

Ewa A. Czyż<sup>1,2</sup>, Artur Łopatka<sup>1</sup>, Anthony R. Dexter<sup>1</sup>, Magdalena Łysiak<sup>1</sup>,  
Jadwiga Stanek-Tarkowska<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowy Instytut Badawczy  
w Puławach*

<sup>2</sup>*Uniwersytet Rzeszowski w Rzeszowie*

## PODATNOŚĆ GLEB NA ZAGĘSZCZENIE\*

**Słowa kluczowe:** gęstość objętościowa gleb, materia organiczna w glebie, przestrzenna ocena stanu zagęszczenia gleb, podatność gleb na zagęszczenie w Polsce

### Wstęp

Degradacja gleby jest to proces zmiany jej właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych, prowadzący do obniżenia aktywności biologicznej, a w konsekwencji do zmniejszenia ilości oraz jakości produkowanej biomasy. Do podstawowych form degradacji gleby zalicza się: nadmierny ubytek próchnicy, zakwaszenie i alkalizację środowiska, wyjąłowanie ze składników pokarmowych i naruszenie równowagi jonowej, zanieczyszczenie składnikami fitotoksycznymi, zasolenie, przesuszenie, nadmierne nasycenie gleby wodą, erozję, zagęszczenie i zniszczenie struktury, zniekształcenie rzeźby terenu, mechaniczne uszkodzenie i zniszczenie poziomu próchniczego, a także zanieczyszczenie mechaniczne, chemiczne i biologiczne (1, 2, 32-35, 45, 75, 80, 81, 93, 113-118, 132, 133, 141, 142, 146, 147, 171).

Według S z c z e p a ń s k i e j i n. (148) występują 4 rodzaje degradacji gleb tj.: geotechniczna, fizyczna, biologiczna i chemiczna. Według tych autorów fizyczna degradacja gleb polega na nadmiernym zagęszczeniu gleby, pogorszeniu jej struktury, nadmiernym odwodnieniu gruntów wywołanym lejem depresyjnym, wadliwej melioracji, oddziaływaniu zbiorników wodnych oraz działaniu erozyjnym wody i wiatru. L a l (110) zdefiniował degradację gleby, jako obniżenie jej naturalnych zdolności do produkcji dóbr ekonomicznych i pełnienia funkcji ekologicznych. W naszym kraju według Polskiej Normy PN-ISO 11074-4 (134) mianem „zdegradowana

\*Badania i analizy sfinansowano z zadania statutowego IUNG-PIB 4.2.4 i grantu AGROGAS. Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.1 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

gleba” określa się glebę, której naturalne właściwości lub produktywność zostały pogorszone przez skażenie/zanieczyszczenie albo procesy fizyczne lub inne.

W polityce Unii Europejskiej w ostatnich latach można dostrzec wyraźne dążenie do nadania ochronie gleb rangi równej ochronie powietrza i wody. Znaczenie ochrony gleb zostało już podkreślone w 6 Programie Działań Środowiskowych UE wskazującym na potrzebę opracowania Ramowej Strategii Glebowej. Podstawą prac nad strategią był komunikat Komisji Europejskiej skierowany w 2002 roku do Rady Europy, Parlamentu Europejskiego, Komitetu Społeczno-Ekonomicznego i Komitetu Regionów UE zatytułowany „*W kierunku tematycznej strategii ochrony gleb*” (Commission of the European Communities, 2002). Opracowany w latach kolejnych przez Komisję Europejską fundamentalny dokument z zakresu ochrony gleb wskazuje na 8 podstawowych zagrożeń i procesów degradacji gleb istotnych z punktu widzenia polityki ochrony zasobów przyrody w Unii Europejskiej (19, 20, 22, 23). Do potencjalnych zagrożeń gleb strategia zalicza: zagęszczenie gleb, ubytek glebowej materii organicznej, erozję, utratę bioróżnorodności, powodzie i osuwiska, zasolenie oraz zasklepianie i utratę powierzchni w wyniku urbanizacji (tj. ekspansji zabudowy i infrastruktury). Zagrożenia te w niektórych przypadkach tworzą łańcuch wzajemnych powiązań przyczynowo-skutkowych i wzajemnie nakładają się. W związku z opublikowaniem strategii glebowej oraz projektem Dyrektywy Ramowej (22, 23) kraje członkowskie UE zobowiązują się do wyznaczenia obszarów ryzyka, na których mogą wystąpić niekorzystne zjawiska ograniczające podstawowe funkcje gleby. Podejście do gleb przyjęte w strategii wykracza poza ramy tradycyjnie rozumianych funkcji produkcyjnych i uwzględnia również funkcje retencyjne, buforowe i siedliskowe istotne dla funkcjonowania krajobrazu, bioróżnorodności, gospodarki wodnej i jakości środowiska wodnego. Polska i pozostałe państwa członkowskie UE zobowiązane będą do przestrzennego wyznaczenia obszarów ryzyka, oceny stanu istniejących zagrożeń, a na tej podstawie do opracowania krajowych programów naprawczych. Polska ma obowiązek dostosowania się do unijnych regulacji i opracowania lokalnych (regionalnych) strategii uwzględniających cele, stan gleb oraz stopień zagrożenia poszczególnymi procesami degradacji.

W chwili obecnej, mimo wielu prac dotyczących zagadnień poruszanych w strategii, dokonanie przestrzennej oceny występowania poszczególnych zagrożeń nie było możliwe z uwagi na często przyczynkowy charakter badań, dotyczących rozproszonych obiektów. Wyniki tych badań są trudne do ujęcia w jednolity system szacowania i monitoringu zagrożeń w oparciu o spójne ramy metodyczne. Tematyka podejmowana w strategii stwarza szansę, a zarazem konieczność integracji badań, niezbędnej dla skutecznego wsparcia programów działań, w oparciu o przesłanki naukowe. Szczególnie pilnym zadaniem jest wypracowanie odpowiednich metod wyznaczania zagrożeń dla jakości gleb w oparciu o kryteria ilościowe w ujęciu przestrzennym. Biorąc pod uwagę nowe podejście do całościowego traktowania zagrożeń gleb i czynników sprawczych, zarówno środowiskowych jak i ekonomicznych

oraz społecznych, związanych z rozwojem gospodarczym, badania wymienionych aspektów muszą mieć charakter zintegrowany i podporządkowany celom strategii.

Pogarszanie się fizycznego stanu gleb uprawnych, w wyniku ich nadmiernego zagęszczania przez stosowanie ciężkiego sprzętu rolniczego i nieodpowiednie systemy uprawy roli jest jednym z podstawowych problemów współczesnego rolnictwa (13-17, 24-37, 48-55, 127, 131, 153). Zasadniczym parametrem charakteryzującym zagęszczenie gleby jest jej gęstość objętościowa. Gęstość objętościowa jest to stosunek suchej masy utworu glebowego do jego objętości, z zachowaniem naturalnej struktury. Wartość gęstości objętościowej utworów glebowych w glebach mineralnych waha się od 0,75 do 1,90 Mg·m<sup>-3</sup>, w glebach mineralno-organicznych od 0,55 do 0,95 Mg·m<sup>-3</sup>, a w glebach organicznych od 0,08 Mg·m<sup>-3</sup> w nie zamulonych torfach do 0,75 Mg·m<sup>-3</sup> w silnie zamulonych. Im niższa jest gęstość objętościowa, tym luźniej ułożone są cząstki, a gleba jest bardziej pulchna. Zastosowanie tego parametru do oceny zagęszczenia gleby wymaga uwzględnienia składu masy glebowej, bez czego gęstość objętościowa nie może stanowić kryterium oceny (125).

Jednym z podstawowych wskaźników określających podatność gleb na zagęszczenie jest naprężenie graniczne, które jest miarą naturalnej wytrzymałości gruntu i odzwierciedla historię wpływu obciążeń na więzi wytworzone między cząsteczkami wody, a cząsteczkami fazy stałej. Po przekroczeniu wartości naprężenia granicznego następuje zerwanie naturalnych powiązań i rozpoczyna się proces chaotycznego przemieszczania cząstek (57, 58). Podobnie tworzy się wskaźniki pozwalające na ocenę podatności gleby na zagęszczanie stosując m.in. model Alcor (96, 147). Wskaźniki te obliczane są za pomocą empirycznych modeli statystycznych. Stąd ilość danych wejściowych (niezależnych) uzależniona jest od zmienności glebowej.

Zastosowanie kryterialnych wskaźników do oceny zagęszczenia gleby wymaga wykonania, poza oznaczeniem aktualnej gęstości objętościowej, przede wszystkim analizy jej składu granulometrycznego (14). Przeprowadzając badania gleby w terenie na wybranym polu, wyznacza się – na podstawie obserwacji makroskopowych – obszar o zbliżonych cechach, a następnie wykonuje reprezentatywną odkrywkę, z której pobiera się próbki do badań laboratoryjnych. Uzyskane z reprezentatywnej odkrywki wyniki odnosi się do całego obszaru. W praktyce naukowej, w przypadku oznaczania gęstości objętościowej z badanego poziomu genetycznego (lub warstwy) pobiera się zwykle od 4 do 6 próbek – o tzw. nienaruszonej strukturze do cylinderków Kopecky'ego, przy czym minimalna liczba wynosi 3 sztuk (33, 36, 126).

Liczne badania wykazały, że podatność gleb na zagęszczenie jest uzależniona od składu granulometrycznego i zawartości wody w glebie w chwili wykonywania zabiegów i przejazdów po polu (16, 17, 78-81, 121, 127, 144, 149, 157, 158, 165). Zwłaszcza niekorzystne jest wykonanie zabiegów uprawowych ciężkim sprzętem w warunkach nadmiernego uwilgotnienia. Gleby o mniejszej zawartości wody są bardziej odporne na zagęszczenie niż gleby wilgotne lub bardzo mokre (67, 72). Ponadto na zagęszczenie gleb istotnie wpływa: zawartość materii organicznej (73, 101,

128, 150), nacisk jednostkowy wywierany na glebę (5-7, 11, 81, 94-97, 102-104, 111), liczba przejazdów kołami ciągnika i maszyn (24-28, 122), zróżnicowanie systemów uprawy roli (10, 33, 38-42, 44, 46, 47, 49, 62, 79, 82-86). Gleby w zależności od tekstury mają różną podatność na zagęszczenie. Szczególnie podatne na zniszczenie struktury i utratę funkcji retencyjnych są gleby o dużej zawartości części spławialnych, zwięzłe gliny oraz ropy. Ogólnie podatność na zagęszczenie wzrasta wraz ze wzrostem udziału frakcji koloidalnej oraz spadkiem zawartości próchnicy.

Zagęszczanie gleby w istotny sposób wpływa na jej właściwości hydrofizyczne (3, 56, 98, 143, 155, 156); termiczne (132); stosunki wodno-powietrzne oraz aerację (45, 55, 76, 88-90, 112, 118, 120). W wyniku zagęszczenia redukuje się przestrzeń między cząsteczkami gleby, a gleba częściowo lub całkiem traci swoje zdolności magazynowania wody (8, 9, 14, 15, 31, 33, 35, 61, 63, 69, 77, 123, 127-129, 131, 153, 161, 166, 170). Nadmierne zagęszczenie gleby ma ujemny wpływ na żyzność i aktywność biologiczną (12, 44, 168) oraz trwałość struktury (32, 34, 36, 43, 46, 64-66, 68, 70, 74, 100, 153). Pogorszenie struktury gleby spowodowane zagęszczaniem ogranicza wzrost korzeni, ilość i jakość plonu (4, 18, 21, 29, 49-54, 99, 106, 119, 124, 135, 138, 145, 151, 154, 162, 167).

Zagęszczeniu gleby sprzyjają także intensywne opady deszczu. Po ulewnym deszczu przez nadmiernie zagęszczone warstwy gleby woda opadowa nie infiltruje swobodnie w głąb profilu. Eksperti podają, że w takich sytuacjach zagęszczanie gleb przyczynia się do nadmiernych spływów powierzchniowych, ryzyka występowania erozji i powodzi na terenie Europy (59, 60, 109, 139, 140, 159).

Postęp techniczny w rolnictwie pociąga za sobą wzrost liczby przejazdów ciągników, maszyn i pojazdów rolniczych po polach, a także wzrost naprężeń rozwijanych pod wpływem sił obciążających powierzchnię gleby. Wzrost mechanizacji prac polowych podczas siewu i zbioru plodów rolnych często prowadzi do nadmiernego zagęszczenia gleb, zarówno w warstwie ornej, jak i podglebiu. Coraz cięższe maszyny i pojazdy rolnicze pracujące na polach są znakiem rozwoju rolnictwa i poprawy jakości życia, niemniej jednak przyczyniają się do niekorzystnych zmian struktury i jakości fizycznej gleby na skutek jej zagęszczania (26, 64-66, 70). Nadmierne zagęszczenie przy wysokim uwilgotnieniu gleby powstaje zazwyczaj podczas jesiennych zbiorów roślin okopowych w wyniku przejazdów ciężkich kombajnów i przyczep transportowych. Do tych prac używane są pojazdy o bardzo dużych obciążeniach przypadających na koło, dochodzących do 100 kN, jak w przypadku wielorzędowych kombajnów buraczanych. Obecnie na rynku europejskim występuje kilka modeli kombajnów do zbioru buraków cukrowych mających dopuszczalne obciążenie na koło przekraczające 150 kN, przy całkowitej masie pojazdu z załadunkiem dochodzącej do 60 Mg (136). Obciążenia tej wielkości działające na nadmiernie wilgotną glebę mogą znacznie zagęszczać i głębsze warstwy gleby. W badaniach wykazano, że procesy zagęszczania mogą obejmować swym zasięgiem bardzo zmienną warstwę gleby, do głębokości od 10 do 60 cm (1, 2), a nawet > 90 cm (130). Zagęszczanie głębiej położonych warstw w profilu glebowym

jest trudne do odwrócenia. Według opracowanych danych zagęszczenie gleby wywołane techniką rolniczą jest główną przyczyną degradacji aż 33 milionów ha gleb użytków rolnych w Europie (122, 139). Szacuje się, że blisko 4% gleb na terenie Europy jest nadmiernie zagęszczonych, ale nie ma dokładnych danych na ten temat. Zagęszczenie gleb, jako jedno z kluczowych zagrożeń wymienionych w strategii nie było do tej pory w pełni rozpoznane przestrzennie z uwzględnieniem oddziaływania czynników związanych ze sposobem i intensywnością rolniczego użytkowania. Nierozpoznane są też w pełni czynniki glebowe decydujące o podatności poszczególnych gatunków gleb na zagęszczenie i występowanie tego zjawiska w skali kraju.

W Zakładzie Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów w IUNG-PIB w Puławach podjęto realizację tematu badawczego nad pełniejszym rozpoznaniem stanu zagrożeń gleb oraz stworzenie przesłanek empirycznych dla opracowania przestrzennej oceny stanu zagęszczenia gleb użytków rolnych. Przeprowadzono pomiary gęstości objętościowej gleb i innych właściwości wybranych profili glebowych oraz kontynuowano tworzenie baz danych glebowych dla obszaru Polski. Celem strategicznym prowadzonego projektu badawczego w IUNG-PIB w Puławach było stworzenie i stała rozbudowa istniejącej bazy danych profili wzorcowych, o dane aktualne tj. współrzędne geograficzne punktów pomiarowych oraz dane fizykochemiczne, w tym gęstość gleby i zawartość materii organicznej. Dane te mają służyć tworzeniu warstw tematycznych, charakteryzujących warunki glebowe przestrzeni rolniczej oraz zasięgi gleb zagrożonych degradacją w wyniku zagęszczenia jako informacje niezbędne do wdrażania strategii glebowej w Polsce.

W pracy przedstawiony zostanie aktualny stan gęstości objętościowej gleb użytków rolnych Polski i adaptacja modelu podatności gleb na zagęszczenie, uwzględniającego oprócz znanych parametrów charakteryzujących skład granulometryczny, zawartość próchnicy i gęstość objętościową gleb.

## Material i metody

W Zakładzie Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów w IUNG-PIB w Puławach prowadzono w latach 2008-2012 pomiary właściwości profili glebowych. Kontynuowano również tworzenie bazy danych glebowych z zakresu badanych parametrów gęstości objętościowej gleb dla obszaru całej Polski o nazwie (bank. DATA COMPACTION) i zawartości materii organicznej (bank. DATA OM), gdzie oprócz właściwości gleb wprowadzono dane współrzędnych geograficznych punktów pobierania próbek glebowych. We współpracy z Instytutem Agrofizyki PAN w Lublinie i Uniwersytetem Rzeszowskim w Rzeszowie pobierano do badań próbki glebowe z wieloletnich doświadczeń polowych oraz prywatnych pól produkcyjnych położonych w różnych rejonach Polski. W zależności od warunków ekonomiczno-organizacyjnych rolnictwa na obszarze całej Polski pobierano próbki glebowe konieczne do przygotowania przestrzennego zróżnicowania stanu zagęszczenia gleb i opracowania mapy podatności gleb na zagęszczenie dla całego kraju. W celu oceny

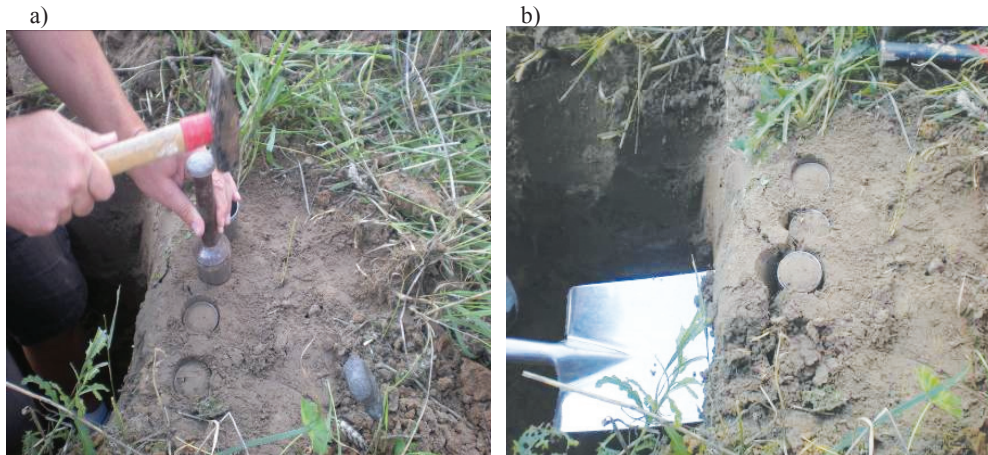
stanu zagęszczenia gleb Polski pobrano próbki glebowe z 670 wzorcowych profili glebowych w okresie wegetacji roślin i podczas zniw. Pobieranie próbek glebowych i prace w polu dokumentują zdjęcia (fot. 1-4). Przeprowadzono również bezpośrednio w polu pomiary m.in. zawartości wody w glebie (% v, v) za pomocą miernika TDR i opór penetrometryczny (w MPa) przy użyciu penetrometru polowego „Penetrologger” firmy Eijkelkamp.

W próbkach glebowych oznaczono wybrane właściwości fizykochemiczne gleb, z wykorzystaniem opisanych poniżej metodyk oznaczeń:

- właściwości fizyczne:
  - skład granulometryczny – metodą areometryczną Casagrande’a w modyfikacji Prószyńskiego i metodą laserową,
  - gęstość objętościową gleb ( $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) i zawartość wody w glebie (% v/v) przy użyciu cylinderek Kopecky’ego - metodą suszarkowo-wagową,
- właściwości chemiczne:
  - zawartość materii organicznej (substancja organiczna) – metodą Tiurina,
  - odczyn pH w 1M KCl i  $\text{H}_2\text{O}$ ,
  - zawartości przyswajalnych składników pokarmowych: K i P – metodą Egnera-Riehma oraz Mg – metodą Schachtschabela.

### **Gęstość objętościowa i zawartość materii organicznej w wierzchniej warstwie gleb użytkowanych rolniczo w Polsce**

W oparciu o przeprowadzone oznaczenia stworzono bazę danych glebowych z zakresu badanych parametrów. W glebowej bazie danych o nazwach: bank. DATA COMPACTION i bank. DATA OM, wprowadzono współrzędne geograficzne punktów poboru próbek glebowych i wszystkie badane właściwości gleb z wybranych 670 wzorcowych profili glebowych. Liczebność i zróżnicowanie składu gatunkowego gleb w warstwie ornej przedstawiono w tabeli 1 i na rysunku 1. Wybór profili glebowych uzasadniony był zróżnicowaniem pokrywy glebowej, warunków klimatycznych i organizacyjno-ekonomicznych rolnictwa. Dla badanych profili glebowych zakresy (wartości minimalne i maksymalne) oraz średnie wartości gęstości objętościowej gleb i zawartości substancji organicznej w warstwie ornej dla poszczególnych grup i podgrup granulometrycznych przedstawiono w tabeli 2 i 3. Badania wykazały duże zróżnicowanie i zmienność wartości gęstości objętościowej gleb dla poszczególnych grup granulometrycznych gleb Polski (tab. 2) oraz zawartości materii organicznej w warstwie ornej (tab. 3). Zestawienie ilości profili glebowych badanych w poszczególnych województwach przedstawiono w tabeli 4. Statystykę danych i graficzne opracowanie dla poszczególnych województw, w tym ilości pobranych profili glebowych zawiera rysunek 4. W warstwie ornej badanych 670 profili glebowych średnia zawartość materii organicznej wynosi 2,23 %.



Fot. 1. Prace przy pobieraniu próbek glebowych do oznaczeń gęstości objętościowej gleb:  
a) wbijanie w glebę cylinderków o pojemności 100 cm<sup>3</sup>, b) wykopywanie cylinderków z glebą z warstwy ornej z wieloletnich doświadczeń polowych

Źródło: fot. Czyż E. A., zasoby własne IUNG-PIB.



Fot. 2. Wkopywanie cylinderków: a) do oznaczeń gęstości objętościowej gleb z różnych warstw profilu glebowego i b) procedura oczyszczania cylinderków w polu do oznaczeń gęstości objętościowej gleb

Źródło: fot. Czyż E. A., zasoby własne IUNG-PIB.



Fot. 3. Oznaczenia właściwości gleb prowadzone na obszarach w gospodarstwach rolnych o małej powierzchni pól i niskonakładowym gospodarowaniu (gospodarstwo rolne – w miejscowości Huta, województwo lubelskie)

Źródło: fot. Czyż E. A., zasoby własne IUNG-PIB.



Fot. 4. Pobieranie próbek glebowych do oznaczenia właściwości gleb w terenie o dużej powierzchni pól i intensywnym gospodarowaniu (gospodarstwo rolne – Rogów, województwo lubelskie)

Źródło: fot. Czyż E. A., zasoby własne IUNG-PIB.

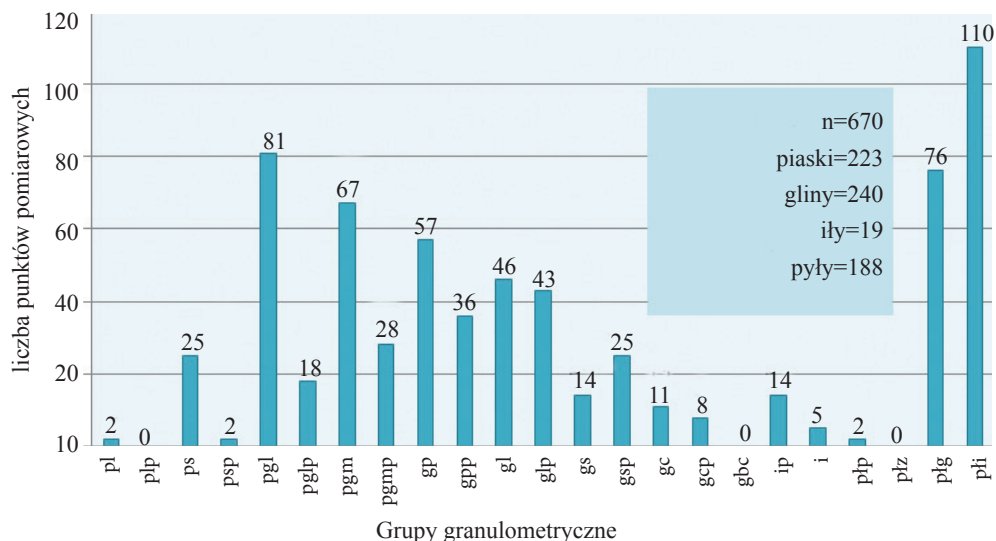
Tabela 1

Liczebność profili glebowych i zróżnicowanie gatunkowe gleb\*/ w warstwie ornej  
(0-20cm) (n=670)

Gatunek gleby		Symbol	Ilość profili
Piaski	- piasek luźny	pl	2
	- piasek luźny pylasty	plp	0
	- piasek słabo gliniasty	ps	25
	- piasek słabo gliniasty pylasty	psp	2
	- piasek gliniasty lekki	pgl	81
	- piasek gliniasty lekki pylasty	pglp	18
	- piasek gliniasty mocny	pgm	67
	- piasek gliniasty mocny pylasty	pgmp	28
Gliny	- glina piaszczysta	gp	57
	- glina piaszczysta pylasta	gpp	36
	- glina lekka	gl	46
	- glina lekka pylasta	glp	43
	- glina średnia	gs	14
	- glina średnia pylasta	gsp	25
	- glina ciężka	gc	11
	- glina ciężka pylasta	gcp	8
	- glina bardzo ciężka	gbc	0
Iły	- ił pylasty	ip	14
	- ił	i	5
Pyły	- pył piaszczysty	plp	2
	- pył zwykły	plz	0
	- pył gliniasty	plg	76
	- pył ilasty	pli	110
Razem			670

\*/ zróżnicowanie gatunkowe gleb wg. normy BN -78/9180-11

Źródło: Czyż E.A., dane niepublikowane, zasoby własne IUNG-PIB.



Rysunek 1. Ilość profili glebowych w poszczególnych gatunkach gleb\*/

\*/ zróżnicowanie gatunkowe gleb wg. normy BN -78/9180-11

Źródło: Czyż E.A., dane niepublikowane, zasoby własne IUNG-PIB.

Tabela 2  
Minimalne, maksymalne i średnie wartości gęstości objętościowej gleb w warstwie 0-20 cm, dla grup i podgrup granulometrycznych Polski (n=670)

Grupy granulometryczne	Podgrupy granulometryczne	Symbol	Zawartość frakcji o śr. < 0,02 mm, w %	Gęstość objętościowa gleby (Mg·m <sup>-3</sup> )				Błąd stand. s.e.		
				ilość profili	minimum	maksimum	średnia		Odczytanie standardowe SD	
Piaski	- piasek luźny	pl	0-5	2	1,4	1,42	1,41	0,011	0,008	
	- piasek luźny pylasty	plp	0-5	0	-	-	-	-	-	
	- piasek słabo gliniasty	ps	6-10	25	1,29	1,81	1,53	0,117	0,023	
	- piasek słabo gliniasty pylasty	psp	6-10	2	1,29	1,46	1,37	0,086	0,061	
	- piasek gliniasty lekki	pgl	11-15	81	1,16	1,99	1,48	0,136	0,015	
	- piasek gliniasty lekki pylasty	pglp	11-15	18	1,15	1,72	1,47	0,159	0,038	
	- piasek gliniasty mocny	pgm	16-20	67	1,21	1,95	1,55	0,135	0,016	
	- piasek gliniasty mocny pylasty	pgmp	16-20	28	1,16	1,91	1,49	0,126	0,024	
	Gliny	- gлина piaszczysta	gp	21-25	57	1,28	1,89	1,50	0,121	0,016
		- gлина piaszczysta pylasta	gpp	21-25	36	1,17	1,91	1,51	0,159	0,026
- gлина lekka		gl	26-35	46	0,87	1,75	1,51	0,159	0,023	
- gлина lekka pylasta		glp	26-35	43	1,26	1,80	1,52	0,125	0,019	
- gлина średnia		gs	36-50	14	0,88	1,68	1,42	0,224	0,060	
- gлина średnia pylasta		gsp	36-50	25	1,16	1,66	1,45	0,140	0,028	
- gлина ciężka		gc	51-75	11	1,07	1,58	1,30	0,163	0,049	
- gлина ciężka pylasta		gcp	51-65	8	1,22	1,59	1,47	0,125	0,044	
- gлина bardzo ciężka		gbc	76-90	0	-	-	-	-	-	
- il pylasty		ip	51-75	14	1,04	1,62	1,4	0,149	0,040	
Płyły	- il	i	67-100	5	0,96	1,37	1,20	0,152	0,068	
	- pyl piaszczysty	plp	0-20	2	1,24	1,46	1,32	0,009	0,006	
	- pyl zwykły	plz	0-20	0	-	-	-	-	-	
	- pyl gliniasty	plg	21-35	75	1,05	2,00	1,44	0,137	0,016	
	- pyl ilasty	pli	36-50	110	1,02	1,69	1,41	0,132	0,013	

\*/ wg normy BN -78/9180-11

Źródło: Czyż E.A. dane niepublikowane zasoby własne IUNG-PIB.

Tabela 3  
Minimalne, maksymalne i średnie zawartości materii organicznej gleb w warstwie 0-20cm, w podniesieniu do poszczególnych grup i podgrup granulometrycznych (n=670)

Grupy granulometryczne	Podgrupy granulometryczne	Symbol	zawartość <0,02 mm	ilość profili	Materia organiczna (%)				błąd stand. s.e.
					minimum	maksimum	średnia	odchylenie standardowe SD	
Piaski	- piasek luźny	pl	0-5	2	0,82	1,17	0,99	0,174	0,123
	- piasek luźny pylasty	plp	0-5	0	-	-	-	-	-
	- piasek słabo gliniasty	ps	6-10	25	0,52	1,72	1,18	0,348	0,070
	- piasek słabo gliniasty pylasty	psp	6-10	2	1,31	1,59	1,45	0,141	0,100
	- piasek gliniasty lekki	pgl	11-15	81	0,60	2,25	1,44	0,329	0,037
	- piasek gliniasty lekki pylasty	pglp	11-15	18	0,75	2,37	1,39	0,435	0,103
	- piasek gliniasty mocny	pgm	16-20	67	0,59	2,81	1,45	0,410	0,050
	- piasek gliniasty mocny pylasty	pgmp	16-20	28	0,45	2,55	1,40	0,397	0,075
Gliny	- glina piaszczysta	gp	21-25	57	0,82	3,43	1,77	0,569	0,075
	- glina piaszczysta pylasta	gpp	21-25	36	0,95	2,37	1,59	0,295	0,049
	- glina lekka	gl	26-35	46	0,97	4,52	2,00	0,771	0,114
	- glina lekka pylasta	glp	26-35	43	0,92	3,24	1,83	0,532	0,081
	- glina średnia	gs	36-50	14	1,56	7,49	2,81	1,440	0,385
	- glina średnia pylasta	gsp	36-50	25	1,32	4,87	2,42	0,828	0,166
	- glina ciężka	gc	51-75	11	1,76	8,64	3,61	1,789	0,539
	- glina ciężka pylasta	gcp	51-65	8	1,51	4,72	2,52	0,965	0,341
	- glina bardzo ciężka	gbc	76-90	0	-	-	-	-	-
	- il pylasty	ip	51-75	14	1,18	4,06	2,59	0,690	0,185
Pyły	- il	i	67-100	5	2,88	5,79	4,38	1,062	0,475
	- pył piaszczysty	plp	0-20	2	1,39	2,16	1,69	0,070	0,049
	- pył zwykły	plz	0-20	0	-	-	-	-	-
	- pył gliniasty	plg	21-35	75	0,62	3,71	1,77	0,517	0,059
	- pył ilasty	pli	36-50	110	0,99	5,66	1,85	0,649	0,062

\*/ wg. normy BN -78/9180-11

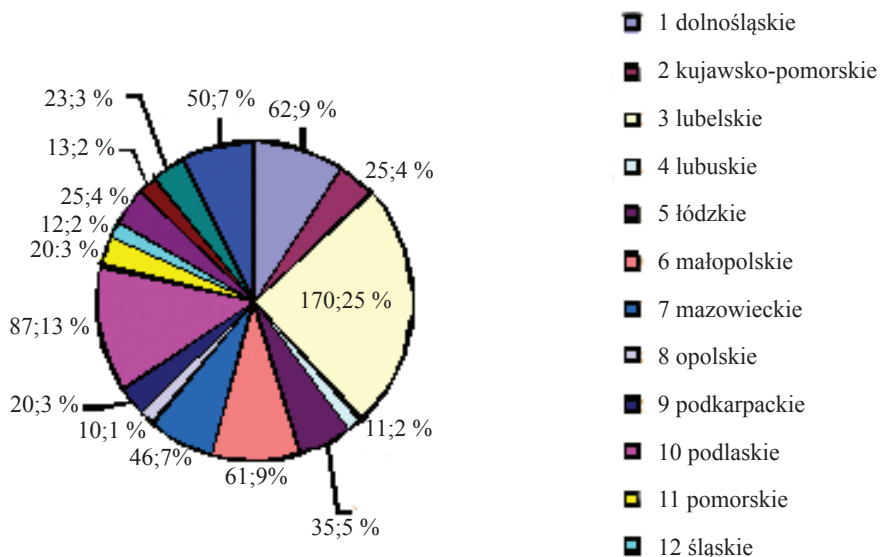
Źródło: Czyż E.A., dane niepublikowane zasoby własne IUNG-PIB

Tabela 4

Zestawienie ilości profili glebowych do badań w poszczególnych województwach

Lp.	Województwo	Ilość punktów
1	dolnośląskie	62
2	kujawsko-pomorskie	25
3	lubelskie	170
4	lubuskie	11
5	łódzkie	35
6	małopolskie	61
7	mazowieckie	46
8	opolskie	10
9	podkarpackie	20
10	podlaskie	87
11	pomorskie	20
12	śląskie	12
13	świętokrzyskie	25
14	warmińsko-mazurskie	13
15	wielkopolskie	23
16	zachodnio-pomorskie	50
Ogólna liczba profili		670

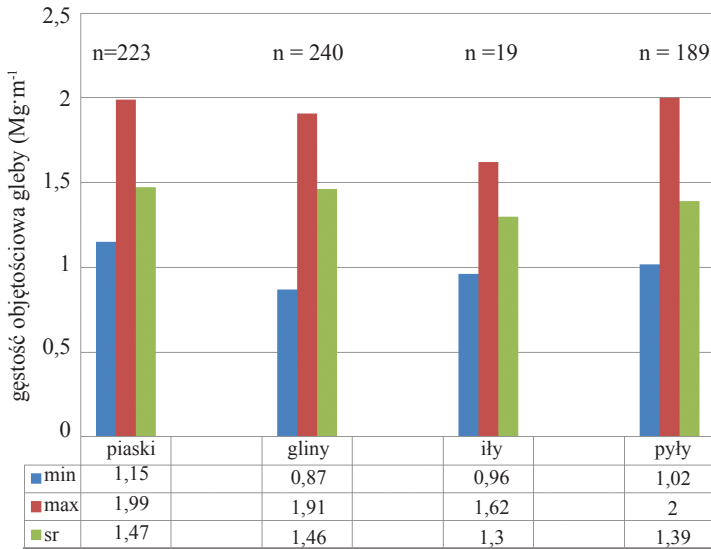
Źródło: Czyż E.A., dane niepublikowane zasoby własne IUNG-PIB.



Rysunek 4. Ilość i procentowy udział badanych profili glebowych w poszczególnych województwach (objaśnienie: pierwsza liczba wskazuje ilość profili glebowych, druga procentowy udział próbek w stosunku do całego zbioru badanych profili)

Źródło: Czyż E.A., dane niepublikowane zasoby własne IUNG-PIB.

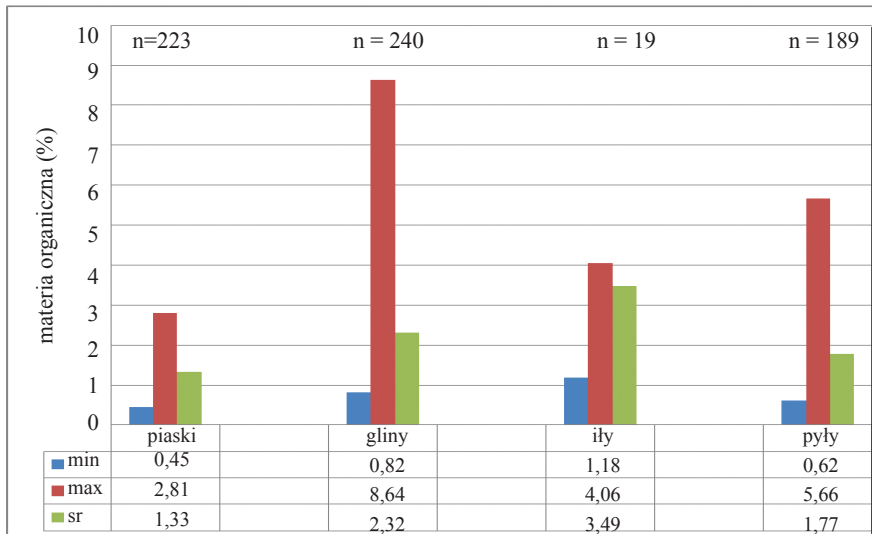
Syntetyczne zestawienie zmienności gęstości objętościowej gleb z zakresami i wartościami średnimi dla poszczególnych grup granulometrycznych przedstawia rysunek 5. Zawartości substancji organicznej w ornej warstwie gleb Polski wskazują, że najniższe wartości mają piaski zaś największe łą (rys. 6). Również piaski miały najmniejsze zróżnicowanie zawartości substancji organicznej w glebach, zaś największe gliny.



Rysunek 5. Zmienność zakresów gęstości objętościowej gleb (wartości minimalne, maksymalne i średnie) dla poszczególnych grup granulometrycznych gleb w warstwie ornej Polski.

Objaśnienie n= 223, 240, 19 i 189 oznacza liczbę profili glebowych

Źródło: Czyż E. A., dane niepublikowane zasoby własne IUNG-PIB.

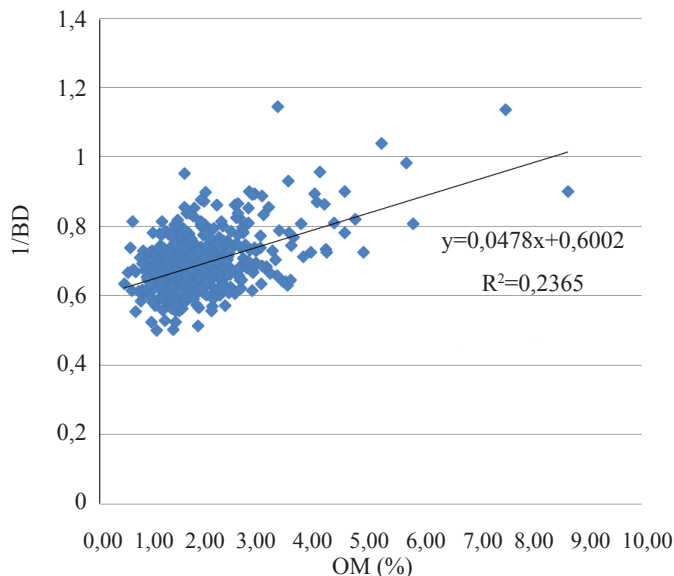


Rysunek 6. Zmienność zakresów zawartości substancji organicznej (wartości minimalne, maksymalne i średnie) dla poszczególnych grup granulometrycznych gleb w warstwie ornej Polski.

Objaśnienie n= 223, 240, 19 i 189 oznacza liczbę profili glebowych

Źródło: Czyż E.A., dane niepublikowane zasoby własne IUNG-PIB.

Na podstawie tych badań stwierdzono wpływ wzrastającej zawartości materii organicznej, OM (w %), na obniżenie wartości gęstości objętościowej badanych gleb, BD (rys. 7).



Rysunek 7. Wpływ zawartości materii organicznej, OM, na wartość gęstości objętościowej, BD, w warstwie ornej badanych gleb (n=670 profili glebowych)

Źródło: dane i badania własne niepublikowane

Gęstość objętościowa gleb zależy, więc w głównej mierze od ich składu granulometrycznego (uziarnienia). Im większy jest stopień rozdrobnienia części mineralnych gleby, tym większa jest jej porowatość i mniejsza gęstość objętościowa. Materia organiczna obniża gęstość objętościową wskutek mniejszej gęstości związków organicznych. Wpływ zawartości materii organicznej w glebie na gęstość stałej fazy ( $r = -0,88$ ) i gęstość objętościową gleby ( $r = -0,62$ ) potwierdziły badania (137). Zależności gęstości gleby od zawartości materii organicznej przedstawiano również w pracach (63-65, 69, 71-73, 164, 165).

Tarkiewicz i Nosalewicz (150) wykazali, że wraz ze wzrostem zawartości materii organicznej w glebach zmniejsza się ich podatność na zagęszczenie. Podatność gleb na zagęszczenie zależy w dużej mierze od ich uziarnienia, a szczególnie od procentowej zawartości frakcji cząstek spławialnych ( $\phi < 0,02$  mm). Słowik i Jurkiewicz i Domżał (144) oraz Walczyk i Frankowicz (158) wykazali, że podatność gleby na ugniatanie jest skorelowana z zawartością cząstek koloidalnych.

## Podatność gleb na zagęszczenie – model podatności gleb z 2007 roku

W 2007 roku Stuczyński i in. (147) opracowali pierwszy model matematyczny podatności gleb na zagęszczenie w oparciu o oryginalny model regresyjny Alcor (96), z przyporządkowanymi metodą ekspercką dla poszczególnych gatunków gleb, wartościami parametrów, które nie były mierzone (tj. spójność, kąt tarcia wewnętrznego, przewodność hydrauliczna  $K_{sat}$ , wilgotność dla pF4.2; 2.5 i przy pełnym nasyceniu, gęstość objętościowa). Następnie w oparciu o ten model opracowali numeryczną mapę podatności gleb w Polsce na zagęszczenie (rys. 8). Zmiennymi niezależnymi w modelu Alcor były: gęstość objętościowa gleby, pojemność powietrzna, woda dostępna dla roślin, woda niedostępna dla roślin, przewodność hydrauliczna w stanie pełnego nasycenia gleby wodą, procentowa zawartość próchnicy, kohezja i kąt tarcia wewnętrznego. Zmienną zależną była podatność na zagęszczenie (ang. *pre-compression stress*), PS, wyrażona w (kPa), przy wilgotności gleby odpowiadającej połowej pojemności wodnej. Przyjęto klasyfikację podatności na zagęszczenie jak w tabeli 5.

Tabela 5

Klasyfikacja podatności gleb na zagęszczenie w Polsce

Podatność na zagęszczenie	wyszczególnienie „ <i>pre-compression stress</i> ” (kPa)
Niska	>150
Średnia	90 – 150
Wysoka	< 90

Źródło: Stuczyński i in. 2007 (147).

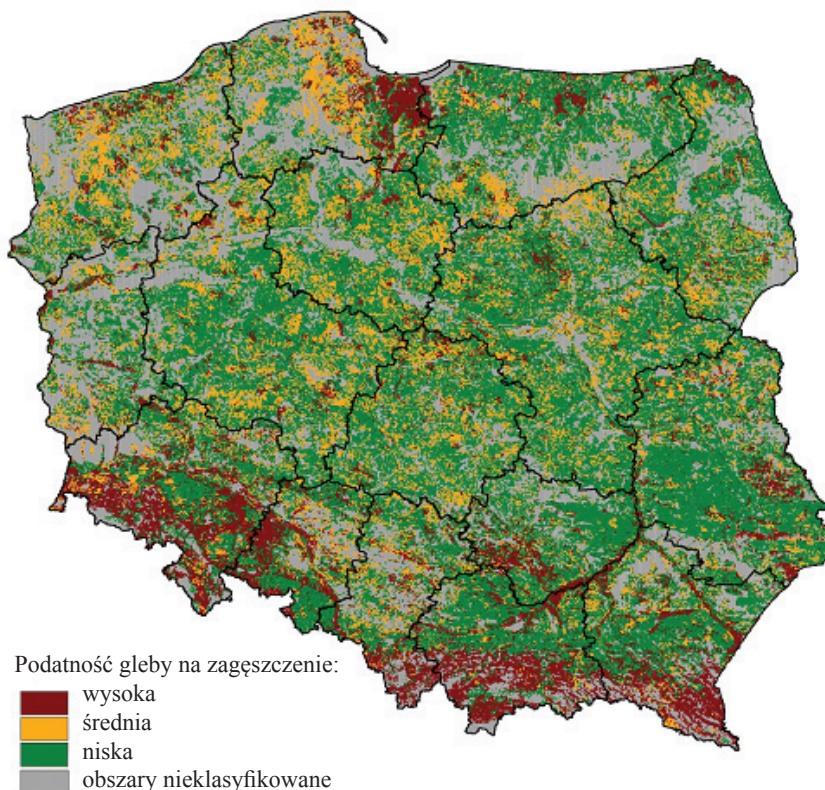
## Modyfikacja dotychczasowych modeli Alcor i opracowanie mapy numerycznej podatności gleb na zagęszczenie „*pre-compression stress*” (PS)

W roku 2011 w Zakładzie Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów IUNG-PIB w Puławach dokonano modyfikacji dotychczasowych modeli podatności gleb na zagęszczenie (96, 147) poprzez uwzględnienie oprócz dobrze rozpoznanych parametrów charakteryzujących skład granulometryczny, również parametrów uaktualnionych dla wzorcowych profili glebowych (n=670). Podatność ornej warstwy gleb na zagęszczenie, wartość PS, oszacowana została również przy użyciu modelu regresyjnego Alcor (96) gdzie:

- zmiennymi niezależnymi w modelu są:
  - gęstość objętościowa gleby (dla n=670)
  - pojemność powietrzna (różnica wilgotności objętościowych odpowiadających pełnemu nasyceniu i połowej pojemności wodnej),
  - woda dostępna dla roślin (różnica połowej pojemności wodnej i punktu trwałego wędnięcia),

- woda niedostępna dla roślin (wilgotność w punkcie trwałego więdnięcia),
  - przewodność hydrauliczna w stanie pełnego nasycenia gleby wodą,
  - procentowa zawartość próchnicy (dla  $n=670$ ),
  - kohezja (spójność (dla  $n=670$ ),
  - kąt tarcia wewnętrznego (dla  $n=670$ ); zaś
- zmienną zależną jest podatność gleby na zagęszczenie pod wpływem krytycznej wartości nacisku, PS (ang. *pre-compression stress*), wyrażony w (kPa), przy wilgotności gleby odpowiadającej połowej pojemności wodnej.

Pierwszy model podatności gleb na zagęszczenie z 2007 r. (147) zweryfikowano w roku 2011 i uzupełniono o oryginalne i aktualne dane glebowe (m.in.: skład granulometryczny, gęstość objętościową gleb, zawartość substancji organicznej) pochodzące z oznaczeń 670 wzorcowych profili glebowych. Ponadto zmodyfikowano i uzupełniono dane dotyczące kohezji gleby oraz kąta tarcia wewnętrznego różnych gatunków gleb (tab. 6) i wyznaczono odpowiednie równania pedotransferu danych



Rysunek 8. Podatność gleb na zagęszczenie w Polsce

Źródło: Stuczyński in., 2007 (147).

(ptf) dla brakujących grup granulometrycznych.

Tabela 6

Wartości glebowych parametrów: spójność gleby (kohezja) i kąt tarcia wewnętrznego  
– przyjęte do modelu Alcor

Wyszczególnienie	Spójność, c (kPa)		Kąt tarcia wewnętrznego, $\gamma$ (°)	
	wartość użyta w modelu	wartości podawane w literaturze [ref]	wartość użyta w modelu	wartości podawane w literaturze [ref]
zp	0	0 [1]	38	36-42 [3]
zg	20	20 +/-10 [1]	35	34-37 [3]
pl	0	0 [1]	36	34-37 [3]
plp	0	0 [1]	30	30-31 [3]
ps	0	0 [1]	32	31-33 [3]
psp	0	0 [1]	30	27-29 [3]
pgl	0	0 [1]	32	29-32 [3]
pglp	0	0 [1]	30	29-32 [3]
pgm	20	20 [1]	22	20-25 [3]
pgmp	20	20 [1]	22	20-25 [3]
gl	20	20 [1]	18	16-21 [3]
glp	20	25+/-10 [1]	18	16-21 [3]
gs	25	25 +/-10 [1]	18	16-21 [3]
gsp	25	25+/-10 [1]	18	16-21 [3]
gc	25	17-47 [1]	13	9-13 [3]
gcp	25	25+/-10 [1]	10	6-10 [3]
i	23	0-23 [1], 0-40 [2]	17	5-20 [2]
ip	13	3-13 [3]	14	5-20 [2]
plz	24	24-48 [2]	22	20-30 [2]
pli	24	24-48 [2]	20	20-30 [2]

Źródło: [1] Geotechdata.info, Cohesion, <http://geotechdata.info/parameter/cohesion> (as of April 29, 2011). [www.geotechdata.info/parameter/cohesion](http://www.geotechdata.info/parameter/cohesion), (87); [2] Koloski, J.W., S.D. Schwarz, D.W. Tubbs, 1989. Geotechnical properties of geologic materials. Engineering Geology in Washington, Washington Division of Geology and Earth Resources Bulletin 78(1). (105); [3] Wiłun Z. Zarys geotechniki. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, WKŁ, Warszawa 1987: 1-192. (160).

### **Modyfikacja modeli Alcor i opracowanie mapy numerycznej podatności gleb na zagęszczenie „pre-compression stress” (PS) /\***

W modelu Alcor „pre-compression stress” dalej w tekście oznaczono jako PS/\*, wyjaśniany jest przez nieliniowe równania regresji wielokrotnej dla każdej z 5 grup granulometrycznych osobno (oparte o podział na frakcje piasku *sand* i łu *clay*). Równania te ze względu na znaczną nieliniowość i różnorodność metody ich

wprowadzenia (potęgi, logarytmy, funkcja sinus) są nieprzejrzyste i nieporównywalne nawet między poszczególnymi grupami. Podział na grupy rodzi także problemy związane z nieciągłością modelu Alcor na granicach poszczególnych grup granulometrycznych (zdarzają się w pewnych przypadkach różnice przewidywanej wartości PS przy zmianie klasyfikacji grupy na sąsiednią przekraczające 100%).

Budowa modelu przestrzennej zmienności PS w oparciu o model Alcor „w czystej postaci” jest niepraktyczna ponieważ duża część wymaganych zmiennych takich jak:

- spójność,  $c$ ,
- kąt tarcia wewnętrznego,  $\gamma, p$
- rzewodność hydrauliczna,  $K_{sat}$
- wilgotności dla pF4.2; 2.5 i przy pełnym nasyceniu

nie jest znana z wystarczającej liczby profili które mają znaną lokalizację przestrzenną. Do ich wyznaczenia stosuje się metody polegające bądź na przypisaniu do poszczególnych gatunków gleb występujących na mapie glebowo-rolniczej wartości średnich znanych z wcześniejszych badań, bądź na użyciu funkcji pedotransferu pozwalających określić powyższe parametry w oparciu o znane, z wystarczającą rozdzielczością przestrzenną, zawartości poszczególnych frakcji składu granulometrycznego i próchnicy.

W celu wyeliminowania tych słabości modelu Alcor, a przy tym wykorzystania zawartych w nim unikalnych informacji o PS (kPa) dla gleb o znacznym podobieństwie do tych jakie występują w Polsce (*model Alcor skalibrowano w oparciu o gleby Niemiec*) i w roku 2011 opracowano nowy model uproszczony, skalibrowany na przewidywaniach modelu Alcor, model regresyjny oparty jedynie o zawartości poszczególnych frakcji składu granulometrycznego i próchnicy. Model opracowano na podstawie bazy danych glebowych pochodzących z 670 profili wzorcowych poprzez obliczenie z modelu Alcor wartości PS (*pre-compaction stress*), a następnie potraktowaniu ich jako zmiennej zależnej.

Zmienne modelu Alcor takie jak wilgotności  $\theta$  dla pF4.2; 2.5 (tj. potencjału wody glebowej  $1500 \text{ kJ.m}^{-3}$  i  $30 \text{ kJ.m}^{-3}$ , odpowiednio) i pełnym nasyceniu zostały określone w oparciu o równanie van Genuchtena (152) opisujące krzywą retencji:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + (\alpha h)^{1-\frac{1}{n}}\right)},$$

której parametry określono za pomocą równań Wöstenai i n. (169):

$$\theta_s = 0,7919 + 0,001691 * C - 0,29619 * BD - 0,000001491 * S^2 + 0,0000821 * OM^2 + 0,02427 * C^{-1} + 0,01113 * S^{-1} + 0,01472 * \ln(S) - 0,0000733 * OM * C - 0,000619 * BD * C - 0,001183 * BD * OM - 0,0001664 * \text{topsoil} * S$$

$$\theta_r = 0,01$$

$$\alpha = \text{Exp}(-14,96 + 0,03135 * C + 0,0351 * S + 0,646 * \text{OM} + 15,29 * \text{BD} - 0,192 * \text{topsoil} - 4,671 * \text{BD}^2 - 0,000781 * C^2 - 0,00687 * \text{OM}^2 + 0,0449 * \text{OM}^{-1} + 0,0663 * \ln(S) + 0,1482 * \ln(\text{OM}) - 0,04546 * \text{BD} * S - 0,4852 * \text{BD} * \text{OM} + 0,00673 * \text{topsoil} * C)$$

$$n = 1 + \text{Exp}(-25,23 - 0,02195 * C + 0,0074 * S - 0,1940 * \text{OM} + 45,5 * \text{BD} - 7,24 * D^2 + 0,0003658 * C^2 + 0,002885 * \text{OM}^2 - 12,81 * \text{BD}^{-1} - 0,1524 * S^{-1} - 0,01958 * \text{OM}^{-1} - 0,2876 * \ln(S) - 0,0709 * \ln(\text{OM}) - 44,6 * \ln(\text{BD}) - 0,02264 * \text{BD} * C + 0,0896 * \text{BD} * \text{OM} + 0,00718 * \text{topsoil} * C)$$

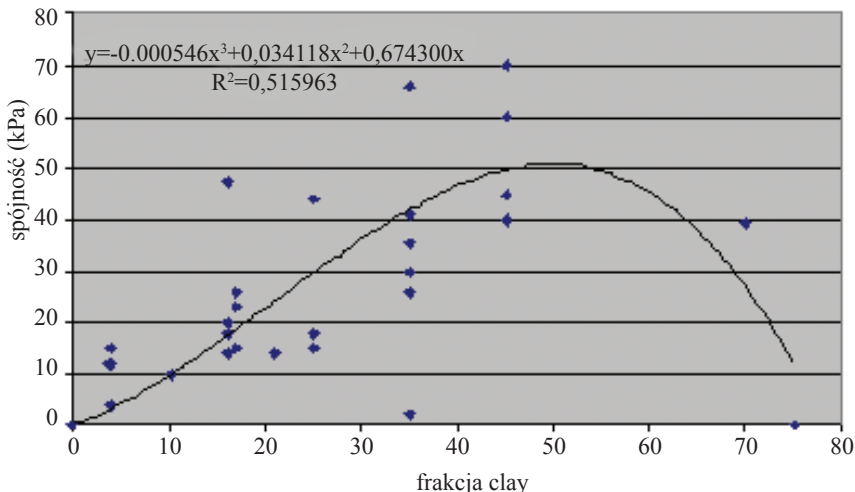
gdzie: OM – oznacza zawartość próchnicy w %; BD – gęstość objętościowa; C – procent frakcji łu ‘clay’; S – procent frakcji pyłu ‘silt’; topsoil zmienna równa 1 dla warstwy ornej i 0 dla innych warstw.

Za pomocą równania Wösten i in. (169) określono także wykorzystywaną w modelu Alcor przewodność hydrauliczną  $K_{\text{sat}}$  (m/s):

$$K_{\text{sat}} = (1/24/3600) * \text{Exp}(7,755 + 0,0352 * S + 0,93 * \text{topsoil} - 0,967 * \text{BD}^2 - 0,000484 * C^2 - 0,000322 * S^2 + 0,001 * S^{-1} - 0,0748 * \text{OM}^{-1} - 0,643 * \ln(S) - 0,01398 * \text{BD} * C - 0,1673 * \text{BD} * \text{OM} + 0,02986 * \text{topsoil} * C - 0,03305 * \text{topsoil} * S)$$

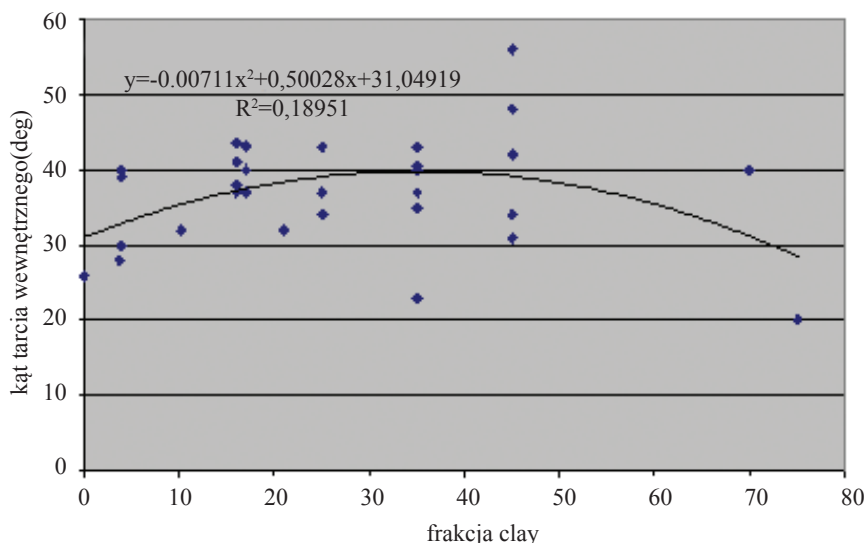
gdzie: OM – oznacza zawartość próchnicy w %; BD – gęstość objętościowa; C – procent frakcji łu ‘clay’; S – procent frakcji pyłu ‘silt’; topsoil - zmienna równa 1 dla warstwy ornej i 0 dla innych warstw.

Wartości spójności i kąta tarcia wewnętrzznego, ze względu na brak szczegółowych danych odpowiadających podziałowi na gatunki gleb występujące na mapie glebowo-rolniczej określono w oparciu o równania pedotransferu wyznaczone na podstawie danych, które posłużyły do opracowania modelu Alcor (96):



Rysunek 9. Zmienność wartości spójności gleb w zależności od zawartości frakcji łu *clay*

Źródło: dane i opracowanie własne niepublikowane.



Rysunek 10. Wpływ zawartości frakcji łu ‘clay’ na wartość kąta tarcia wewnętrznego gleb  
 Źródło: dane i opracowanie własne niepublikowane.

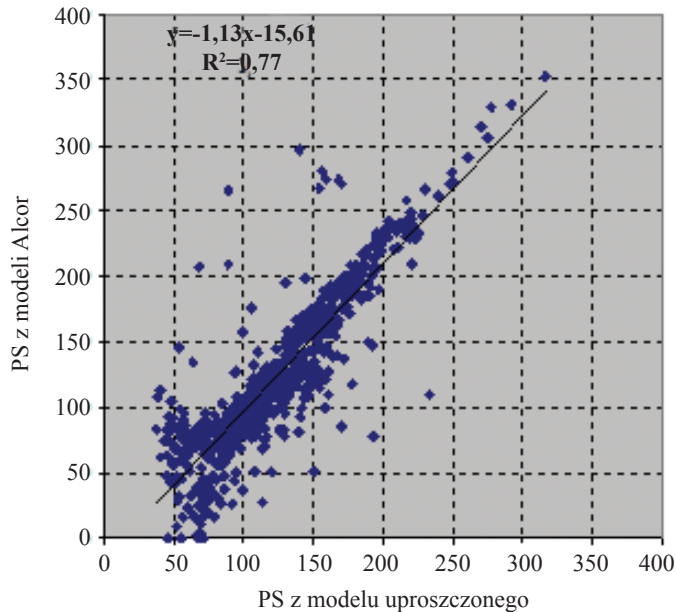
Po wyliczeniu z modelu Alcor wartości  $PS_{Alcor}$  (tj. podatności gleb na zagęszczenie „pre-compression stress”) poszukiwano funkcji pedotransferu, którą dalej określa się jako model uproszczony PS, w postaci równania liniowego względem gęstości objętościowej BD, w której współczynniki są funkcjami zmiennych charakteryzujących uziarnienie: frakcji cząstek spławalnych  $F_{<0,02}$ , frakcji pyłu  $F_{0,1-0,02}$  ich iloczynów oraz ich kwadratów.

Ze względu na skorelowanie zmiennych niezależnych, współczynników równania poszukiwano metodą regresji krokowej grzbietowej przy użyciu pakietu STATISTICA (w równaniu pozostawiane są tylko wyrazy statystycznie istotne na poziomie 0,05):

$$PS = 366 - 0.77F_{<0,02} - 0.57F_{0,1-0,02})BD - (376 - 0.016F_{<0,02}^2), R^2 = 0,68$$

gdzie: BD – oznacza wartość gęstości objętościowej gleb, wartość BD została skorygowana tak samo jak w modelu Alcor poprzez ograniczenie jej zmienności do przedziału od 1,3 do 2,1 (jeśli gęstość gleby jest większa niż 2,1 przyjmuje się że BD = 2,1; a gdy mniejsza od 1,3 przyjmuje się BD = 1,3).

W celu oszacowania rzeczywistych zdolności predykcyjnych modelu wykreślono przewidywane przez model Alcor wartości  $PS_{Alcor}$  w funkcji wartości PS przewidywanych przez model uproszczony (rys. 11):



Rysunek 11. Porównanie wartości PS przewidywanych przez model Alcor i przez model uproszczony wykorzystujący informacje o gęstości objętościowej.

Źródło: dane i opracowanie własne niepublikowane.

Z uwagi na potrzebę porównywalności z opracowaniami międzynarodowymi opracowano analogiczne równanie zastępując frakcje cząstek spławianych i pyłu frakcjami o nazwie ‘clay’ i ‘silt’, odpowiednio:

$$PS = 365 - 1,4F_{<0,02} - 0,62F_{0,05-0,002})BD - (381 - 0,039F_{<0,02}^2 - 0,05-0,002}), \quad R^2=0,68, \quad R^2=0,69$$

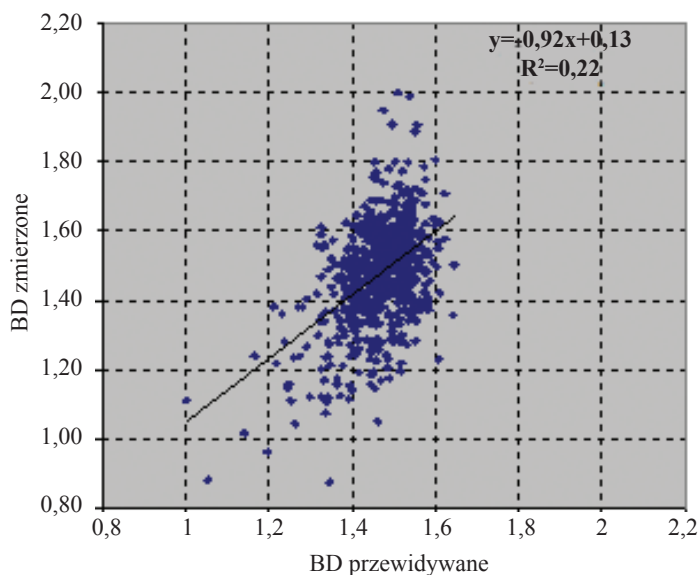
Znalezione równania, pod warunkiem znajomości wartości gęstości objętościowej, BD, wyjaśniają rzeczywistą zmienność PS w około 50% (współczynniki determinacji  $R^2$  modelu Alcor wynoszą powyżej 70%, a dla proponowanego modelu 77% stąd  $0,7 \cdot 0,77 = 0,54$ ).

Znaczące uproszczenie modelu Alcor okupione zostało zatem utratą zdolności przewidywania o ok. 16 punktów procentowych (z ok. 70% do 54%). Jest to jednak oszacowanie nie uwzględniające efektu nieciągłości modelu Alcor, która została usunięta poprzez zastąpienie 5 równań jednym. Prawdopodobne jest zatem, że proponowany model uproszczony wyjaśnia więcej niż 54% zmienności PS.

W sytuacji gdy nie jest znana wartość gęstości objętościowej gleby, BD, może być ona określona za pomocą funkcji pedotransferu znalezionej w oparciu o wspomnianą bazę 670 profili:

$$BD = 1 / (0,047 \cdot OM + 0,00087 \cdot F_{0,1-0,02} + 0,574); \quad R^2=0,27$$

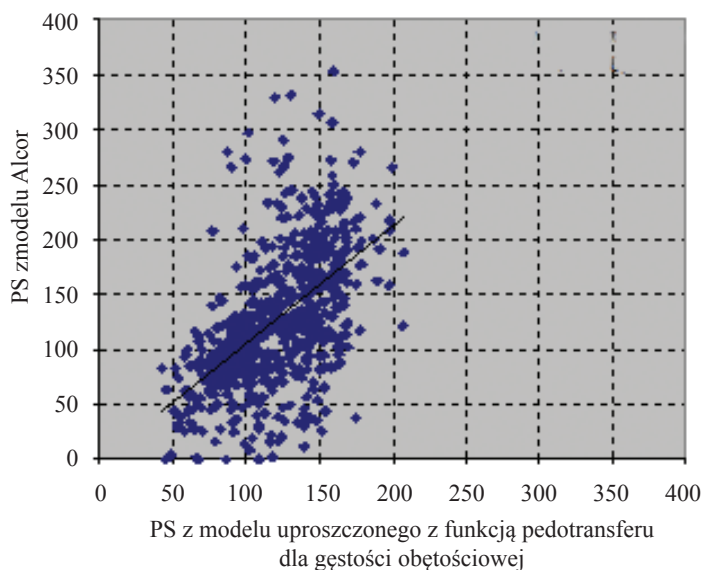
gdzie: BD – oznacza gęstość objętościową gleby, OM – zawartość materii organicznej w glebie,  $F_{0,1-0,02}$  – frakcja granulometryczna gleby o średnicy 0,1-0,02mm.



Rysunek 12. Porównanie przewidywanych i zmierzonych wartości gęstości objętościowej

Źródło: dane i opracowanie własne niepublikowane.

Model w małym stopniu wyjaśnia zmienność wartości gęstości objętościowej gleb, BD, jednak nie istnieją dużo lepsze modele dla gleb Polski.

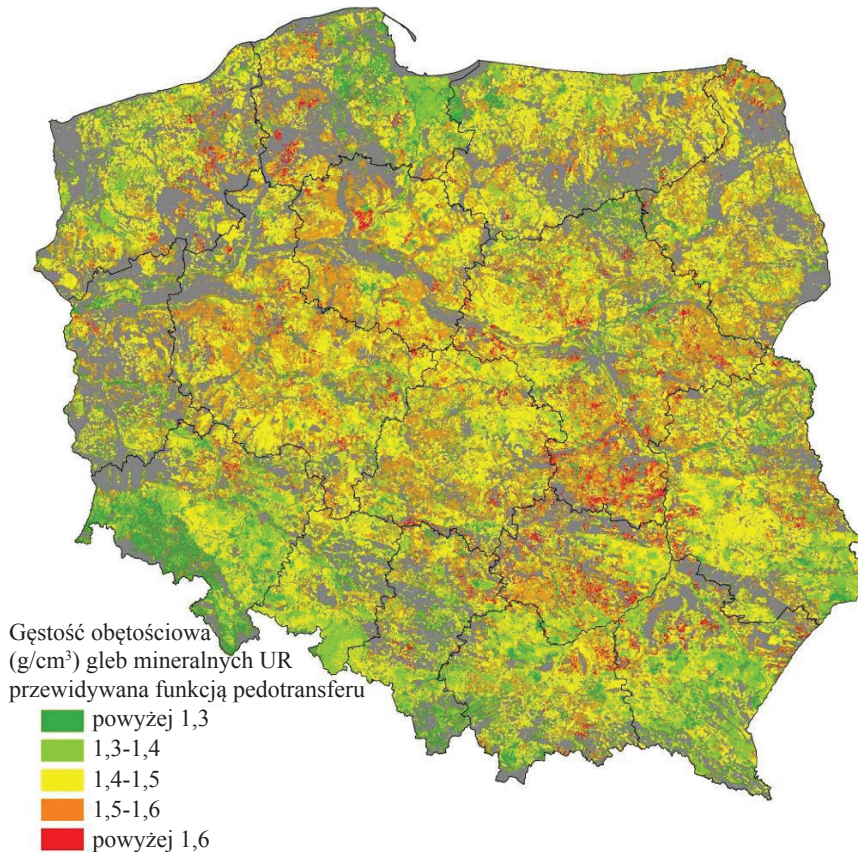


Rysunek 13. Porównanie wartości PS przewidywanych przez model Alcor i przez model uproszczony nie wykorzystujący informacji o gęstości objętościowej

Źródło: dane i opracowanie własne niepublikowane.

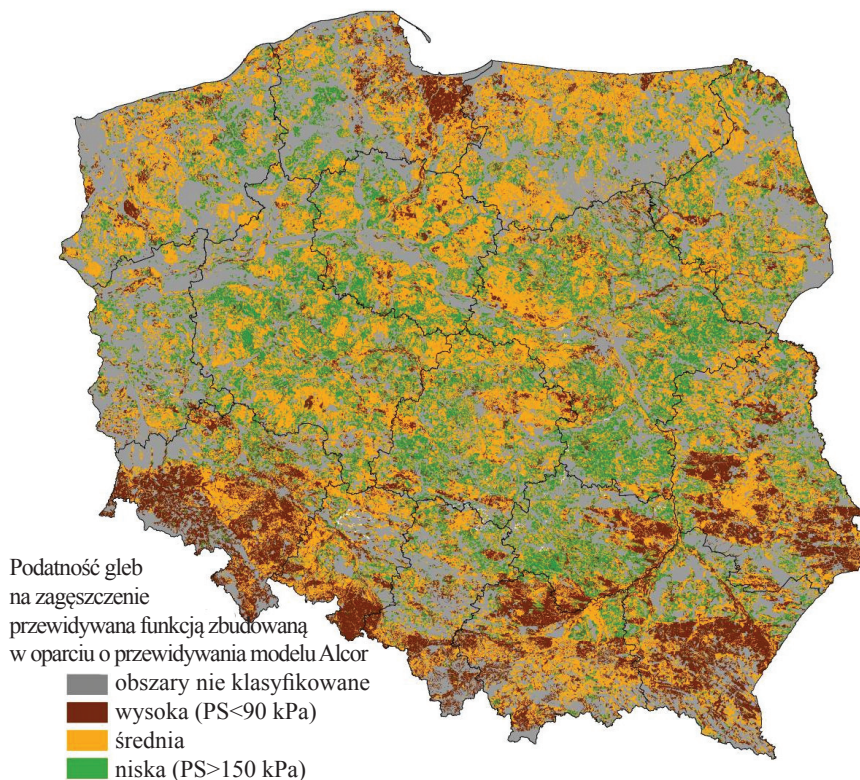
Użycie zaproponowanej funkcji powoduje, że model uproszczony z funkcją pedotransferu dla gęstości objętościowej gleb, BD, wyjaśnia zmienność PS w około 22% ( $0,7 \cdot 0,32 = 0,22$ ).

Zaproponowany model uproszczony wykorzystujący wartości gęstości objętościowej, BD, określony uzyskaną funkcją pedotransferu (rys. 14) został wykorzystany do opracowania mapy wartości PS („*pre-compression stress*”) dla Polski (rys. 15).



Rysunek 14. Gęstość objętościowa gleb użytków rolnych w Polsce przewidywana na podstawie funkcji pedotransferu (mapa numeryczna opracowana na podstawie funkcji ptf)

Źródło: opracowanie własne niepublikowane.



Klasyfikację podatności gleb na zagęszczenie przyjęto za opracowaniem (147):

Podatność na zagęszczenie	wartość krytyczna nacisku PS „pre-compression stress” (kPa)
Niska	>150
Średnia	90 - 150
Wysoka	< 90

Rysunek 15. Podatność gleb na zagęszczenie w Polsce - opracowany nowy model 2011,

IUNG-PIB Puławy

Źródło: dane i opracowanie własne niepublikowane (Czyż i in. 2011; opracowanie równań ptfA. Łopatka).

Mapy te powstały w oparciu o mapę glebowo-rolniczą w skali 1:100000 z przyporządkowanymi wartościami składu granulometrycznego (frakcja części spławalnych i pyłu) oraz zawartości próchnicy. Wielkości te zostały przyporządkowane do poligonów mapy z bazy zawierającej około 45000 profili wzorcowych w ten sposób aby zapewnić maksymalne podobieństwo profilu i wielkości charakteryzujących poligon na mapie (147).

Procentowy udział powierzchni użytków rolnych w różnych klasach podatności na zagęszczenie przedstawiono w tabeli 7. Natomiast zestawienie powierzchni gleb użytków rolnych w różnych klasach podatności gleb na zagęszczenie według modeli z 2011 roku na tle opracowanego modelu z 2007 roku (147) zawiera tabela 8.

Tabela 7

Udział powierzchni gleb użytków rolnych (w %) w różnych klasach podatności gleb na zagęszczenie

Województwo	Średnia podatność (kPa)	Udział powierzchni w poszczególnych klasach podatności gleb na zagęszczenie (%)		
		Niska*/	Średnia*/	Wysoka*/
dolnośląskie	91,1	53,6	35,2	11,1
kujawsko-pomorskie	134,0	9,1	54,5	36,4
lubelskie	109,0	36,8	43,4	19,8
lubuskie	120,9	20,9	49,5	29,7
łódzkie	132,4	13,1	53,2	33,8
małopolskie	98,0	44,7	46,5	8,8
mazowieckie	134,1	14,3	46,1	39,6
opolskie	98,2	43,7	45,6	10,7
podkarpackie	99,9	49,6	37,6	12,7
podlaskie	134,5	15,9	55,0	29,2
pomorskie	113,0	27,9	50,4	21,7
śląskie	107,6	38,8	41,4	19,8
świętokrzyskie	130,1	27,1	37,3	35,5
warmińsko-mazurskie	121,8	14,2	67,2	18,5
wielkopolskie	134,6	8,9	52,8	38,3
zachodniopomorskie	124,4	14,5	61,9	23,6
<b>Polska</b>	<b>119,0</b>	<b>25,6</b>	<b>48,6</b>	<b>25,8</b>

Źródło: Czyż i in. (2011) oraz dane i opracowanie własne niepublikowane.

\*/ Zastosowano tu klasyfikację podatności gleb na zagęszczenie za opracowaniem (147):

Podatność gleb na zagęszczenie	wartość krytyczna nacisku PS „pre-compression stress” (kPa)
*/ Niska	>150
*/ Średnia	90 - 150
*/ Wysoka	< 90

Tabela 8

Zestawienie powierzchni gleb użytków rolnych w różnych klasach podatności na zagęszczenie wg. modelu z roku 2011\*/ na tle opracowanego modelu z roku 2007\*\*/

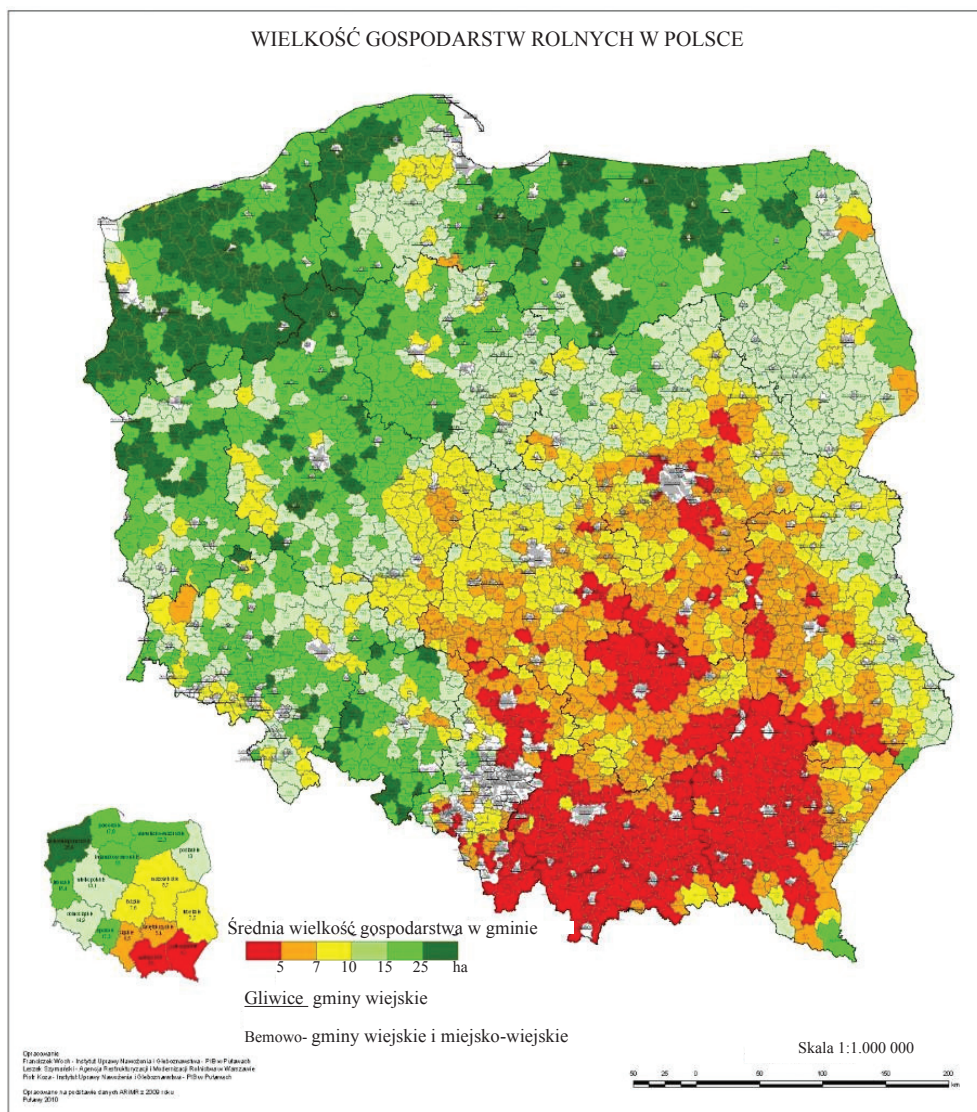
Wyszczególnienie	średnia podatność (kPa)	Podatność na zagęszczenie					
		niska		średnia		wysoka	
		ha	%	ha	%	ha	%
POLSKA (2011) */	119,0	3976188	25,6	7543934	48,6	4013879	25,8
POLSKA (2007)**/	164,0	10594727	62,7	3703857	21,9	2600317	15,4

Źródło: dane opracowanie własne nowy model z 2011r. Czyż i in. 2011 (40) /\* na tle modelu z 2007r. Stuczyński i in.2007, (147) \*\*/.

Według przyjętego z roku 2007 modelu podatności gleb na zagęszczenie (147), oszacowana w kraju łączna powierzchnia gleb wysoce narażonych na zagęszczenie, w wyniku niewłaściwych technik uprawy sprzętem o zbyt dużych naciskach i w warunkach nadmiernego uwilgotnienia, wynosi 2 600 316 ha, co stanowi około 15% użytków rolnych. Modyfikacja tego modelu podatności gleb na zagęszczenie z 2007r. przeprowadzona w roku 2011 w oparciu o aktualne dane wzorcowych profili glebowych (n=670), wykazała że gleby o wysokiej podatności na zagęszczenie zajmują znacznie większy obszar naszego kraju niż dotychczas twierdzono i wynosi on 4 013 879 ha, co stanowi około 26% użytków rolnych w Polsce (tab. 8). Dużym udziałem gleb o wysokiej podatności na zagęszczenie charakteryzuje się pokrywa glebowa województwa mazowieckiego (40%), wielkopolskiego (38%) i kujawsko-pomorskiego (36%). Szczególnie w tych województwach ze względu na powszechne stosowanie ciężkiego sprzętu rolniczego zagęszczenie gleb może stanowić i być istotnym czynnikiem pogarszającym warunki siedliskowe na użytkach rolnych (tab. 7). Przy tym zaznaczyć należy, że według GUS (91, 92) powierzchnia użytków rolnych w Polsce uległa zmniejszeniu z 16,2 mln ha (2007 r.) do 15,5 mln ha (2010 r.). Co więcej gleby w naszym kraju wykazują duże zróżnicowanie pod względem granulometrycznym i charakteryzują się małą zawartością materii organicznej, co determinuje ich podatność na ugniatanie. Dla badanych 760 profili glebowych średnia zawartość materii organicznej w warstwie ornej wynosiła 2,23%. W niniejszych badaniach stwierdzono, że poszczególne gleby wykazują zróżnicowany stopień podatności na zagęszczanie również w zależności od tekstury i zawartości substancji organicznej. Przestrzenne rozmieszczenie tych gleb tworzy dużą mozaikę, co jest cechą charakterystyczną dla pokrywy glebowej w Polsce (107, 108). Szczególnie niekorzystne warunki uprawy z tego punktu widzenia występują w dolinach rzecznych, na zwięzłych madach, glinach ciężkich i łąkach nadmiernie uwilgotnionych w okresie wykonania prac uprawowych. Skutki zagęszczenia na tych glebach są długotrwałe i trudno odwracalne.

### **Przesłanki przeciwdziałania zagęszczeniu gleb**

Współcześnie wielkość gospodarstw, a co za tym idzie i intensywność gospodarowania w Polsce wykazuje duże zróżnicowanie. Najwięcej gospodarstw powyżej 25 ha posiadają gminy w województwie zachodniopomorskim, natomiast najbardziej rozdrobnione gospodarstwa o małej powierzchni poniżej 5 ha mają województwa podkarpackie i małopolskie. Wielkość gospodarstw rolnych w poszczególnych gminach i województwach zobrazowano na mapie (rys. 16) opracowanej przez W o c h a i i n. (163).



Rysunek 16. Wielkość gospodarstw rolnych w Polsce

Źródło: Woch i in., 2010 (163).

Biorąc pod uwagę warunki naszego kraju i perspektywy zmian organizacyjno-ekonomiczne do 2020 roku w Polskim rolnictwie, Zięta (172) podaje, że dominować będzie w najbliższej przyszłości model rolnictwa zachodnioeuropejskiego oparty na gospodarstwach rodzinnych. Dalej autor dodaje, że obok tej formy prawno-organizacyjnej występować będą również inne formy prawne, np. spółki z o.o., szczególnie w regionach Północnej i Zachodniej Polski, gdzie do 1990 roku dominowały

gospodarstwa państwowe. Zdaniem autora, co się tyczy gospodarstw rodzinnych, które będą formą dominującą obserwuje się nasilające się zjawisko polaryzacji polegające na powstawaniu z jednej strony gospodarstw towarowych z tendencją do powiększania powierzchni i produkcji, a z drugiej strony gospodarstw o małej powierzchni (do 5 ha użytków rolnych, UR). Zwiększanie się liczby i udziału w użytkowaniu ziemi tych grup gospodarstw następuje kosztem gospodarstw z przedziału 5-20 ha UR. Gospodarstwa towarowe o powierzchni ponad 15 ha użytkują obecnie około 44% UR, a ich udział w produkcji towarowej wynosi ponad 60%. Poziom intensywności produkcji w tej grupie gospodarstw jest wysoki i będzie wzrastał, powodując obciążenie środowiska naturalnego. Podmioty te będą jednak zmuszone do stosowania metod produkcji przyjaznych dla środowiska naturalnego. Należy przypuszczać, że dominować w nich będzie system tzw. integrowanej produkcji i zasady dobrej praktyki rolniczej. Natomiast druga grupa gospodarstw o małej powierzchni nastawiona głównie na zaspokajanie własnych potrzeb będzie prowadzić ekstensywny system produkcji, co nie jest równoznaczne z przestrzeganiem zasad dobrych praktyk rolniczych. Ponadto w większości gospodarstwa te dysponują wyeksploatowanym sprzętem rolniczym. Polaryzacja powierzchni gospodarstw będzie także źródłem problemów społecznych, szczególnie rolników prowadzących gospodarstwa o powierzchni 5-20 ha. Część z nich przejdzie do grupy gospodarstw o małej powierzchni nastawionych na samo zaopatrzenie i nie będzie zdolna do podejmowania dodatkowej pracy poza rolnictwem. Autor na zakończenie swych rozważań pisze, że "(...) w Polsce w przyszłości dominować będzie model rolnictwa dualnego, w którym występować będą dwie grupy gospodarstw: tzw. socjalne i towarowe."

Z tego względu zapobieganie zagęszczeniu gleb i dalszy rozwój sytuacji zależy w znacznym stopniu od modelu organizacyjnego i systemów uprawy roli w gospodarstwach. Na obszarach występowania dużych gospodarstw należy zakładać scenariusz upowszechnienia się uprawy zredukowanej (tj. uproszczonej), połączonej z mniejszą liczbą przejazdów ugniatających glebę, sprzętem o mniejszych naciskach jednostkowych na koło. Stosowanie tych technik, na co wskazują wyniki badań, wydatnie zmniejsza zagęszczenie. Sprzyjają tym uprawom powierzchnie dużych gospodarstw rolnych, wspomniane gospodarstwa rolne o dużym areale (np. w województwie zachodnio-pomorskim. Z kolei, z uwagi na rozdrobnioną strukturę rolnictwa w Polsce i ograniczone możliwości inwestycyjne, większość małych gospodarstw pozostanie przy tradycyjnych technikach uprawy roli, niekorzystnych z punktu widzenia ryzyka degradacji fizycznej gleb, szczególnie gospodarstwa o małym areale (np. województwo podkarpackie - ryunek 16).

Scenariusz powyższy można traktować jako najbardziej realny, w wyniku czego powierzchnia gleb o dużym ryzyku degradacji fizycznej przez nadmierne zagęszczanie pozostanie na niezmiennym poziomie, z niewielką tendencją spadkową na obszarach funkcjonowania większych gospodarstw stosujących uproszczone techniki uprawy roli. Sprzyjają tym uprawom powierzchnie dużych gospodarstw rolnych, głównie

w województwie zachodnio-pomorskim. Równocześnie nie należy zapominać, że na terenach o małym areale gospodarstw, między innymi w województwie lubelskim, są także indywidualne gospodarstwa rolnicze, np. w miejscowości Rogów, o dużych powierzchniach z nowoczesnym sprzętem do uprawy i zbiorów płodów rolnych, gdzie stosowane są zredukowane, konserwujące systemy uprawy roli i świadome inwestycje producenta - rolnika w ochronę i zrównoważony rozwój środowiska. Zastosowanie w tym gospodarstwie prawidłowych technik uprawowych i uproszczonych systemów uprawy roli zapewnia właściwe warunki do wzrostu i plonowania roślin, a wykorzystywanie szerokich ścieżek przejazdowych, odpowiedniego szerokiego ogumienia kół ciągników i przyczep podczas żniw zapobiega degradacji gleby. Od wielu lat i aktualnie w tym gospodarstwie rolnym z dużym sukcesem prowadzi badania IUNG-PIB w Puławach i inne ośrodki naukowe.

W ostatnim latach niekorzystnym zjawiskiem jest również obserwowana intensyfikacja zmianowań i wprowadzanie monokultur zbożowych oraz odchodzenie od nawożenia organicznego i uprawy roślin wieloletnich w zmianowaniu na obszarach gospodarki bezzinwentarzowej.

W Polsce w chwili obecnej nie funkcjonuje żaden instrument polityki ukierunkowany bezpośrednio na przeciwdziałanie zagęszczeniu gleb – jednak pośrednio realizacja pakietów ochrony gleb i wód oraz rolnictwa zrównoważonego przyczynia się do zapobiegania fizycznej degradacji gleb.

Wśród zalecanych działań ograniczających negatywne zjawisko nadmiernego zagęszczenia gleb najbardziej efektywne są:

- stosowanie konserwujących uproszczonych systemów uprawy roli,
- zmniejszenie do minimum ruchu pojazdów rolniczych przy wysokiej wilgotności gleby,
- agregatowanie maszyn i zmniejszanie liczby przejazdów,
- używanie stałych ścieżek przejazdowych,
- stosowanie prawidłowego zmianowania roślin,
- stosowanie niskiego ciśnienia powietrza w ogumieniu,
- stosowanie bliźniaczych kół ciągników i zastępowanie ciągników kołowych gąsienicowymi lub tzw. 'pasowymi'.

### **Podsumowanie**

Na podstawie wieloletnich badań stwierdzono, że nadmierne zagęszczenie gleb powoduje wiele niekorzystnych skutków środowiskowych i produkcyjnych, gdyż:

1. Zwiększa ciężar objętościowy gleby,
2. Uszkadza i zaburza strukturę gleby,
3. Zmniejsza napowietrzanie gleby,
4. Zmniejsza retencję wody w glebie i ilości wody dostępnej dla roślin,
5. Ogranicza szybkość przenikania wody (zmniejsza przewodność wody w glebie),

6. Powoduje wzrost spływu powierzchniowego i erozję gleby,
7. Zwiększa straty składników odżywczych,
8. Ogranicza rozwój korzeni,
9. Powoduje niedobory składników odżywczych dla roślin,
10. Zmniejsza wydajność upraw (ilość i jakość plonu).

Na podstawie badań własnych i przeglądu literatury przytoczono 10 argumentów i wykazano, dlaczego należy eliminować i ograniczać nadmierne zagęszczenie gleby.

Otrzymane przez autorów niniejszego opracowania wyniki badań nad gęstością gleb użytków rolnych, umożliwiły oszacowanie stanu zagęszczenia wierzchniej warstwy gleb i w roku 2011 stworzenie "nowego" modelu podatności gleb na zagęszczenie. Przeprowadzona analiza w oparciu o aktualne dane glebowe i opracowany model wykazała, że gleby o wysokiej podatności na zagęszczenie zajmują znacznie większy obszar naszego kraju niż dotychczas twierdzono i wynosi on 4 013 879 ha, co stanowi około 26% użytków rolnych w Polsce.

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano mapę numeryczną podatności gleb na zagęszczenie. Wyniki zgromadzone w bazie danych glebowych z zakresu badanych parametrów gęstości objętościowej gleb dla obszaru całej Polski o nazwie 'bank. DATA COMPACTION' i zawartości materii organicznej o nazwie 'bank. DATA OM', stanowią unikalny zbiór danych glebowych znajdujących zastosowanie w badaniach agrotechnicznych i erozyjnych, jak również wykorzystywanych do celów praktycznych w ocenie wpływu techniki i technologii uprawy roli na fizyczną jakość gleb oraz w ocenie zagrożeń środowiskowych związanych z oddziaływaniem mechanizacji w rolnictwie. Dane te posłużą do ilościowego charakteryzowania warunków siedliskowych ważnych z punktu widzenia potrzeb roślin i systemów uprawy oraz ochrony środowiska, a także kształtowania zagęszczenia gleb w krajobrazie rolniczym w różnych skalach: pola, regionu i kraju.

## Literatura

1. A l a k u k k u L.: Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. 11 Long-term effects on the properties of fine-textured and organic soils. *Soil and Tillage Research*, 1996, **37**: 223-238.
2. A l a k u k k u L.: Response of annual crops to subsoil compaction in a field experiment on clay soil lasting 17 years. In: Horn R., van den Akker, J.J.H., Arvidsson J. (Eds.). *Subsoil compaction: Distribution, processes and consequences*. *Advances in GeoEcology* 32, Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, 2000, 205-208.
3. A l a o u i A., L i p i e c J., G e r k e H.: A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil and Tillage Research*, 2011, **115-116**: 1-15.
4. A l i M., J e n s e n C. R., M o g e n s e n V. O., A n d e r s e n M. N., H e n s o n I. E.: Root signaling and osmotic adjustment during intermittent soil drying sustain grain yield of field grown wheat. *Field Crops Res*, 1999, **62**: 35-52.
5. A r v i d s s o n J.: Soil compaction in Agriculture – from soil stress to plant stress. Doctoral Thesis. *Agraria* 41, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 1997.
6. A r v i d s s o n J., H å k a n s s o n I.: A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 1991, **20**: 319-332.

7. Arvidsson J.: Subsoil compaction caused by heavy sugar beet harvesters in southern Sweden. I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil and Tillage Research*, 2001, **60**: 67-78.
8. Assouline S.: Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve. *Vadose Zone Journal*, 2006, **5**: 554-563.
9. Assouline S., Tavares-Filho J., Tessier D.: Effect of compaction of soil physical and hydraulic properties: Experimental results and modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**: 390-398.
10. Atkinson B. S., Sparkes D. L., Mooney S. J.: Effect of seedbed cultivation and soil macrostructure on the establishment of winter wheat (*Triticum aestivum*). *Soil and Tillage Research*, 2009, **103**: 291-301.
11. Batey T.: Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use Manage*, 2009, **25**: 335-345.
12. Bednarz W.: Wpływ stopnia zagęszczenia gleby kołami ciągnika na jej aktywność biologiczną. *Rocz. Nauk Rol.*, 1985, **76-C-1**: 9-23.
13. Birkás M.: Environmentally-Sound Adaptable Tillage. Akademia Kiado, Budapest, Hungary, 2008.
14. Błazejczak D., Dawidowski J. B., Śnieg M., Tomaszewicz T.: Oddziaływanie gęstości i składu gleby na ocenę stanu jej zagęszczenia. *Inżynieria Rolnicza*, 2008, **4(102)**: 127-132.
15. Błazejczak D., Tomaszewicz T., Dawidowski J. B., Śnieg M.: Właściwości fizykomechaniczne warstwy podornej gleby dla wybranych roślin uprawnych. *Inżynieria Rolnicza*, 2002, **5(38)**: 197-204.
16. Buliński J.: Możliwości zmniejszenia ugniatania gleby agregatami rolniczymi. *Przegl. Techn. Roln i Leśnej*, 1994, **6**: 4-5.
17. Buliński J.: Zagęszczenie gleby w różnych technologiach uprawy roślin i związane z tym opory orki. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 1998.
18. Busscher W. J., Lipiec J., Bauer P. J., Carter T. E.: Root penetration of artificial compacted hard layers. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica*, 1997, **2A/97**: 119-122.
19. CEC (Commission of the European Communities). Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Thematic Strategy for Soil Protection. SEC(2006)620 and SEC(2006)1165. Brussels, 2006a.
20. CEC (Commission of the European Communities). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council, establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC. Brussels, 2006b.
21. Chen G., Weil R. R.: Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil*, 2010, **331**, 31-43.
22. COM(2006) 231final. Propozycja Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady ustanawiającej ramy ochrony gleb i zmieniającej dyrektywę 2004/35/WE /etap dyskusji/, 2006. 231.
23. COM(2006) 231final. Uwarunkowania prawne precyzują podstawowe funkcje gleby i określają zagrożenia. Przyjęta we wrześniu 2006 r. przez Parlament Europejski „Strategia tematyczna w dziedzinie ochrony gleby”, 22 September 2006, Brussels.
24. Czyż E. A.: Badanie zmian gęstości, warunków aeracyjnych i potencjału oksydoredukcyjnego w glebie gliniastej pod wpływem przejazdów ciągnika. VII Międzynarodowa Sesja Naukowa „Technika rolnicza i jej rola w kształtowaniu środowiska rolniczego”, Szczecin, 16-17 marca 1995a, 111-112.
25. Czyż E. A.: Badanie zmian gęstości, warunków aeracyjnych i potencjału oksydoredukcyjnego w glebie piaskowej pod wpływem przejazdów ciągnika. VII Międzynarodowa Sesja Naukowa „Technika rolnicza i jej rola w kształtowaniu środowiska rolniczego”, Szczecin, 16-17 marca 1995b, 109-110.
26. Czyż E. A.: Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil and Tillage Research*, 2004a, **79(2)**: 153-166.

27. Czyż E. A.: The study of the relationship between soil compactness and soil aeration. International Conference „Soil compaction as a factor determining plant productivity”, Lublin, Poland, 5-9 June, 1989, 47-48.
28. Czyż E. A.: Ugniatanie gleby kołami ciągnika a warunki aeracyjne i plonowanie jęczmienia. I Międzynarodowe Sympozjum „Ekologiczne aspekty mechanizacji nawożenia, ochrony roślin i uprawy gleby”. Wydawnictwa IBMER Warszawa, 17 czerwca, 1994, 68-73.
29. Czyż E. A.: Wpływ systemów uprawy roli na uwilgotnienie i zagęszczenie gleby ciężkiej oraz plonowanie kukurydzy. *Fragmenta Agronomica*, 2004b, **3(83)**: 21-30.
30. Czyż E. A.: Wpływ zagęszczenia gleb mineralnych w różnych warunkach uwilgotnienia na ich aerację, potencjał oksydoredukcyjny i zawartość azotu azotanowego i amonowego. *Wyd. IUNG Puławy*, 1992, seria **R (300)**: 27-50.
31. Czyż E. A., Dexter A.R.: Prediction of the effects of tillage in relation to soil organic matter content. In: Borowski P.F., Klimkiewicz M., Powalka M. (Eds.) Selected problems of soil tillage systems and operations. Faculty of Production Engineering. Warsaw University of Life Sciences, WEMA Warsaw, 2010a, 11-21.
32. Czyż E. A., Dexter A. R.: Soil crumbling during tillage as a function of soil organic matter content. *Int. Agrophysics*, 2011a, Vol. **25**, No **3**: 215-221.
33. Czyż E. A., Dexter A. R.: Soil physical properties as affected by traditional, reduced and no-tillage for winter wheat. *Int. Agrophysics*, 2009, Vol. **23**, No **4**: 319-326.
34. Czyż E. A., Dexter A. R.: Turbidity in Encyclopedia of Agrophysics edited by J. Glinski, J. Horabik, J. Lipiec., Springer Verlag, Heidelberg The Netherlands, 2011b, 938-940.
35. Czyż E. A., Dexter A. R.: Wpływ przejazdów ciągnikiem po polu na zmiany warunków wodnych gleby piaskowej. (Effect of tractor passes in the field on changes in the water status of sand soils). IX Międzyn. Symp. „Ekologiczne Aspekty Mechanizacji Produkcji Roślinnej”, 19-20 września 2002, Wydawnictwa IBMER Warszawa, 2002, 96-101.
36. Czyż E. A., Dexter A. R.: Wpływ zagęszczenia na jakość fizyczną gleb. *Zeszyty Naukowe Południowo-Wschodniego Oddziału Polskiego Towarzystwa Inżynierii Ekologicznej z Siedzibą w Rzeszowie i Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego Oddział w Rzeszowie*, 2010b, Nr. **13**: 27-29.
37. Czyż E. A., Dexter A. R.: Wpływ zagęszczenia na zmiany zakresów wody użytecznej dla roślin w glebie piaskowej oraz plon jęczmienia jarego. *Wydawnictwa Naukowe FRNA*, 1999, **1**: 11-13.
38. Czyż E. A., Dexter A. R., Dębowska H.: Ocena oddziaływania zróżnicowanych systemów uprawy roli na stabilność pyłu ilastego w uprawie pszenicy ozimej. Referaty i doniesienia. II Konferencja Nauk nt. „Agrofizyka w inżynierii produkcji i ochronie środowiska”. PTA, Krasiczyn, 15-17 września, 2010a, 47-48.
39. Czyż E. A., Dexter A. R., Gałę O. P.: Determination of soil stability in relation to ecological agriculture. In: Borowski P. F., Klimkiewicz M., Powalka M. (Eds.) Selected problems of soil tillage systems and operations. Faculty of Production Engineering. Warsaw University of Life Sciences, Warsaw 2010, 2010b, 22-34.
40. Czyż E. A., Dexter A. R., Jadczyż J., Łopatka A., Podolski B., Stuczyński T., Niedźwiecki J., Nowocień E., Wawer R.: Przestrzenna ocena stanu zagęszczenia i stabilności struktury gleb. Raport z tematu statutowego IUNG-PIB 2.4.2. Materiały IUNG-PIB w Puławach, 2011: 1-141.
41. Czyż E. A., Dexter A. R., Niedźwiecki J.: Wpływ niektórych parametrów fizycznych fazy stałej gleby na retencję wodną w warstwie ornej gleb mineralnych. *Zesz. Probl. Postęp. Nauk Rol.* 2006, **508**: 27-39.
42. Czyż E. A., Dexter A. R., Stanek-Tarkowska J., Dębowska H.: Oddziaływanie systemów uprawy roli na właściwości i jakość fizyczną wybranych gleb. Referaty i doniesienia. II Konferencja Nauk nt. „Agrofizyka w inżynierii produkcji i ochronie środowiska”. PTA, Krasiczyn, 15-17 września, 2010c, 49-51.

43. Czyż E. A., Dexter A. R., Terelak H.: Content of readily-dispersible clay in the arable layer of some Polish soils. In: Pagliai M., Jones R. (Eds.) Sustainable Land Management-Environmental Protection. A Soil Physical Approach. Advances in GeoEcology 2002, **35**: 115-124.
44. Czyż E. A., Gajda A. M.: Zmiany parametrów jakości i żyzności gleby brunatnej właściwej pod wpływem stosowania konserwujących systemów uprawy roli. Międzynarodowa Konferencja Naukowa nt. „Nowe Trendy w Agrofizyce”, połączona z uroczystymi obchodami Jubileuszu 40-lecia Instytutu Agrofizyki PAN, Lublin, 10-11.06.2008, Wyd. Nauk. FRNA Lublin, 2008, 58-59.
45. Czyż E. A., Kukiery U.: The effect of soil bulk density and water content on soil aeration, nitrogen forms and barley yield. 14th ISTRO Conference “Agroecological and economical aspects of soil tillage”, Puławy, Poland, 27-31 July, Bibliotheca Fragmenta Agronomica, 1997, **2A/97**: 163-166.
46. Czyż E. A., Stanek-Tarkowska J., Dexter A. R., Dębowska H.: Wpływ różnych systemów uprawy roli na stabilność gleb w wodzie. Zeszyty Naukowe Południowo-Wschodniego Oddziału Polskiego Towarzystwa Inżynierii Ekologicznej z Siedzibą w Rzeszowie i Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego Oddział w Rzeszowie. 2010, **13**: 37-39.
47. Czyż E. A., Stanek-Tarkowska J., Dexter A. R., Dębowska H.: Wpływ konserwującej uprawy roli na kształtowanie właściwości fizycznych gleby pylastej w rejonie Podkarpacia. Zeszyty Probl. Postępu Nauk Rol., 2009, **543**: 12-24.
48. Czyż E. A., Tomaszewska J.: Changes of aeration conditions and the yield of sugar beet on sandy soil of different density. Polish J. of Soil Sci. 1993a, vol. **XXVI/1**: 1-9.
49. Czyż E. A., Tomaszewska J.: Changes of bulk density and soil moisture in different tillage systems of maize (*Zea mays* L.) Monoculture on the alluvial soil. International Symposium “Sustainable Agricultural Development and Rehabilitation”. Tallinn, Estonia, 20-24 August, 1996, 84-87.
50. Czyż E. A., Tomaszewska J.: Determination of optimum density of some soils for growth and yielding of spring barley. 14th ISTRO Conference “Agroecological and economical aspects of soil tillage”, Puławy, Poland, 27-31 July, Bibliotheca Fragmenta Agronomica, 1997, **2A/97**: 159-162.
51. Czyż E. A., Tomaszewska J.: Rozwój i plonowanie jęczmienia jarego na glinie ciężkiej przy różnych stanach jej zagęszczenia pod wpływem przejazdów kołami ciągnika. III Międzyn. Sympozjum „Ekologiczne aspekty mechanizacji nawożenia, ochrony roślin i uprawy gleby”, Wydawnictwa IBMER Warszawa, 25 września, 1996: 189-194.
52. Czyż E. A., Tomaszewska J.: Study of the response of spring barley to an increase in the compaction of a loess soil. Proceedings Symposium „Land and Soil Protection”, Tallinn, Estonia, 6-12 July, 1994, 119-123.
53. Czyż E. A., Tomaszewska J.: The effect of different compaction of sandy and loamy soils on their physical properties and the spring barley yield. Polish J. of Soil Sci., 1993b, vol. **XXVI/1**: 11-17.
54. Czyż E. A., Tomaszewska J.: Wpływ zagęszczenia gleby lessowej na rozwój i plonowanie jęczmienia jarego. Pam. Puł., 2002, **130/I**: 91-97.
55. Czyż E. A., Tomaszewska J., Dexter A. R.: Response of spring barley to changes of compaction and aeration of sandy soil under model conditions. International Agrophysics, 2001, **15(1)**: 9-12.
56. Dechniak I., Lipiec J.: Przewodnictwo wodne gleby w strefie nienasyconej i metody jego pomiaru. Probl. Agrof., 1980, 32: 47.
57. Dawidowski B.: Proces ugniatania gleby i metoda prognozowania jej zagęszczenia w zmechanizowanych technologiach prac polowych. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Szczecinie, 1995, Nr Rozprawy 163.
58. Dawidowski B., Śnieg M.: Wyznaczanie naprężeń granicznych gleby w kontekście oceny jej podatności na ugniatanie mechanizmami jezdnyimi agregatów rolniczych. Prace Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych, 1997, vol. **42, 1**: 12-14.

59. De la Rosa D., Diaz-Pereira E., Czyż E. A., Dexter A. R., Dumitru E., Enache R., Fleige H., Horn R., Mayol F., Rakai K., Simota C.: SIDASS project part 2: Soil erosion as a function of soil types and crop management in a Sevilla olive area, southern Spain. *Soil and Tillage Research*, 2005, **82**: 19-28.
60. De la Rosa D., Simota C., Horn R., Rajkaj K., Dexter A. R., Czyż E. A., Fleige H., Dumitru E., Enache R., Mayol F.: SIDASS - Soil erosion as a function of tillage practices and hydraulic properties – A database for European soil. Paper no. 1056, Symposium No. 38, Proc. 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 14-21 August, 2002, 1-10.
61. Dexter A. R.: Changes in the matric potential of soil water with time after disturbance by moulding. *Soil and Tillage Research*, 1990, **16**: 35-50.
62. Dexter A. R.: Physical properties of tilled soils. *Soil and Tillage Research*, 1997, **43**: 41-63.
63. Dexter A. R.: Soil physical quality. Part I: theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 2004a, **120**: 201-214.
64. Dexter A. R.: Soil physical quality. Part II: friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma*, 2004b, **120**: 215-226.
65. Dexter A. R.: Soil physical quality. Part III: unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 2004c, **120**: 227- 239.
66. Dexter A. R.: Soil structure: the key to soil function. In: Pagliai Marcello and Jones Robert (Eds.). *Sustainable Land Management-Environmental Protection. Advances in GeoEcology*, 2002, **35**: 55-69. Catena Verlag, Reiskirchen, 598.
67. Dexter A. R., Bird N. R. A.: Methods for predicting the optimum and the range of water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil and Tillage Research*, 2001, **57**: 203-212.
68. Dexter A. R., Birkás M.: Prediction of the soil structures produced by tillage. *Soil and Tillage Research*, 2004, **79**: 233-238.
69. Dexter A. R., Czyż E. A., Birkás M., Dumitru E., Enache R., Fleige H., Horn R., Rajkai K., De la Rosa D., Simota C.: SIDASS project Part 3: The optimum and the range of water content for tillage – further development. *Soil and Tillage Research*, 2005, **82**: 29-37.
70. Dexter A. R., Czyż E. A.: Application of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. *Land Degrad. Develop.*, 2007, **18**: 369-381.
71. Dexter A. R., Czyż E. A.: Soil physical quality. Abstract in Proceedings of NATO Advanced Research Workshop on Soil Quality in Relation to Sustainable Development of Agriculture and Environmental Security in Central and Eastern Europe. Puławy, Poland, 13-17 October, 1997, 39-41.
72. Dexter A. R., Czyż E. A.: Soil physical quality and the effects of management. In: M.J. Wilson and B. Maliszewska-Kordybach (Eds.) *Soil Quality, Sustainable Agriculture and Environmental Security in Central and Eastern Europe*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht /Boston/ London 2000 Published in the Netherlands cooperation with NATO Science Affairs Division. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 2000: 153-167.
73. Dexter A. R., Richard G., Arrouays D., Czyż E. A., Jolivet C., Duval O.: Complexed organic carbon controls soil physical properties. *Geoderma*, 2008, **144**: 620-627.
74. Dexter A. R., Watts C. W.: Tensile strength and friability. In: Smith K.A. and Mullins C.E. (Eds.) *Soil Analysis: Physical Methods*, 2nd Edition, Marcel Dekker Inc., New York, 2000: 405-433.
75. Dexter A. R., Zoebisch M. A.: Degradation, critical limits of soil properties and irreversible. In: Lal R. (Ed.) *Encyclopedia of Soil Science*, Marcel Dekker, New York, 2002: 272-276.
76. Domżał H.: Compaction of the soil phase and its role in the formation of water-air properties of soils. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1983, **220**: 137-150.
77. Domżał H.: Wpływ zagęszczenia gleby na zawartość wody silnie związanej oraz retencję wody użytkowej i produkcyjnej. *Rocz. Glebozn.*, 1979, **30**, **3**: 47-72.
78. Domżał H., Gliński J., Lipiec J.: Soil compaction research in Poland. *Soil and Tillage Research*, 1991, **19**, **2-3**: 99-109.

79. Domżał H., Hodara J.: Physical properties of three soils compacted by machine wheels during field operations. *Soil and Tillage Research*, 1991, **19**, 2-3: 227-235.
80. Domżał H., Prana gal J.: Wodoodporność agregatów glebowych jako wskaźnik degradacji gleb wywołanej użytkowaniem rolniczym. *Fragm. Agronom.*, 1994, **11**, 3: 22-34.
81. Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz R., Tur ski J., Hodara J.: Ugniatanie jako czynnik kształtujący fizyczne właściwości gleby. *Roczniki Nauk Rolniczych. Seria D. Monografie*, tom 198, PWN Warszawa, 1984, 1-102.
82. Dzienia S., Piskier T., Wereszczaka J.: Wpływ systemów uprawy roli na fizyczne właściwości gleby i plonowanie pszenżyta ozimego. *Mat. Międzynar. Symp. Nauk nt. „Ekologiczne aspekty mechanizacji, nawożenia, ochrony roślin i uprawy gleby”*. IBMER Warszawa, 1995, 165-169.
83. Dzienia S., Sosnowski A., Hofman-Kąkol I.: Wpływ ugniatania gleby i roślin przez ciągniki na fizyczne właściwości gleby, zachwaszczenie oraz plony jęczmienia i pszenicy. Zmian niektórych właściwości fizycznych gleby. *Rocz. Nauk Rol.*, 1990, A, **104/4**: 21-29.
84. Dzienia S., Sosnowski A.: Możliwości zastosowania siewu bezpośredniego na glebie kompleksu żyniego dobrego w warunkach klimatycznych Pomorza Zachodniego. *Rocz. Nauk Rol.*, 1991, A, **109**, 2: 157-173.
85. Etana A., Håkansson I., Zagal E., Bucas S.: Effects of tillage depth on organic carbon content and physical properties in five Swedish soils. *Soil and Tillage Research*, 1999, **52**: 129-139.
86. Ferrero A., Lipiec J., Nosalewicz A., Parana S.: Conventional tillage or permanent grass cover in hillside vineyards: effects on soil physical characteristics. *Physical Methods in Agriculture - Approach to Precision and Quality 20(PMA)01*, Czech University of Agriculture, Prague, 27-30.08.2001, 2000, 88-92.
87. Geotechdata.info, Cohesion, <http://geotechdata.info/parameter/cohesion> (as of April 29, 2011). [www.geotechdata.info/parameter/cohesion](http://www.geotechdata.info/parameter/cohesion)
88. Gliński J., Stępniewski W.: Reakcja roślin na stan aeracji gleby. *Probl. Agrofizyki*, 1985, 45.
89. Gliński J., Stępniewski W.: *Soil Aeration and Its Role for Plants*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1985.
90. Gliński J., Stępniewski W., Łabuda S.: Pobieranie tlenu i wydzielanie dwutlenku węgla w środowisku glebowym. *Problemy Agrofizyki*, 1983, **44**: 3-39.
91. Główny Urząd Statystyczny, Informacja o wstępnych wynikach Powszechnego Spisu Rolnego 2010. *Użytkowanie gruntów*. Warszawa, 2011.
92. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, 2010. [http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/PUBL\\_rl\\_psr\\_raport\\_z\\_wynikow\\_PSR\\_2010\\_260711.pdf](http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/PUBL_rl_psr_raport_z_wynikow_PSR_2010_260711.pdf), 2010.
93. Greenland D. J.: Soil management and soil degradation. *J. Soil Sci.*, 1981, **32**: 301-322.
94. Håkansson I., Lipiec J.: A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, 2000, **53**: 71-85.
95. Håkansson I.: (Ed.). Special Issue: Subsoil Compaction by High Axle Load Traffic. *Soil and Tillage Research*, 1994: 105-306.
96. Horn R., Fleige A.: A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soil. *Soil and tillage Research*, 2003, **73**: 89-99.
97. Horn R., Way T., Rostek J.: Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil and Tillage Research*, 2003, **73**: 101-106.
98. Horton R., Ankeny M. D., Allmaras R. R.: Effects of compaction on soil hydraulic properties. In: B.D. Soane and C. van Ouwerkerk (Eds.) *Soil Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering*, 1994, **11**: 141-165.
99. Jones C. A.: Effect of soil texture on critical bulk density for root growth. *Soil Sci. Soc. Am.*, 1983, J. **47**: 1208-1211.
100. Karlen D. L., Mausbach M. J., Doren J. W., Cline R. G., Harris R. F., Schuman G. E.: Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**: 4-10.

101. Kay B. D.: Soil structure and organic carbon: a review. In: R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett, and B.A. Stewart (Eds.) *Soil processes and the carbon cycle*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1998, 169-197.
102. Keller T., Arvidsson J.: Technical solution to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil and Tillage Research*, 2004, **79(2)**: 191-205.
103. Keller T., Lemandé M., Schjønnig P., Dexter A. R.: Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, 2011, **163**: 13-23.
104. Keller T., Trautner A., Arvidsson J.: Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on land and within furrows. *Soil and Tillage Research*, 2002, **68**: 39-47.
105. Koloski J. W., Schwarz S. D., Tubbs D. W.: Geotechnical properties of geologic materials. *Engineering Geology in Washington*, Washington Division of Geology and Earth Resources Bulletin, 1989, **78(1)**.
106. Kosowski J., Lipiec J., Tarkiewicz S.: The response of spring barley yield to the degree of soil compactness related to meteorological conditions. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1990, **396**: 81-87.
107. Krasowicz S., Oleszek W., Horabik J., Dębicki R., Jankowiak J., Stuczyński T., Jadczyzyn J.: Racjonalne gospodarowanie środowiskiem glebowym Polski. *Polish J. of Agron.*, 2011, **7**: 43-58.
108. Krasowicz S., Stuczyński T., Doroszewski A.: Produkcja roślinna w Polsce na tle warunków przyrodniczych i ekonomiczno-organizacyjnych. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2009, **14**: 27-54.
109. Lal R.: Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1998, **17(4)**: 319-464.
110. Lal R.: Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil and Tillage Research*, 1993, **27**: 1-8.
111. Lemandé M., Berisso F., Alakukku L., Wildenschild D., Schjønnig P.: Subsoil compaction of a clay soil persists three decades after heavy wheel traffic; NJF seminar 448: Soil compaction – effects on soil functions and strategies for prevention. Helsinki, Finland, 6–8 March 2012: NJF Report, 2012, **8**, **1**: 49-52.
112. Letey J., Stolzy L. H., Voloras N., Szuszkiewicz T. E.: Influence of soil oxygen on mineral concentration of barley. *Agron. J.*, 1962, **54**: 538-540.
113. Lipiec J.: Crop responses to soil compaction. NJF seminar 448: Soil compaction – effects on soil functions and strategies for prevention. Helsinki, Finland, 6–8 March 2012: NJF Report, 2012, Vol **8**, No **1**: 27-36.
114. Lipiec J.: Wpływ stanu zagęszczenia gleby na wzrost i funkcjonowanie roślin. *Acta Agrophysica*, 2002, **63**: 49-62.
115. Lipiec J., Arvidsson J., Murer E.: Review of modeling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. *Soil and Tillage Research*, 2003, **73**: 15-29.
116. Lipiec J., Arvidsson J., Murer E.: Modeling of crop growth, water and chemical movement in relation to topsoil and subsoil compaction: a review. In: Arvidsson J., J.J.H. Van den Akker, Horn R. (Eds.) *European Commission Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community*, 2000: 25-41.
117. Lipiec J., Dębicki R., Rejman J.: Prognozowanie natężenia erozji wodnej na obszarach użytkowanych rolniczo. *Acta Agrophysica* 1999, **20**: 49-50.
118. Lipiec J., Horn R., Pietrusiewicz J., Siczek A.: Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil and Tillage Research*, 2012, **121**: 74-81.
119. Lipiec J., Kosowski J., Tarkiewicz S.: Spring barley yield and root growth in response to the degree of compactness of soil and weather conditions. *Proceedings of Int. Conf. ISTRO Tallinn, Estonia*, 1992, 86-89.

120. Lipiec J., Medvedev V.V., Birkás M., Dumitru E., Lyndina T.E., Rousseva S., Fulajtár E.: Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International Agrophysics*, 2003, **17**: 61–69.
121. Lipiec J., Pabin J., Tarkiewicz S.: Soil Compaction in Poland: Assessment and Effects. In: J.J.H. van den Akker, J. Arvidsson, R.Horn (Eds) *Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community*. DLO-Staring Centre, Wageningen, The Netherlands, 1999: 180-195.
122. Lipiec J., Rejman J.: Gleba pod kołami. *Academia*, 2007, **3(11)**: 38-390.
123. Lipiec J., Szustak A., Bennicelli R., Kania W.: The influence of soil compaction on water use and growth of spring barley. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1991, **397**: 40-41.
124. Lipiec J., Tarkiewicz S., Kosowski J., Hakansson I.: Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. *Soil and Tillage Research*, 1991, **19(2-3)**: 307-317.
125. Marcinek J.: Parametryzacja środowiska glebowego w aspekcie gospodarki wodnej gleb. *Problemy Agrofizyki*, 1992, **67**: 20-53.
126. Mocek A., Drzymała S., Maszer P.: *Geneza, analiza i klasyfikacja gleb*. AR Poznań, 1997.
127. Niedźwiecki J., Czyż E.A., Dexter A.R.: Effect of particle size distribution, organic matter and bulk density on saturated hydraulic conductivity of arable soil. In: Dexter A.R. and Czyż E.A. (Eds.) *International Workshop PROLAND „Soil Physical Quality”*, Puławy, Poland, 2-4 October, 2003, 61-64.
128. Niedźwiecki J., Czyż E. A., Dexter A. R.: Przewodność hydrauliczna warstwy ornej w zależności od parametrów fazy stałej. *Pam. Puł.*, 2006, **142**: 297-307.
129. Niedźwiecki J., Czyż E. A., Dexter A. R., Reszkowska A.: Effect of soil organic matter content on soil physical quality and implications for environmental protection In: *Mat. Int. Conf. “Soil Protection Strategy – Needs and Approaches for Policy support” IUNG-PIB Puławy*, 2006, 106-108.
130. Nosalewicz A.: Ocena wpływu przejazdów ciężkich maszyn rolniczych na zagęszczenie gleby przy użyciu modelu SOCOMO. *Acta Agrophysica*, 2005, **6(30)**: 753-759.
131. Nosalewicz A., Lipiec J.: Wpływ miejscowego zagęszczenia i uwilgotnienia gleby na wzrost i funkcjonowanie korzeni pszenicy. Effect of localised soil compaction and wetness on early root growth and functions. *Acta Agrophysica*, 2002, **78**: 199-208.
132. Nosalewicz A., Lipiec J., Ferrero A.: Wpływ wielostopniowego zagęszczenia gleby na opór penetracji i współczynnik przewodnictwa temperaturowego gleby. *Ogólnopolska Konferencja Naukowa Polskiego Towarzystwa Agrofizycznego pt. "Fizyczna degradacja gleb: prognozowanie, metody ochrony i rekultywacji"*, Lublin, 9.09.1999r.
133. Peth S., Nellesen J., Fischer G., Horn R.: 2010. Non-invasive 3D analysis of local soil deformation under mechanical and hydraulic stresses by  $\mu$ CT and digital image correlation. *Soil and Tillage Research*, 1999, **111**: 3-18.
134. Polska Norma PN-ISO 11074-4, Jakość gleby. Terminologia. Część 4: Terminy i definicje związane z rekultywacją gleb i terenów, 2005.
135. Poniatowska J.: Gęstość objętościowa gleb mineralnych i jej znaczenie dla warunków rozwoju roślin. *Rocz. Glebozn.*, 2003, **54, 4**: 1-11.
136. Poedt M.P., Koolen A.J., Van der Linden J.P.: FEM analysis of subsoil reaction on heavy wheel loads with emphasis on soil preconsolidation stress and cohesion. *Soil and Tillage Research*, 2003, **73**: 67-76.
137. Pranał J.: Stan fizyczny wybranych gleb Lubelszczyzny. *Rozprawy Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie*. 2011, **353**: 1-129.
138. Siczek A., Lipiec J.: Soybean nodulation and nitrogen fixation in response to soil compaction and surface straw mulching. *Soil and Tillage Research.*, 2011, **114**: 50-56.

139. Simota C., Horn R., Fleige H., Dexter A.R., Czyż E.A., Diaz-Pereira E., Mayol F., Rajkai K., De la Rosa D.: SIDASS project part 1: A spatial distributed simulation model predicting the dynamics of agro-physical soil state for selection of management practices to prevent soil erosion. *Soil and Tillage Research*, 2005, **82**: 15-18.
140. Singh M. J., Kherra K. L.: Physical indicators of soil quality in relation to soil erodibility under different land use. *Arid Land Res. Manag.*, 2009, **23**: 152-167.
141. Siuta J.: Gleba – diagnozowanie stanu i zagrożenia. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa, 1995.
142. Siuta J., Kucharska A.: Wieloczynnikowa degradacja ziemi w Polsce. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa, 1997.
143. Sławiński C., Cymerman J., Witkowska-Walczak B., Lamborski K.: Impact of diverse tillage on soil moisture dynamics. *International Agrophysics*, 2012, Vol. **26**, **3**: 301-30.
144. Słowińska-Jurkiewicz A., Domżał H.: The structure of the cultivated horizon of soil compacted by the wheels of agricultural tractors. *Soil and Tillage Research.*, 1991, **19**, **2-3**: 215-226.
145. Soane B. D., van Ouwerkerk C.: (Eds) *Compaction and crop production. Developments in Agricultural Engineering Series*, 11, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands, 1994, 662.
146. Stuczyński T. i in. (red.). *Obszary o niekorzystnych warunkach gospodarowania w Polsce*. IUNG-PIB Puławy, 2006.
147. Stuczyński T., Kozyra J., Łopatka A., Siebielec G., Jadczyzyn J., Kozłowski P., Doroszewski A., Wawer R., Nowocień E.: *Przyrodnicze uwarunkowania produkcji rolniczej w Polsce. Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2007, **7**: 77-115.
148. Szczepańska E., Jaworski P., Ciesielski Z.: *Problemy ochrony i rekultywacji środowiska*. Wyd. UMK. Wrocław. 1994.
149. Ślusarczyk E., Czyż E. A., Tomaszewska J.: Wpływ przejazdu ciągników kołowych na fizyczne właściwości gleby i plonowanie jęczmienia jarego. *Wyd. IUNG Puławy*, 1992, **R (300)**: 69.
150. Tarkiewicz S., Nosalewicz A.: Wpływ zawartości próchnicy w glebach lessowych na ich podatność na zagęszczenie. *Międzynarodowa Konferencja nt: Rola gleby w funkcjonowaniu ekosystemów*” Lublin, 1999, 400.
151. Tyć E.: Wpływ przedsięwziętego spulchnienia albo ugniatania gleby ciężkiej na ważniejsze jej właściwości fizyczne i na plony roślin. *Zesz. Nauk. AR Wrocław Rol.* 1986, **44**: 163-186.
152. Van Genuchten M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, **44**: 892-898.
153. Visitiu O., Czyż E.A., Dexter A. R.: *Soil physical quality – theory and applications for arable soils*. SITECH Publications, Craiova. Romania, 2010: 1-166.
154. Voorhees W. B.: Long-term effect of subsoil compaction on yield of maize. In: Horn R., van den Akker J.J.H., and Arvidsson J. (Eds.) *Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences*. *Advances in GeoEcology* 32, Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, 2000, 331-338.
155. Walczak R.: Modelowe badania zależności retencji wodnej od parametrów fazy stałej gleby. *Problemy Agrofizyki*, 1984, **19**: 1-72.
156. Walczak R., Witkowska-Walczak B., Baranowski P.: Soil structure parameters in models of crop growth and yield prediction – physical submodels. *Int. Argrophysics*, 1997, **11**: 111-127.
157. Walczyk M.: Wybrane techniczne i technologiczne aspekty ugniatania gleb rolniczych agregatami ciągnikowymi. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie*, 1995, **202**: 108.
158. Walczyk M., Frankowicz R.: Wpływ wybranych wilgotności i obciążeń na zagęszczenie gleby piaszczystej i gliniastej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1996, **425**: 275-280.
159. Wawer R., Nowocień E.: Digital map of actual water erosion risk in Poland. A qualitative, vector based approach. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2006, **16(5)**: 763-772.
160. Wiłun Z.: *Zarys geotechniki*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, WKŁ, Warszawa, 1987, 192.
161. Wittek T.: *Gleby. Stan środowiska w Polsce*. Wyd. PIOŚ Cent. Inf. o Środowisku GRID, Bibl. Monit. Środ., 1993, 58-65.

- 
162. Witk T.: Wpływ jakości gleb na plonowanie roślin uprawnych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1979, **224**: 35-47.
  163. Woch F. i in.: Monografie i rozprawy naukowe. IUNG-PIB, Puławy, 2011, **32**: 35.
  164. Wojtasik M.: Gęstość naturalna gleb mineralnych. Wyd. Uczeln.WSP w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 1995.
  165. Wojtasik M.: Ocena gęstości gleb wytworzonych z glin zwałowych. Roczn. Glebozn., 1989, **40**: 2, 29-42.
  166. Wojtasik M.: Wpływ gęstości gleb na ich użyteczną retencję wodną. Woda – Środ. Wiejskie, 2002a, **2(5)**: 119-128.
  167. Wojtasik M.: Wpływ różnych stanów gęstości gleb na plonowanie roślin. Roczn. AR w Poznaniu, 342, Melior. Inż. Środ. 2002b, **23**: 515-521.
  168. Wolinśka A.: Aktywność dehydrogenazowa mikroorganizmów glebowych i dostępność tlenu w procesie reoksydacji wybranych mineralnych gleb Polski. Acta Agrophysica. Rozprawy i Monografie, 2010, **180**: 1-88.
  169. Wösten J. H. M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C.: Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma, 1999, **90**: 169-185.
  170. Zhung S., Grip H., Lövdahl L.: Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soil in China. Soil and Tillage Research, 2006, **90**: 117-125.
  171. Zornoza R., Mataiz-Solera J., Guerrero J., Arcenegui V., García-Orenes F., Mataix-Beneyto J., Morugán A.: Evaluation of soil quality using multiple lineal regression based on physical, chemical and biochemical properties. Sci. Total Environ., 2007, **378**: 233-237.
  172. Ziętara W.: Model polskiego rolnictwa – wobec aktualnych wyzwań. Zeszyty Naukowe SGGW w Warszawie seria Ekonomika i Organizacja Gospodarki Żywnościowej, 2009, **73**.

---

Adres do korespondencji

*prof. dr hab. Ewa A. Czyż*  
*Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów*  
*IUNG-PIB*  
*ul. Czartoryskich 8*  
*24-100 Puławy*  
*tel. 81 886 34 21 w. 324*  
*e-mail: ewac@iung.pulawy.pl*

