żytniego dobrego (5) i klasy bonitacyjnej IVa-IVb:

- 2. Zawadów (Obniżenie Dorohuckie),
- 20. Kolonia Krzyżanowice (Przedgórze Ilżeckie),
- 74. Cerekwica (Pojezierze Gnieźnieńskie),
- 75. Jaroszewo (Pojezierze Gnieźnieńskie).

H. Czarne ziemie wytworzone z piasków:

- a). Czarne ziemie wytworzone z piasków gliniastych, zaliczane do kompleksu żyniego bardzo dobrego (4) i klasy bonitacyjnej IIIa:
 - 31. Guzów (Równina Łowicko-Błońska),
 - 32. Maurycew (Równina Łowicko-Błońska),
 - 33. Oryszew Nowy (Równina Łowicko-Błońska),
 - 34. Cyganka (Równina Łowicko-Błońska).
- b). Czarne ziemie wytworzone z piasków gliniastych, należące do kompleksu żyniego dobrego (5) i klasy bonitacyjnej IVa:
 - 27. Nieborów (Równina Łowicko-Błońska),
 - 28. Łasieczniki (Równina Łowicko-Błońska),
 - 30. Piaski (Równina Łowicko-Błońska),
 - 35. Wiskitki (Równina Łowicko-Błońska).
- c). Czarne ziemie wytworzone z piasków gliniastych, należące do kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego (8) i klasy bonitacyjnej IVa:
 - 18. Pomorzany (Przedgórze Ilżeckie),
 - 29. Sypień (Równina Łowicko-Błońska),
 - 43. Tum (Równina Łowicko-Błońska),
 - 58. Kolonia Górka (Wysoczyzna Lubartowska).
- d). Czarne ziemie wytworzone z piasków gliniastych, należące do kompleksu zbożowo-pastewnego słabego (9) i klasy bonitacyjnej IVb:
 - 22. Orlicz (Wysoczyzna Lubartowska),
 - 26. Wypnicha (Wysoczyzna Lubartowska),
 - 62. Wola Sernicka (Wysoczyzna Lubartowska),
 - 69. Wiecanowo (Pojezierze Gnieźnieńskie).

Decydując się na wybór do badań tych typów gleb Polski, kierowano się następującymi przesłankami:

- gleby płowe są najważniejszym typem genetycznym, ze względu na największy procentowy udział w pokrywie glebowej Polski,
- czarne ziemie i czarnoziemy, chociaż stanowią niewielki udział w pokrywie glebowej Polski należą do najlepszych gleb, wyróżniając się żyznością i urodzajnością,

- dokonany wybór umożliwia porównanie właściwości typów genetycznych gleb wytworzonych z takich samych skał macierzystych, charakteryzujących się zbliżonym składem granulometrycznym, ale o odmiennej zawartości materii organicznej.

Badania terenowe prowadzono w latach 2008-2010 w sierpniu, kiedy zboża znajdowały się w fazie dojrzałości pełnej lub wkrótce po zbiorze. Wybór terminu pobrania próbek glebowych jest zagadnieniem kluczowym w badaniach jakości stanu fizycznego gleb. Ze względu na dużą zmienność sezonową właściwości fizycznych, zwłaszcza agregacji, wodoodporności agregatów, gęstości gleby, porowatości ogólnej i wilgotności, uwarunkowaną zabiegami uprawowymi, zmianowaniem roślin i przebiegiem warunków agrometeorologicznych, jest tylko krótki okres uzyskania porównywalnych wyników analiz stanu fizycznego różnych gleb. Takim okresem jest faza dojrzałości pełnej i zbioru zbóż (lipiec – sierpień), kiedy po kilku miesiącach od siewu roślin, pod wpływem naturalnych procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych, gleby osiągają w miarę stabilny stan struktury i właściwości wodno-powietrznych.

Próbki gleb do badań laboratoryjnych pobrano z poziomów genetycznych, odpowiadających czterem warstwom pedonu: z poziomu Ap (z głębokości 0-25 cm) i poziomów podpowierzchniowych (z głębokości 25-50 cm, 50-75 cm i 75-100 cm). W glebach płowych były to poziomy: Eet, Bt, BC lub C, w czarnych ziemiach poziomy: Aa, Bbr, AC, Cg lub G (w zależności od podtypu), a w czarnoziemach A, ABbr, Bbr lub AC, Cca (w zależności od podtypu). Łącznie pobrano i poddano analizom laboratoryjnym 400 próbek glebowych.

Próbki standardowe do badań struktury, składu granulometrycznego i właściwości chemicznych pobierano w ilości 1,5-2 kg. Probki o nienaruszonej strukturze do badań właściwości wodno-powietrznych pobierano w 8 powtórzeniach do metalowych cylinderków o objętości 100 cm³ (w tym 4 do oznaczania pojemności wodnej i przepuszczalności powietrznej oraz 4 do oznaczania przewodnictwa wodnego nasyconego). Łącznie pobrano 3200 próbek o nienaruszonej strukturze w cylinderkach (1600 do oznaczania pojemności wodnej i przepuszczalności powietrznej oraz 1600 do oznaczania przewodnictwa wodnego).

3.2. Analizy laboratoryjne i opracowanie wyników

Skład granulometryczny gleb oznaczono metodą areometryczną Bouyoucosa-Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego, z rozdzieleniem podfrakcji piasku na sitach o wymiarach oczek 1, 0,5, 0,25 i 0,1 mm. Grupy granulometryczne określono zarówno według nowej klasyfikacji Polskiego Towarzystwa Glebo-

znawczego z 2008 r. (PTG 2009), jak i starej klasyfikacji PTG (1989). Zawartość węgla organicznego oznaczano analizatorem Vario Max CNS Elementar w Centralnym Laboratorium Analiz Chemicznych IUNG w Puławach. Zawartość CaCO_3 oznaczono za pomocą aparatu Scheiblera. Odczyn gleby w $1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ KCl mierzono potencjometrycznie, stosując elektrodę zespoloną.

Kwasowość hydrolityczną (Hh) w $\text{cmol H}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ oznaczono metodą Kappena w $1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ CH_3COONa . Kationy wymienne o charakterze zasadowym w $\text{cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ oznaczono metodą Pallmanna w wyciągu $1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ NH_4Cl o pH 8,2. Zawartość kationów wymiennych Ca^{2+} , K^+ i Na^+ oznaczono na fotometrze płomieniowym, natomiast zawartość kationów Mg^{2+} – metodą ASA. Na podstawie tych oznaczeń obliczono sumę kationów zasadowych (S), pojemność wymiany kationów (T) w $\text{cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$ i stopień wysycenia kompleksu sorpcyjnego kationami o charakterze zasadowym (Vs) w procentach.

Zawartość łatwo przyswajalnego dla roślin potasu i fosforu ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) oznaczono metodą Egnera-Riehma, a zawartość przyswajalnego magnezu ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) metodą Schachtschabela w Okręgowej Stacji Chemiczno-Rolniczej w Lublinie.

Skład agregatowy gleb ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) oznaczono metodą przesiewania w stanie powietrznie suchym, przez zestaw sit o wymiarach oczek: 10, 7, 5, 3, 1, 0,5 i 0,25 mm, stosując naważkę 500 g w dwóch powtórzeniach.

Zawartość wodoodpornych agregatów glebowych ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) oznaczono metodą przesiewania w wodzie, za pomocą zmodyfikowanego aparatu Bakszejewa, wykonanego w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie. Stosowano naważkę gleby o masie 25 g (w 4 replikacjach), złożoną z agregatów powietrznie suchych proporcjonalnie do ich rozkładu według wymiarów. Naważkę umieszczano w zestawie sit: 7, 5, 3, 1, 0,5 i 0,25 mm. Zwilżanie agregatów następowało w wyniku podsiąku, a następnie zanurzano je w wodzie. Czas wodnego przesiewania w wyniku ruchu sit wynosił 12 minut. Następnie poszczególne wodoodporne frakcje agregatów przenoszono z sit na sączki, suszono i ważono.

Otrzymane wyniki zawartości poszczególnych frakcji powietrznie suchych i wodoodpornych agregatów zsumowano i zestawiono w tabelach. Nie wprowadzano tzw. poprawki piaskowej na zawartość w glebach podfrakcji piasku bardzo grubego (o wymiarach 2-1 mm), grubego (1-0,5 mm) i średniego (0,5-0,25 mm). Na podstawie wyników przesiewania obliczono średnie ważone średnice agregatów powietrznie suchych (mean weight diameter – MWD_{dry}) i agregatów wodoodpornych (MWD_{wet}) metodą Youkera i McGuinnessa (1957).

Gęstość fazy stałej gleby ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$) oznaczono metodą piknometryczną. Gęstość gleby ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$) obliczono na podstawie stosunku masy gleby wysuszonej

w 105°C do jej objętości. Porowatość ogólną ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) obliczono na podstawie wartości gęstości fazy stałej i gęstości gleby.

Pojemność wodną ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ i $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) w przedziale potencjału wody glebowej od $-0,1$ kPa (pF 0) do $-49,03$ kPa (pF 0-2,7) oznaczono w komorach niskociśnieniowych, a w przedziale potencjału od -155 kPa do -1554 kPa (pF 3,2-4,2) w komorach wysokociśnieniowych, na porowatych płytach ceramicznych produkcji Eijkelkamp Agrisearch Equipment i Soil Moisture Equipment Corporation (w 4 replikacjach). Względną pojemność połową obliczono na podstawie wartości porowatości ogólnej i połowej pojemności wodnej (przy potencjale $-15,5$ kPa) wyrażonej w $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Rozkład porów glebowych ($>300 \mu\text{m}$, $>20 \mu\text{m}$, $0,2-20 \mu\text{m}$ i $<0,2 \mu\text{m}$ oraz retencję wody glebowej obliczono na podstawie odpowiednich wartości pojemności wodnej, wyrażonych w $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Zawartość makroporów o średnicy równoważnej $>0,300 \mu\text{m}$ obliczono na podstawie wartości porowatości ogólnej i pojemności wodnej przy potencjale $-0,98$ kPa (pF 1,0). Zawartość makroporów o średnicy równoważnej $>20 \mu\text{m}$ obliczono z różnicy porowatości ogólnej i połowej pojemności wodnej przy potencjale $-15,5$ kPa (pF 2,2). Zawartość mezoporów o średnicy równoważnej $0,2-20 \mu\text{m}$ i retencję wody użytecznej dla roślin (potencjalną retencję użyteczną) wyliczono na podstawie połowej pojemności wodnej przy potencjale $-15,5$ kPa (pF 2,2) i wilgotności trwałego wędnięcia przy potencjale -1554 kPa (pF 4,2). W obliczeniach retencji wodnej gleb nie uwzględniano wielkości efektu histerezy.

Na podstawie krzywych retencji wodnej obliczono wskaźnik jakości stanu fizycznego gleb S według Dextera (2004) z wykorzystaniem równania van Genuchtena za pomocą programu komputerowego RETC. Wskaźnik jakości S został zdefiniowany przez autora jako tangens kąta nachylenia krzywej retencyjności wodnej gleby w punkcie jej przegięcia do osi potencjału wody glebowej i powinien być obliczany za pomocą przekształconego równania van Genuchtena (1980):

$$S = -n (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) (1 + 1/m)^{-(1+m)}, \quad (4)$$

w którym poszczególne symbole oznaczają: θ_{sat} – zawartość wody w glebie przy pełnym nasyceniu ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), θ_{res} – tzw. „resztkowa” ($>\text{pF } 4,2$) zawartość wody ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), n – parametr empiryczny kontrolujący kształt krzywej retencji, m – parametr empiryczny z ograniczeniem Mualema (1986): $1-1/n$.

Uzyskane wyniki ze 100 pedonów i 400 poziomów lub warstw glebowych poddano analizie statystycznej dzieląc gleby według grup i podgrup granulome-

trycznych. Obliczono średnie arytmetyczne, odchylenia standardowe i współczynniki zmienności dla wszystkich właściwości i wydzielonych zbiorów. Obliczono również współczynniki korelacji prostej (r), współczynniki determinacji (r^2) oraz równania regresji pomiędzy zawartością frakcji granulometrycznych, zawartością C org. i właściwościami fizycznymi we wszystkich poziomach glebowych, korzystając z programów MatLab i Arstat.

Na podstawie uzyskanych wyników analiz laboratoryjnych i obliczeń statystycznych oceniono przydatność poszczególnych właściwości i wskaźników jako kryteriów oceny stanu fizycznego gleby. Następnie opracowano własną klasyfikację wybranych właściwości i wskaźników fizycznych pod względem ich jakości. Do ustalenia liczb granicznych wykorzystano zarówno średnie arytmetyczne, odchylenia standardowe oraz współczynniki korelacji pomiędzy badanymi właściwościami gleb i równania regresji. Klasyfikacja jest twórczym rozwinięciem dotychczasowych ustaleń autorów cytowanych w Przeglądzie literatury, dostosowanych dla wybranych jednostek systematycznych gleb Polski.

Opracowana klasyfikacja jakości obejmuje następujące właściwości fizyczne z ustalonymi granicznymi wartościami liczbowymi (od – do), najczęściej w pięciostopniowej skali, dostosowanej do specyfiki poszczególnych właściwości:

- skład agregatowy według zawartości powietrznie suchych agregatów glebowych o wymiarach 1-10 mm ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$),
- skład agregatowy według wielkości średniej ważonej średnicy agregatów powietrznie suchych (MWD_{dry}) w mm,
- wodoodporność agregatów glebowych na podstawie zawartości wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$),
- gęstość gleby,
- porowatość ogólną,
- połowę pojemność wodną ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$),
- pojemność wodną w punkcie trwałego wędnięcia roślin ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$),
- pojemność powietrzną gleby w stanie połowej pojemności wodnej według zawartości makroporów o średnicy równoważnej $>20\ \mu\text{m}$ ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$),
- retencję wody użytecznej dla roślin według zawartości mezoporów o średnicy równoważnej 0,2-20 μm ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$),
- przewodnictwo wodne nasyczone,
- przepuszczalność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5\ \text{kPa}$).

Do klasyfikacji składu agregatowego gleb wykorzystano ustalenia Braunacka i Dextera (1989), którzy ocenili jako optymalne wielkości agregatów glebowych

od 0,5 do 16 mm (w zależności od kryterium oceny), zapewniające najlepsze warunki do kiełkowania nasion, wzrostu korzeni i rozwoju roślin.

Przy opracowywaniu liczb granicznych wodoodporności agregatów glebowych porównano uzyskane wyniki z klasyfikacjami Le Bissonnais (1996), Kuzniecovej (1978) oraz Dilkovej i in. (2002). Le Bissonnais (1996) na podstawie średniej ważonej średnicy agregatów wodoodpornych (MWD_{wet}) ocenił trwałość agregatów glebowych oraz podatność gleb na zaskorupianie i erozję wodną. Kuzniecowa (1978) przedstawiła zawartość wodoodpornych agregatów o wymiarach $>0,25$ mm jako kryterium do oceny budowy warstwy ornej czarnoziemów typowych o średnim i ciężkim składzie granulometrycznym. Dilkova i in. (2002) jako kryterium oceny jakości gleby zastosowali wskaźnik MWDR obliczany jako stosunek średniej ważonej średnicy agregatów po przesianiu w wodzie do średniej ważonej średnicy agregatów przed przesiewaniem.

Opracowując klasyfikację gęstości gleby wykorzystano ustalenia z literatury (Ślusarczyk 1979, Wojtasik 1995, Arshad i in. 1996, Pabin i in. 1999, Drewry i in. 2008). Wynika z nich że gęstość gleby jako kryterium jakości fizycznej, powinna być oceniana oddzielnie dla poszczególnych grup granulometrycznych (piasków, glin, pyłów) oraz oddzielnie dla poziomu Ap i pozostałych poziomów genetycznych gleb uprawnych.

Ustalając liczby graniczne dla porowatości ogólnej wykorzystano ustalenia Ślusarczyka (1979) oraz porównania jej wartości średnich z klasyfikacją gęstości gleby. Porowatość ogólną również oceniano oddzielnie dla poszczególnych grup granulometrycznych oraz oddzielnie dla poziomu Ap i pozostałych poziomów genetycznych.

Opracowując klasyfikację jakości właściwości wodnych wzięto pod uwagę przede wszystkim ustalenia Walczaka i in. (2002a,b,c), Cockrofta i Olsona (1997), Dextera (2004a), a także prace Reynoldsa i in. (2008) oraz Olnessa i in. (1998). Walczak i in. (2002a,b,c) na podstawie wyników badań 290 profili glebowych z całej Polski przedstawili podział gleb według wartości polowej pojemności wodnej przy potencjale $-15,5$ kPa, pojemności wodnej w punkcie trwałego wędgnięcia (-1554 kPa), zawartość makroporów o średnicy równoważnej >20 μ m (równej retencji wody grawitacyjnej) i retencji wody użytecznej dla roślin. Uwzględniono także ocenę retencji wody użytecznej dla roślin zawartą w pracach Cockrofta i Olsona (1997) oraz innych autorów (Craul 1999, Warrick 2002, White 2006). Przyjęte przez Dextera (2004a) cztery kategorie jakości fizycznej gleby według obliczonej wartości wskaźnika S porównano z wartościami polowej pojemności wodnej i retencji wody użytecznej dla roślin, z którymi ten wskaźnik

ściśle dodatnio koreluje. Z pracy Reynoldsa i in. (2008) przyjęto twierdzenie, że optymalna równowaga pomiędzy pojemnością wodną strefy korzeniowej gleb a pojemnością powietrzną występuje wtedy, kiedy względna pojemność połowa (zdolność gleby do zatrzymywania wody względem całkowitej objętości porów) jest równa 0,6-0,7. Natomiast według Olnessa i in. (1998) optymalna równowaga między zdolnością do zatrzymywania wody w powierzchniowej warstwie gleby a aeracją jest zachowana wtedy, kiedy połowa pojemność wodna stanowi 0,66 porowatości ogólnej, a pojemność powietrzna 0,34.

Do ustalenia liczb granicznych dla przewodnictwa wodnego nasyconego wykorzystano klasyfikację Stryjewskiego (1977), Walczaka i in. (2002a) oraz wskaźniki korelacji z zawartością makroporów o średnicy równoważnej $>20\ \mu\text{m}$ i $>300\ \mu\text{m}$.

Opracowując klasyfikację przepuszczalności powietrznej korzystano z ustaleń Turskiego i in. (1978). Porównano uzyskane wyniki z zawartością makroporów o średnicy równoważnej $>20\ \mu\text{m}$ i $>300\ \mu\text{m}$ oraz korelacje z przewodnictwem wodnym nasyconym.

W niniejszej monografii przedstawiono jedynie część wyników badań nad niektórymi właściwościami fizycznymi obszernego zbioru gleb. Szczegółowe wyniki badań z projektu MNiSzW nr N N310 3088 34 zostaną przedstawione w następnych publikacjach.

4. WYNIKI I DYSKUSJA

Badane gleby pod względem składu granulometrycznego stanowiły zbiorowość obejmującą 400 utworów glebowych ze 100 poziomów Ap oraz 300 poziomów i warstw podpowierzchniowych. Stwierdzono znaczne różnice w zaliczeniu gleb do określonych grup granulometrycznych w porównaniu z poprzednio obowiązującym podziałem uziarnienia (PTG 1989), według którego planowano w 2007 r. omawiane badania. Okazało się, że wiele gleb zaliczanych uprzednio do podgrup granulometrycznych piasku gliniastego lekkiego pylastego i piasku gliniastego mocnego, według obecnie obowiązującego podziału kwalifikuje się do zaliczenia ich jako gliny piaszczyste (gp).

Według aktualnie obowiązującej klasyfikacji składu granulometrycznego (PTG 2009) najliczniej reprezentowane były utwory pyłowe: 179, w tym 57 pyłów gliniastych i 122 pyły ilaste. Gliny stanowiły łącznie 175 utworów, w tym gliny piaszczyste 84, gliny lekkie 38, gliny piaszczysto-ilaste 31, gliny zwykłe 14, gliny ilaste 6 i gliny pylasto-ilaste 2. Do utworów piaszczystych zaliczono łącznie 46 poziomów, w tym 35 jako piaski gliniaste, 8 jako piaski słabogliniaste i 3 piaski luźne.

Badana zbiorowość gleb zawierała 0-18,2% frakcji żwiru o wymiarach >2 mm, 11-95% frakcji piasku (2-0,05 mm), 2-79% pyłu (0,05-0,002 mm) i 1-35% iłu $<0,002$ mm. Z reguły poziomy Ap i Eet gleb płowych oraz poziomy Ap czarnoziemów i czarnych ziem charakteryzowały się mniejszą zawartością frakcji iłu, a większą zawartością frakcji piasku i pyłu niż głębsze poziomy genetyczne. Średnią zawartość poszczególnych frakcji granulometrycznych w wybranych typach i rodzajach gleb zamieszczono w tabeli 5.

Zawartość węgla organicznego wahała się w szerokich granicach od 0,3 do 44,4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. W poziomach Ap mieściła się w przedziale od 5,16 do 44,40 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, a w poziomach podpowierzchniowych od 0,42 do 27,75 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Największą zawartością C org. charakteryzowały się poziomy Ap i Aa czarnych ziem wytworzonych z glin zwałowych i utworów pyłowych (tab. 5). Najmniej węgla organicznego zawierały poziomy skały macierzyste w glebach płowych.

Gleby płowe najczęściej nie zawierały CaCO_3 , z wyjątkiem poziomu skały macierzyste Cca (tab. 5). W czarnoziemach węglan wapnia występował w poziomach Bbr i Cca (maksymalnie do 139,4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Natomiast zawartość węglanu wapnia w czarnych ziemiach dochodziła do 159,9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ w poziomie Ap i do 371,9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ w poziomach głębszych. Odczyn gleb wahał się w szerokim przedziale od silnie kwaśnego (pH 3,8) do zasadowego (pH 8,6). Najczęściej w badanych glebach występował odczyn słabo kwaśny (pH 6,0-6,5).

Zawartość łatwo przyswajalnego dla roślin fosforu była największa w czarnych ziemiach wytworzonych z glin (w poziomie Ap wynosiła średnio 192,0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a w poziomach głębszych 117,5-44,2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Najmniej przyswajalnej dla roślin formy fosforu (14,5-44,9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) zawierały gleby płowe wytworzone z piasków (tab. 5). Zasobność badanych gleb w łatwo przyswajalny dla roślin potas była mniej zróżnicowana niż zasobność w przyswajalny fosfor. Najwięcej przyswajalnego potasu również zawierały czarne ziemie wytworzone z glin (średnio 148,6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w poziomach Ap). Gleby te wykazywały się ponadto największą zasobnością w łatwo przyswajalny dla roślin magnez – średnio 138,2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w poziomie Ap i 268,2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w poziomie Aa (na głębokości 25-50 cm).

Kwasowość hydrolityczna w badanych glebach wynosiła średnio 0,51-1,57 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ (tab. 6). W składzie kationów wymiennych w kompleksie sorpcyjnym gleb dominowały zdecydowanie kationy wapnia. Największe stężenie kationów Ca^{2+} stwierdzono w poziomach Ap czarnych ziem wytworzonych z glin – 24,22 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ i utworów pyłowych – 21,34 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ oraz w poziomach Cca (75-100 cm) czarnoziemów wytworzonych z lessów – 41,35 $\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$.

Tabela 5. Skład granulometryczny i chemiczne właściwości gleb (wartości średnie)
Table 5. Soil texture and chemical properties of soils (mean values)

Typ gleby Soil type	Skala macierzysta Parent rock	Głębokość Depth (cm)	Zawartość frakcji o średnicy w mm Content of fraction of diameter in mm (%)				C org. (g·kg ⁻¹)	CaCO ₃ (g·kg ⁻¹)	Przyswajalne Available (mg·kg ⁻¹)		
			>2	2-0,05	0,05-0,002	<0,002			P	K	Mg
Płowe Luvisols	utwory pyłowe silt formations	0-25	0,0	21	71	8	8,15	0,55	74,4	118,8	65,9
		25-50	0,1	21	66	13	2,19	0,00	17,5	70,0	65,6
		50-75	0,6	33	48	19	1,12	0,00	22,5	60,7	84,1
		75-100	2,5	39	41	20	0,90	0,00	21,5	64,7	90,6
Czarne ziemie Mollic Gleysols	utwory pyłowe silt formations	0-25	0,2	29	61	10	17,23	14,01	122,2	97,3	75,8
		25-50	0,2	26	62	12	12,69	22,89	85,1	55,7	65,5
		50-75	0,2	27	56	17	5,91	25,25	41,0	55,8	50,8
		75-100	1,4	37	47	16	3,37	43,15	31,5	57,6	44,2
Płowe Luvisols	less loess	0-25	0,0	15	73	12	6,95	0,49	45,1	77,8	95,3
		25-50	0,0	15	67	18	2,09	0,04	32,0	54,9	106,0
		50-75	0,0	16	65	19	1,40	0,28	36,5	54,7	133,3
		75-100	0,0	16	67	17	1,15	7,52	31,0	52,6	130,7
Czarnoziemy Phaeozems	less loess	0-25	0,0	13	75	12	11,60	6,09	62,4	108,4	105,6
		25-50	0,0	13	72	15	6,98	17,61	19,3	53,0	110,8
		50-75	0,0	13	72	15	3,96	20,71	18,6	49,4	113,4
		75-100	0,0	13	72	15	2,50	36,05	24,6	56,2	116,2

Tabela 5. cd. Skład granulometryczny i chemiczne właściwości gleb (wartości średnie)
Table 5. Cont. Soil texture and chemical properties of soils (mean values)

Typ gleby Soil type	Skala macierzysta Parent rock	Głębokość Depth (cm)	Zawartość frakcji o średnicy w mm Content of fraction of diameter in mm (%)				C org. (g·kg ⁻¹)	CaCO ₃ (g·kg ⁻¹)	Przyswajalne Available (mg·kg ⁻¹)		
			>2	2-0,05	0,05-0,002	<0,002			P	K	Mg
Płowe Luvisols	gliny loams	0-25	2,6	62	29	9	7,27	0,35	87,8	132,3	65,1
		25-50	2,1	60	23	17	3,48	3,57	57,4	139,3	91,7
		50-75	2,2	60	22	18	1,52	12,46	24,3	99,1	101,7
		75-100	2,1	63	19	18	1,13	17,34	21,1	78,2	94,8
Czarne ziemie Mollic Gleysols	gliny loams	0-25	1,2	61	30	9	19,85	29,55	192,0	148,6	138,2
		25-50	1,9	61	26	13	10,45	18,78	117,5	105,4	268,2
		50-75	1,0	62	23	15	4,52	24,51	80,4	55,5	157,1
		75-100	1,2	64	19	17	3,01	32,21	44,2	57,6	142,4
Płowe Luvisols	piaski sands	0-25	1,0	73	22	5	7,61	0,00	44,9	103,5	38,8
		25-50	1,0	77	16	7	2,08	0,00	26,2	101,7	34,3
		50-75	0,8	67	17	16	1,25	0,00	14,5	136,6	83,5
		75-100	1,6	72	12	16	1,18	0,00	15,0	121,6	82,8
Czarne ziemie Mollic Gleysols	piaski sands	0-25	2,3	74	22	5	13,47	8,40	98,6	85,9	76,2
		25-50	3,5	77	17	6	7,10	4,47	23,4	40,5	62,5
		50-75	2,1	73	16	11	4,31	3,18	16,8	38,6	106,7
		75-100	1,6	71	16	13	3,98	14,08	54,2	48,5	118,7

Tabela 6. Właściwości fizykochemiczne gleb (wartości średnie)
Table 6. Physicochemical properties of soils (mean values)

Typ gleby Soil type	Skala macierzysta Parent rock	Głębokość Depth (cm)	pH KCl	cmol(+)·kg ⁻¹					S	T	V _s %
				Hh	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺			
Płowe Luvisols	utwory pyłowe silt formations	0-25	6,06	1,40	6,55	0,74	0,36	0,17	7,82	9,22	82,98
		25-50	5,54	1,29	5,53	0,81	0,21	0,18	6,73	8,02	82,28
		50-75	5,18	1,42	8,11	1,05	0,20	0,23	9,58	11,00	84,79
		75-100	5,02	1,56	10,22	1,12	0,24	0,29	11,87	13,43	84,07
Czarne ziemie Mollic Gleysols	utwory pyłowe silt formations	0-25	6,66	1,33	21,34	0,92	0,34	0,46	23,06	24,39	90,56
		25-50	6,86	1,09	25,03	0,83	0,20	0,52	26,58	27,68	93,49
		50-75	6,78	1,03	22,46	0,66	0,21	0,49	23,81	24,84	92,31
		75-100	6,75	0,91	24,26	0,60	0,20	0,53	25,59	26,50	93,16
Płowe Luvisols	less loess	0-25	5,57	1,54	7,43	1,01	0,31	0,20	8,94	10,48	82,87
		25-50	5,29	1,44	7,93	1,16	0,23	0,24	9,55	10,99	86,47
		50-75	5,32	1,28	8,71	1,44	0,22	0,24	10,61	11,89	89,02
		75-100	5,35	1,11	12,82	1,46	0,20	0,32	14,79	15,91	89,44
Czarnoziemy Phaeozems	less loess	0-25	6,15	1,34	20,07	1,27	0,40	0,45	22,20	23,54	91,19
		25-50	6,55	0,74	21,99	1,32	0,28	0,52	24,10	24,84	95,43
		50-75	6,95	0,59	25,71	1,42	0,23	0,59	27,95	28,54	96,34
		75-100	7,49	0,51	41,35	1,63	0,21	0,92	44,12	44,62	97,77

Hh – kwasowość hydrolityczna – hydrolytic acidity, S – suma kationów zasadowych – total exchangeable bases, T – pojemność wymiany kationów – cation exchange capacity, Vs – stopień wysycenia zasadami – base saturation.

Tabela 6. cd. Właściwości fizykochemiczne gleb (wartości średnie)
Table 6. Cont. Physicochemical properties of soils (mean values)

Typ gleby Soil type	Skala macierzysta Parent rock	Głębokość Depth (cm)	pH KCl	cmol(+)·kg ⁻¹						Vs %	
				Hh	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S		T
Płowe Luvisols	gliny loams	0-25	5,74	1,42	5,36	0,65	0,37	0,18	6,56	7,99	77,53
		25-50	5,59	1,18	11,09	1,02	0,37	0,30	12,78	13,95	88,39
		50-75	5,94	0,94	16,82	1,18	0,26	0,38	18,64	19,58	90,88
		75-100	6,06	0,91	16,17	1,15	0,23	0,38	17,94	18,84	92,24
Czarne ziemie Mollic Gleysols	gliny loams	0-25	7,34	1,06	24,22	1,77	0,46	0,56	27,02	28,08	94,97
		25-50	7,28	0,86	24,51	2,49	0,28	0,66	27,95	28,81	95,92
		50-75	7,32	0,84	23,02	2,24	0,19	0,59	26,04	26,88	94,08
		75-100	7,43	0,83	21,57	1,97	0,20	0,52	24,26	25,10	94,67
Płowe Luvisols	piaski sands	0-25	5,25	1,57	2,51	0,39	0,28	0,11	3,30	4,87	63,38
		25-50	5,39	1,27	2,20	0,33	0,23	0,08	2,84	4,11	60,30
		50-75	5,33	1,10	5,90	0,88	0,33	0,16	7,27	8,36	86,13
		75-100	5,34	1,11	6,18	0,85	0,28	0,16	7,46	8,58	85,67
Czarne ziemie Mollic Gleysols	piaski sands	0-25	6,15	1,17	14,78	0,84	0,21	0,32	16,16	17,33	87,79
		25-50	6,68	1,06	9,73	0,68	0,09	0,22	10,73	11,79	86,92
		50-75	6,79	0,97	9,15	1,13	0,11	0,22	10,60	11,58	85,54
		75-100	6,79	1,02	16,25	1,43	0,13	0,38	18,19	19,21	87,37

Hh – kwasowość hydrolityczna – hydrolytic acidity, S – suma kationów zasadowych – total exchangeable bases, T – pojemność wymiany kationów – cation exchange capacity, Vs – stopień wysycenia zasadami – base saturation.

Najmniejsze stężenie kationów wapnia występowało w glebach pławych wytworzonych z piasków – $2,20\text{--}6,18 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$. Największe wysycenie kationami wymiennymi Mg^{2+} stwierdzono w czarnych ziemiach wytworzonych z glin – $1,77\text{--}2,49 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$. Wysycenie kationami wymiennymi K^{+} było mało zróżnicowane i wahało się od 0,09 do $0,46 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, a wysycenie kationami wymiennymi Na^{+} wynosiło $0,08\text{--}0,92 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$.

W rezultacie czarne ziemie i czarnoziemy charakteryzowały się w całym profilu znacznie większą sumą kationów zasadowych (S) i pojemnością wymiany kationów (T) od gleb pławych wytworzonych z tych samych skał macierzystych (tab. 6). Największą pojemność wymiany kationów miały czarne ziemie wytworzone z glin – $28,08\text{--}25,10 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, a najmniejszą pojemność gleby pławie wytworzone z piasków – $4,11\text{--}8,58 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$. Stopień wysycenia kompleksu sorpcyjnego gleb kationami wymiennymi o charakterze zasadowym (V_s) najwyższe wartości uzyskiwał w czarnych ziemiach wytworzonych z glin i utworów pyłowych oraz w czarnoziemach (90,56–97,77%). Najniższy stopień wysycenia zasadami występował w glebach pławych wytworzonych z piasków (60,30–86,13%).

Na podstawie porównania uzyskanych wyników badań z danymi literaturowymi, dotyczącymi jakości struktury i właściwości wodno-powietrznych gleb (Braunack i Dexter 1989, Le Bissonnais 1996, Olness i in. 1998, Dexter 2004a, Reynolds i in. 2008) stwierdzono, że jako kryteria do oceny jakości stanu fizycznego gleb Polski najbardziej przydatne są następujące właściwości:

- zawartość powietrznie suchych agregatów glebowych o wymiarach 1–10 mm,
- zawartość wodoodpornych agregatów glebowych o wymiarach 1–10 mm,
- zawartość mezoporów o średnicy równoważnej $0,2\text{--}20 \mu\text{m}$, które retencjonują wodę użyteczną dla roślin,
- zawartość makroporów o średnicy równoważnej $>20 \mu\text{m}$, określającą pojemność powietrzną gleby przy polowej pojemności wodnej.

4.1. Skład agregatowy

Skład agregatowy badanych gleb był bardzo zróżnicowany (tab. 7). Zawartość brył o wymiarach $>10 \text{ mm}$ wynosiła od $0,0 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w glebach o składzie piasku luźnego do $0,943 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w glebie o składzie gliny lekkiej (średnio $0,429 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Udział powietrznie suchych makroagregatów o wymiarach $0,25\text{--}10 \text{ mm}$ wynosił od $0,052$ do $0,873 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (średnio $0,516 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Z kolei udział powietrznie suchych mikroagregatów o wymiarach $<0,25 \text{ mm}$ wahał się od $0,003$ do $0,447 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (średnio $0,055 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Zróżnicowanie składu agregatowego wynikało głównie z różnic

w składzie granulometrycznym gleb, a ponadto zależało od poziomu genetycznego i głębokości warstwy.

Zawartość powietrznie suchych elementów strukturalnych o wymiarach 0,25-10 mm była największa w glebach o składzie piasków (średnio 0,799-0,646 kg·kg⁻¹), przy czym w rzeczywistości większość z nich nie stanowiła agregatów glebowych lecz niepołączone ze sobą ziarna piasku bardzo grubego, grubego i średniego (tab. 7). Najmniejszą zawartość agregatów 0,25-10 mm wykazywały gleby o składzie glin piaszczysto-ilastych (średnio 0,337 kg·kg⁻¹). Zawartość agregatów powietrznie suchych 0,25-10 mm korelowała ściśle dodatnio z zawartością C org. ($r = 0,29$) i zawartością frakcji piasku o wymiarach 2-0,05 mm ($r = 0,13$) (tab. 8). Ponadto zawartość agregatów 0,25-10 mm korelowała ujemnie z zawartością frakcji łu ($r = -0,53$), co wynikało z dużego udziału brył >10 mm w glebach o największej zawartości tej frakcji. Jako najbardziej korzystną dla właściwości gleb i wzrostu roślin uprawnych uznano największą zawartość agregatów o wymiarach 0,25-10 mm, mieszczącą się w przedziale 0,600-0,745 kg·kg⁻¹, wśród których >0,280 kg·kg⁻¹ stanowiły agregaty 1-5 mm.

Tabela 7. Zawartość powietrznie suchych agregatów glebowych o wymiarach 0,25-10 mm

Table 7. Content of air-dry soil aggregates with sizes of 0.25-10 mm

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum (kg·kg ⁻¹)	Wartość najwyższa Maximum (kg·kg ⁻¹)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean (kg·kg ⁻¹)	Odchylenie standardowe Standard deviation (kg·kg ⁻¹)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,497	0,872	0,799	0,114	14,2
Piaski gliniaste Loamy sands	0,221	0,842	0,646	0,119	18,4
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,195	0,818	0,525	0,130	24,9
Gliny lekkie – Light loams	0,052	0,668	0,454	0,127	28,0
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,132	0,546	0,337	0,132	39,1
Gliny zwykłe – Loams	0,091	0,629	0,433	0,127	29,3
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,179	0,822	0,521	0,202	38,8
Pyły gliniaste – Loamy silts	0,349	0,740	0,559	0,088	15,7
Pyły ilaste – Clay silts	0,151	0,745	0,501	0,116	23,2

Tabela 8. Współczynniki korelacji (r) pomiędzy zawartością frakcji granulometrycznych, C org. i CaCO_3 a składem agregatowym i zawartością wodoodpornych agregatów glebowych ($n = 400$)

Table 8. Correlation coefficients (r) between content of granulometric fractions, C org. and CaCO_3 content and aggregate size distribution and water-stable aggregate content ($n = 400$)

Zmienna Variable	Zawartość frakcji – Content of fractions (%)			C org. (g·kg ⁻¹)	CaCO ₃ (g·kg ⁻¹)
	2-0,05 mm	0,05-0,002 mm	<0,002 mm		
Agregaty powietrznie suche – Air-dry aggregates (kg·kg ⁻¹)					
>10 mm	-0,12*	-0,06	0,61**	-0,28**	0,05
0,25-10 mm	0,13*	0,00	-0,53**	0,29**	-0,03
1-10 mm	-0,50**	0,50**	0,15*	0,16**	-0,01
1-5 mm	-0,46**	0,51**	-0,05	0,27**	0,02
MWD _{dry}	-0,07	-0,07	0,40**	-0,26**	0,06
Agregaty wodoodporne – Water-stable soil aggregates (kg·kg ⁻¹)					
0,25-10 mm	0,43**	-0,40**	-0,21**	0,52**	0,11*
1-10 mm	0,24**	-0,20**	-0,19**	0,49**	0,11*
1-5 mm	0,20**	-0,20**	-0,05	0,41**	0,12*
MWD _{wet}	0,27**	-0,20**	-0,31**	0,52**	0,09

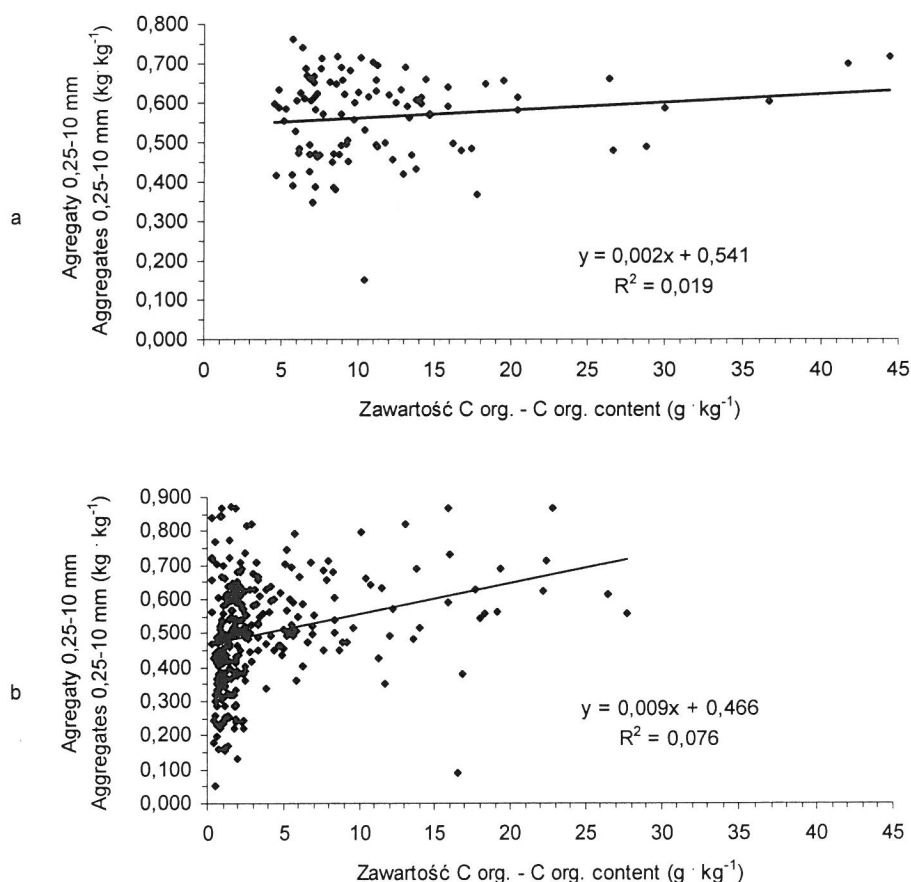
*poziom istotności $\alpha = 0,05$ – significance level 0.05, ** poziom istotności $\alpha = 0,01$ – significance level 0.01.

Zależność zawartości powietrznie suchych agregatów glebowych o wymiarach 0,25-10 mm od zawartości węgla organicznego w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunku 1.

Znaczny udział ziaren piasku w zawartości agregatów powietrznie suchych o wymiarach 0,25-10 mm powoduje, że wskaźnik ten nie jest dobrym kryterium do oceny jakości struktury glebowej. Wprowadzenie do obliczeń poprawki na zawartość piasku o wymiarach 0,25-2 mm również nie jest właściwym rozwiązaniem, ponieważ część tej frakcji wchodzi w skład agregatów. Ziarna piasku o wymiarach 0,25-2 mm w badanych glebach stanowiły zmienny udział – od kilku do kilkudziesięciu procent, w zależności od grupy granulometrycznej i wymiarów agregatów.

Znacznie bardziej odpowiednim wskaźnikiem do oceny jakości agregacji jest zawartość agregatów powietrznie suchych o wymiarach 1-10 mm, która w badanych glebach mieściła się w przedziale 0,038-0,655 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (tab. 9). Najmniej agregatów tej wielkości zawierały gleby o składzie piasków luźnych i słaboglinia-

stych (średnio $0,143 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), a najwięcej gleby o składzie glin ilastych i pylasto-ilastych ($0,427 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) oraz pyłów gliniastych ($0,408 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$).



Rys. 1. Zależność zawartości powietrznie suchych agregatów 0,25-10 mm od zawartości C org.: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 1. Dependence of content of air-dry soil aggregates 0,25-10 mm on C org. content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Zawartość powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm wykazywała dodatnią korelację z zawartością frakcji pyłu ($r = 0,50$), zawartością ilu ($r = 0,15$) i węgla organicznego ($r = 0,16$) (tab. 8). Zależność zawartości powietrznie suchych

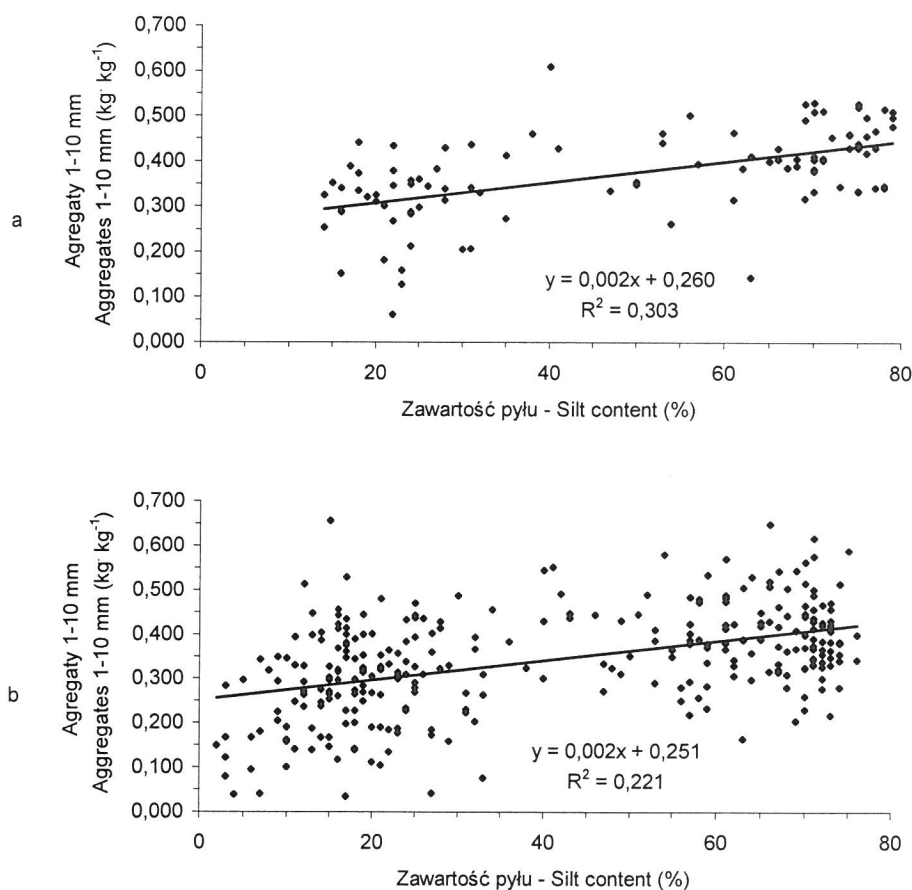
agregatów glebowych o wymiarach 1-10 mm od zawartości frakcji pyłowej w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunku 2.

Tabela 9. Zawartość powietrznie suchych agregatów glebowych o wymiarach 1-10 mm
Table 9. Content of air-dry soil aggregates with sizes of 1-10 mm

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum (kg·kg ⁻¹)	Wartość najwyższa Maximum (kg·kg ⁻¹)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean (kg·kg ⁻¹)	Odchylenie standardowe Standard deviation (kg·kg ⁻¹)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,038	0,296	0,143	0,085	59,4
Piaski gliniaste Loamy sands	0,060	0,434	0,257	0,083	32,5
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,041	0,655	0,332	0,099	29,8
Gliny lekkie – Light loams	0,034	0,528	0,331	0,098	29,7
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,104	0,469	0,275	0,112	40,7
Gliny zwykłe – Loams	0,076	0,446	0,340	0,099	29,1
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,159	0,551	0,427	0,141	33,1
Pyły gliniaste Loamy silts	0,205	0,527	0,408	0,074	18,1
Pyły ilaste – Clay silts	0,144	0,649	0,399	0,093	23,3

Na podstawie porównania uzyskanych wyników badań oraz danych z literatury (Braunack i Dexter 1989, Amézketa 1999, Bronick i Lal 2005) można przyjąć schematyczną klasyfikację jakości agregacji gleby według zawartości powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm: zawartość $\leq 0,150$ kg·kg⁻¹ – skład agregatowy bardzo niekorzystny, 0,151-0,250 kg·kg⁻¹ – skład agregatowy niekorzystny, 0,251-0,350 kg·kg⁻¹ – skład agregatowy średnio korzystny, 0,351-0,450 kg·kg⁻¹ – skład agregatowy korzystny i $> 0,450$ kg·kg⁻¹ – skład agregatowy bardzo korzystny. Gleby o zawartości agregatów o wymiarach 1-10 mm > 450 kg·kg⁻¹ charakteryzowały się równocześnie największym udziałem agregatów 1-5 mm (najczęściej $> 0,270$ kg·kg⁻¹) i agregatów 5-10 mm ($> 0,180$ kg·kg⁻¹). Natomiast gleby zawierają-

ce $\leq 0,150 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ agregatów 1-10 mm stanowiły piaski luźne i słabogliniaste albo zawierały $>0,800 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ brył o wymiarach $>10 \text{ mm}$.



Rys. 2. Zależność zawartości powietrznie suchych agregatów 1-10 mm od zawartości pyłu: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 2. Dependence of content of air-dry soil aggregates on silt content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Zawartość powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-5 mm, najbardziej korzystnych dla wzrostu roślin, była największa w glebach o składzie granulometrycznym pyłów gliniastych (średnio $0,254 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) oraz glin ilastych i pylasto-ilastych ($0,235 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (tab. 10). Najmniej agregatów o wymiarach 1-5 mm za-

wierały gleby wytworzone z piasków luźnych i słabogliniastych ($0,093 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Zawartość powietrznie suchych agregatów 1-5 mm korelowała ściśle dodatnio z zawartością frakcji pyłu ($r = 0,51$) i C org. ($r = 0,27$) – tabela 8.

Tabela 10. Zawartość powietrznie suchych agregatów glebowych o wymiarach 1-5 mm

Table 10. Content of air-dry soil aggregates with sizes of 1-5 mm

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Wartość najwyższa Maximum ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Odchylenie standardowe Standard deviation ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,021	0,232	0,093	0,061	66,2
Piaski gliniaste Loamy sands	0,048	0,262	0,161	0,052	32,6
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,038	0,368	0,188	0,060	32,1
Gliny lekkie Light loams	0,016	0,283	0,183	0,060	33,0
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,043	0,230	0,127	0,063	49,6
Gliny zwykłe Loams	0,036	0,278	0,180	0,061	33,8
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,055	0,385	0,235	0,110	47,0
Pyły gliniaste Loamy silts	0,128	0,357	0,254	0,051	20,1
Pyły ilaste Clay silts	0,050	0,452	0,226	0,068	30,1

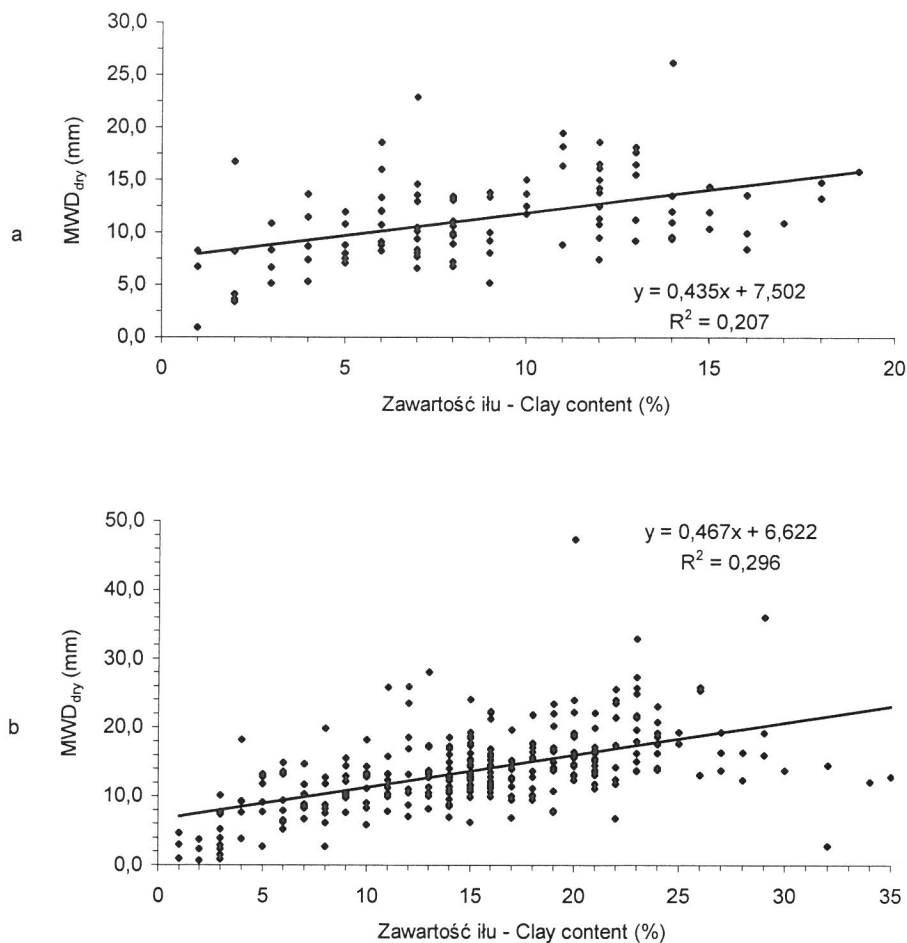
Średnia ważona średnica agregatów powietrznie suchych (MWD_{dry}) w badanych glebach wahała się w szerokich granicach, od 0,7 do 47,3 mm i była bardzo zróżnicowana w zależności od składu granulometrycznego. W glebach o składzie piasków luźnych i słabogliniastych była najmniejsza i wynosiła średnio 4,0-mm, co wynikało ze znacznego udziału nie połączonych ziaren piasku (tab. 11). Największą średnią ważoną średnicę agregatów powietrznie suchych stwierdzono w glebach o składzie glin piaszczysto-ilastych (20,0 mm) i glin lekkich (15,7 mm), zawierających najwięcej brył o wymiarach >10 mm. Natomiast najbardziej korzystną średnią

ważoną średnicą agregatów powietrznie suchych charakteryzowały się gleby o składzie pyłów gliniastych – od 5,2 do 18,5 mm (średnio 10,9 mm).

Tabela 11. Średnia ważona średnica powietrznie suchych agregatów glebowych
Table 11. Weighted mean diameter of air-dry soil aggregates

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum (mm)	Wartość najwyższa Maximum (mm)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean (mm)	Odchylenie standardowe Standard deviation (mm)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabo gliniaste – Sands	0,7	10,3	4,0	3,4	84,7
Piaski gliniaste Loamy sands	0,9	23,5	7,7	4,2	55,5
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,7	28,0	13,5	5,1	37,8
Gliny lekkie Light loams	5,2	47,3	15,7	7,0	44,4
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	12,3	36,0	20,0	5,8	29,1
Gliny zwykłe Loams	10,4	20,8	14,9	2,7	18,2
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	2,7	19,2	13,2	4,8	36,0
Pyły gliniaste Loamy silts	5,2	18,5	10,9	2,7	24,9
Pyły ilaste Clay silts	6,2	26,1	13,6	3,8	27,7

Średnia ważona średnica agregatów wykazywała ścisłą dodatnią korelację z zawartością frakcji iltu ($r = 0,40$) i ujemną korelację z zawartością C org. ($r = -0,26$) (tab. 8). Zależność pomiędzy zawartością frakcji iltu $<0,002$ mm a średnią ważoną średnicą agregatów powietrznie suchych w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność średniej ważonej średnicy powietrznie suchych agregatów (MWD_{dry}) od zawartości ilu: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 3. Dependence of mean weight diameter of air-dry soil aggregates (MWD_{dry}) on clay content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Na podstawie porównania uzyskanych wyników można następująco sklasyfikować jakość składu agregatowego według wartości średniej ważonej średnicy agregatów powietrznie suchych: $MWD_{dry} \leq 5$ mm – skład agregatowy bardzo rozdrobniony, 5,1-7,0 mm – skład agregatowy rozdrobniony, 7,1-10,0 mm – skład agregatowy bardzo korzystny, 10,1-13,0 mm – skład agregatowy korzystny, 13,1-16,0 mm – skład agregatowy średnio korzystny, 16,1-20,0 mm – skład agregatowy

zbrylony i $>20,0$ mm – skład agregatowy bardzo zbrylony. Gleby o wartościach MWD_{dry} 7,1-10,0 mm charakteryzowały się największą zawartością agregatów o wymiarach 1-10 mm (najczęściej $>0,500$ $kg \cdot kg^{-1}$), w tym agregatów 1-5 mm ($>0,270$ $kg \cdot kg^{-1}$). Natomiast gleby o wartościach $MWD_{dry} >20$ mm zawierały zwykle w składzie agregatowym 0,600-0,943 $kg \cdot kg^{-1}$ brył o wymiarach >10 mm.

4.2. Wodoodporność agregatów glebowych

Powietrznie suche agregaty glebowe podczas przesiewania w wodzie najczęściej rozpadały się na drobniejsze frakcje, w tym na mikroagregaty o wymiarach $<0,25$ mm. Elementy strukturalne pochodzące z gleb wytworzonych z piasków gliniastych i glin po przesiewaniu w wodzie stanowiły w większości oddzielne ziarna piasku. Zróżnicowanie wodoodporności elementów strukturalnych było bardzo duże i wynikało głównie z przynależności do określonego poziomu genetycznego i zawartości węgla organicznego, natomiast w mniejszym stopniu z różnic w składzie granulometrycznym. Wartości najwyższe pochodziły zwykle z poziomów Ap, natomiast wartości najniższe z głębszych poziomów genetycznych (przede wszystkim z warstwy 75-100 cm). Zawartość wodoodpornych elementów strukturalnych (agregatów i ziaren piasku) o wymiarach 0,25-10 mm była największa w glebach o składzie glin piaszczysto-ilastych (średnio 0,614 $kg \cdot kg^{-1}$), a najmniejsza w glebach o składzie pyłów ilastych (średnio 0,338 $kg \cdot kg^{-1}$) – tabela 12. Uziarnienie pyłów ilastych było charakterystyczne dla poziomów Bt gleb płowych wytworzonych z lessu i utworów pyłowych oraz poziomów głębszych czarnoziemów, które charakteryzowały się znacznie mniejszą wodoodpornością agregatów od poziomów Ap i A.

Analiza statystyczna wykazała, że zawartość trwałych elementów strukturalnych o wymiarach 0,25-10 mm korelowała ściśle dodatnio z zawartością C org. ($r = 0,52$), frakcją piasku ($r = 0,43$) i słabo z zawartością $CaCO_3$ ($r = 0,11$), a ściśle ujemnie z zawartością frakcją pyłu ($r = -0,40$) i ilu ($r = -0,21$) (tab. 8). Zależność zawartości wodoodpornych agregatów glebowych o wymiarach 0,25-10 mm od zawartości węgla organicznego w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunku 4.

Dodatnia korelacja z frakcją piasku jest nieoczekiwana, lecz wynika głównie z dużego udziału frakcji piasku w trwałych elementach strukturalnych, ponieważ nie uwzględniono poprawki piaskowej. Ponadto w badanej zbiorowości największą wodoodpornością charakteryzowały się poziomy Ap czarnych ziem i gleb płowych, zazwyczaj zawierające więcej frakcji piasku, niż poziomy głębsze.

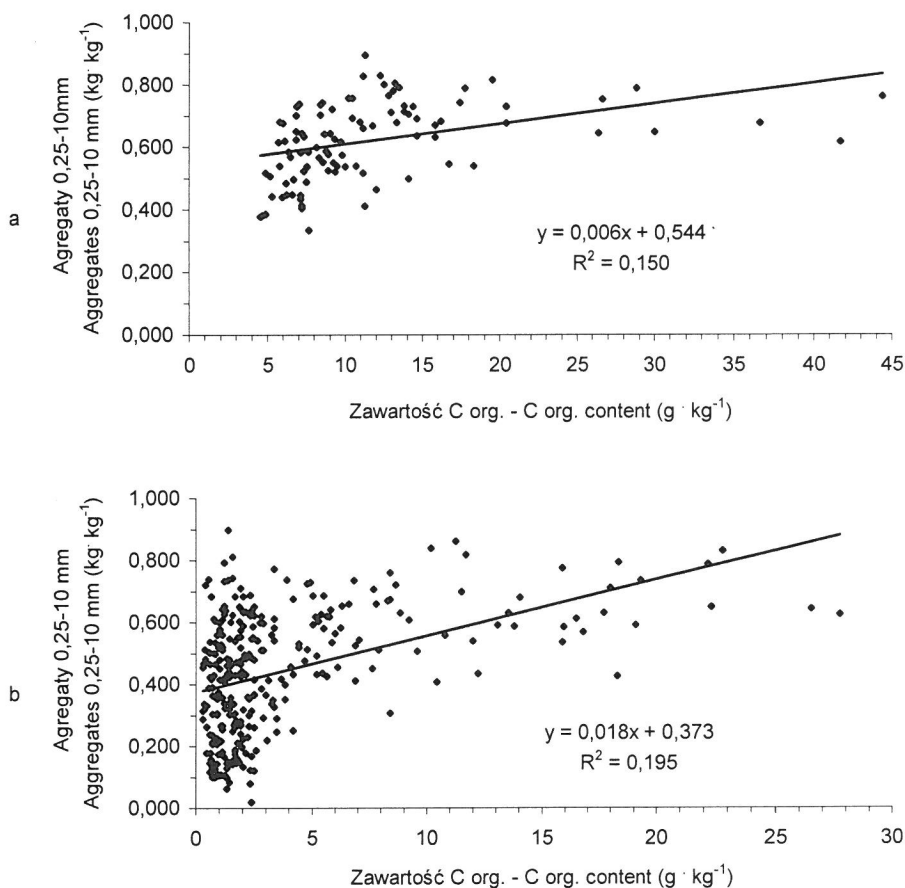
Z kolei ujemne korelacje z frakcją pyłu i frakcją iltu wynikały ze słabej wodoodporności agregatów w podpowierzchniowych poziomach genetycznych (w warstwie 50-75 i 75-100 cm), zawierających zwykle największą tych frakcji.

Tabela 12. Zawartość wodoodpornych agregatów o wymiarach 0,25-10 mm

Table 12. Content of water-stable soil aggregates with sizes of 0.25-10 mm

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum (kg·kg ⁻¹)	Wartość najwyższa Maximum (kg·kg ⁻¹)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean (kg·kg ⁻¹)	Odchylenie standardowe Standard deviation (kg·kg ⁻¹)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,205	0,837	0,526	0,235	44,7
Piaski gliniaste Loamy sands	0,209	0,894	0,581	0,157	27,1
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,353	0,860	0,577	0,121	21,0
Gliny lekkie Light loams	0,178	0,816	0,512	0,182	35,5
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,254	0,896	0,614	0,121	19,6
Gliny zwykłe Loams	0,207	0,729	0,424	0,132	31,2
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,300	0,723	0,565	0,177	31,4
Pyły gliniaste Loamy silts	0,105	0,829	0,513	0,188	36,7
Pyły ilaste Clay silts	0,018	0,803	0,338	0,183	54,2

Podobnie jak w przypadku zawartości powietrznie suchych agregatów 0,25-10 mm, również w zawartości wodoodpornych agregatów 0,25-10 mm znaczny udział mają ziarna piasku grubego (1-0,5 mm) i średniego (0,5-0,25 mm), które zmniejszają różnice pomiędzy glebami wytworzonymi z piasków i glin a glebami wytworzonymi z pyłów. Dlatego stwierdzono, że zawartość trwałych agregatów o wymiarach 0,25-10 mm nie jest dobrym kryterium oceny wodoodporności agregatów glebowych.



Rys. 4. Zależność zawartości wodoodpornych agregatów 0,25-10 mm od zawartości C org.: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 4. Dependence of content of water-stable soil aggregates of 0,25-10 mm on C org. content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Zawartość trwałych agregatów o wymiarach 1-10 mm wykazywała duże różnice pomiędzy glebami zaliczanymi do poszczególnych grup i podgrup granulometrycznych, jak i wewnątrz grup (tab. 13). Świadczą o tym wysokie wartości współczynników zmienności, przekraczające 100%. Najwięcej wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm zawierały gleby o składzie glin piaszczysto-ilastych (średnio 0,224 kg·kg⁻¹) i glin piaszczystych (0,202 kg·kg⁻¹). Najmniejszą zawartość trwałych agregatów 1-10 mm stwierdzono w glebach o składzie piasków luźnych

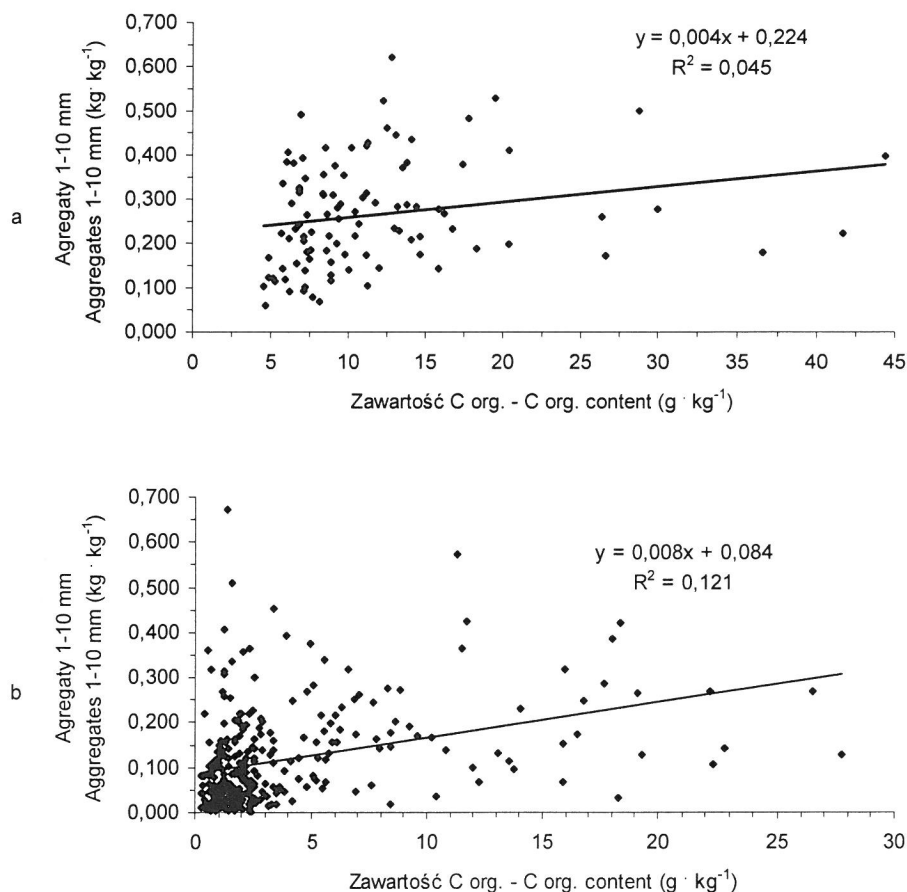
i słabogliniastych (średnio $0,055 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) oraz pyłów ilastych ($0,080 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Analiza korelacji wykazała podobne zależności jak w przypadku wodoodpornych agregatów $0,25\text{-}10 \text{ mm}$ – dodatnią korelację z zawartością C org. ($r = 0,49$) i frakcją piasku ($r = 0,24$), ale wartości współczynników korelacji były niższe (tab. 8). Zależność zawartości wodoodpornych agregatów glebowych o wymiarach $1\text{-}10 \text{ mm}$ od zawartości węgla organicznego w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunku 5.

Tabela 13. Zawartość wodoodpornych agregatów o wymiarach $1\text{-}10 \text{ mm}$

Table 13. Content of water-stable aggregates with sizes of $1\text{-}10 \text{ mm}$

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Wartość najwyższa Maximum ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Odchylenie standardowe Standard deviation ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,007	0,165	0,055	0,055	100,2
Piaski gliniaste Loamy sands	0,022	0,461	0,195	0,126	64,5
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,007	0,571	0,202	0,127	63,0
Gliny lekkie Light loams	0,007	0,423	0,169	0,133	78,5
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,016	0,670	0,224	0,143	63,7
Gliny zwykłe Loams	0,014	0,375	0,109	0,097	89,7
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,064	0,270	0,168	0,079	47,3
Pyły gliniaste Loamy silts	0,010	0,621	0,178	0,145	81,0
Pyły ilaste Clay silts	0,001	0,381	0,080	0,084	104,0

Dodatnia zależność udziału trwałych agregatów o wymiarach 1-10 mm od zawartości frakcji piasku wynika z faktu, że największą wodoodpornością charakteryzowały się poziomy Ap czarnych ziem i gleb płowych, zawierające więcej frakcji piasku, niż ich poziomy głębsze, o małej wodoodporności. Natomiast ujemne korelacje z frakcją pyłu i frakcją łu wynikały ze słabej wodoodporności agregatów z podpowierzchniowych poziomów genetycznych gleb (Bt, BC, C), zawierających zwykle najwięcej tych frakcji.



Rys. 5. Zależność zawartości wodoodpornych agregatów 1-10 mm od zawartości C org.: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 5. Dependence of content of water-stable soil aggregates of 1-10 mm on C org. content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Przedstawione wyniki oznaczeń wodoodporności elementów strukturalnych wskazują, że zawartość trwałych agregatów o wymiarach 1-10 mm może być dobrym kryterium oceny jakości wodoodporności agregatów glebowych. Na podstawie porównania analiz statystycznych uzyskanych wyników z klasyfikacjami innych autorów (Kuzniecowa 1978, Le Bissonnais 1996, Dilkova i in. 2002) ustalono następujące liczby graniczne dla oceny jakości wodoodporności agregatów: zawartość wodoodpornych agregatów 1-10 mm $\leq 0,070 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – wodoodporność bardzo mała (bardzo słaba), $0,071-0,150 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – wodoodporność mała (słaba), $0,151-0,250 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – wodoodporność średnia, $0,251-0,400 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – wodoodporność duża (dobra) i $>0,400 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – wodoodporność bardzo duża (bardzo dobra).

Zawartość wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-5 mm, najbardziej korzystnych dla wzrostu roślin, była największa w glebach o składzie granulometrycznym glin piaszczysto-ilastych (średnio $0,191 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) oraz glin ilastych i pyłasto-ilastych ($0,151 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (tab. 14). Najmniej agregatów trwałych 1-5 mm zawierały gleby o składzie piasków luźnych i słabogliniastych ($0,051 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) oraz pyłów ilastych ($0,069 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Zawartość wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-5 mm korelowała ściśle dodatnio z zawartością Corg. ($r = 0,41$) i zawartością piasku ($r = 0,20$) (tab. 8).

Średnia ważona średnica agregatów trwałych (MWD_{wet}) wahała się w badanych glebach w przedziale od 0,13 do 3,55 mm (tab. 15). Bardziej właściwe byłoby określenie jej jako średnia ważona średnica wodoodpornych elementów strukturalnych, ponieważ jej wielkość wynikała ze znacznego udziału ziaren piasku grubego (1-0,5 mm) i średniego (0,5-0,25 mm). Najwyższe wartości tego wskaźnika stwierdzono w glebach o składzie glin piaszczystych (średnio 1,15 mm) i piasków gliniastych (1,03 mm), a najniższe w glebach o składzie piasków luźnych i słabogliniastych (0,44 mm) oraz pyłów ilastych (0,46 mm). Przyczyną bardzo małej wartości MWD_{wet} w glebach o składzie pyłów ilastych była ich przynależność do poziomów głębszych (Bt, BC, C) bardzo słabo odpornych na działanie wody. MWD_{wet} była ściśle dodatnio skorelowana z zawartością C org. ($r = 0,41$), zawartością piasku ($r = 0,20$) oraz słabo dodatnio z zawartością CaCO_3 ($r = 0,12$) (tab. 8).

Wpływ zawartości węgla organicznego na średnią ważoną średnicę agregatów wodoodpornych w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych gleb przedstawiono na rysunku 6.

Tabela 14. Zawartość wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-5 mm**Table 14.** Content of water-stable aggregate with sizes of 1-5 mm

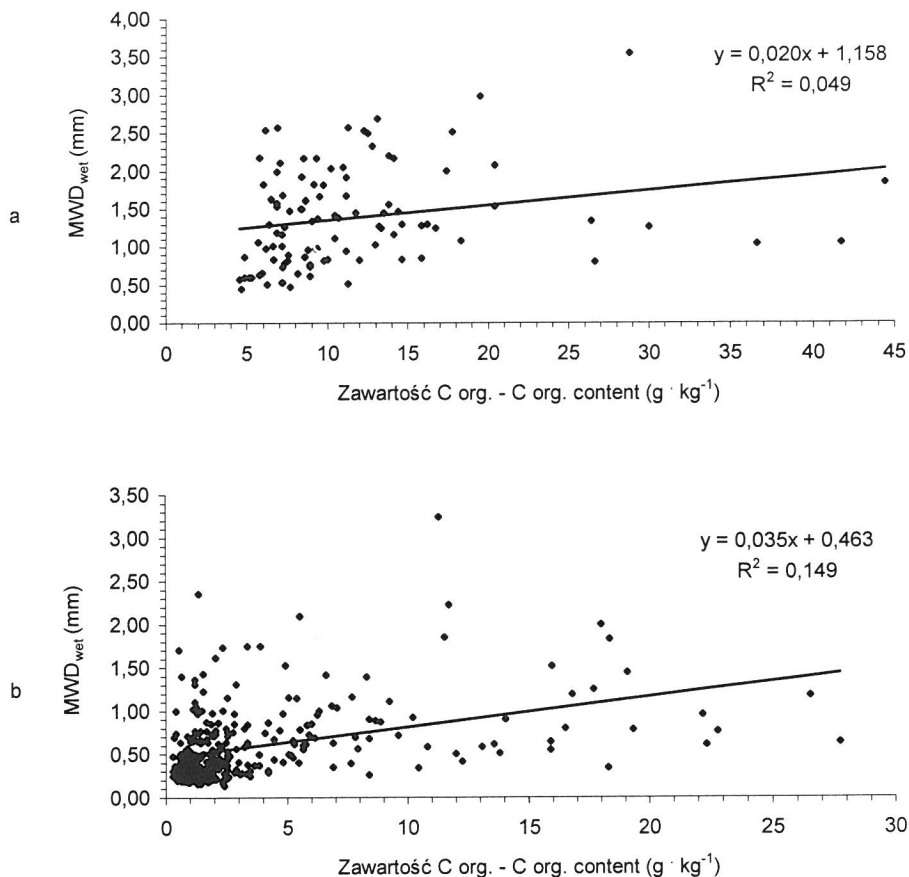
Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum (kg·kg ⁻¹)	Wartość najwyższa Maximum (kg·kg ⁻¹)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean (kg·kg ⁻¹)	Odchylenie standardowe Standard deviation (kg·kg ⁻¹)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,007	0,135	0,051	0,048	95,5
Piaski gliniaste Loamy sands	0,022	0,240	0,116	0,060	52,2
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,007	0,380	0,144	0,075	51,9
Gliny lekkie Light loams	0,007	0,284	0,124	0,084	68,0
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,015	0,546	0,191	0,117	61,5
Gliny zwykłe Loams	0,014	0,320	0,093	0,086	92,1
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,058	0,259	0,151	0,079	52,3
Pyły gliniaste Loamy silts	0,008	0,483	0,128	0,096	74,7
Pyły ilaste Clay silts	0,001	0,279	0,069	0,065	95,2

Zaproponowana przez Le Bissonnais (1996) klasyfikacja trwałości agregatów glebowych, na podstawie średniej ważonej średnicy agregatów wodoodpornych (MWD_{wet}) okazała się przydatna również przy zastosowaniu aparatu Bakszejewa. Przyjęte przez tego autora liczby graniczne: $MWD_{wet} < 0,4$ mm – agregaty są bardzo nietrwałe, 0,4-0,8 mm – agregaty nietrwałe, 0,8-1,3 mm – agregaty średnio trwałe, 1,3-2,0 mm – agregaty trwałe i powyżej 2,0 mm – agregaty bardzo trwałe są wiarygodne i zasługują na ich stosowanie do oceny jakości struktury agregato-

wej gleb o zbliżonym składzie granulometrycznym. Natomiast stosowanie tej klasyfikacji do porównywania gleb o diametralnie różnicowanym uziarnieniu nie jest uzasadnione.

Tabela 15. Średnia ważona średnica wodoodpornych agregatów glebowych
Table 15. Weighted mean diameter of water-stable soil aggregates

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum (mm)	Wartość najwyższa Maximum (mm)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean (mm)	Odchylenie standardowe Standard deviation (mm)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,20	0,93	0,44	0,23	53,4
Piaski gliniaste Loamy sands	0,31	2,69	1,15	0,75	65,0
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,25	3,55	1,03	0,66	64,3
Gliny lekkie Light loams	0,21	2,23	0,87	0,61	70,2
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,24	2,35	0,94	0,49	51,3
Gliny zwykłe Loams	0,22	1,52	0,56	0,33	59,3
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,38	1,00	0,74	0,24	32,9
Pyły gliniaste Loamy silts	0,20	2,57	0,92	0,66	71,3
Pyły ilaste Clay silts	0,13	1,81	0,46	0,33	72,0



Rys. 6. Zależność średniej ważonej średnicy wodoodpornych agregatów (MWD_{wet}) od zawartości C org.: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 6. Dependence of mean weight diameter of water-stable soil aggregates (MWD_{wet}) on C org. content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

4.3. Gęstość i porowatość ogólna gleby

Gęstość fazy stałej w badanych glebach była mało zróżnicowana i wynosiła najczęściej $2,59$ - $2,62 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ w poziomach Ap i $2,63$ - $2,70 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ w pozostałych poziomach genetycznych. Tylko w poziomach Ap i Aa czarnych ziem murszastych o największej zawartości węgla organicznego gęstość fazy stałej wynosiła $2,47$ - $2,55 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Gęstość badanych gleb wytworzonych z różnych skał macierzystych wahała się w przedziale od 1,12 do 1,68 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach Ap i od 1,19 do 1,93 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach głębszych (tab. 16). Najbardziej zagęszczone były gleby wytworzone z glin zwałowych o składzie granulometrycznym glin piaszczysto-ilastych, których gęstość wynosiła średnio w profilu 1,72 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Najmniejszą gęstością charakteryzowały się gleby wytworzone z lessów i pyłów lessopodobnych o składzie pyłu gliniastego (średnio 1,38 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) i pyłu ilastego (1,45 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Tabela 16. Gęstość gleby

Table 16. Bulk density

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Wartość najwyższa Maximum ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Odchylenie standardowe Standard deviation ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	1,43	1,79	1,58	0,09	5,9
Piaski gliniaste Loamy sands	1,39	1,79	1,62	0,11	6,9
Gliny piaszczyste Sandy loams	1,12	1,93	1,61	0,16	10,0
Gliny lekkie Light loams	1,40	1,85	1,66	0,11	6,4
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	1,53	1,91	1,72	0,08	4,7
Gliny zwykłe Loams	1,20	1,84	1,57	0,16	10,4
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	1,32	1,73	1,51	0,14	9,2
Pyły gliniaste Loamy silts	1,15	1,64	1,38	0,11	7,6
Pyły ilaste Clay silts	1,19	1,71	1,45	0,10	7,1

Gęstość gleby wykazywała ścisłą korelację dodatnią z zawartością frakcji piasku ($r = 0,59$) i iłu ($r = 0,17$) oraz ujemną korelację z zawartością frakcji pyłu ($r = -0,68$) i C org. ($r = -0,47$). Ponadto gęstość gleby korelowała dodatnio ze średnią ważoną

średnicą agregatów powietrznie suchych ($r = 0,35$). Z pozostałymi wskaźnikami struktury wykazywała ona korelację ujemną lub nie wykazywała żadnej korelacji (tab. 17-18). Zależność gęstości gleby od zawartości frakcji piasku (2-0,05 mm) w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunku 7.

Tabela 17. Współczynniki korelacji (r) pomiędzy zawartością frakcji granulometrycznych, C org. i CaCO_3 a właściwościami wodno-powietrznymi gleb ($n = 400$)

Table 17. Correlation coefficients (r) between content of granulometric fractions, C org. content and water-air properties of soils ($n = 400$)

Zmienna – Variable	Zawartość frakcji Content of fractions (%)			C org. ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	CaCO_3 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
	2-0,05 mm	0,05-0,002 mm	<0,002 mm		
Gęstość gleby Bulk density ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0,59**	-0,68**	0,17**	-0,47**	0,00
Porowatość ogólna Total porosity ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	-0,63**	0,72**	-0,13*	0,38**	-0,01
Półowa pojemność wodna Field water capacity ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	-0,85**	0,83**	0,29**	0,21**	-0,05
Punkt trwałego wędnięcia Wilting point ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	-0,20**	0,11*	0,74**	0,12*	0,00
Zawartość makroporów >300 μm Content of macropores >300 μm ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	0,11*	-0,02	-0,35**	0,14**	-0,07
Zawartość makroporów >20 μm Content of macropores >20 μm ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	0,32**	-0,20**	-0,51**	0,18**	0,05
Zawartość mezoporów 0,2-20 μm Content of mesopores 0,2-20 μm ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	-0,72**	0,82**	-0,18**	0,15**	-0,06
Przewodnictwo wodne nasycone Saturated hydraulic conductivity ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	-0,03	0,05	-0,08	-0,02	-0,08
Przepuszczalność powietrzna Air permeability (-15,5 kPa) ($\times 10^{-8} \text{ m}^2\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	-0,01	-0,01	0,06	0,12*	0,05
Wskaźnik S – Index S	-0,70**	0,81**	-0,21**	0,24**	-0,05

*poziom istotności $\alpha = 0,05$ – significance level 0.05, ** poziom istotności $\alpha = 0,01$ – significance level 0.01.

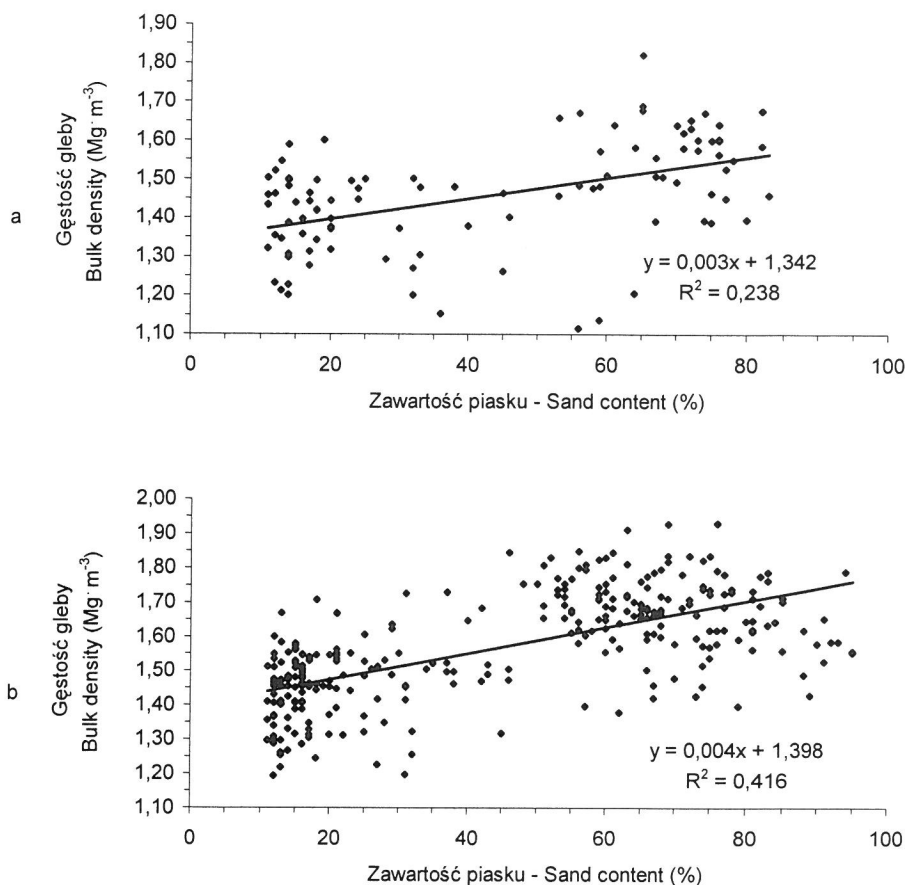
Tabela 18. Współczynniki korelacji (r) pomiędzy zawartością powietrznie suchych i wodoodpornych agregatów a właściwościami wodno-powietrznymi gleb ($n = 400$)

Table 18. Correlation coefficients (r) between content of air-dry and water-stable soil aggregates water-air properties of soils ($n = 400$)

Zmienna – Variable	Agregaty powietrznie suche Air-dry aggregates ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)			Agregaty wodoodporne Water-stable aggregates ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		
	0,25-10 mm	1-10 mm	MWD _{dry} mm	0,25-10 mm	1-10 mm	MWD _{wet} mm
Gęstość gleby Bulk density ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	-0,31**	-0,42**	0,35**	0,04	-0,08	-0,11*
Porowatość ogólna Total porosity ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	0,29**	0,42**	-0,33**	-0,12*	0,02	0,05
Polowa pojemność wodna Field water capacity ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	-0,13*	0,46**	0,04	-0,30**	-0,09	-0,11*
Punkt trwałego wędnięcia Wilting point ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	-0,41**	0,22**	0,46**	0,12*	0,17**	0,07
Zawartość makroporów $>300\ \mu\text{m}$ Content of macropores $>300\ \mu\text{m}$ ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	0,37**	0,01	-0,33**	0,21**	0,16**	0,20**
Zawartość makroporów $>20\ \mu\text{m}$ Content of macropores $>20\ \mu\text{m}$ ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	0,50**	-0,08	-0,43**	0,24**	0,14**	0,20**
Zawartość mezoporów $0,2-20\ \mu\text{m}$ Content of mesopores $0,2-20\ \mu\text{m}$ ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	0,13*	0,35**	-0,26**	-0,40**	-0,21**	-0,16**
Przewodnictwo wodne nasycone Saturated hydraulic conductivity ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)	0,13*	0,05	-0,11*	-0,04	-0,08	-0,06
Przepuszczalność powietrzna Air permeability ($-15,5\ \text{kPa}$) ($\times 10^{-8}\ \text{m}^2\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	0,05	0,08	0,04	0,25**	0,18**	0,13*
Wskaźnik S – Index S	0,18**	0,36**	-0,30**	-0,33**	-0,14**	-0,10

*poziom istotności $\alpha = 0,05$ – significance level 0.05, ** poziom istotności $\alpha = 0,01$ – significance level 0.01.

Gęstość gleby w okresie po zbiorach zbóż można ogólnie sklasyfikować następująco: $\leq 1,30\ \text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo mała, $1,31-1,45\ \text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby mała, $1,46-1,60\ \text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby średnia, $1,61-1,75\ \text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby duża, $>1,75\ \text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo duża.



Rys. 7. Zależność gęstości gleby od zawartości piasku: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 7. Dependence of bulk density on sand content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Uzyskane wyniki badań potwierdziły wcześniejsze ustalenia innych autorów (Ślusarczyk 1979, Wojtasik 1995, Arshad i in. 1996, Pabin i in. 1999, Drewry i in. 2008), że gęstość gleb o różnym składzie granulometrycznym (zwłaszcza gliniastym i pyłowym) powinna być jednak oceniana i klasyfikowana oddzielnie. Również liczby graniczne dla gęstości gleby w poziomach uprawno-próchnicznych i w pozostałych poziomach genetycznych powinny być ustalone oddzielnie. W poziomie próchnicznym czarnoziemów wytworzonych z lessu gęstość gleby wynosiła najczęściej $1,20\text{--}1,40 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, a w poziomach podpowierzchniowych $1,30\text{--}1,51 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Nato-

miast dla gleb płowych i czarnych ziem wytworzonych z glin zwałowych powszechnie występujące wartości gęstości gleby wynoszą $1,48-1,67 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach Ap i $1,51 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w pozostałych poziomach genetycznych.

Szczegółowa klasyfikacja gęstości poziomu Ap gleb o składzie granulometrycznym pyłów przedstawia się następująco: $\leq 1,20 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo mała, $1,21-1,30 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby mała, $1,31-1,40 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby średnia, $1,41-1,50 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby duża, $> 1,50 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo duża.

Dla gęstości poziomów podpowierzchniowych gleb o składzie granulometrycznym pyłów ustalono inne liczby graniczne: $\leq 1,30 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo mała, $1,31-1,40 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby mała, $1,41-1,50 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby średnia, $1,51-1,60 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby duża, $> 1,60 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo duża.

Klasyfikując gęstość poziomu Ap gleb o składzie granulometrycznym piasków i glin przyjęto wyższe przedziały wartości: $\leq 1,40 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo mała, $1,41-1,50 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby mała, $1,51-1,60 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby średnia, $1,61-1,70 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby duża, $> 1,70 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo duża.

Liczby graniczne gęstości poziomów podpowierzchniowych gleb o składzie granulometrycznym piasków i glin ustalono następująco: $\leq 1,50 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo mała, $1,51-1,60 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby mała, $1,61-1,70 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby średnia, $1,71-1,80 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby duża, $> 1,80 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo duża.

Porowatość ogólna w badanych glebach wynosiła najczęściej od $0,450$ do $0,556 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach Ap i od $0,300$ do $0,490 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ w poziomach podpowierzchniowych (tab. 19). Najwyższe wartości osiągała w glebach o składzie pyłów gliniastych (średnio $0,473 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$) i pyłów ilastych ($0,453 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$), a najniższe w glinach piaszczysto-ilastych (średnio $0,351 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$) i glinach lekkich ($0,373 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$).

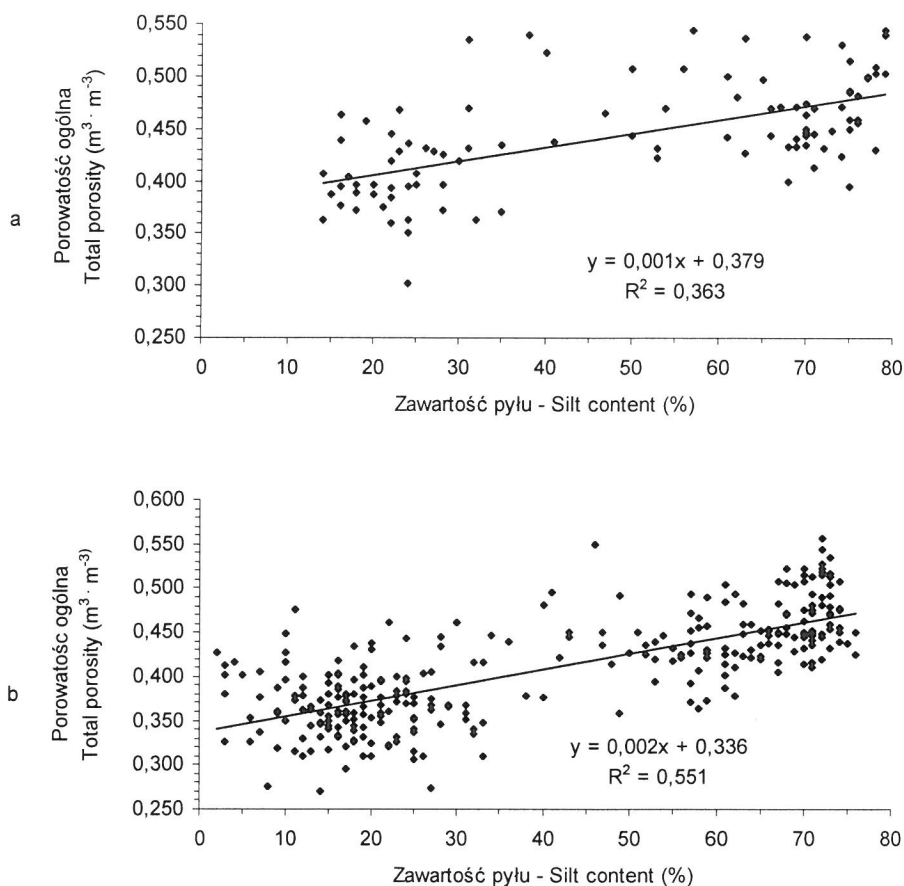
Porowatość ogólna wykazywała ścisłą dodatnią korelację z zawartością frakcji pyłu ($r = 0,72$) i zawartością C org. ($r = 0,38$) oraz ujemną korelację z zawartością piasku ($r = -0,63$) i ilu ($r = -0,13$) (tab. 17). Ponadto korelowała ściśle dodatnio z zawartością powietrze suchych agregatów o wymiarach $0,25-10 \text{ mm}$ ($r = 0,29$) i $1-10 \text{ mm}$ ($r = 0,42$) (tab. 18). Zależność porowatości ogólnej gleb od zawartości frakcji pyłu ($0,05-0,002 \text{ mm}$) i węgla organicznego w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

Tabela 19. Porowatość ogólna
Table 19. Total porosity

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum (m ³ ·m ⁻³)	Wartość najwyższa Maximum (m ³ ·m ⁻³)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean (m ³ ·m ⁻³)	Odchylenie standardowe Standard deviation (m ³ ·m ⁻³)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,325	0,449	0,402	0,033	8,1
Piaski gliniaste Loamy sands	0,325	0,468	0,385	0,039	10,0
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,273	0,540	0,388	0,055	14,1
Gliny lekkie Light loams	0,306	0,461	0,373	0,037	9,8
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,271	0,426	0,351	0,031	8,8
Gliny zwykłe Loams	0,310	0,550	0,410	0,061	14,8
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,347	0,496	0,426	0,051	11,9
Pyły gliniaste Loamy silts	0,388	0,545	0,473	0,037	7,7
Pyły ilaste Clay silts	0,363	0,556	0,453	0,038	8,5

Porowatość ogólna jest równa pełnej pojemności wodnej przy potencjale – 0,1 kPa, wyrażonej w jednostkach objętości (m³·m⁻³), która określa stan maksymalnego nasycenia gleby wodą.

Ocenę jakości porowatości ogólnej gleb oparto o porównanie jej wartości średnich z klasyfikacją gęstości gleby oraz ustalenia Ślusarczyka (1979). Porowatość ogólną jako kryterium jakości fizycznej gleb, podobnie jak gęstość gleby, sklasyfikowano dwukrotnie: łącznie dla wszystkich gleb oraz oddzielnie dla piasków i glin, oddzielnie dla pyłów (w tym oddzielnie dla poziomu Ap i pozostałych poziomów genetycznych gleb uprawnych).



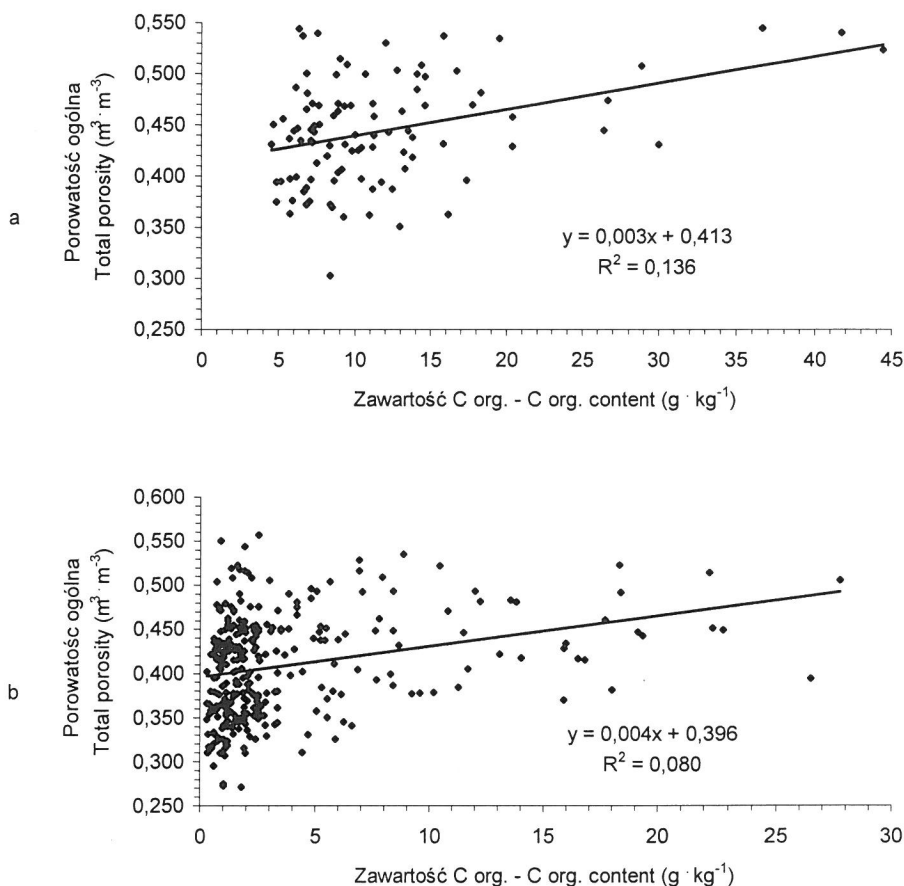
Rys. 8. Zależność porowatości ogólnej od zawartości pyłu: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 8. Dependence of total porosity on silt content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Przyjęto następujące liczby graniczne dla oceny porowatości ogólnej wszystkich gleb: $\leq 0,350 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo mała, $0,351\text{--}0,400 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna mała, $0,401\text{--}0,450 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna średnia, $0,451\text{--}0,500 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna duża, $>0,500 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo duża.

Szczegółowa klasyfikacja porowatości ogólnej poziomów Ap gleb o składzie granulometrycznym pyłów została ustalona następująco: $\leq 0,430 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo mała, $0,431\text{--}0,470 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna mała, $0,471\text{--}$

$0,500 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna średnia, $0,501-0,540 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna duża, $>0,540 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo duża.



Rys. 9. Zależność porowatości ogólnej od zawartości C org.: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 9. Dependence of total porosity on C org. content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Jako liczby graniczne porowatości ogólnej poziomów podpowierzchniowych gleb o składzie granulometrycznym pyłów przyjęto wartości: $\leq 0,400 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo mała, $0,401-0,440 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna mała, $0,441-0,480 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna średnia, $0,481-0,510 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna duża, $>0,510 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo duża.

Dla klasyfikacji porowatości ogólnej poziomów Ap gleb o składzie granulometrycznym piasków i glin przyjęto niższe wartości: $\leq 0,360 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo mała, $0,361\text{--}0,390 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna mała, $0,391\text{--}0,420 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna średnia, $0,421\text{--}0,450 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna duża, $>0,450 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo duża.

Klasyfikując porowatość ogólną poziomów podpowierzchniowych gleb o składzie granulometrycznym piasków i glin ustalono następujące liczby graniczne: $\leq 0,320 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo mała, $0,321\text{--}0,360 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna mała, $0,361\text{--}0,400 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna średnia, $0,401\text{--}0,430 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna duża, $>0,430 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo duża.

4.4. Polowa pojemność wodna i punkt trwałego wędnięcia

Polowa pojemność wodna przy potencjale wody glebowej $-15,5 \text{ kPa}$ (pF 2,2) również kształtowała się w przedziale wartości od $0,058$ do $0,436 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (tab. 20). Najmniejszą polową pojemność wodną stwierdzono w glebach o składzie piasków luźnych i słabogliniastych (średnio $0,158 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) oraz piasków gliniastych ($0,220 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Największą pojemnością polową charakteryzowały się gleby o składzie glin ilastych i pylasto-ilastych ($0,348 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) oraz pyłów gliniastych ($0,342 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

Pojemność polowa była ściśle dodatnio skorelowana z zawartością frakcji pyłu ($r = 0,83$), iłu ($r = 0,29$) i węgla organicznego ($r = 0,21$) oraz ściśle ujemnie z zawartością frakcji piasku ($r = -0,85$) (tab. 17). Ponadto korelowała ona dodatnio z zawartością powietrznie suchych agregatów o wymiarach $1\text{--}10 \text{ mm}$ ($r = 0,46$) (tab. 18) i porowatością ogólną gleb ($r = 0,66$). Zależność polowej pojemności gleb od zawartości frakcji pyłu ($0,05\text{--}0,002 \text{ mm}$) w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunku 10.

Uzyskane wyniki porównano z wynikami badań pojemności wodnej uzyskanymi przez innych autorów (Walczak i in. 2002a) oraz ze wskaźnikiem S ustalonym przez Dextera (2004a). Stwierdzono znaczne podobieństwo w zakresie wysokich wartości polowej pojemności wodnej, natomiast pewne różnice w zakresie wartości niskich. Uznano, że najbardziej odpowiednie są następujące liczby graniczne: $\leq 0,170 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – polowa pojemność wodna bardzo mała, $0,171\text{--}0,230 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – polowa pojemność mała, $0,231\text{--}0,290 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – polowa pojemność średnia, $0,291\text{--}0,350 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – polowa pojemność duża i $>0,350 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – pojemność bardzo duża. Polowa pojemność wodna może stanowić kryterium oceny stanu fizycznego większości gleb mineralnych o składzie granulometrycznym piasków, glin i pyłów. Na-

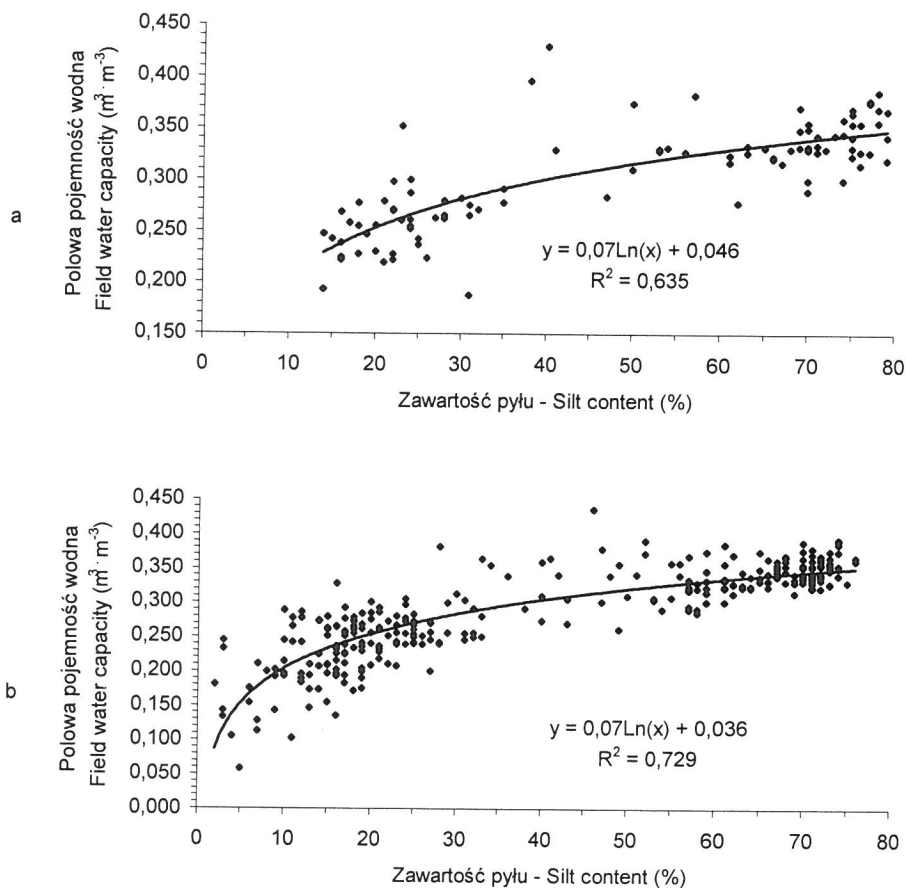
tomiast nie jest odpowiednim kryterium dla gleb o składzie ilów, gleb silnie próchnicznych, organiczno-mineralnych i organicznych, które charakteryzują się bardzo dużą pojemnością wodną w punkcie trwałego wędnięcia roślin.

Tabela 20. Połowa pojemność wodna przy $-15,5$ kPa w $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

Table 20. Field water capacity at -15.5 kPa in $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Wartość najwyższa Maximum ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Odchylenie standardowe Standard deviation ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,058	0,245	0,158	0,060	38,0
Piaski gliniaste Loamy sands	0,113	0,351	0,220	0,051	23,3
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,143	0,429	0,247	0,051	20,8
Gliny lekkie Light loams	0,210	0,312	0,262	0,025	9,4
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,224	0,368	0,270	0,025	9,3
Gliny zwykłe Loams	0,245	0,436	0,307	0,056	18,4
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,280	0,391	0,348	0,040	11,3
Pyły gliniaste Loamy silts	0,277	0,385	0,342	0,025	7,2
Pyły ilaste Clay silts	0,285	0,392	0,339	0,022	6,4

Względna pojemność połowa w badanych glebach mieściła się w przedziale od 0,14 do 0,89. Najniższe wartości stwierdzono w glebach o składzie piasków luźnych i słabogliniastych (średnio 0,39) i gliniastych (0,57), a najwyższe w glebach o składzie glin ilastych i pylasto-ilastych (0,82). Najbardziej korzystną względną pojemnością połową charakteryzowały się gleby o składzie glin piaszczystych (0,64), natomiast w pozostałych glinach i pyłach jej wartości wynosiły 0,71-0,77 (tab. 21).



Rys. 10. Zależność polowej pojemności wodnej od zawartości pyłu: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 10. Dependence of field water capacity on silt content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Według Reynoldsa i in. (2008) dla zasilanych opadami mineralnych gleb uprawnych optymalna równowaga pomiędzy pojemnością wodną strefy korzeniowej gleb a pojemnością powietrzną występuje wtedy, kiedy względna pojemność polowa wynosi 0,6-0,7. Przy tej wielkości w glebie występuje największa mikrobiologiczna nityfikacja. Olness i in. (1998) przyjęli jeszcze bardziej uściśloną wartość równą 0,66.

Wartości względnej pojemności wodnej powyżej 0,70 w glebach o składzie pyłów gliniastych i pyłów ilastych (zwłaszcza w ich poziomach podpowierzchni-

niowych – A, Bbr, Eet i Cca) wynikają przede wszystkim z dużo większej polowej pojemności wodnej w porównaniu z glebami o składzie glin piaszczystych. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że przydatność względnej pojemności wodnej jako kryterium oceny jakości fizycznej gleb ogranicza się jedynie do ich poziomów uprawno-próchnicznych.

Tabela 21. Względna pojemność polowa

Table 21. Relative field capacity

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum	Wartość najwyższa Maximum	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean	Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,14	0,65	0,39	0,15	37,4
Piaski gliniaste Loamy sands	0,33	0,82	0,57	0,10	17,8
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,37	0,85	0,64	0,11	17,0
Gliny lekkie Light loams	0,52	0,86	0,71	0,08	10,8
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,58	0,94	0,77	0,07	9,7
Gliny zwykle Loams	0,60	0,87	0,75	0,08	10,1
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,73	0,90	0,82	0,06	7,3
Pyły gliniaste Loamy silts	0,58	0,86	0,73	0,07	9,1
Pyły ilaste Clay silts	0,54	0,89	0,75	0,07	8,7

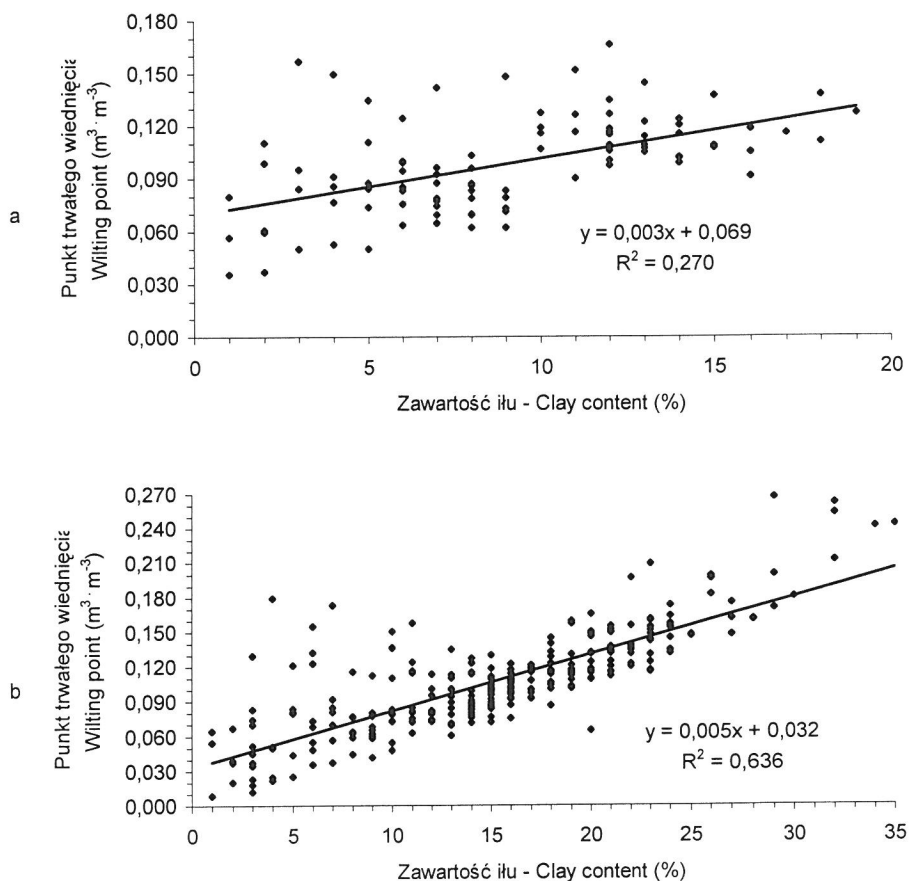
Pojemność wodna w punkcie trwałego wędnięcia roślin przy potencjale wody glebowej -1554 kPa (pF 4,2), wyrażona w jednostkach objętości ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), określa zawartość mikroporów glebowych o średnicy równoważnej $<0,2$ μm , retencjonujących wodę bardzo silnie związaną siłami cząsteczkowymi i niedostępną dla roślin. Wartości punktu trwałego wędnięcia były również bardzo zróżnicowane – od $0,008$ do $0,267$ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (tab. 22). Najniższe – najbardziej korzystne wartości stwier-

dzono w glebach wytworzonych z piasków luźnych i słabogliniastych (średnio $0,034 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) oraz piasków gliniastych ($0,064 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Niskie wartości występowały również w glebach o składzie pyłów gliniastych ($0,093 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) i glin piaszczystych ($0,097 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Natomiast najwyższe wartości (najmniej korzystne) stwierdzono w glebach o składzie glin ilastych i pylasto-ilastych ($0,229 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), zwłaszcza w poziomach Ap i Aa czarnych ziem o dużej zawartości C org. Gleby te, pomimo bardzo dużej polowej pojemności wodnej, retencjonują dużo wody zawartej w mikroporach o średnicy równoważnej $< 0,2 \text{ }\mu\text{m}$, silnie związanej siłami międzycząsteczkowymi i niedostępnej dla roślin. W rezultacie retencjonują one mniej wody dostępnej dla roślin.

Tabela 22. Pojemność wodna w punkcie trwałego wędnięcia roślin przy -1554 kPa w $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
Table 22. Water capacity at wilting point at -1554 kPa in $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Wartość najwyższa Maximum ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Odchylenie standardowe Standard deviation ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,008	0,067	0,034	0,020	60,3
Piaski gliniaste Loamy sands	0,023	0,129	0,064	0,025	38,8
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,024	0,179	0,097	0,030	30,6
Gliny lekkie Light loams	0,058	0,165	0,109	0,024	22,1
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,116	0,200	0,149	0,020	13,7
Gliny zwykłe Loams	0,065	0,209	0,121	0,047	38,5
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,170	0,267	0,229	0,037	16,1
Pyły gliniaste Loamy silts	0,062	0,173	0,093	0,027	28,6
Pyły ilaste Clay silts	0,060	0,197	0,112	0,023	20,7

Wartości punktu trwałego wędnięcia ściśle dodatnio korelowały z zawartością frakcji iłu ($r = 0,74$), oraz słabo z zawartością pyłu ($r = 0,11$) i węgla organicznego ($r = 0,12$). Ponadto korelowały one dodatnio z zawartością powietrznie suchych agregatów 1-10 mm ($r = 0,22$), MWD_{dry} ($r = 0,46$), zawartością agregatów wodoodpornych 0,25-10 mm ($r = 0,12$) i 1-10 mm ($r = 0,17$) (tab. 17-18). Zależność pojemności wodnej w punkcie trwałego wędnięcia roślin od zawartości frakcji iłu ($<0,002$ mm) w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych gleb przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Zależność pojemności wodnej w punkcie trwałego wędnięcia od zawartości iłu: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 11. Dependence of water capacity in permanent wilting point on clay content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Pojemność wodną w punkcie trwałego wędnięcia porównano ze wskaźnikami statystycznymi i ustaleniami Walczaka i in. (2002a). Przyjęto następujące liczby graniczne: $\leq 0,060 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ pojemność została oceniona jako bardzo mała (bardzo korzystna), $0,061\text{--}0,090 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ jako mała (korzystna), $0,091\text{--}0,120 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ jako średnia, $0,121\text{--}0,150 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ jako duża (niekorzystna) i $> 0,150 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ jako bardzo duża (bardzo niekorzystna). Wartości te w przybliżeniu odpowiadają następującym wartościom pojemności trwałego wędnięcia roślin, wyrażonym w stosunku do masy gleby: $\leq 0,040 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – pojemność bardzo mała, $0,041\text{--}0,060 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – pojemność mała, $0,061\text{--}0,080 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – pojemność średnia, $0,081\text{--}0,100 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – pojemność duża i $> 0,100 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – bardzo duża.

Pojemność wodna w punkcie trwałego wędnięcia roślin może stanowić uzupełniające dla polowej pojemności wodnej kryterium oceny jakości fizycznej gleb, przydatne do badań porównawczych gleb o zróżnicowanym składzie granulometrycznym.

4.5. Rozkład porów glebowych i retencja wody użytecznej dla roślin

Zawartość makroporów o średnicy równoważnej $> 300 \mu\text{m}$ ($0,3 \text{ mm}$) wynosiła w badanych glebach od $0,022$ do $0,171 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (tab. 23). Największy udział tych porów stwierdzono w glebach o składzie piasków luźnych i słabogliniastych (średnio $0,100 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Najmniejszym udziałem makroporów $> 300 \mu\text{m}$ charakteryzowały się gleby o składzie glin ilastych i pylasto-ilastych ($0,025 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) oraz glin piaszczysto-ilastych ($0,034 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Zawartość największych porów powietrznych korelowała dodatnio z zawartością frakcji piasku ($r = 0,11$), zawartością C org. ($r = 0,14$), zawartością powietrznie suchych agregatów glebowych o wymiarach $0,25\text{--}10 \text{ mm}$ ($r = 0,37$) oraz zawartością wodoodpornych agregatów o wymiarach $0,25\text{--}10 \text{ mm}$ ($r = 0,21$) i $1\text{--}10 \text{ mm}$ ($r = 0,16$) i ich MWD_{wet} ($r = 0,20$) (tab. 17-18). Ponadto objętość makroporów $> 300 \mu\text{m}$ korelowała ściśle dodatnio z porowatością ogólną gleb ($r = 0,37$).

Zawartość największych porów glebowych ma decydujący wpływ na wielkość przewodnictwa wodnego i przepuszczalności powietrznej, dlatego ocena jej przydatności jako kryterium jakości stanu fizycznego może być dokonana tylko w powiązaniu z tymi właściwościami.

Zawartość makroporów o średnicy równoważnej $> 20 \mu\text{m}$ decyduje o pojemności powietrznej gleby przy polowej pojemności wodnej, a w okresie intensywnych opadów określa zdolność do retencjonowania wody grawitacyjnej. Największą zawartość tych porów charakteryzowały się gleby o składzie piasków luźnych

i słabogliniastych (średnio $0,244 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) (tab. 24). Najmniej porów powietrznych zawierały gleby o składzie glin ilastych i pylasto-ilastych ($0,077 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) oraz glin piaszczysto-ilastych ($0,081 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

Zawartość makroporów $>20 \mu\text{m}$ była ściśle dodatnio skorelowana z zawartością frakcji piasku ($r = 0,32$), węgla organicznego ($r = 0,18$), powietrznie suchych agregatów glebowych o wymiarach $0,25\text{-}10 \text{ mm}$ ($r = 0,50$) oraz wodoodpornych agregatów $0,25\text{-}10 \text{ mm}$ ($r = 0,24$) i $1\text{-}10 \text{ mm}$ ($r = 0,14$) (tab. 17-18). Ponadto objętość makroporów korelowała dodatnio z porowatością ogólną gleb ($r = 0,34$). Zależność pojemności powietrznej gleb w stanie polowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) od zawartości frakcji pyłu ($0,05\text{-}0,002 \text{ mm}$) oraz porowatości ogólnej w poziomie A_p i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunkach 12 i 13.

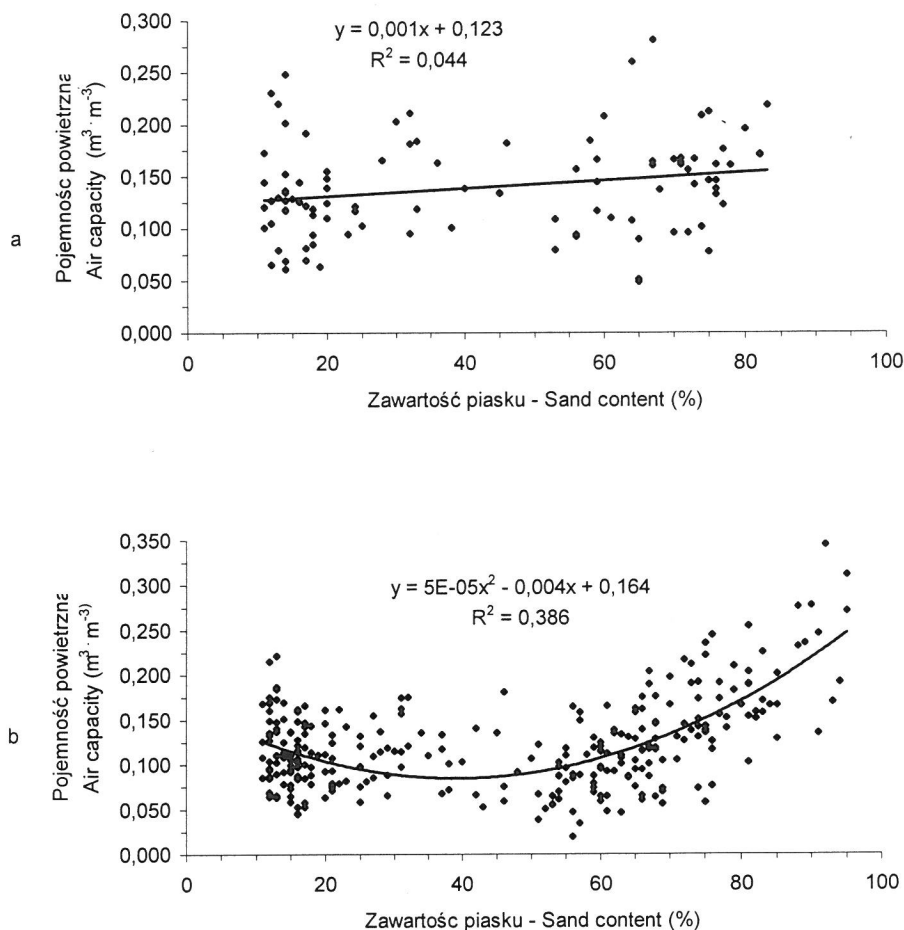
Tabela 23. Zawartość makroporów o średnicy $>300 \mu\text{m}$
Table 23. Content of macropores of $>300 \mu\text{m}$ in diameter

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Wartość najwyższa Maximum ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Odchylenie standardowe Standard deviation ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,049	0,130	0,100	0,026	26,2
Piaski gliniaste Loamy sands	0,021	0,124	0,062	0,023	37,7
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,010	0,141	0,056	0,028	49,7
Gliny lekkie Light loams	0,013	0,113	0,045	0,024	52,8
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,002	0,108	0,034	0,025	73,6
Gliny zwykłe Loams	0,013	0,096	0,040	0,021	53,2
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,012	0,051	0,025	0,014	56,7
Pyły gliniaste Loamy silts	0,011	0,149	0,059	0,029	48,4
Pyły ilaste Clay silts	0,005	0,171	0,050	0,024	48,5

Tabela 24. Zawartość makroporów o średnicy $>20\ \mu\text{m}$
Table 24. Content of macropores of $>20\ \mu\text{m}$ in diameter

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	Wartość najwyższa Maximum ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	Odchylenie standardowe Standard deviation ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,135	0,344	0,244	0,062	25,2
Piaski gliniaste Loamy sands	0,077	0,254	0,164	0,037	22,5
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,048	0,281	0,141	0,049	35,1
Gliny lekkie Light loams	0,047	0,208	0,112	0,037	32,8
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,019	0,165	0,081	0,030	37,5
Gliny zwykłe Loams	0,052	0,181	0,104	0,035	33,9
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,045	0,132	0,077	0,033	42,1
Pyły gliniaste Loamy silts	0,061	0,220	0,131	0,039	29,5
Pyły ilaste Clay silts	0,045	0,248	0,113	0,039	34,1

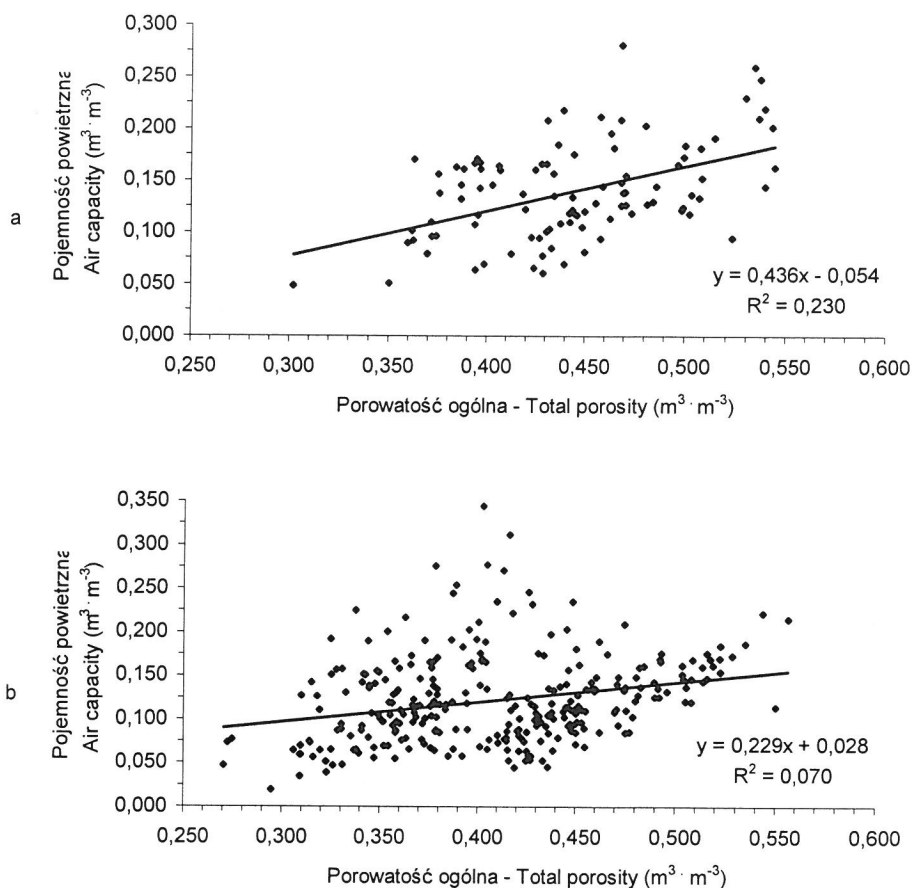
Pojemność powietrzna gleby w stanie polowej pojemności wodnej jest bardzo ważnym kryterium oceny jakości fizycznej gleb. Na podstawie obliczeń statystycznych i danych z literatury (Cockroft i Olsson 1997, Walczak i in. 2002a, Drewry 2006, Mueller i in. 2008) ustalono następujące liczby graniczne dla pojemności powietrznej gleby równej zawartości makroporów o średnicy równoważnej $0,2\text{--}20\ \mu\text{m}$: $\leq 0,070\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – pojemność powietrzna bardzo mała, $0,071\text{--}0,110\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – pojemność mała, $0,111\text{--}0,140\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – pojemność średnia, $0,141\text{--}0,180\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – pojemność duża, $0,181\text{--}0,220\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – bardzo duża i $>0,220\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – pojemność powietrzna nadmierna. Wielkość $>0,220\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ uznano za pojemność niekorzystną, ponieważ znacznie pogarsza zaopatrzenie korzeni roślin w wodę i składniki pokarmowe. Pojemność powietrzna $>0,220\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ odpowiada względnej pojemności wodnej poniżej 0,5 (Reynolds 2008).



Rys. 12. Zależność pojemności powietrznej (przy -15,5 kPa) od zawartości piasku: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 12. Dependence of air capacity (at -15,5 kPa) on sand content: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Zawartość mezoporów o średnicy równoważnej 0,2-20 μm , retencjonujących wodę użyteczną dla roślin, wynosiła w badanych glebach od 0,021 do 0,329 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (tab. 25). Najmniej mezoporów zawierały gleby o składzie granulometrycznym glin ilastych i pylasto-ilastych (średnio 0,120 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), glin piaszczysto-ilastych (0,121 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) oraz piasków luźnych i słabogliniastych (0,124 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Natomiast najwięcej mezoporów zawierały gleby o składzie pyłów gliniastych (0,249 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) i pyłów ilastych (0,227 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).



Rys. 13. Zależność pojemności powietrznej (przy $-15,5$ kPa) od porowatości ogólnej: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

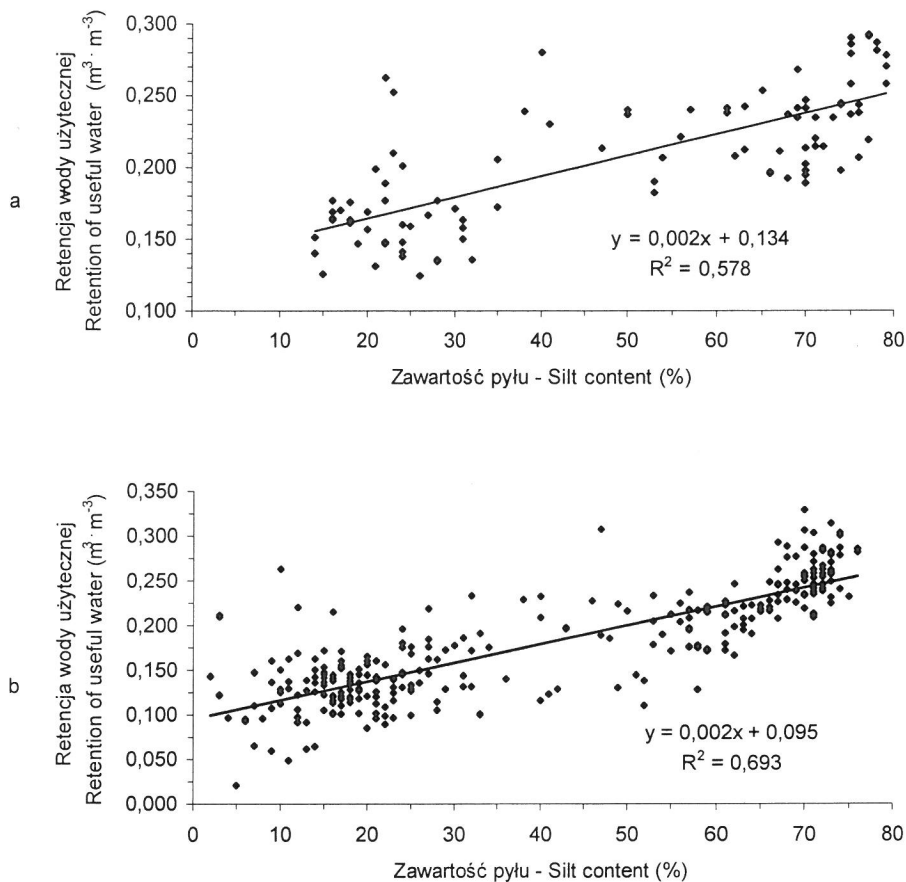
Fig. 13. Dependence of air capacity (at $-15,5$ kPa) on total porosity: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Zawartość mezoporów retencjonujących wodę użyteczną dla roślin wykazywała ścisłą dodatnią korelację z zawartością frakcji pyłu $0,05-0,002$ mm ($r = 0,82$), C org. ($r = 0,18$) oraz powietrznie suchych agregatów o wymiarach $1-10$ mm ($r = 0,35$) i $0,25-10$ mm ($r = 0,15$) (tab. 17 i 18). Udział mezoporów korelował również ściśle dodatnio z porowatością ogólną gleb ($r = 0,73$). Zależność retencji wody użytecznej dla roślin w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych od zawartości frakcji pyłu i porowatości ogólnej przedstawiono na rysunkach 14 i 15.

Tabela 25. Zawartość mezoporów o średnicy 0,2-20 μm
Table 25. Content of mesopores of 0.2-20 μm in diameter

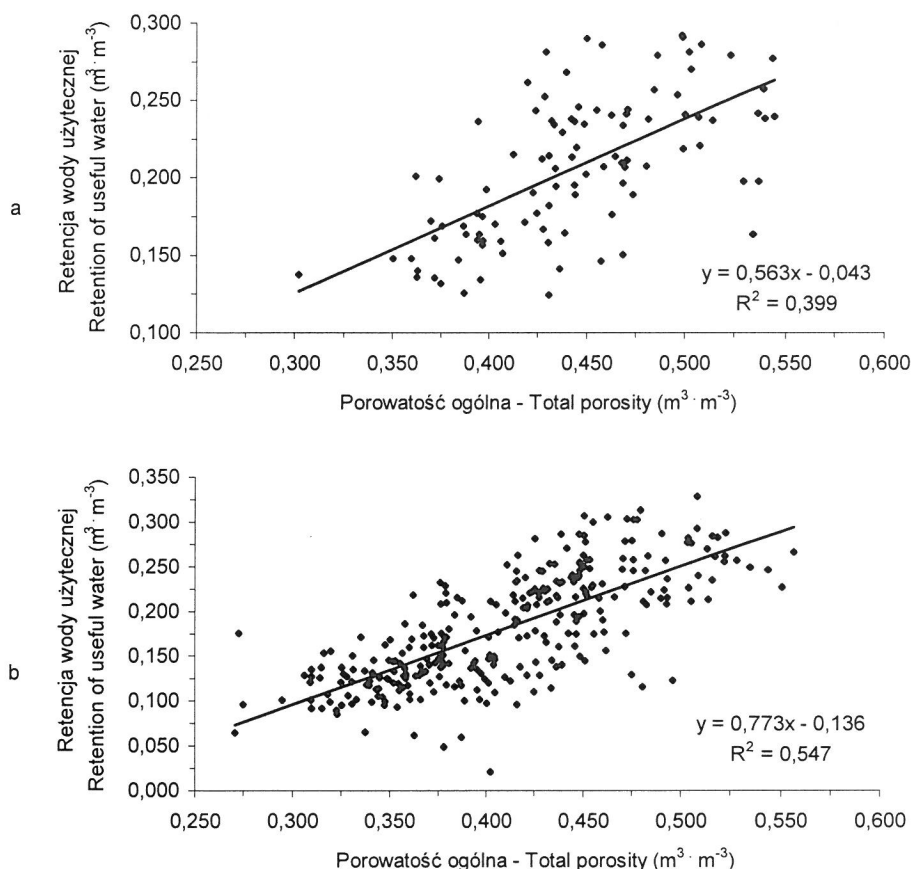
Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Wartość najwyższa Maximum ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Odchylenie standardowe Standard deviation ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,021	0,211	0,124	0,058	46,6
Piaski gliniaste Loamy sands	0,065	0,263	0,157	0,046	29,3
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,059	0,279	0,157	0,039	26,0
Gliny lekkie Light loams	0,097	0,233	0,153	0,032	20,9
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,064	0,208	0,121	0,027	22,6
Gliny zwykłe Loams	0,101	0,307	0,186	0,054	29,3
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,100	0,138	0,120	0,012	10,2
Pyły gliniaste Loamy silts	0,171	0,313	0,249	0,032	13,0
Pyły ilaste Clay silts	0,128	0,329	0,227	0,035	15,6

Porównanie opracowanych statystycznie wyników badań z propozycjami innych autorów (Cocroft i Olson 1997, Craul 1999, Walczak i in. 2002a, Warrick 2002, White 2006) pozwoliło ustalić następujące liczby graniczne dla retencji wody użytecznej, jako kryterium oceny jakości stanu fizycznego gleb Polski. Przyjęto następujące wartości: $\leq 0,080 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – retencja bardzo mała, $0,081-0,120 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – retencja mała, $0,121-0,170 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – retencja średnia, $0,171-0,210 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – retencja duża i $>0,210 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – retencja bardzo duża. Retencja wody użytecznej dla roślin jest najważniejszym kryterium oceny jakości fizycznej gleb mineralnych, niezależnie od ich składu granulometrycznego.



Rys. 14. Zależność retencji wody użytecznej od zawartości pyłu: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 14. Dependence of retention of useful water on silt content: a) in Ap horizon, b) in subsoil



Rys. 15. Zależność retencji wody użytecznej od porowatości ogólnej: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 15. Dependence of retention of useful water on total porosity: a) in Ap horizon, b) in subsoil

4.6. Przewodnictwo wodne nasycone

Pomiary przewodnictwa wodnego za pomocą 1600 próbek gleby w metalowych cylindkach wykazały bardzo dużą zmienność wyników, nie tylko pomiędzy typami i rodzajami gleb, ale także w obrębie poszczególnych pedonów. Obliczone średnie wartości z 4 powtórzeń wahały się od 0,01 do $112,58 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. Natomiast mierzone wartości ekstremalne mieściły się w przedziale od 0,000 do $449,06 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$. Największym przewodnictwem wodnym nasyconym charakteryzowały się gleby wytworzone z piasków luźnych i słabogliniastych

(średnio $8,73 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$) oraz piasków gliniastych ($8,33 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$). Najmniejsze przewodnictwo wodne stwierdzono w glebach wytworzonych z glin ilastych i pylasto-ilastych (średnio $1,96 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$). Obliczona wartość współczynników zmienności wynosiła od 125,4% w glebach o składzie piasków luźnych i słabogliniastych do 279,9% w glebach o składzie piasków gliniastych (tab. 26).

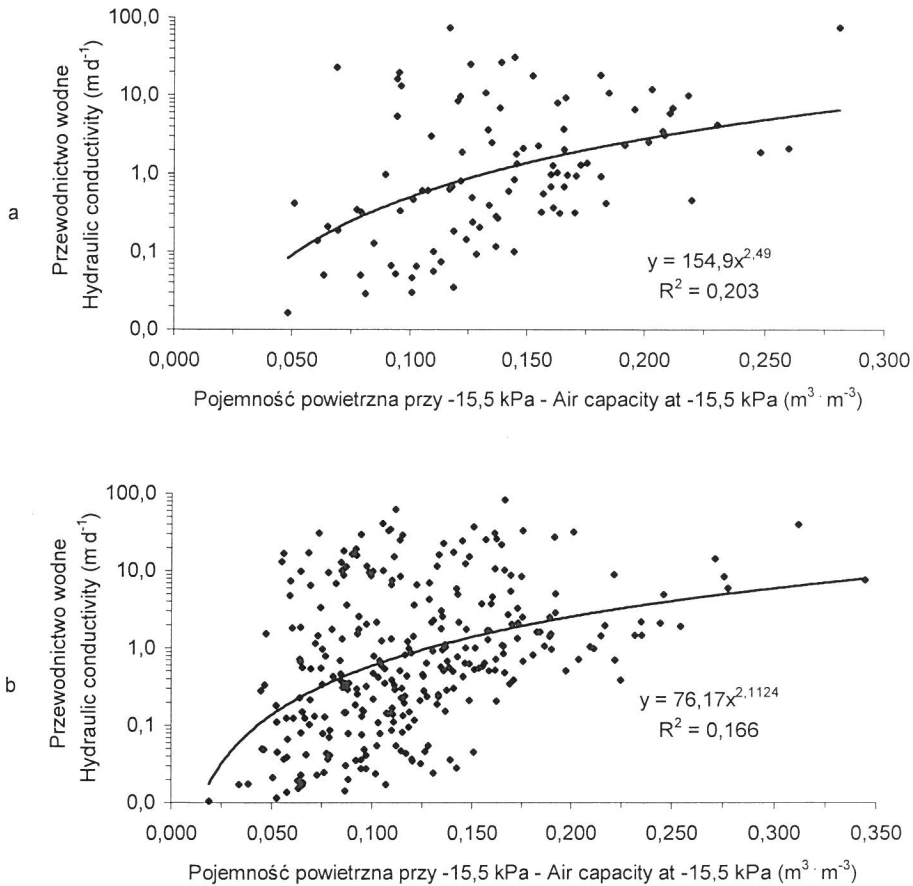
Tabela 26. Przewodnictwo wodne nasyczone

Table 26. Saturated hydraulic conductivity

Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum	Wartość najwyższa Maximum	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	1,47	39,87	8,73	10,94	125,4
Piaski gliniaste Loamy sands	0,04	112,58	8,33	23,32	279,9
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,01	75,11	4,48	11,31	252,3
Gliny lekkie Light loams	0,02	16,14	2,31	3,90	168,8
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,01	21,93	2,42	5,37	222,2
Gliny zwykłe Loams	0,11	19,15	3,67	5,67	154,4
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,01	11,41	1,96	4,01	205,1
Pyły gliniaste Loamy silts	0,02	73,68	6,30	13,98	221,7
Pyły ilaste Clay silts	0,01	112,51	6,86	15,51	226,2

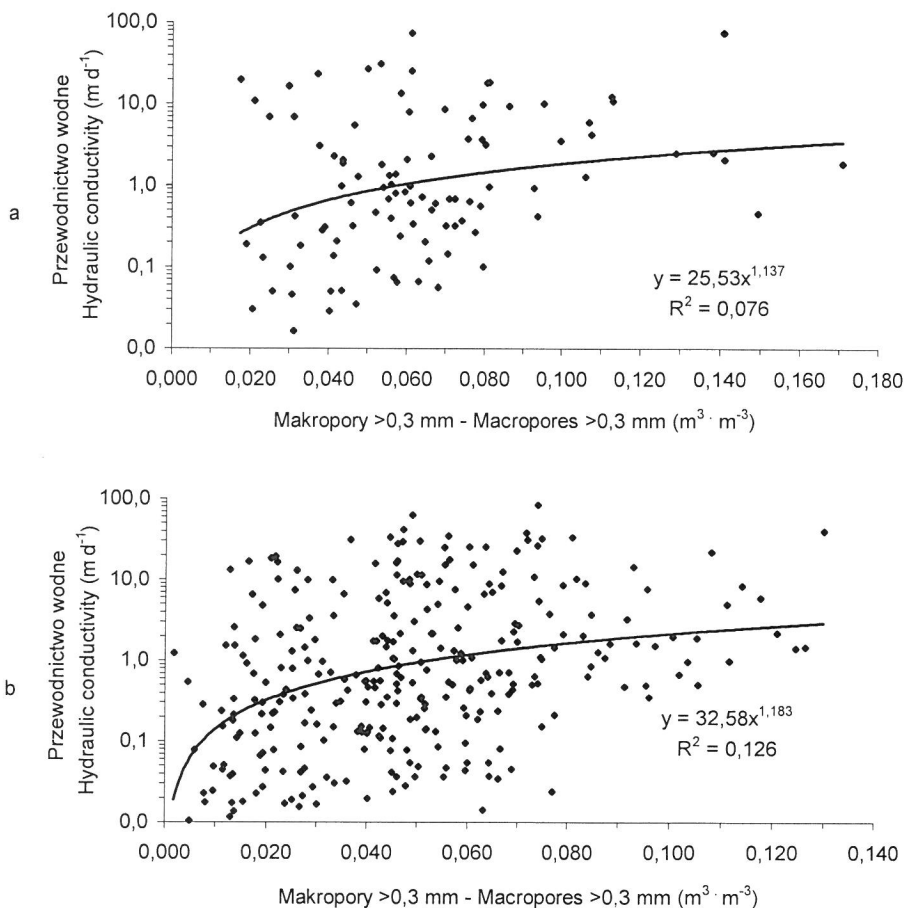
Większość badanych warstw i poziomów glebowych (227 – 56,8%), zwłaszcza podpowierzchniowych o składzie glin i pyłów, charakteryzowała się średnimi wartościami przewodnictwa wodnego $<1 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$. Najwyższe wartości przewodnictwa ($>2 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$) związane były z występowaniem w tych poziomach pionowo skierowanych kanalików zoogenicznych, a zwłaszcza chodników dżdżownic ($>5 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$). Analiza korelacji nie wykazała żadnej istotnej zależności przewodnictwa od za-

wartości frakcji granulometrycznych, zawartości C org., zawartości powietrznie suchych i wodoodpornych agregatów glebowych (tab. 17-18). Dodatnią korelację stwierdzono tylko z zawartością makroporów glebowych $>20\ \mu\text{m}$ ($r = 0,18$) i $>300\ \mu\text{m}$ ($r = 0,18$) oraz z porowatością ogólną ($r = 0,11$). Zależność przewodnictwa wodnego nasyconego od zawartości makroporów $>20\ \mu\text{m}$ (pojemności powietrznej gleby w stanie połowej pojemności wodnej) i zawartości największych makroporów $>0,3\ \text{mm}$ w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunkach 16-17.



Rys. 16. Zależność przewodnictwa wodnego nasyconego od pojemności powietrznej ($-15,5\ \text{kPa}$): a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 16. Dependence of saturated water conductivity on air capacity ($-15.5\ \text{kPa}$): a) in Ap horizon, b) in subsoil



Rys. 17. Zależność przewodnictwa wodnego nasyconego od zawartości makroporów >0,3 mm: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 17. Dependence of saturated water conductivity on content of macropores >0.3 mm: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Opracowując liczby graniczne dla przewodnictwa wodnego nasyconego wzięto pod uwagę klasyfikację Stryjewskiego (1977), Walczaka i in. (2002a,d) oraz równania regresji z zawartością makroporów o średnicy równoważnej >20 μm i >300 μm . Na tej podstawie ustalono następujące przedziały wartości: $\leq 0,100 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ – przewodnictwo wodne nasycone bardzo małe, $0,101-0,500 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ – przewodnictwo wodne nasycone małe, $0,501-2,000 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ – przewodnictwo średnie, $2,001-10,00 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ – przewodnictwo duże, $>10,00 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ – przewodnictwo wodne bardzo duże.

4.7. Przepuszczalność powietrzna w stanie polowej pojemności wodnej

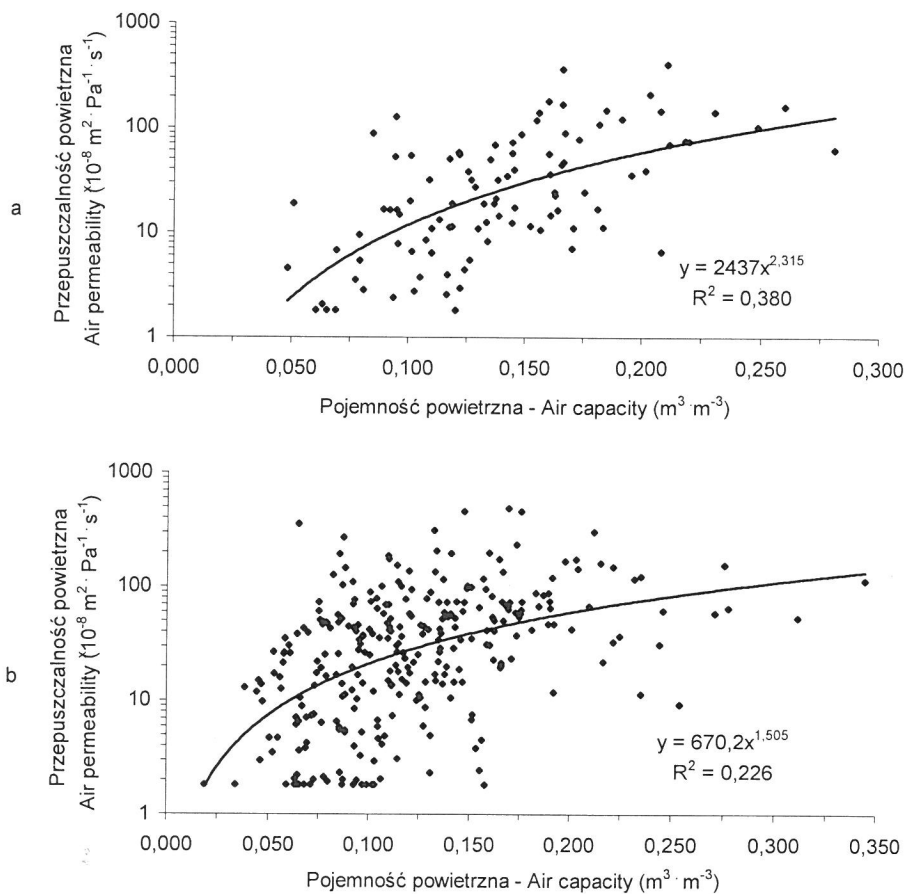
Analiza przepuszczalności powietrznej gleb również wykazywała dużą zmienność uzyskanych wyników, jednak mniejszą od przewodnictwa wodnego nasyconego. W stanie polowej pojemności wodnej (przy potencjale $-15,5$ kPa) średnie wartości przepuszczalność powietrznej z czterech powtórzeń wynosiły od $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (wartość minimalna odczytywana z aparatu LPiR) do $486,1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Natomiast zmierzona wartość ekstremalna przepuszczalności wynosiła $3551,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Z poszczególnych grup granulometrycznych największą przepuszczalnością charakteryzowały się gleby o składzie piasków luźnych i słabogliniastych (średnio $77,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) oraz gleby o składzie glin ilastych i ilasto-piaszczystych ($71,1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). Najmniejszą przepuszczalność powietrzną stwierdzono w glebach o składzie glin zwykłych (średnio $30,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) oraz piasków gliniastych ($35,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). Obliczone współczynniki zmienności wynosiły od 57,8% w glebach o składzie piasków luźnych i słabogliniastych do 163,7% w glebach o składzie glin zwykłych (tab. 27).

Tabela 27. Przepuszczalność powietrzna przy polowej pojemności wodnej ($-15,5$ kPa)

Table 27. Air permeability at field water capacity (-15.5 kPa)

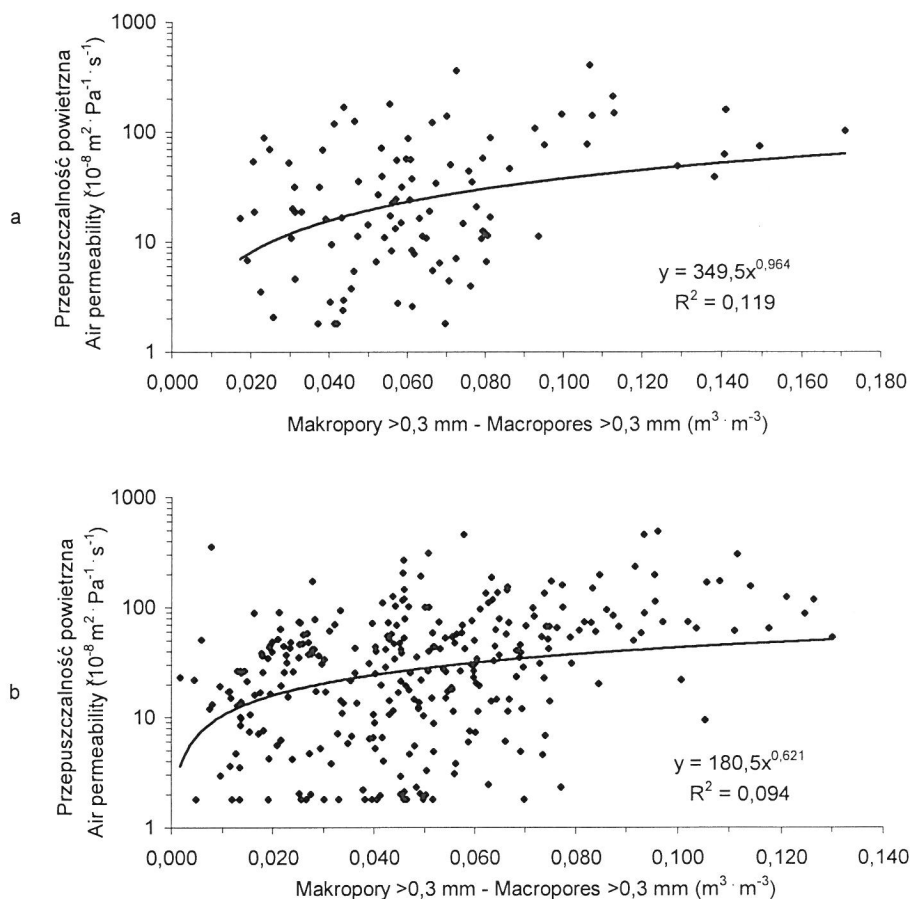
Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum	Wartość najwyższa Maximum	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean	Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
	$\times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$				
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	11,8	155,1	77,0	44,5	57,8
Piaski gliniaste Loamy sands	1,8	181,1	35,7	46,2	129,4
Gliny piaszczyste Sandy loams	1,8	362,6	50,9	57,9	113,8
Gliny lekkie – Light loams	1,8	205,5	42,8	55,1	128,6
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	1,8	353,1	61,4	79,2	129,0
Gliny zwykłe – Loams	1,8	196,0	30,3	49,7	163,7
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	10,5	311,0	71,1	100,4	141,1
Pyły gliniaste Loamy silts	1,8	406,5	40,1	63,4	158,1
Pyły ilaste – Clay silts	1,8	486,1	57,4	81,2	141,5

Wartości przepuszczalności powietrznej powyżej $100 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ były związane z występowaniem pionowo skierowanych kanalików zoogenicznych, w tym chodników dżdżownic. Przepuszczalność powietrzna nie wykazywała istotnej zależności od poszczególnych frakcji granulometrycznych (tab. 17-18). Natomiast wykazywała ścisłą dodatnią korelację z zawartością wodoodpornych agregatów o wymiarach 0,25-10 mm ($r = 0,25$) i 1-10 mm ($r = 0,18$), porowatością ogólną ($r = 0,24$), zawartością makroporów o średnicy $>20 \mu\text{m}$ ($r = 0,35$) i makroporów $>300 \mu\text{m}$ ($r = 0,34$). Ponadto była dodatnio skorelowana z zawartością C org. ($r = 0,12$) i z przewodnictwem wodnym nasyconym ($r = 0,19$).



Rys. 18. Zależność przepuszczalności powietrznej ($-15,5 \text{ kPa}$) od pojemności powietrznej ($-15,5 \text{ kPa}$): a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 18. Dependence of air permeability (-15.5 kPa) on air capacity (-15.5 kPa): a) in Ap horizon, b) in subsoil



Rys. 19. Zależność przepuszczalności powietrznej (–15,5 kPa) od zawartości makroporów >0,3 mm: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 19. Dependence of air permeability (–15.5 kPa) on content of macropores >0.3 mm: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Opracowując klasyfikację przepuszczalności powietrznej gleb w stanie polowej pojemności wodnej wykorzystano ustalenia Turskiego i in. (1978) oraz wskaźniki korelacji z zawartością makroporów o średnicy równoważnej $>20 \mu\text{m}$ i $>300 \mu\text{m}$ oraz z przewodnictwem wodnym nasyconym.

Na podstawie uzyskanych wyników badań ustalono następujące liczby graniczne: od $1,8 \cdot 10^{-8}$ do $5,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ – przepuszczalność powietrzna bardzo mała, od $5,1 \cdot 10^{-8}$ do $20,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ – przepuszczalność powietrzna mała, od $20,1 \cdot 10^{-8}$ do $50,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ – przepuszczalność średnia, od $50,1 \cdot 10^{-8}$ do

$100,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ – przepuszczalność duża oraz $>100,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ – przepuszczalność powietrzna bardzo duża.

Zależność przepuszczalności powietrznej w stanie polowej pojemności wodnej od zawartości makroporów $>20 \text{ }\mu\text{m}$ (pojemności powietrznej gleby w stanie polowej pojemności wodnej) i zawartości największych makroporów $>0,3 \text{ mm}$ w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunkach 18 i 19.

4.8. Wskaźnik jakości S

Obliczone za pomocą programu komputerowego RETC wartości wskaźnika S według Dexter wynosiły w badanych glebach od 0,001 do 0,093 (tab. 28). Najniższe wartości były charakterystyczne dla gleb o składzie glin piaszczysto-ilastych (średnio 0,019) oraz piasków luźnych i słabogliniastych (0,024). Zdecydowanie najwyższe wartości wskaźnika uzyskano dla gleb o składzie pyłów gliniastych (średnio 0,062) i pyłów ilastych (0,054), które świadczą o najlepszej jakości stanu fizycznego gleb wytworzonych z lessów i pyłów lessopodobnych.

Wskaźnik S korelował ściśle dodatnio z zawartością frakcji pyłu ($r = 0,81$), węgla organicznego ($r = 0,24$) oraz zawartością agregatów powietrznie suchych o wymiarach 1-10 mm ($r = 0,36$) i 0,25-10 mm ($r = 0,18$) (tab. 17-18). Z innych właściwości fizycznych wskaźnik ten wykazywał ścisłą dodatnią zależność od porowatości ogólnej ($r = 0,84$), polowej pojemności wodnej ($r = 0,78$), a najbardziej od udziału mezooporów o średnicy 0,2-20 μm retencjonujących wodę dostępną dla roślin ($r = 0,95$). Teoria wskaźnika S jest oparta wyłącznie o rozkład porów glebowych, dlatego z wodoodpornością agregatów glebowych koreluje on ujemnie lub nie wykazuje istotnej korelacji. Zależność wskaźnika jakości fizycznej S od zawartości frakcji pyłowej (0,05-0,002 mm) i retencji wody użytecznej dla roślin w poziomie Ap i poziomach podpowierzchniowych przedstawiono na rysunkach 20-21.

Dexter przyjął następujące kategorie jakości fizycznej gleby według obliczonej wartości wskaźnika S : $<0,020$ – jakość bardzo słaba, $0,020$ - $0,035$ – jakość słaba, $0,035$ - $0,050$ – jakość dobra, $>0,050$ – jakość bardzo dobra (Dexter 2004a, Dexter i in. 2007).

Klasyfikacja Dexter jest interesującą propozycją w rozwoju badań nad jakością fizyczną gleb uprawnych. Jednak wskaźnik S jest mało zrozumiały dla gleboznawców nie specjalizujących się w fizyce gleby. Wartości wskaźnika, jako tangensa kąta nachylenia krzywej retencji wodnej w punkcie jej przegięcia do osi potencjału wody glebowej, są obliczane w tysięcznych częściach jedności. Dla spopularyzowania tego wskaźnika potrzebne jest porównanie jego zakresu warto-

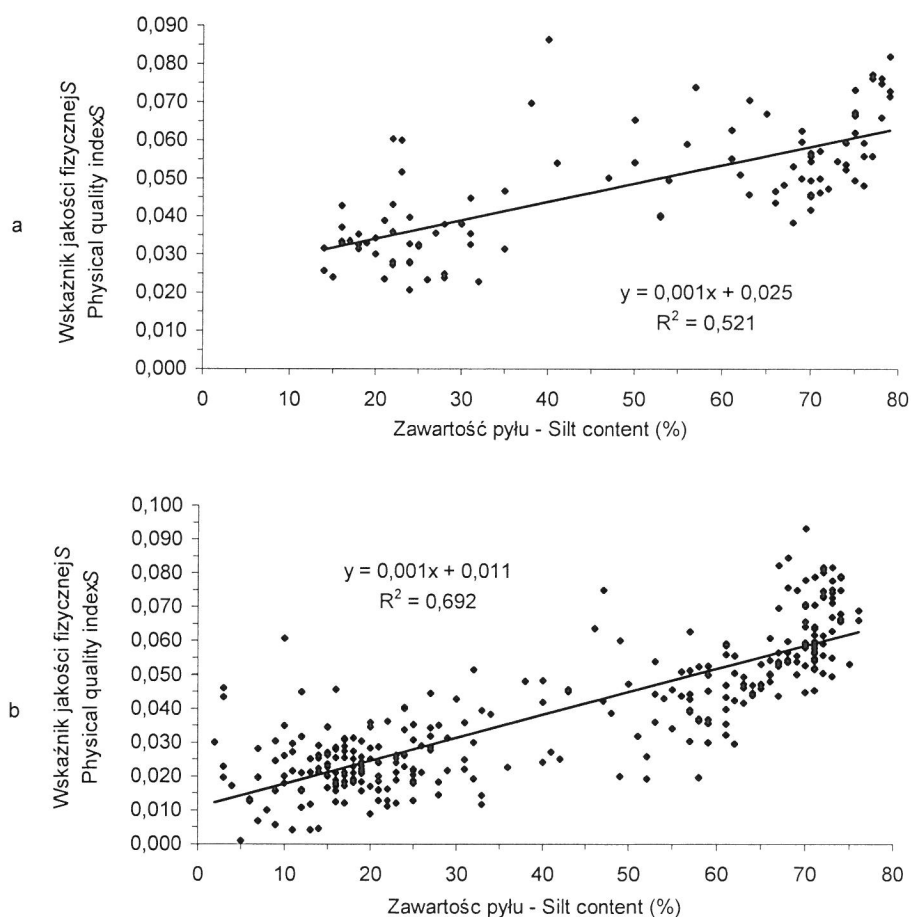
ści z wartościami powszechnie znanych wskaźników struktury i właściwości wodno-powietrznych, np. z wartościami polowej pojemności wodnej, retencji wody użytecznej dla roślin i zawartości makroporów glebowych. Wątpliwości budzi również czterostopniowa skala wartości, nie uwzględniająca średniej jakości fizycznej gleb. Wskaźnik S nie uwzględnia wodoodporności agregatów glebowych, przewodnictwa wodnego i przepuszczalności powietrznej, dlatego nie może być jedynym kryterium dla kompleksowej oceny żyzności poszczególnych jednostek systematycznych gleb. Ustalenia Dextera (2004a,b,c) stanowią jednak ważną inspirację dla dalszych badań, mogących uściślić wartości liczbowe wskaźnika S i jego korelację z właściwościami fizykochemicznymi i chemicznymi. Autor wskaźnika dostrzega potrzebę sprawdzenia teorii S w badaniach jak największej liczby gleb uprawnych w różnych krajach.

Tabela 28. Wartości wskaźnika S

Table 28. Values of index S

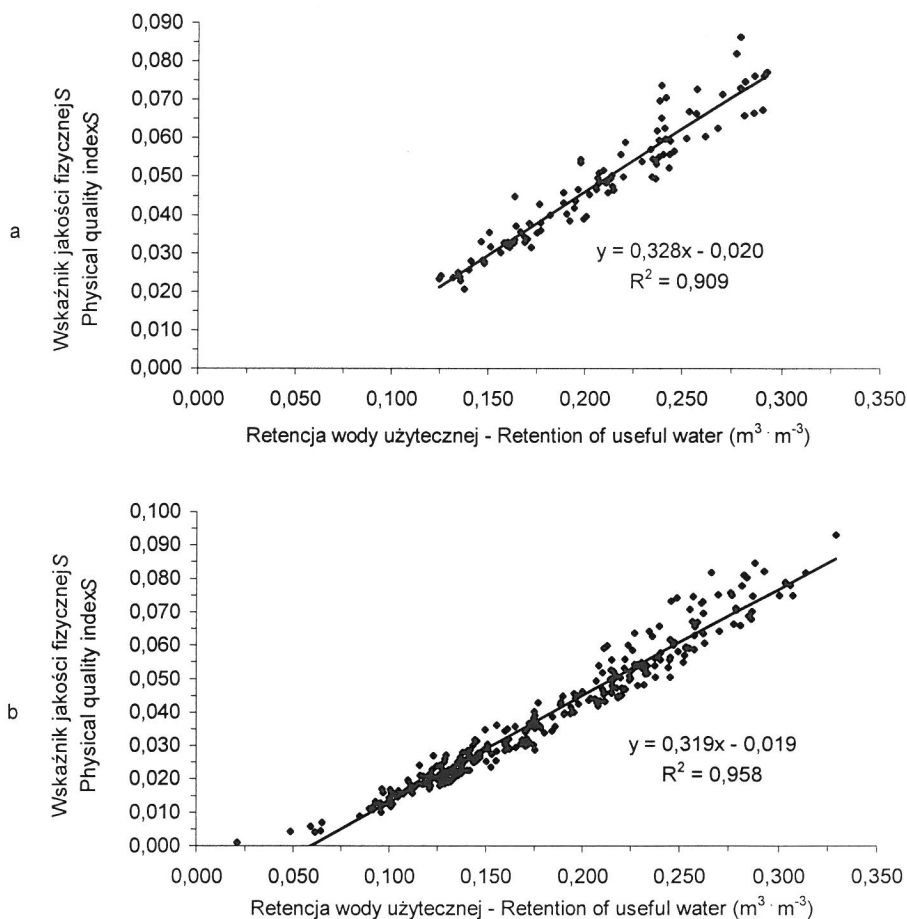
Grupy granulometryczne Texture classes	Wartość najniższa Minimum	Wartość najwyższa Maximum	Średnia arytmetyczna Arithmetic mean	Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik zmienności Variation coefficient (%)
Piaski luźne i słabogliniaste Sands	0,001	0,046	0,024	0,014	59,3
Piaski gliniaste Loamy sands	0,007	0,061	0,031	0,013	42,5
Gliny piaszczyste Sandy loams	0,004	0,086	0,029	0,014	46,0
Gliny lekkie Light loams	0,012	0,051	0,028	0,009	32,9
Gliny piaszczysto-ilaste Sandy clay loams	0,004	0,043	0,019	0,007	37,8
Gliny zwykłe Loams	0,012	0,075	0,039	0,018	46,3
Gliny ilaste i pylasto-ilaste Clay loams, silty clay loams	0,014	0,027	0,022	0,004	19,9
Pyły gliniaste Loamy silts	0,034	0,085	0,062	0,011	18,2
Pyły ilaste Clay silts	0,020	0,093	0,054	0,0013	24,7

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że można nieznacznie skorygować ustalenia Dexter'a w następujący sposób: wartość wskaźnika $S \leq 0,020$ – jakość fizyczna gleby bardzo słaba, $0,021-0,030$ – jakość fizyczna słaba, $0,031-0,040$ – jakość fizyczna średnia, $0,041-0,050$ – jakość fizyczna dobra, $>0,050$ – jakość fizyczna bardzo dobra.



Rys. 20. Zależność wskaźnika jakości fizycznej gleby S od zawartości pyłu: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 20. Dependence of soil physical quality index S on silt content: a) in Ap horizon, b) in subsoil



Rys. 21. Zależność wskaźnika jakości fizycznej gleby S od retencji wody użytecznej: a) w poziomie Ap, b) w poziomach podpowierzchniowych

Fig. 21. Dependence of soil physical quality index S on retention of useful water: a) in Ap horizon, b) in subsoil

Przedstawione wyniki stanowią opracowanie klasyfikacji jakości stanu fizycznego gleb Polski na podstawie bogatego materiału analitycznego, charakteryzującego wybrane właściwości fizyczne gleb. Ustalenie liczb granicznych dla wybranych kryteriów oceny stanu fizycznego gleb wykorzystujące dotychczasowy dorobek naukowy autorów krajowych i zagranicznych, stanowi jego twórcze rozwinięcie. Określone powyżej przedziały wartości dla właściwości wodno-

powietrznych powinny być weryfikowane w dalszych badaniach. Mogą być nieznacznie skorygowane i uściślone dla poszczególnych rodzajów gleb i poziomów genetycznych.

4.9. Charakterystyka jakości fizycznej gleb według klas bonitacyjnych i kompleksów przydatności rolniczej

Na podstawie uzyskanych wyników badań przedstawiono propozycje uzupełnienia charakterystyki klas bonitacyjnych i kompleksów przydatności rolniczej wybranych typów gleb uprawnych o uściślone wartości ich właściwości fizycznych w okresie zbioru i po zbiorze zbóż. Podstawą wyliczeń przedziałów wartości badanych parametrów dla poszczególnych klas bonitacyjnych były średnie arytmetyczne i odchylenia standardowe. Stwierdzono, że większe różnice w jakości stanu fizycznego występowały pomiędzy typami i rodzajami gleb, niż pomiędzy poszczególnymi klasami bonitacyjnymi i kompleksami przydatności rolniczej. Różnice w jakości fizycznej pomiędzy klasami bonitacyjnymi w tym samym typie i rodzaju gleb nie zawsze były istotne.

A. Gleby płowe wytworzone z utworów pyłowych różnej genezy charakteryzują się bardzo dobrą jakością fizyczną poziomów Ap, w tym bardzo dobrymi właściwościami wodnymi, korzystną agregacją, małą gęstością gleby, średnią wodoodpornością agregatów i średnimi właściwościami powietrznymi. Jakość fizyczna poziomów podpowierzchniowych tych gleb jest zróżnicowana, od słabej do bardzo dobrej.

a). Gleby płowe wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych zaliczane do klasy bonitacyjnej II i kompleksu psennego bardzo dobrego (1). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,330\text{--}0,474\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,094\text{--}0,192\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,33\text{--}1,49\text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,433\text{--}0,491\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5\text{ kPa}$) $0,353\text{--}0,387\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,267\text{--}0,301\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie polowej pojemności wodnej ($-15,5\text{ kPa}$) $0,053\text{--}0,129\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Eet i Bt (25-100 cm) zawierają $0,335\text{--}0,449\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,003\text{--}0,043\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,41\text{--}1,56\text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,419\text{--}0,469\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5\text{ kPa}$) $0,342\text{--}0,372\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,213\text{--}0,269\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie polowej pojemności wodnej ($-15,5\text{ kPa}$) $0,055\text{--}0,119\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

b). Gleby płowe wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych zaliczane do klasy bonitacyjnej IIIa-IIIb i kompleksu pszennego dobrego (2). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,353\text{--}0,547 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,149\text{--}0,307 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,26\text{--}1,38 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,470\text{--}0,522 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,312\text{--}0,362 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,229\text{--}0,277 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,121\text{--}0,199 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Eet i Bt (25-100 cm) zawierają $0,293\text{--}0,461 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,002\text{--}0,056 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,38\text{--}1,66 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,374\text{--}0,482 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną $0,268\text{--}0,376 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,158\text{--}0,232 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,077\text{--}0,133 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

c). Gleby płowe wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych zaliczane do klasy bonitacyjnej IVa-IVb i kompleksu pszennego wadliwego (3). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,340\text{--}0,422 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,091\text{--}0,287 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,37\text{--}1,51 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,431\text{--}0,481 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną $0,317\text{--}0,353 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,218\text{--}0,248 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,081\text{--}0,159 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Bt i BC (25-100 cm) zawierają $0,312\text{--}0,524 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,011\text{--}0,127 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,42\text{--}1,72 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,352\text{--}0,466 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną $0,240\text{--}0,382 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,104\text{--}0,218 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,047\text{--}0,149 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

d). Gleby płowe wytworzone z utworów pyłowych wietrzeniowych zaliczane do klasy bonitacyjnej IIIb i kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego (8). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,395\text{--}0,453 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,086\text{--}0,162 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,45\text{--}1,57 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,405\text{--}0,453 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną $0,319\text{--}0,337 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,230\text{--}0,248 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,071\text{--}0,129 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Eet i Btg (25-100 cm) zawierają $0,169\text{--}0,461 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,005\text{--}0,067 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agrega-

tów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,55-1,77 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,337-0,419 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną $0,213-0,351 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,109-0,215 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie polowej pojemności wodnej $0,048-0,146 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

B. Czarne ziemie wytworzone z utworów pyłowych różnej genezy charakteryzują się bardzo dobrą jakością fizyczną poziomów Ap i bardzo dobrą lub dobrą jakością głębszych poziomów genetycznych. Mają bardzo korzystny skład agregatowy, dobrą wodoodporność agregatów, bardzo małą lub małą gęstość gleby, bardzo dobre lub dobre właściwości wodne i dobre właściwości powietrzne.

a). Czarne ziemie wytworzone z utworów pyłowych należące do I klasy bonitacyjnej i kompleksu pszennego bardzo dobrego (1). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,435-0,569 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,250-0,306 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,25-1,31 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,492-0,517 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,304-0,344 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,200-0,249 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie polowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,160-0,213 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Aa i AC (25-100 cm) czarnych ziem I klasy bonitacyjnej zawierają $0,418-0,506 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,015-0,123 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,33-1,47 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną: $0,445-0,495 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną $0,286-0,314 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,212-0,234 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie polowej pojemności wodnej $0,152-0,190 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

b). Czarne ziemie wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych i wietrzeniowych, zaliczane do II klasy bonitacyjnej i kompleksu pszennego bardzo dobrego (1). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,376-0,446 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,132-0,262 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,21-1,47 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,431-0,529 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,321-0,352 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,176-0,232 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie polowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,087-0,199 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Aa i AC (25-100 cm) zawierają $0,324-0,470 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,038-0,200 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,28-1,48 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,438-0,510 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną

0,301-0,363 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin 0,191-0,265 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie polowej pojemności wodnej 0,116-0,166 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

c). Czarne ziemie wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych i wietrzeniowych, zaliczane do klasy bonitacyjnej IIIa i kompleksu pszennego dobrego (2). Poziom Ap tych gleb zawiera 0,292-0,484 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i 0,161-0,480 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby 1,31-1,47 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, porowatość ogólną 0,434-0,494 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, połową pojemność wodną (przy potencjale $-15,5$ kPa) 0,319-0,337 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin 0,185-0,239 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie polowej pojemności wodnej ($-15,5$ kPa) 0,105-0,169 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Aa, ABbr i Bbr (25-100 cm) zawierają 0,291-0,521 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i 0,017-0,187 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby 1,31-1,51 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, porowatość ogólną 0,431-0,497 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, połową pojemność wodną 0,302-0,364 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin 0,161-0,277 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie polowej pojemności wodnej 0,100-0,162 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

d). Czarne ziemie wytworzone z utworów pyłowych lessopodobnych, zaliczane do klasy bonitacyjnej IVa i kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego (8). Poziom Ap tych gleb zawiera 0,381-0,433 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i 0,178-0,466 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby 1,24-1,52 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, porowatość ogólną 0,416-0,514 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, połową pojemność wodną (przy potencjale $-15,5$ kPa) 0,316-0,368 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin 0,196-0,234 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie polowej pojemności wodnej 0,092-0,152 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe ACg i G (25-100 cm) zawierają 0,258-0,444 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i 0,035-0,153 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby 1,40-1,66 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, porowatość ogólną 0,374-0,462 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, połową pojemność wodną 0,270-0,364 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin 0,150-0,224 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie polowej pojemności wodnej 0,067-0,135 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

C. Gleby płowe wytworzone z lessów charakteryzują się bardzo dobrą lub dobrą jakością fizyczną poziomów Ap i poziomów podpowierzchniowych, w tym korzystnym składem agregatowym, zróżnicowaną wodoodpornością agregatów (od bardzo dużej do średniej w poziomie Ap i bardzo małą w poziomach głębszych), bardzo małą lub małą gęstością gleby, bardzo dobrymi właściwościami wodnymi oraz średnimi właściwościami powietrznymi.

a). Gleby płowe wytworzone z lessów, zaliczane do klasy bonitacyjnej II i kompleksu pszennego bardzo dobrego (1). Poziom Ap tych gleb zawiera 0,388-0,544 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i 0,212-0,326 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby 1,17-1,43 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną 0,456-0,554 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5$ kPa) 0,325-0,367 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin 0,262-0,290 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5$ kPa) 0,092-0,226 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Eet i Bt (25-100 cm) zawierają 0,293-0,463 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i 0,008-0,048 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby 1,40-1,50 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną 0,435-0,475 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną 0,326-0,358 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin 0,208-0,264 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej 0,085-0,141 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

b). Gleby płowe wytworzone z lessów, zaliczane do klasy bonitacyjnej IIIa-IIIb i kompleksu pszennego dobrego (2). Poziom Ap tych gleb zawiera 0,350-0,528 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i 0,274-0,480 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby 1,24-1,48 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną 0,439-0,531 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5$ kPa) 0,275-0,329 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin 0,183-0,257 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5$ kPa) 0,124-0,242 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Eet i Bt (25-100 cm) zawierają 0,243-0,407 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i 0,009-0,049 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby 1,44-1,66 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną 0,379-0,463 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną 0,299-0,345 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin 0,161-0,247 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej 0,066-0,134 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

c). Gleby płowe wytworzone z lessów, zaliczane do klasy bonitacyjnej IVa-IVb i kompleksu pszennego wadliwego (3). Poziom Ap tych gleb zawiera 0,345-0,481 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i 0,095-0,225 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby 1,46-1,58 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną 0,402-0,452 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5$ kPa) 0,322-0,338 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin 0,196-0,220 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5$ kPa) 0,068-0,126 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Bt, BC i Cca (25-100 cm) zawierają 0,269-0,433 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i 0,005-0,067 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymia-

rach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,38-1,54 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,425-0,485 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną $0,336-0,384 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,222-0,308 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,078-0,112 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

D. Czarnoziemy wytworzone z lessów wyróżniają się bardzo dobrą jakością fizyczną w całym profilu. Mają bardzo korzystny skład agregatowy, małą lub bardzo małą gęstość gleby, bardzo dobre właściwości wodne, dobre właściwości powietrzne, natomiast średnią wodoodporność agregatów w poziomie Ap i słabą w poziomach podpowierzchniowych.

a). Czarnoziemy wytworzone z lessów należące do I klasy bonitacyjnej i kompleksu rolniczej przydatności pszennego bardzo dobrego (1). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,370-0,520 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,171-0,247 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,30-1,36 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,476-0,502 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,349-0,381 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,239-0,279 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,110-0,140 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe A i AC (25-100 cm) czarnoziemów I klasy bonitacyjnej zawierają $0,364-0,526 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,027-0,183 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,25-1,41 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną: $0,467-0,527 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,333-0,361 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,222-0,262 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,116-0,184 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

b). Czarnoziemy wytworzone z lessów, zaliczane do II klasy bonitacyjnej i kompleksu pszennego bardzo dobrego (1). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,440-0,480 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,128-0,243 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,29-1,49 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,432-0,506 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,310-0,363 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,201-0,271 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,089-0,156 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe A i ABbr czarnoziemów (25-100 cm) zawierają $0,289-0,417 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,028-0,068 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,27-1,45 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,454-0,520 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną $0,339-0,371 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,249-0,285 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,087-0,177 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

c). Czarnoziemy wytworzone z lessów, zaliczane do klasy bonitacyjnej IIIa i kompleksu pszennego dobrego (2). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,440\text{--}0,478 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,085\text{--}0,549 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,22\text{--}1,42 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,446\text{--}0,532 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,309\text{--}0,367 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,204\text{--}0,262 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,085\text{--}0,217 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe ABbr, Bbr i Cca (25-100 cm) zawierają $0,344\text{--}0,560 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,006\text{--}0,186 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,32\text{--}1,54 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,423\text{--}0,505 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,327\text{--}0,367 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,229\text{--}0,275 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,071\text{--}0,165 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

d). Czarnoziemy wytworzone z lessów, zaliczane do klasy bonitacyjnej IVa i kompleksu pszennego wadliwego (3). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,367\text{--}0,463 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,115\text{--}0,327 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,39\text{--}1,51 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,428\text{--}0,476 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,318\text{--}0,348 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,208\text{--}0,238 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,086\text{--}0,152 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Ich poziomy podpowierzchniowe ABbr, Bbr i Cca (25-100 cm) zawierają $0,327\text{--}0,471 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,029\text{--}0,123 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,28\text{--}1,50 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,441\text{--}0,521 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,331\text{--}0,371 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,234\text{--}0,288 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,091\text{--}0,169 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

E. Gleby płowe wytworzone z glin zwałowych charakteryzują się dobrą lub średnią jakością fizyczną poziomu Ap, w tym korzystnym lub średnio korzystnym składem agregatowym, zróżnicowaną (od bardzo dużej do małej) wodoodpornością agregatów, średnią gęstością gleby oraz dobrymi lub średnimi właściwościami wodnymi i powietrznymi. Poziomy podpowierzchniowe tych gleb mają słabą (zwłaszcza Bt) lub średnią jakość fizyczną, w tym średnio korzystny skład agregatowy, małą wodoodporność agregatów, dużą lub bardzo dużą gęstość gleby oraz słabe lub średnie właściwości wodne i powietrzne.

a). Gleby płowe wytworzone z glin zwałowych, należące do klasy bonitacyjnej II i kompleksu pszennego bardzo dobrego (1). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,363\text{--}0,435\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,213\text{--}0,423\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,48\text{--}1,66\text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,366\text{--}0,436\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5\text{ kPa}$) $0,215\text{--}0,263\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,141\text{--}0,183\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5\text{ kPa}$) $0,128\text{--}0,196\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Eet i Bt (25-100 cm) zawierają $0,201\text{--}0,479\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,089\text{--}0,241\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,54\text{--}1,82\text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,311\text{--}0,419\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną ($-15,5\text{ kPa}$) $0,213\text{--}0,283\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,104\text{--}0,170\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,044\text{--}0,188\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

b). Gleby płowe wytworzone z glin zwałowych, należące do klasy bonitacyjnej IIIa-IIIb i kompleksu pszennego dobrego (2). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,291\text{--}0,397\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,243\text{--}0,413\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,39\text{--}1,61\text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,386\text{--}0,470\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5\text{ kPa}$) $0,273\text{--}0,307\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,181\text{--}0,233\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5\text{ kPa}$) $0,091\text{--}0,185\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Eet i Bt (25-100 cm) zawierają $0,192\text{--}0,410\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,131\text{--}0,261\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,66\text{--}1,78\text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,331\text{--}0,377\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną $0,265\text{--}0,293\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,101\text{--}0,159\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,045\text{--}0,105\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

c). Gleby płowe wytworzone z glin zwałowych, należące do klasy bonitacyjnej IVa i kompleksu pszennego wadliwego (3). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,314\text{--}0,358\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,113\text{--}0,247\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,48\text{--}1,66\text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,370\text{--}0,438\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5\text{ kPa}$) $0,226\text{--}0,270\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,128\text{--}0,188\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5\text{ kPa}$) $0,109\text{--}0,205\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Bt, BC i Cca (25-100 cm) zawierają $0,156\text{--}0,404\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie su-

chych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,030\text{--}0,148 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,58\text{--}1,82 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,315\text{--}0,405 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,198\text{--}0,290 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,102\text{--}0,188 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,046\text{--}0,186 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

F. Czarne ziemie wytworzone z glin zwałowych charakteryzują się zróżnicowaną jakością fizyczną, od bardzo dobrej do słabej w poziomach Ap oraz słabą lub średnią w poziomach podpowierzchniowych. Poziomy Ap mają korzystny lub średnio korzystny skład agregatowy, dobrą wodoodporność, zróżnicowaną gęstość gleby, średnie właściwości wodne (często dużą pojemność wodną w punkcie trwałego wędnięcia roślin) i średnie właściwości powietrzne.

a). Czarne ziemie wytworzone z glin zwałowych, należące do I klasy bonitacyjnej i kompleksu pszennego bardzo dobrego. Poziom Ap tych gleb zawiera $0,346\text{--}0,440 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,250\text{--}0,318 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,45\text{--}1,61 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,382\text{--}0,442 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,260\text{--}0,292 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,149\text{--}0,169 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,094\text{--}0,180 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Aa i AC (25-100 cm) czarnych ziem I klasy bonitacyjnej zawierają $0,301\text{--}0,393 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,105\text{--}0,223 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,48\text{--}1,66 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną: $0,366\text{--}0,438 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,239\text{--}0,265 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,139\text{--}0,161 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,119\text{--}0,181 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

b). Czarne ziemie wytworzone z glin zwałowych, należące do II klasy bonitacyjnej i kompleksu pszennego bardzo dobrego (1). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,378\text{--}0,388 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,123\text{--}0,205 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,54\text{--}1,70 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,349\text{--}0,413 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,248\text{--}0,280 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,142\text{--}0,176 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,077\text{--}0,159 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Aa i AC (25-100 cm) zawierają $0,318\text{--}0,406 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,084\text{--}0,158 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agrega-

tów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,63-1,79 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,326-0,386 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,227-0,267 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,127-0,145 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,071-0,147 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

c). Czarne ziemie wytworzone z glin zwałowych, należące do klasy bonitacyjnej IIIa i kompleksu pszennego dobrego (2). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,284-0,324 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,302-0,404 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,62-1,78 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,316-0,378 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,252-0,290 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,131-0,147 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,043-0,107 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Aa, ACg i Cg (25-100 cm) zawierają $0,163-0,369 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,181-0,329 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,62-1,76 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,339-0,387 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną $0,214-0,262 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,104-0,144 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,093-0,159 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

d). Czarne ziemie wytworzone z glin zwałowych należące do klasy bonitacyjnej IVa i kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego (8). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,322-0,556 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,288-0,439 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,08-1,46 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,432-0,552 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,310-0,428 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,166-0,280 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,095-0,149 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe ACg, G i IIG (25-100 cm) zawierają $0,158-0,428 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,119-0,379 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,41-1,67 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,371-0,455 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,215-0,355 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,107-0,203 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,076-0,178 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

G. Gleby płowe wytworzone z piasków charakteryzują się dobrą lub średnią jakością fizyczną poziomu Ap, w tym średnio korzystnym lub niekorzystnym składem agregatowym, małą wodoodpornością agregatów, średnią lub dużą gęstością gleby, dobrymi lub średnimi właściwościami wodnymi i dobrymi właściwościami powietrznymi. Poziomy podpowierzchniowe

mają słabą jakość fizyczną, zwłaszcza bardzo małą lub małą wodoodporność agregatów, bardzo dużą lub dużą gęstość gleby, słabe lub średnie właściwości wodne i średnie właściwości powietrzne.

a). Gleby płowe wytworzone z piasków gliniastych, niecałkowicie na glinie zwałowej, należące do klasy bonitacyjnej IIIa-IIIb i kompleksu żytniego bardzo dobrego (4). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,076\text{--}0,296 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,099\text{--}0,355 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,44\text{--}1,64 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,374\text{--}0,454 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,218\text{--}0,284 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,145\text{--}0,245 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,124\text{--}0,202 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe IIeet i IIbt (25-100 cm) zawierają $0,143\text{--}0,327 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,044\text{--}0,156 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,65\text{--}1,79 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,324\text{--}0,376 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,217\text{--}0,283 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,104\text{--}0,170 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,057\text{--}0,145 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

b). Gleby płowe wytworzone z piasków gliniastych, należące do klasy bonitacyjnej IVa-IVb i kompleksu żytniego dobrego (5). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,192\text{--}0,394 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,128\text{--}0,286 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,44\text{--}1,66 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,362\text{--}0,450 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,201\text{--}0,265 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,148\text{--}0,194 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,099\text{--}0,247 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Eet, Bt i IIbt (25-100 cm) zawierają $0,088\text{--}0,304 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,010\text{--}0,096 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,60\text{--}1,78 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,328\text{--}0,396 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,145\text{--}0,249 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,086\text{--}0,194 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,095\text{--}0,135 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

H. Czarne ziemie wytworzone z piasków charakteryzują się średnią lub dobrą jakością fizyczną poziomu Ap i słabą jakością poziomów podpowierzchniowych. Poziom Ap ma bardzo zróżnicowany skład agregatowy (od bardzo niekorzystnego do korzystnego), dużą wodoodporność agregatów, średnią lub dużą gęstość gleby, średnie właściwości wodne i dobre właści-

wości powietrzne. Poziomy podpowierzchniowe mają najczęściej małą lub średnią wodoodporność agregatów, dużą lub bardzo dużą gęstość gleby, bardzo słabe lub słabe właściwości wodne, zróżnicowane właściwości powietrzne (często nadmierną pojemność powietrzną).

a). Czarne ziemie wytworzone z piasków gliniastych, zaliczane do klasy bonitacyjnej IIIa i kompleksu żyniego bardzo dobrego (4). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,256\text{--}0,356 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,252\text{--}0,340 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,50\text{--}1,66 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,368\text{--}0,424 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,202\text{--}0,256 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,143\text{--}0,171 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,152\text{--}0,182 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Aa, IIAC i IICg (25-100 cm) zawierają $0,255\text{--}0,433 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,088\text{--}0,312 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,65\text{--}1,77 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,331\text{--}0,379 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,200\text{--}0,270 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,107\text{--}0,155 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,079\text{--}0,161 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

b). Czarne ziemie wytworzone z piasków gliniastych, należące do klasy bonitacyjnej IVa i kompleksu żyniego dobrego (5). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,283\text{--}0,493 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,252\text{--}0,340 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,44\text{--}1,64 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,374\text{--}0,448 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną (przy potencjale $-15,5 \text{ kPa}$) $0,239\text{--}0,267 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,132\text{--}0,178 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5 \text{ kPa}$) $0,126\text{--}0,190 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Aa, ACg i Cg (25-100 cm) zawierają $0,297\text{--}0,415 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,107\text{--}0,213 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,58\text{--}1,74 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,344\text{--}0,400 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, połowę pojemność wodną $0,137\text{--}0,265 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,074\text{--}0,168 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,098\text{--}0,244 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

c). Czarne ziemie wytworzone z piasków gliniastych, należące do klasy bonitacyjnej IVa i kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego (8). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,311\text{--}0,401 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,284\text{--}0,486 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,26\text{--}1,58 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,389\text{--}0,511 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$, po-

lową pojemność wodną (przy potencjale $-15,5$ kPa) $0,247-0,315 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,139-0,211 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5$ kPa) $0,094-0,244 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Aa, IIAc_g i IIG (25-100 cm) zawierają $0,297-0,449 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,215-0,313 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,52-1,72 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,349-0,417 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, połową pojemność wodną ($-15,5$ kPa) $0,216-0,272 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,108-0,164 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,094-0,186 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

d). Czarne ziemie wytworzone z piasków gliniastych, należące do klasy bonitacyjnej IVb i kompleksu zbożowo-pastewnego słabego (9). Poziom Ap tych gleb zawiera $0,130-0,246 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,220-0,412 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, ma gęstość gleby $1,42-1,52 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,415-0,451 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, połową pojemność wodną (przy potencjale $-15,5$ kPa) $0,230-0,332 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,154-0,234 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5$ kPa) $0,092-0,212 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Poziomy podpowierzchniowe Aa, AC_g i G (25-100 cm) zawierają $0,140-0,256 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm i $0,032-0,176 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, mają gęstość gleby $1,50-1,82 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, porowatość ogólną $0,314-0,426 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, połową pojemność wodną ($-15,5$ kPa) $0,136-0,248 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, retencję wody użytecznej dla roślin $0,097-0,175 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i pojemność powietrzną w stanie połowej pojemności wodnej $0,110-0,248 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Rozwój badań gleboznawczych w ostatnich kilkudziesięciu latach upoważnia do postawienia tezy, że w XXI wieku jakość gleb nie powinna być nadal oceniana przez klasyfikator wyłącznie na podstawie badań terenowych. Klasyfikator powinien jedynie wybrać reprezentatywne dla klasyfikowanego obszaru pedony glebowe, opisać ich morfologię oraz pobrać z głównych poziomów genetycznych próbki gleby do analiz laboratoryjnych. Terenową nieprecyzyjną ocenę właściwości gleb powinny zastąpić analizy niektórych właściwości nowoczesnymi metodami przez laboratoria gleboznawcze (Paluszek i Słowińska-Jurkiewicz 2001). Ostateczną klasyfikację gruntów powinni wykonywać eksperci – gleboznawcy, po zapoznaniu się z opisem pedonu i wynikami analiz właściwości fizycznych i chemicznych.

Dyskusyjnym zagadnieniem pozostaje wybór właściwości gleb, które mogą być uznane za wskaźniki dla nowej klasyfikacji bonitacyjnej gleb. W pierwszej kolejności powinny być wybrane te właściwości, które wykazują relatywnie małą zmienność w ciągu sezonu wegetacyjnego, a wpływ zabiegów agrotechnicznych na

ich wartości jest dobrze rozpoznany (Paluszek i Słowińska-Jurkiewicz 2001). Do takich właściwości można zaliczyć: skład granulometryczny, zawartość węgla organicznego, odczyn (pH KCl), pojemność wymiany kationów, wysycenie kompleksu sorpcyjnego kationami o charakterze zasadowym i zasobność w łatwo przyswajalne dla roślin makroskładniki (P, K, Mg). Z właściwości fizycznych wykorzystane mogą być zwłaszcza: retencja wody użytecznej dla roślin, pojemność powietrzna w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5$ kPa), zawartość powietrznie suchych i wodoodpornych agregatów glebowych o wymiarach 1-10 mm. Uzyskane wyniki pozwalają na uzupełnienie klasyfikacji bonitacyjnej wybranych jednostek systematycznych gleb gruntów uprawnych Polski o bardziej precyzyjną ocenę ich właściwości fizycznych.

5. WNIOSKI

1. Badana zbiorowość 100 wybranych gleb pólowych, czarnych ziem i czarnoziemów uprawnych Polski charakteryzowała się dużym zróżnicowaniem pod względem składu granulometrycznego, zawartości węgla organicznego oraz właściwości fizykochemicznych i chemicznych. Przedstawiona ocena stanu fizycznego badanych jednostek systematycznych gleb wykazała bardzo duże zróżnicowanie poszczególnych właściwości i ich zależność szczególnie od składu granulometrycznego i zawartości C org.

2. Porównanie uzyskanych wyników z danymi literaturowymi pozwoliły na ocenę właściwości fizycznych jako kryteriów oceny jakości fizycznej gleb Polski i ustalenie dla nich liczb granicznych. Jako kryteria do oceny jakości fizycznej gleb najbardziej przydatne są: zawartość powietrznie suchych agregatów glebowych o wymiarach 1-10 mm ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$), zawartość wodoodpornych agregatów glebowych o wymiarach 1-10 mm ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$), połowa pojemność wodna ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$), retencja wody użytecznej dla roślin równa zawartości mezoporów o średnicy równoważnej 0,2-20 μm ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$) i pojemność powietrzna gleby w stanie połowej pojemności wodnej, określona przez zawartość makroporów o średnicy równoważnej >20 μm ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$).

3. Parametry fizyczne, takie jak: średnia ważona średnica agregatów powietrznie suchych (MWD_{dry}), średnia ważona średnica agregatów wodoodpornych (MWD_{wet}), gęstość gleby, porowatość ogólna, pojemność wodna w punkcie trwałego wędnięcia roślin (-1554 kPa), przewodnictwo wodne nasyczone, przepuszczalność powietrzna w stanie połowej pojemności wodnej ($-15,5$ kPa) i wskaźnik

S mogą być wykorzystywane jako kryteria uzupełniające oceny jakości fizycznej gleb.

4. Na podstawie zawartości powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm ustalono następujące przedziały wartości, jako liczby graniczne określające jakość składu agregatowego: zawartość $\leq 0,150 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – skład agregatowy bardzo niekorzystny, $0,151-0,250 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – skład agregatowy niekorzystny, $0,251-0,350 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – skład agregatowy średnio korzystny, $0,351-0,450 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – skład agregatowy korzystny i $>0,450 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – skład agregatowy bardzo korzystny.

5. Według średniej ważonej średnicy agregatów powietrznie suchych jakość składu agregatowego gleb sklasyfikowano następująco: $\leq 5,0 \text{ mm}$ – skład agregatowy bardzo rozdrobniony, $5,1-7,0 \text{ mm}$ – skład agregatowy rozdrobniony, $7,1-10,0 \text{ mm}$ – skład agregatowy bardzo korzystny, $10,1-13,0 \text{ mm}$ – skład agregatowy korzystny, $13,1-16,0 \text{ mm}$ – skład agregatowy średnio korzystny, $16,1-20,0 \text{ mm}$ – skład agregatowy zbrylony i $>20,0 \text{ mm}$ – skład agregatowy bardzo zbrylony.

6. Ustalono następujące liczby graniczne dla oceny jakości wodoodporności agregatów na podstawie zawartości trwałych agregatów o wymiarach 1-10 mm: $\leq 0,070 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – wodoodporność bardzo mała (bardzo słaba), $0,071-0,150 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – wodoodporność mała (słaba), $0,151-0,250 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – wodoodporność średnia, $0,251-0,400 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – wodoodporność duża (dobra) i $>0,400 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ – wodoodporność bardzo duża (bardzo dobra).

7. Gęstość gleby w okresie po zbiorach zbóż można ogólnie sklasyfikować następująco: $\leq 1,30 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo mała, $1,31-1,45 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby mała, $1,46-1,60 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby średnia, $1,61-1,75 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby duża i $>1,75 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ – gęstość gleby bardzo duża.

8. Przyjęto następujące liczby graniczne dla oceny porowatości ogólnej wszystkich badanych gleb: $\leq 0,350 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo mała, $0,351-0,400 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna mała, $0,401-0,450 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna średnia, $0,451-0,500 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna duża, $>0,500 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – porowatość ogólna bardzo duża.

9. Jako najbardziej odpowiednie liczby graniczne dla połowej pojemności wodnej uznano następujące wartości: $\leq 0,170 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – połowa pojemność wodna bardzo mała, $0,171-0,230 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – połowa pojemność mała, $0,231-0,290 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – połowa pojemność średnia, $0,291-0,350 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – połowa pojemność duża i $>0,350 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – pojemność bardzo duża.

10. Dla pojemności wodnej w punkcie trwałego więdnięcia przyjęto następujące liczby graniczne: $\leq 0,060 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – pojemność bardzo mała (bardzo korzystna), $0,061-0,090 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – pojemność mała (korzystna), $0,091-0,120 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ – pojemność

średnia, $0,121-0,150 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – pojemność duża (niekorzystna) i $>150 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – bardzo duża (bardzo niekorzystna).

11. Liczby graniczne dla pojemności powietrznej gleby w stanie polowej pojemności wodnej, równej zawartości makroporów o średnicy równoważnej $0,2-20 \mu\text{m}$, ustalono następujące: $\leq 0,070 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – pojemność powietrzna bardzo mała, $0,071-0,110 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – pojemność mała, $0,111-0,140 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – pojemność średnia, $0,141-0,180 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – pojemność duża, $0,181-0,220 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – bardzo duża i $>0,220 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – pojemność powietrzna nadmierna.

12. Przyjęto następujące wartości jako liczby graniczne dla retencji wody użytkowej dla roślin: $\leq 0,080 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – retencja bardzo mała, $0,081-0,120 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – retencja mała, $0,121-0,170 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – retencja średnia, $0,171-0,210 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – retencja duża i $>0,210 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ – retencja bardzo duża.

13. Liczby graniczne dla przewodnictwa wodnego nasyconego ustalono następujące: $\leq 0,100 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ – przewodnictwo wodne bardzo małe, $0,101-0,500 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ – przewodnictwo wodne małe, $0,501-2,000 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ – przewodnictwo średnie, $2,001-10,00 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ – przewodnictwo duże i $>10,00 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ – przewodnictwo wodne bardzo duże.

14. Dla przepuszczalności powietrznej gleb w stanie polowej pojemności wodnej (przy $-15,5 \text{ kPa}$) ustalono następujące liczby graniczne: od $1,8 \cdot 10^{-8}$ do $5,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ – przepuszczalność powietrzna bardzo mała, od $5,1 \cdot 10^{-8}$ do $20,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ – przepuszczalność powietrzna mała, od $20,1 \cdot 10^{-8}$ do $50,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ – przepuszczalność średnia, od $50,1 \cdot 10^{-8}$ do $100,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ – przepuszczalność duża i $>100,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ – przepuszczalność powietrzna bardzo duża.

15. Wskaźnik fizycznej jakości gleb S według Dextera opiera się na zawartości mezoporów glebowych, nie uwzględnia natomiast wodoodporności agregatów glebowych, przewodnictwa wodnego i przepuszczalności powietrznej. Dlatego nie może być jedynym kryterium dla kompleksowej oceny stanu fizycznego gleb.

16. Ustalone liczby graniczne dla wybranych kryteriów oceny stanu fizycznego gleb powinny być weryfikowane w dalszych badaniach. Mogą być nieznacznie skorygowane i uściślone dla poszczególnych rodzajów gleb i poziomów genetycznych.

17. Uzyskane wyniki badań umożliwiły ocenę jakości fizycznej gleb uprawnych Polski. Ustalono graniczne wartości liczbowe właściwości fizycznych gleb reprezentujących wybrane typy genetyczne, należących do różnych klas bonitacyjnych i kompleksów rolniczej przydatności gleb. Podstawą ustalenia tych wartości badanych parametrów były średnie arytmetyczne i odchylenia standardowe.

6. PIŚMIENNICTWO

- Abiven S., Menasseri S., Angers D.A., Leterme P., 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *Europ. J. Soil Sci.*, 58, 239-247.
- Aimrun W., Amin M. S. M., Eltaib S. M., 2004. Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity *Geoderma*, 121, 3-4, 197-203.
- Amézketa E., 1999. Soil aggregate stability: a review. *J. Sustain. Agricult.*, 14, 2/3, 82-151.
- Andrzejewski M. 1993. Znaczenie próchnicy dla żyzności gleb. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 411, 11-22.
- Arshad M.A., Coen G.M., 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *Am. J. Altern. Agric.*, 7, 25-31.
- Arshad M.A., Lowery B., Grossman B., 1996. Physical tests for monitoring soil quality. W: *Methods for assessing soil quality* (red. J.W. Doran, A.J. Jones). Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ., 49, Madison, WI, USA, 123-142.
- Arshad M.A., Martin S., 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agric. Ecosys. Environ.*, 88, 153-160.
- Assouline S., 2001. A model for soil relative hydraulic conductivity based on the water retention characteristic curve. *Water Resources Res.*, 37, 265-271.
- Assouline S., 2006. Modelling the relationship between soil bulk density and the water retention curve. *Vadose Zone J.*, 5, 554-563.
- Aziz I., Ashraf M., Mahmood T., Islam K.R., 2011. Crop rotation impact on soil quality. *Pakistan J. Bot.* 43, 949-960.
- Baranowski R., 1980. Wpływ gęstości gleby na jej agrofizyczne właściwości. *Rocz. Glebozn.*, 31, 2, 15-31.
- Barthès B., Roose E., 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 47, 133-149.
- Bastida F., Zsolnay A., Hernandez T., Garcia C., 2008. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. *Geoderma*, 147, 159-171.
- Bengough A.G., Bransby M.F., Hans J., McKenna S.J., Roberts T.J., 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *J. Experim. Bot.*, 57, 437-447.
- Boix-Fayos C., Calvo-Cases A., Imeson A.C., Soriano-Soto M.D., 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena*, 44, 47-67.
- Bouma J., Droogers P., Peters P., 1999. Defining the "ideal" soil structure in surface soil of a Typic Fluvaquent in the Netherlands. *Soil Sci Soc. Am. J.*, 63, 343-348.
- Braunack M.V., Dexter A.R., 1989. Soil aggregation in the seedbed: a review. II. Effect of aggregate size on plant growth. *Soil Tillage Res.*, 14, 281-298.
- Brewer R., Sleeman J. R., 1960. Soil structure and fabric. Their definition and description. *J. Soil Sci.*, 11, 172-185.
- Brogowski Z., 1990. Próba obliczenia niektórych właściwości fizycznych gleb na podstawie analizy ziarnowej. *Rocz. Glebozn.*, 41, 3-4, 17-28.
- Bronick C.J., Lal R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3-22.

- Brożek S., 2007. Liczbowa wycena „jakości” gleb – narzędzie w diagnozowaniu siedlisk leśnych. *Sylwan*, 2, 35-42.
- Brożek S., Zwydak M., 2003. Atlas gleb Polski. Centrum Inf. Lasów Państwowych, Warszawa.
- Canarache A., 1991. Factors and indices regarding excessive compactness of agricultural soil. *Soil Till. Res.*, 19, 145-164.
- Cockroft B., Olsson K.A., 1997. Case study of soil quality in south-eastern Australia: management of structure for roots in duplex soils. W: *Soil quality for crop production and ecosystem health* (red. E.G. Gregorich, M.R. Carter). *Developments in Soil Science*, 25, Elsevier, New York, 339-350.
- Cosentino D., Chenu C., Le Bissonnais Y., 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biol. Biochem.*, 38, 2053-2062.
- Craul P.J., 1999. *Urban soils: applications and practices*. Wiley, Toronto.
- Czachor H., 2001. Wpływ geometrii próbki na retencję wodną gleby. *Acta Agrophysica*, 53, 81-91.
- Czyż E.A., 2004. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil Till. Res.*, 79, 153-166.
- Darbox F., Le Bissonnais Y., 2007. Changes in structural stability with soil surface crusting: consequences for erodibility estimation. *Europ. J. Soil Sci.*, 58, 1107-1114.
- De Boodt M.F., 1995. Models of particle aggregation and their usefulness. *Int. Agrophysics*, 9, 11-17.
- Degens B.P., 1997. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factor affecting these: a review. *Aust. J. Soil Res.*, 35, 431-459.
- Dexter A. R., 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.*, 11, 199-238.
- Dexter A. R., Birkas M., 2004. Prediction of the soil structures produced by tillage. *Soil Till. Res.*, 79, 233-238.
- Dexter A.R., 1997. Physical properties of tilled soils. *Soil Tillage Res.*, 43, 41-63.
- Dexter A.R., 2004a. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 201-214.
- Dexter A.R., 2004b. Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma*, 120, 215-225.
- Dexter A.R., 2004c. Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-teory. *Geoderma*, 120, 227-239.
- Dexter A.R., Czyż E.A., 2007. Application of S-teory in the study of soil physical degradation and its consequences. *Land Degrad. Develop.*, 18, 369-381.
- Dexter A.R., Czyż E.A., Gałę O.P., 2004. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil Till. Res.*, 79, 185-189.
- Dexter A.R., Czyż E.A., Gałę O.P., 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil Till. Res.*, 93, 412-419.
- Dilkova R., Jokova M., Kerchev G, Kercheva M., 2002. Aggregate stability as a soil quality criterion. *Options Méditerranéennes*, A, 50, 305-312.
- Domżał H., 1979. Wpływ zagęszczenia gleby na zawartość wody silnie związanej oraz retencję wody użytecznej i produkcyjnej. *Rocz. Glebozn.*, 30, 3, 47-72.
- Domżał H., Pranagal J., 1994. Wodoodporność agregatów glebowych jako wskaźnik degradacji gleb wywołanej użytkowaniem rolniczym. *Fragm. Agronom.*, 11, 3, 22-34.

- Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., 1988. Wpływ składu granulometrycznego i próchnicy na ilość agregatów glebowych i ich odporność na działanie wody. *Rocz. Glebozn.*, 39, 3, 5-19.
- Drewry J.J., 2006. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: a review. *Agric. Ecosys. Environ.*, 114, 159-169.
- Drewry J.J., Cameron K.C., Buchan G.D., 2001. Effect of simulated dairy cow treading on soil physical properties and ryegrass pasture yield. *New Zealand J. Agric. Res.*, 44, 181-190.
- Drewry J.J., Cameron K.C., Buchan G.D., 2008. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing – a review. *Aust. J. Soil Res.*, 46, 237-256.
- Drewry J.J., Paton R.J., 2005. Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. *Aus. J. Soil Res.*, 43, 525-531.
- Dziadowiec H., 1993. Ekologiczna rola próchnicy glebowej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 411, 269-282.
- Emerson W.W., 1995. Water retention, organic C and soil texture. *Aust. J. Soil Res.*, 33, 241-251.
- Emerson W.W., McGarry D., 2003. Organic carbon and soil porosity. *Aust. J. Soil Res.*, 41, 107-118.
- Erkossa T., Itanna F., Stahr K., 2007. Indexing soil quality: a new paradigm in soil science research. *Aust. J. Soil Res.*, 45, 129-137.
- Eynard A., Schumacher T.E., Lindstrom M.J., Malo D.D., 2004. Porosity and pore-size distribution in cultivated Ustolls and Usterts. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 1927-1934.
- Francis G.S., Fraser P.M., 1998. The effects of three earthworm species on soil macroporosity and hydraulic conductivity. *Applied Soil Ecology*, 10, 1-2, 11-19.
- Gajewski P., Kaczmarek Z., Owczarzak W., Grzelak M., 2007. Współczynnik filtracji w glebach pływowych wytworzonych z glin zwałowych równiny dennomorenowej. *Rocz. Glebozn.*, 58, 3-4, 78-83.
- Głąb T., Kulig B., 2008. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). *Soil Till. Res.*, 99, 169-178.
- Gliński J., Stępniewski W., 1984. Procesy biologiczne i chemiczne w glebie uzależnione od stanu natlenienia. *Probl. Agrofizyki*, 44.
- Gliński J., Stępniewski W., 1985. Reakcja roślin na stan aeracji gleby. *Probl. Agrofizyki*, 45.
- Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P., 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Soil Res.*, 32, 1043-1068.
- Greenland D.J., 1981. Soil management and soil degradation. *J. Soil Sci.*, 32, 301-322.
- Guber A.K., Rawls W.J., Shein E.V., Pachepsky Ya.A., 2003. Effect of soil aggregate size distribution on water retention. *Soil Sci.*, 168, 223-233.
- Håkansson I., Lipiec J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res.*, 53, 71-85.
- Hofman J., Bezchlebová J., Dušek L., Doležal L., Holoubek I., Anděl P., Ansorgová A., Malý S., 2003. Novel approach to monitoring of the soil biological quality. *Environ. Intern.*, 28, 771-778.
- Hudson B.D., 1994. Soil organic matter and available water capacity. *J. Soil Water Conserv.*, 49, 189-193.
- IUNG, 1990. Zalecenia nawozowe. cz. I, Puławy.
- Iversen B.V., Moldrup P., Schjønning P., Loll P., 2001. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. *Soil Sci.*, 166, 643-659.

- Iwanek M., 2005. Badanie współczynnika filtracji gleb metodą polową i w laboratorium. *Acta Agrophysica*, 5 (1), 39-47.
- Iwanek M., 2008. A method for measuring saturated hydraulic conductivity in anisotropic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72, 1527-1531.
- Iwanek M., Widomski M., 2005. Przepuszczalność gleb w stanie nasyconym. W: Zintegrowany system zabezpieczeń przeciwoerozyjnych i ochrony wód terenów wyżynnych intensywnie użytkowanych rolniczo (red. W. Olszta, D. Kowalski). *Acta Agrophysica*, 121, 22-30.
- Jastrow J.D., Miller R.M., 1998. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organomineral associations. W: *Soil processes and the carbon cycle* (red. R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett, B.A. Stewart), CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 207-223.
- Jones C.A., 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 1208-1211.
- Kaczmarek Z., Gajewski P., Owczarzak W., Grzelak M., 2007. Wybrane właściwości fizyczne i wodne gleb pływowych wytworzonych z glin zwałowych równiny dennomorenowej (W rm). *Rocz. Glebozn.*, 58, 1-2, 45-52.
- Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E., 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 4-10.
- Kay B.D., 1998. Soil structure and organic carbon: a review. W: *Soil processes and the carbon cycle* (red. R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett, B.A. Stewart), CRC Press, Boca Raton, Florida, 169-197.
- Kemper W.D., Rosenau R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. W: Klute A. *Methods of Soil Analysis. 1. Physical and Mineralogical Methods*. ASA-SSSA Inc., Madison, WI, USA, 425-444.
- Keren R., Ben-Hur M., 2003. Interaction effects of clay swelling and dispersion and CaCO_3 content on saturated hydraulic conductivity. *Aust. J. Soil Res.*, 41, 979-989.
- Knoepf J.D., Coleman D.C., Crossley D.A.Jr., Clark J.S., 2000. Biological indices of soil quality: an ecosystem case study of their use. *Forest Ecol. Manag.*, 138, 357-368.
- Kobierski M., Dąbkowska-Naskręt H., 2002. Skład mineralogiczny i wybrane właściwości fizykochemiczne zróżnicowanych typologicznie gleb Równiny Inowrocławskiej. Cz. I. Morfologia oraz właściwości fizyczne i chemiczne wybranych gleb. *Rocz. Glebozn.*, 54, 4, 17-27.
- Kondracki J., 2001. *Geografia regionalna Polski*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Konstantkiewicz K., 1985. Porowatość gleby, definicje i metody oznaczania. *Probl. Agrofizyki*, 47.
- Kopittke P.M., Menzies N.W., 2007. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, 259-265.
- Kutílek M., 2004. Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil Till. Res.*, 79, 175-184.
- Kuzniecowa I.W., 1979. O niektórych kryteriach oceny fizycznych свойств почв. *Почвов.*, 3, 81-88.
- Lado M., Paz A., Ben-Hur M., 2004. Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 234-242.
- Le Bissonnais Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Europ. J. Soil Sci.*, 47, 425-437.
- Lebron I., Suarez D.L., Schaap M.G., 2002. Soil pore size and geometry as a result of aggregate-size distribution and chemical composition. *Soil Sci.*, 167, 165-172.

- Lehrsch G.A., 1998. Freeze-thaw cycles increase near-surface aggregate stability. *Soil Sci.*, 163, 63-70.
- Lenart S., 2002. Studia nad wodoodpornością agregatów glebowych w różnych systemach uprawy roli i roślin. Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa.
- Licznar M., 1985. Właściwości gleb i kierunki ich ewolucji na terenach erodowanych Płaskowyżu Głubczyckiego. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Rozpr.* 48, 1-79.
- Licznar M., Weber J., Drozd J., Licznar S.E., Jamroz E., 2000. Właściwości fizyczne gleby piaszczystej nawożonej kompostami z odpadów miejskich – pierwszy rok po nawożeniu. *Folia Univ. Agric. Stetin.* 211, *Agricultura* (84), 223-228.
- Lipiec J., 1983. Możliwości oceny przewodnictwa wodnego gleb na podstawie ich niektórych właściwości. *Probl. Agrofizyki*, 40.
- Lipiec J., 2002. Wpływ stanu zagęszczenia gleby na wzrost i funkcjonowanie roślin. *Acta Agrophysica*, 63, 49-62.
- Lipiec J., Arvidsson J., Murer E., 2003. Review of modeling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. *Soil Till. Res.*, 73, 15-29.
- Lipiec J., Dębicki R., 1989. Zależność między strukturą gleb a ich właściwościami. *Rocz. Glebozn.*, 40, 2, 5-19.
- Lipiec J., Håkansson I., 2000. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. *Soil Tillage Res.*, 53, 87-94.
- Lipiec J., Hatano R., 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116, 107-136.
- Lipiec J., Kuś J., Słowińska-Jurkiewicz A., Nosalewicz A., 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil Till. Res.*, 89, 210-220.
- Lipiec J., Walczak R., Witkowska-Walczak B., Nosalewicz A., Słowińska-Jurkiewicz A., Sławiński C., 2007. The effect of aggregate size on water retention and pore structure of two silt loam soils of different genesis. *Soil Till. Res.*, 97, 239-246.
- Logsdon S.D., Karlen D.L., 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil Till. Res.*, 78, 143-149.
- Malamoud K., McBratney A.B., Minasny B., Field D.J., 2009. Modelling how carbon affect soil structure. *Geoderma*, 149, 19-26.
- McKenzie B.M., Tisdall J.M., Vance W.H., 2011. Soil physical quality. W: *Encyclopedia of agro-physics* (red. J. Gliński, J. Horabik, J. Lipiec), *Encyclopedia of Earth Science Series*, Springer, 770-777.
- Miatkowski Z., 2001. Wpływ zabiegów agromelioracyjnych na właściwości fizyczno-wodne gleb związanych oraz ukorzenienie i plon roślin. *Wyd. IMUZ, Bydgoszcz*.
- Ministerstwo Rolnictwa, 1963. *Komentarz do tabeli klas gruntów*. Warszawa.
- Mohanty B.P., Mousli Z., 2000. Saturated hydraulic conductivity and soil water retention properties across a soil-slope transition. *Water Resources Res.*, 36, 3311-3324.
- Mualem Y., 1986. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction, and formulas. In: *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods* (Ed. A. Klute), 2nd ed., Am. Soc. Agron. Monograph 9, 799-823.

- Mueller L., Kay B.D., Been B., Hu C., Zhang Y., Wolff M., Eulenstein F., Schindler U., 2008. Visual assessment of soil structure: Part II. Implications of tillage, rotation and traffic on sites in Canada, China and Germany. *Soil Till. Res.*, 103, 188-196.
- Nawrocki S., Terelak H., 2004. Problemy wartości bonitacyjnej i użytkowej gleb Polski. *Acta Agrophysica*, 5 (108), 43-48.
- Nemes A., Rawls W.J., Pachepsky Y.A., 2005. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, 1330-1337.
- Nichols K.A., Toro M., 2011. A whole soil stability index (WSSI) for evaluate soil aggregation. *Soil Till. Res.*, 111, 99-104.
- Niedźwiecki J., Czyż E.A., Dexter A.R., 2006. Przewodność hydrauliczna warstwy ornej w zależności od parametrów fazy stałej. *Pam. Puław.*, 142, 297-307.
- Niewczas J., Witkowska-Walczak B., 2005. The soil aggregates stability index (ASI) and its extreme values. *Soil Till. Res.*, 80, 69-78.
- Oades J.M., Waters A.G., 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Aust. J. Soil Res.*, 29, 815-828.
- Olness A., Archer D., 2005. Effect of organic carbon on available water in soil. *Soil Sci.*, 170, 90-101.
- Olness A., Clapp C.E., Liu R., Palazzo A.J., 1998. Biosolids and their effects on soil properties. W: *Handbook of soil conditioners* (red. A. Wallace, R.E. Terry), Marcel Dekker, New York, 141-150.
- Orzechowski M., Smólczyński S., 2010. Struktura i wodoodporność agregatów gleb aluwialnych w krajobrazie deltowym. *Rocz. Glebozn.*, 61, 3, 87-99.
- Owczarzak W., 2002. Struktura gleb mineralnych Polski – badania modelowe. *Rocz. AR w Poznaniu. Rozpr. Nauk.*, 328.
- Pabin J., 1999. Wpływ stanu fizycznego gleby w warstwie ornej i podornej na wegetację i plonowanie roślin. *Acta Agrophysica*, 23, 217-233.
- Pabin J., Kukula S., Włodek S., Biskupski A., 1998. Optymalna gęstość – kryterium oceny właściwości fizycznych gleb w dobrej praktyce rolniczej. W: *Dobre praktyki w produkcji rolniczej*. Mat. Konf. Nauk., IUNG Puławy, K (15/1), 413-422.
- Pabin J., Włodek S., Biskupski A., 1998. Wartości krytyczne gęstości różnych gatunków gleb mineralnych. *Zesz. Nauk. AR w Szczecinie*, 195, *Agricultura* 74, 81-86.
- Pabin J., Włodek S., 1990. Wpływ zagęszczenia gleby na plonowanie pszenicy ozimej. *Mat. Międzynar. Semin. RWPG, IUNG Puławy, K/2*, 97-105.
- Pachepsky Y.A., Timlin D.J., Rawls W.J., 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 1787-1795.
- Pagliai M., Vignozzi N., Pellegrini S., 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil Till. Res.*, 79, 131-143.
- Paluszek J., 1995. Zmiany struktury i właściwości fizycznych czarnoziemów pod wpływem erozji wodnej. *Rocz. Glebozn.* 46, 1/2, 21-35.
- Paluszek J., 2001. Właściwości wodno-powietrzne erodowanych gleb pływowych wytworzonych z lessu. *Acta Agrophysica*, 56, 233-245.
- Paluszek J., 2002. Sezonowa zmienność wodoodporności agregatów w glebach wytworzonych z lessu w aspekcie ich podatności na erozję wodną. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 487, 213-221.
- Paluszek J., 2003. Kształtowanie syntetycznymi polimerami właściwości gleb erodowanych terenów lessowych. *Rozpr. Nauk. AR w Lublinie*, 277, 1-153.

- Paluszek J., 2004. Porównanie agregacji i wodoodporności agregatów w glebach pływych, czarnych ziemiach i madach rzecznych. *Roczn. Glebozn.*, 55, 1, 181-192.
- Paluszek J., 2009. Jakość stanu fizycznego zerodowanej gleby płowej nawozonej węglem brunatnym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 535, 305-312.
- Paluszek J., 2010a. Ocena jakości stanu fizycznego gleb pływych i czarnych ziem wytworzonych z utworów pyłowych. *Rocz. Glebozn.*, 61, 4, 186-193.
- Paluszek J., 2010b. Ocena struktury czarnych ziem i gleb pływych wytworzonych z utworów pyłowych. *Zesz. Nauk. Pd.-Wsch. Oddz. PTIE i PTG Oddz. w Rzeszowie*, 13, 123-124.
- Paluszek J., 2010c. The quality of structure and water-air properties of eroded Haplic Luvisol treated with gel-forming polymer. *Pol. J. Environ. Stud.*, 19, 6, 1287-1296.
- Paluszek J., Słowińska-Jurkiewicz A., 2004. Problematyka jakości gleb wytworzonych z lessu. *Acta Agrophysica*, 108, 89-100.
- Perrone J., Madramootoo C. A., 1994. Characterizing bulk density and hydraulic conductivity changes in a potato cropped field. *Soil Technology*, 7, 3, 261-268.
- Pondel H., Sadurski W., Wilkos S., 1985. Zawartość próchnicy w glebach Polski. *Pam. Puław.*, 85, 5-27.
- Poniatowska J., 2003. Gęstość objętościowa gleb mineralnych i jej znaczenie dla warunków rozwoju roślin. *Rocz. Glebozn.*, 54, 4, 1-11.
- Poulsen T.G., Iversen B.V., Yamaguchi T., Moldrup P., Schjønning P., 2001. Spatial and temporal dynamics of air permeability in a constructed fields. *Soil Sci.*, 166, 153-162.
- Pranagal J., 2007. The influence of utilizing reduced tillage systems on the retention properties of rendzina. *Pol. J. Soil Sci.*, 40, 1, 101-108.
- Pranagal J., Lipiec J., Domżał H., 2005. Changes in pore size distribution and aggregate stability of two soils under long term tillage system. *Int. Agrophysics*, 19, 165-174.
- PTG 1989. Systematyka Gleb Polski. Wydanie 4, *Rocz. Glebozn.* 40(3/4): 1-150.
- PTG 2009: Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008. *Rocz. Glebozn.*, 60, 2, 5-16.
- Quintern M., Lein M., Joergensen R.G., 2006. Changes in soil-biological quality indices after long-term addition of shredded shrubs and biogenic waste compost. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 169, 488-493.
- Rejman J., Pawłowski M., Dębicki R., 1994. Stability of aggregates and erodibility of loess soil. *Pol. J. Soil Sci.*, 27, 87-91.
- Reynolds W.D., Bowman B.T., Drury C.F., Tan C.S., Lu X., 2002. Indicators of good soil quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110, 131-146.
- Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A., Yang X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152, 252-263.
- Reynolds W.D., Drury C.F., Yang X.M., Fox C.A., Tan C.S., Zhang T.Q., 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil Till. Res.*, 96, 316-330.
- Reynolds W.D., Drury C.F., Yang X.M., Tan C.S., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interaction. *Geoderma*, 146, 466-474.
- Romano N., 1997. Water retention and movement in soil. W: *Land and water engineering* (red. H.N. Van Lier), Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, Missouri, 262-285.

- Roseberg R.J., McCoy E.L., 1992. Tillage- and traffic-induced changes in macropore continuity: air permeability assessment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 1261-1267.
- Roszak W., Radecki A., Opic J., Witkowski F., 1990. Proba określenia optymalnego zagęszczenia gleby gliniastej dla wzrostu i plonowania roślin uprawnych. Modelowanie i optymalizacja parametrów żyzności gleb. *Mat. Międzynar. Seminar. RWPg, IUNG Puławy, K/2*, 106-115.
- Rzasa S., Owczarzak W., 1992. Porosity limits of polish soils. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 398, 139-144.
- Rzasa S., Owczarzak W., 2004. *Struktura gleb mineralnych*. Wyd. AR w Poznaniu, Poznań.
- Schoenholtz S.H., Van Miegroet H., Burger J.A., 2000. A review of chemical and physical properties as indicator of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecol. Manag.*, 138, 335-356.
- Schrader S., Zhang H., 1997. Earthworm casting: stabilization or destabilization of soil structure? *Soil Biol. Biochem.*, 29, 469-475.
- Seybold C.A., Mausbach M.J., Karlen D.L., Rogers H.H., 1998. Quantification of soil quality. W: *Soil processes and the carbon cycle* (red. R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett, B.A. Stewart). CRC Press, Boca Raton, 387-404.
- Shukla M.K., Lal R., Ebinger M., 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Till. Res.*, 87, 194-204.
- Singh M.J., Khera K.L., 2009. Physical indicators of soil quality in relation to soil erodibility under different land use. *Arid Land Res. Manag.*, 23, 152-167.
- Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.*, 79, 7-31.
- Skłodowski P., Bielska A., 2009. *Potrzeby i metody aktualizacji gleboznawczej klasyfikacji gruntów*. Uczelnia Warszawska im. Marii Skłodowskiej-Curie, Warszawa.
- Skopp J., Jawson M.D., Doran J.W., 1990. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 1619-1625.
- Słowińska-Jurkiewicz A., 1988. Przepuszczalność powietrzna w leśnych i uprawnych glebach leśnych. *Zesz. Probl., Post. Nauk Rol.*, 315, 189-204.
- Słowińska-Jurkiewicz A., 1989. *Struktura i właściwości wodno-powietrzne gleb wytworzonych z lessu*. *Rocz. Nauk Rol., Ser. D Monografie*, 218.
- Ślusarczyk E., 1979. An empirical model of the optimal physical properties of soil for the requirements of field crops. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 220, 327-347.
- Ślusarczyk E., 1985. Optymalny model gleby dla potrzeb roślin uprawnych (pierwsze przybliżenie). *Rocz. Glebozn.*, 36, 1, 185-190.
- Ślusarczyk E., 1990. Optymalna gęstość trzech gleb dla wzrostu i plonowania jęczmienia jarego. *Mat. Międzynar. Seminar. RWPg, IUNG Puławy, K/2*, 116-128.
- Soil Moisture Equipment Corporation. 1985. *Instruction of laboratory set-up LAB 0123 pressure extractor*. Santa Barbara, Ca, USA.
- Stange C.F., Horn R., 2005. Modeling the soil water retention curve for conditions of variable porosity. *Vadose Zone J.*, 4, 602-613.
- Strzyjewski F., 1987. *Drenowanie*. PWN, Warszawa.
- Strzemiński M., Siuta J., Witek T., 1973. *Przydatność rolnicza gleb Polski*. PWRiL, Warszawa.

- Terelak H., Piotrowska M., Motowicka-Terelak T., Stuczyński T., Budzyńska K., 1995. Zawartość metali ciężkich i siarki w glebach użytków rolnych Polski oraz ich zanieczyszczenie tymi składnikami. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 418, 45-59.
- Touma J., 2009. Comparison of the soil hydraulic conductivity predicted from its water retention expressed by the equation of Van Genuchten and different capillary models. *Soil Sci.*, 60, 671-680.
- Trojan M.D., Linden D.R., 1998. Macroporosity and hydraulic properties of earthworm-affected soils as influenced by tillage and residue management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62, 1687-1692.
- Trzecki S., Zawadzki S., Król H., Szuniewicz J., 1971. Metody oznaczania różnych pojemności wodnych i porowatości różnicowej. *Gleb. PTG*, Warszawa.
- Turski R., Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., 1978. Przepuszczalność powietrzna jako wskaźnik stanu fizycznego gleby. *Rocz. Glebozn.*, 29, 3, 3-25.
- Turski R., Słowińska-Jurkiewicz A., Paluszek J., 1997. Struktura i właściwości wodno-powietrzne niektórych gleb Pagórów Chelmskich. *Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska, E*, 52, 269-281.
- Usowicz B., Ferrero A., Lipiec J., 2004. Opór penetracji gleby na zboczu winnicy. *Acta Agrophysica*, 3, 3, 603-613.
- Usowicz B., Kossowski J., Hurtalova T., Matejka F., 2001. Soil moisture and thermal properties state under plant crops. *Acta Agrophysica*, 53, 189-200.
- van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- van Vliet P.C.J., Radcliffe D.E., Hendrix P.F., Coleman D.C., 1998. Hydraulic conductivity and pore-size distribution in small microcosms with and without enchytraeids (*Oligochaeta*). *Appl. Soil Ecol.*, 9, 277-282.
- VandenBygaart A.J., Fox C.A., Fallow D.J., Protz R., 2000. Estimating earthworm-influenced soil structure by morphometric image analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 982-988.
- Vargas Gil S., Meriles J., Conforto C., Fioni G., Basanta M., Lovera E., March G.J., 2009. Field assessment of soil biological and chemical quality in response to crop management practices. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 25, 439-448.
- Vermang J., Demeyer V., Cornelis W.M., 2009. Aggregate stability and erosion response to antecedent water content of a loess soil. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 73, 718-726.
- Visser S., Parkinson D., 1992. Soil biological criteria as indicators of soil quality. *Am. J. Altern. Agric.*, 7, 33-37.
- Walczak R., 1984. Modelowe badania zależności retencji wodnej od parametrów fazy stałej gleby. *Probl. Agrofizyki*, 41.
- Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2002a. Hydrofizyczne charakterystyki mineralnych gleb ornych Polski. *Acta Agrophysica*, 79, 1-64.
- Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2002b. Spatial characteristic of hydro-physical properties in arable mineral soils in Poland as illustrated by field water capacity (FWC). *Int. Agrophysics*, 16, 151-159.
- Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2002c. Spatial characteristic of potentially useful retention in Polish arable water. *Int. Agrophysics*, 16, 231-238.
- Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2002d. Spatial characteristic of water conductivity in the surface level of polish arable soils. *Int. Agrophysics*, 16, 239-247.

- Walczak R., Witkowska B., 1976. Metody badania i sposoby opisywania agregacji gleby. *Probl. Agrofizyki*, 19.
- Walczak R., Witkowska-Walczak B., Baranowski P., 1997. Soil structure parameters in models of crop growth and yield prediction – physical submodels. *Int. Agrophysics*, 11, 111-127.
- Wander M.A., Walter G.L., Nissen T.M., Bollero G.A., Andrews S.S., Cavanough-Grant D.A., 2002. Soil quality: science and process. *Agron. J.*, 94, 23-32.
- Warrick A.W., 2002. *Soil physics companion*. CRC Press LLC, Boca Raton, USA.
- White R.E., 2006. *Principles and practice of Soil Science*. 4th edition. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Wieczysty A., 1982. *Hydrogeologia inżynierska*. PWN, Warszawa.
- Witek T., 1979. Wpływ jakości gleby na plonowanie roślin uprawnych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 224, 35-47.
- Witkowska-Walczak B., 2000. Wpływ struktury agregatowej gleb mineralnych na ich hydrofizyczne charakterystyki (badania modelowe). *Acta Agrophysica*, 30, 1-96.
- Witkowska-Walczak B., Turski M., Lipiec J., 2004. Analiza jakości agregacji gleb płowych wytworzonych z utworu piaszczysto-pyłowego i lessu. *Acta Agrophysica*, 4 (1), 221-233.
- Wojtasik M., 1989. Ocena gęstości gleb wytworzonych z glin zwałowych. *Rocz. Glebozn.*, 40, 2, 29-42.
- Wojtasik M., 1995. Gęstość naturalna gleb mineralnych. WSP w Bydgoszczy, Bydgoszcz.
- Wojtasik M., 2002a. Wpływ gęstości gleb na ich użyteczną retencję wodną. *Woda – Środ. Wiejskie*, 2, 2 (5), 119-128.
- Wojtasik M., 2002b. Wpływ różnych stanów gęstości gleb na plonowanie roślin. *Rocz. AR w Poznaniu*, 342, *Melior. Inż. Środ.* 23, 515-521.
- Yang X.M., Wander M., 1998. Temporal changes in dry aggregate size and stability: tillage and crop effects on a silty loam Mollisol in Illinois. *Soil Till. Res.*, 49, 173-183.
- Youker R.E., McGuinness J.L., 1957. A short method of obtaining mean weight diameter values of aggregate analyses of soils. *Soil Sci.*, 83, 291-294.
- Youngs E.G., 2001. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: *Soil and environmental analysis: physical methods*. Second edition (Eds K.A. Smith and C.E. Mullins). Marcel Dekker, Inc., New York, 141-181.
- Zanini E., Bonifacio E., Albertson J.D., Nielsen D.R., 1998. Topsoil aggregate breakdown under water-saturated conditions. *Soil Sci.*, 163, 288-298.
- Zawadzki S., 1973. Laboratoryjne oznaczanie zdolności retencyjnych utworów glebowych. *Wiad. IMUZ*, 11, 1, 11-31.
- Zornoza R., Mataiz-Solera J., Guerrero J., Arcenegui V., García-Orenes F., Mataix-Beneyto J., Morugán A., 2007. Evaluation of soil quality using multiple lineal regression based on physical, chemical and biochemical properties. *Sci. Total Environ.*, 378, 233-237.

7. STRESZCZENIE

Jakość gleby jest definiowana jako jej zdolność do funkcjonowania w obrębie naturalnych lub przekształconych rolniczo ekosystemów, do utrzymywania produktywności roślin oraz do zapewnienia zdrowia ludzi i ich środowiska. Do wskaźników oceny jakości gleby zaliczane są takie cechy fizyczne, jak: skład granulometryczny, agregacja, wodoodporność agregatów, gęstość gleby, pojemność wodna, retencja wody użytecznej dla roślin, infiltracja i aeracja.

Celem pracy było ustalenie kryteriów oceny jakości stanu fizycznego gleb pławowych i czarnych ziem wytworzonych z glin zwałowych, piasków i utworów pyłowych oraz czarnoziemów i gleb pławowych wytworzonych z lessu. Gleby te były zaliczane do różnych kompleksów rolniczej przydatności: pszennego bardzo dobrego, pszennego dobrego, pszennego wadliwego, żytniego bardzo dobrego, żytniego dobrego, zbożowo-pastewnego mocnego i zbożowo-pastewnego słabego. Ogólna liczba zbadanych gleb wynosiła 100, a liczba pobranych próbek gleby – 400. Próbki gleby pobrano z poziomów Ap (z głębokości 0-25 cm) i z innych poziomów genetycznych (z głębokości 25-50 cm, 50-75 cm i 75-100 cm), po zbiorze zbóż w sierpniu 2008-2010 r.

Skład granulometryczny, zawartość węgla organicznego, zawartość węglanów, odczyn i skład agregatowy oznaczono standardowymi metodami. Zawartość wodoodpornych agregatów glebowych ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) oznaczono metodą przesiewania w wodzie, za pomocą zmodyfikowanego aparatu Bakszejewa, wykonanego w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie. Gęstość fazy stałej gleby ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) oznaczono metodą piknometryczną. Gęstość gleby ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) obliczono na podstawie stosunku masy gleby wysuszonej w 105°C do jej objętości. Porowatość ogólną ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$) obliczono na podstawie wartości gęstości fazy stałej i gęstości gleby. Pojemność wodną ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$) w przedziale potencjału wody glebowej od $-0,1$ kPa do -1554 kPa w komorach wysokociśnieniowych, na porowatych płytach ceramicznych produkcji Eijkelkamp i Soil Moisture Equipment Corporation. Rozkład porów glebowych ($>300\text{ }\mu\text{m}$, $>20\text{ }\mu\text{m}$, $0,2\text{-}20\text{ }\mu\text{m}$ i $<0,2\text{ }\mu\text{m}$) obliczono na podstawie odpowiednich wartości pojemności wodnej, wyrażonych w $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$. Na podstawie krzywych retencji wodnej obliczono wskaźnik jakości stanu fizycznego gleb S według Dextera z wykorzystaniem równania van Genuchtena za pomocą programu komputerowego RETC.

Jako najlepsze kryteria oceny stanu fizycznego badanych gleb uznano: zawartość powietrznie suchych agregatów o wymiarach 1-10 mm, zawartość wodoodpornych agregatów o wymiarach 1-10 mm, połowę pojemność wodną przy $-15,5$ kPa, zawartość mezoporów o średnicy 0,2-20 μm , która określa retencję wody użytecznej dla

roślin i zawartość makroporów o średnicy $>20\ \mu\text{m}$ (pojemność powietrzną przy połowym nasyceniu wodą). Wartości badanych właściwości oceniono za pomocą liczb granicznych jako bardzo słabe, słabe, średnie, dobre i bardzo dobre. Najbardziej korzystnymi właściwościami fizycznymi charakteryzowały się czarnoziemy i gleby płowe wytworzone z lessu.

Słowa kluczowe: gleby Polski, jakość fizyczna, skład agregatowy, wodoodporność agregatów, właściwości wodno-powietrzne

8. SUMMARY

CRITERIA OF EVALUATION OF PHYSICAL QUALITY OF POLISH ARABLE SOILS

Soil quality can be conceptualised as the capability of soil to function within natural or agriculturally managed ecosystems, to sustain plant productivity, and to support human health and habitation. Physical properties suggested as soil quality indicators include texture, aggregation, aggregate water stability, bulk density, field water capacity, retention of useful water, infiltration and aeration.

The objective of this study was to determine the criteria of evaluation of the physical quality of Luvisols and Mollic Gleysols developed from moraine loams, sands and silt formations, and Phaeozems and Luvisols developed from loess. The soils were classified into the various complexes of agricultural suitability: very good wheat, good wheat, faulty wheat, very good rye, good rye, strong corn-pasture and weak corn-pasture. The total number of investigated soils was 100 and the number of soil samples taken was 400. The samples were taken from Ap horizons (from the depth of 0-25 cm) and from other genetic horizons (from the depth of 25-50 cm, 50-75 cm and 75-100 cm) after the harvest of cereals in 2008-2010.

Standard methods were used to determine the particle size distribution, content of organic carbon and carbonates, pH, and aggregate-size distribution. The distribution of water-stable aggregates was determined in four replications with the use of the modified Baksheyev's apparatus made at the Institute of Agrophysics, PAS, in Lublin. Particle density (Mg m^{-3}) was measured pycnometrically. Soil bulk density (Mg m^{-3}) was calculated from the ratio of the mass of soil dried at 105°C to its volume. Total porosity ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) was calculated using particle density and bulk density values. Water capacity ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) in the range of soil water potential from -0.1 kPa to -1554 kPa was determined in pressure chambers, on porous ceramic plates manufactured by Eijkelkamp Agrisearch Equipment and Soil

Moisture Equipment Corporation. Distribution of soil pores with equivalent diameters of $>300\text{ }\mu\text{m}$, $>20\text{ }\mu\text{m}$, $0.2\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$, and $<0.2\text{ }\mu\text{m}$ was calculated on the basis of water capacity values expressed in $\text{m}^3\text{ m}^{-3}$. Dexter's index of soil physical quality S was calculated on the basis of water retention curves established with the computer program RETC using the van Genuchten equation.

The following were recognised as the best criteria of evaluation of the physical quality of the investigated soils: content of air-dry soil aggregates with sizes of 1-10 mm, content of water-stable aggregates with sizes of 1-10 mm, field water capacity at $-15,5\text{ kPa}$, content of mesopores of $0.2\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ in diameter which determine the retention of useful water, and content of macropores of $>20\text{ }\mu\text{m}$ in diameter (air capacity at field water saturation). The values of examined properties were classified with limit numbers as very good, good, medium, weak and very weak. The most favourable of the physical properties were found for the Phaeozems and Luvisols developed from loess.

Keywords: Polish soils, physical quality, aggregate-size distribution, water stability, water-air properties

Adres Autora:

Jan Paluszek
Instytut Gleboznawstwa i Kształtowania Środowiska
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. S. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin
e-mail: jan.paluszek@up.lublin.pl

Address of Author:

Institute of Soil Science and Environment Management
University of Life Sciences
ul. S. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin
e-mail: jan.paluszek@up.lublin.pl

