

STUDIA I RAPORTY IUNG - PIB

ZESZYT 8

2007

Jan Pabin

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

**UPRAWA ROLI A WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE GLEBY I PLONOWANIE
ROŚLIN***

Wstęp

Intensyfikacja mechanizacji prac związanych z produkcją roślinną i zwierzęcą prowadzi do mimowolnego ugniatania gleby kołami ciągników i maszyn poruszających się po polach. Efektem tego mogą być zmiany w zagęszczeniu, zwięzłości, uwilgotnieniu, temperaturze i natlenieniu gleby. Wymienione czynniki zmieniają się w różnych zakresach w zależności od sposobu uprawy roli, gatunku uprawianej rośliny, gatunku gleby i zawartości w niej próchnicy oraz przebiegu pogody.

Utrzymanie w trakcie wegetacji roślin właściwego zagęszczenia w warstwie ornej jest z przyczyn technicznych bardzo trudne do zrealizowania. Należy zatem poprzez stosowanie właściwej uprawy roli i odpowiedniego zmianowania roślin nadawać glebie takie właściwości, które utrzymywałyby ją w optymalnym stanie fizycznym przez cały okres wegetacji roślin.

Stan fizyczny warstwy podornej gleby jest również ważny dla wegetacji roślin. Jego znaczenie jest kształtowane wieloma uwarunkowaniami natury glebowej i przebiegiem pogody.

Istnieje zatem potrzeba wyjaśnienia różnych zagrożeń związanych z nadmiernym zagęszczeniem gleby w warstwie uprawnej i podornej oraz określenia zależności, które mogą wpływać na ostateczny efekt zabiegów ukierunkowanych na poprawienie stanu fizycznego gleby.

Przyczyny nadmiernego zagęszczenia gleb

Wzrost zagęszczenia gleby jest wynikiem jej naturalnego osiadania, które na gruntach ornych w znacznym stopniu potęgowane jest ugniatającym działaniem kół ciągników, maszyn samobieżnych i innych środków transportu poruszających się po polach. W powszechnie stosowanych technikach uprawowych w Polsce dochodzi do wielokrotnego zagęszczania gleby. Według *D o m ż a ł a i H o d a r y* (15) w okresie

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.4 w programie wieloletnim IUNG - PIB

wegetacyjnym gleba w powierzchniowej warstwie poddawana jest ugniataniu średnio 2,5 do 5 razy, a w niektórych przypadkach nawet 8 razy. Wspomniani autorzy podają, że w ciągu wegetacji niezagęszczona powierzchnia gleby może zajmować jedynie 10% całego areалу pola, co znajduje potwierdzenie również w innych badaniach (8). Koła ciągników przemieszczających się na polach wywierają nacisk w granicach 100-200 kPa, natomiast pojazdy transportowe naciskają kilkakrotnie silniej. Przy wykonywaniu orki koło ciągnika poruszające się w wyorywanej bruździe może, w zależności od szerokości roboczej pługa i szerokości koła, ugniatać około 20-30% powierzchni stropu warstwy podornej, a w niektórych przypadkach może osiągać nawet 50% całkowitej powierzchni zaorywanego pola (7).

Największą podatność na ugniatanie wykazują gleby wilgotne. Każdy gatunek gleby posiada określoną wilgotność, przy której jej podatność na zagęszczenie jest największa i w mechanice gruntów nosi ona nazwę optymalnej wilgotności zagęszczania. Wilgotności wyższe i niższe od optymalnej nie pozwalają uzyskać maksymalnego zagęszczenia. Według H a k a n s s o n a i R e e d e r a (23) przejazd po glebie wilgotnej środka transportowego o nacisku 4 Mg na oś powoduje zagęszczenie do głębokości 30 cm przy nacisku 6 Mg do 40 cm, zaś przy nacisku 10 Mg – do 50 cm i przy 15 Mg do 60 i więcej centymetrów.

Uważa się, że decydujący wpływ na zagęszczenie gleby w warstwie powierzchniowej ma wielkość nacisku jednostkowego. Zależność ta nie ma jednak większego znaczenia dla warstw głębiej zalegających. Stopień zagęszczenia tych warstw zależy głównie od całkowitego obciążenia koła (13, 26, 31). Stąd wniosek, że stosowanie coraz powszechniej cięższych i wydajniejszych ciągników oraz kombajnów zachowujących niezmienny nacisk jednostkowy (szersze opony) powoduje zagęszczenie gleby w jej głębszych warstwach. Jest ono szczególnie uciążliwe ze względu na jego długotrwałość. Z doniesień różnych autorów (6, 19, 20, 49) wynika, że zagęszczenie warstwy podornej wywołane przejazdami środków transportu o obciążeniu osi w granicach 10-20 Mg, mimo oddziaływania procesów zamarzania – odmarzania oraz nawilżania – wysychania, utrzymywało się po upływie 6-10 lat. Z syntezy wieloletnich badań przeprowadzonych w Szwecji na glebach o zróżnicowanej zawartości frakcji koloidalnych (6-85 %) wynika, że przejazdy sprzętu o obciążeniu osi 10 Mg na glebie o wilgotności zbliżonej do połowej pojemności wodnej powodowały zagęszczenie do głębokości 50-60 cm (16). Po okresie 11 lat, gdy gleba corocznie zamarzała do głębokości 50-70 cm nie stwierdzono wyraźnego zmniejszenia wspomnianego zagęszczenia na głębokości poniżej 35 cm i plony w dalszym ciągu były niższe. Świadczy to o trwałości zagęszczenia warstwy podornej, nawet w warunkach, gdzie występuje głębokie przemarzanie gleby.

Utrzymywanie się nabytego zagęszczenia w warstwie podornej zależy między innymi od stopnia uziarnienia. Gleby posiadające więcej minerałów ilastych mają większą zdolność regeneracji stanu fizycznego w wyniku procesów zamarzania i odmarzania oraz nawilżania i wysychania (cyt. za Heinonen, 30). Szczególną rolę odgrywają tu minerały z grupy montmorylonitowej. Jeśli gleba posiada 20-35% frakcji koloidalnej

i w tym co najmniej 50% montmorylonitów oraz substancji organicznej nie mniej niż 4%, to cechuje się ona dużą zdolnością powracania do naturalnego zagęszczenia, nawet po kilku cyklach nawilżania i wysychania (cyt. za Kovdą, 30).

Ocenia się, że spadek plonów wywołany nadmiernym zagęszczeniem w USA przynosi straty na ponad miliard dolarów rocznie (cyt. za Raghavanim i in., 30). Według H a k a n s s o n a (24) w Szwecji straty plonów spowodowane różnymi formami degradacji fizycznej mogą wynosić około 20%. Szacuje się, że na świecie około 83,3 mln ha, a w Europie około 36,4 mln ha gleb jest zdegradowanych pod względem właściwości fizycznych. Głównym czynnikiem wspomnianej degradacji jest w obu przypadkach nadmierna gęstość gleby (cyt. za Van Ouverkerk i Saone, 30).

Potrzeba utrzymania gleby we właściwym stanie fizycznym odnosi się przede wszystkim do warstwy powierzchniowej. Dowodem na to są, między innymi, badania amerykańskie i angielskie, z których wynika, że nawet gleba uprawiana tradycyjnie z wykorzystaniem uciągu ciągnikowego ulega silniejszemu zagęszczeniu i zmniejsza się jej wartość plonotwórcza w porównaniu z uprawianą narzędziami zawieszanymi na szerokiej ramie umożliwiającej uprawę roli bez ugniatania jej kołami ciągników (11, 12, 41, 42).

Relacje między gęstością i innymi właściwościami fizycznymi gleby a wzrostem i plonowaniem roślin

Gleba zdegradowana cechująca się nadmiernym zagęszczeniem jest zjawiskiem rozpowszechnionym, ale mało dostrzeganym w praktyce rolniczej. Wynika to z charakteru zależności między wzrostem i plonowaniem roślin a gęstością gleby. Otóż czynnik ten nie jest bezpośrednio związany z wegetacją roślin, ale oddziałuje na wszystkie właściwości fizyczne, od których zależy życie roślin w środowisku glebowym, a więc na: dostępność wody i tlenu, temperaturę gleby i jej opory mechaniczne stawiane korzeniom przy penetracji ośrodka glebowego. Należy zatem wyjaśnić związki, jakie zachodzą między czynnikami bezpośredniego oddziaływania na wegetację roślin i zmieniającą się gęstością gleby.

Gdy gleba ulega zagęszczeniu najsilniej różnicują się jej zdolności retencyjne w przedziale niskich wartości sił wiążących wodę (pF poniżej 2), zmniejszając ogólną ilość porów aeracyjnych i grubych porów kapilarnych, a także ilość wody zawartej w tych porach (3, 14, 15, 17, 42, 43). Przy wyższych siłach wiązania wody (pF 2-3), w przybliżeniu odpowiadających połowej pojemności wodnej, retencja wody jest stała, niezależnie od tego, czy gleba jest spulchniona czy też zagęszczona (2). Wyjaśnia się to przejściem, przy ugniataniu gleby, takiej samej ilości porów grubych do średnich, co średnich do drobnych. Przy wartościach sił ssących gleby powyżej pF 3 większość badaczy stwierdza, że ugniatanie gleby zwiększa jej zdolność do zatrzymywania wody, lecz tylko trudno dostępnej i niedostępnej dla roślin, a zatem zostaje ograniczona ilość wody dostępnej (2, 36).

Istotne znaczenie ma również wpływ gęstości gleby na gromadzenie wody w ujęciu dynamicznym, gdzie retencja wody jest modyfikowana procesami przesiąkania,

podsiąkania, parowania, transpiracji i intercepcji. Badania takie można traktować jako pewnego rodzaju weryfikację wszystkich ustaleń dokonanych w warunkach laboratoryjnych. Przeprowadzone w takim aspekcie obserwacje wykazały, że zawartość wody użytecznej w warstwie uprawnej gleby (0-25 cm) zależy od stanu jej zagęszczenia i od długotrwałości występowania okresów nawilżania i wysychania roli (33).

Reasumując trzeba stwierdzić, że negatywne skutki zwiększonej gęstości objawiają się jedynie w procesie wysychania gleby. Przy nawilżaniu natomiast efekt jest odwrotny – więcej wody gromadzi gleba zagęszczona (zwłaszcza jej powierzchniowa warstwa) niż spulchniona (33). Trzeba również podkreślić, że chociaż w warunkach polowych istnieje przewaga występowania okresów wysychania nad okresami nawilżania gleby, to częstotliwość i przemienność ich występowania sprawiają, że efekty ujemnego działania większego zagęszczenia gleby są krótkotrwałe i dotyczą przede wszystkim form wody łatwo dostępnej dla roślin.

Wspomniana dynamika zmian uwilgotnienia gleby sprawia, że nawet wzrost gęstości do stanu krytycznego jest krótkotrwały, ponieważ jest on ściśle związany z określoną wilgotnością (tab. 1). Z danych przedstawionych w tabeli 1 wynika, że np. gleba o zawartości 10% części spławialnych i 0,7% C_{org} mająca gęstość $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ przy wilgotności 50% PPW będzie miała poziom zagęszczenia wyższy niż określony jako krytyczny, a więc powodujący znaczący spadek plonów roślin. Natomiast stan zagęszczenia tej samej gleby przy wilgotności 90% PPW będzie daleki od poziomu krytycznego i umożliwi korzeniom swobodne przerastanie gleby. Takie uwarunkowania między gęstością a wilgotnością gleby przyczyniają się do szybkich zmian przewartościowania gęstości od stanu optymalnego do krytycznego i odwrotnie. W praktyce sprawia to trudność rozpoznania, czy obserwowane zahamowanie wzrostu lub rozwoju roślin jest spowodowane nadmiernym zagęszczeniem, czy brakiem dostatecznej ilości wody, ponieważ po wzroście wilgotności (opady) rozwój roślin jest wznowiony i w tych warunkach zagęszczenie utraciło charakter restrykcyjny.

Odrębnym zagadnieniem jest wpływ gęstości gleby na jej zwięzłość. Czynniki te nie oddziałują bezpośrednio na wegetację roślin, ale jest cechą najsilniej dodatnio skorelowaną z oporami mechanicznymi gleby. Dlatego ze względu na brak możliwości

Tabela 1

Zakresy wartości krytycznych gęstości ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) i zwięzłości (MPa) różnych gatunków gleb w warstwie ornej

Zawartość części spławialnych (%)	C_{org} (%)	Gęstość krytyczna gleby przy uwilgotnieniu		Zwięzłość krytyczna gleby przy uwilgotnieniu	
		50% PPW	90% PPW	50% PPW	90% PPW
10	0,7	1,42	1,70	0,13	2,93
20	1,0	1,44	1,72	1,08	3,88
30	1,2	1,40	1,68	1,34	4,14
40	1,5	1,42	1,70	2,29	5,09

Źródło: Pabin J. i in. (38).

pomiaru rzeczywistych oporów określa się zastępczo zwężłość gleby. Jak już wspomniano, zależność zwężłości od gęstości gleby jest dodatnia, jakkolwiek modyfikuje ją wilgotność gleby (2, 4, 9). Przy wyższym uwilgotnieniu wpływ gęstości na zwężłość gleby jest niewielki (4, 6).

Reakcja roślin na zwiększenie zwężłości gleby objawia się głównie hamowaniem wzrostu korzeni (3, 5, 21, 22, 32, 34), a to najczęściej powoduje obniżkę plonu roślin (46, 48, 50). Jednak i w tym przypadku oddziaływanie zwężłości na rośliny jest również silnie związane z wilgotnością gleby (tab. 1). Nadmierna zwężłość gleby, powodująca znaczącą obniżkę poziomu plonowania roślin ulega podobnemu przewartościowaniu, jak analizowana już gęstość. Jest jednak zasadnicza różnica wynikająca z zależności zwężłości od wilgotności gleby wyrażająca się negatywnym wpływem wilgotności na zwężłość, przy założonym stanie gęstości. Zatem jeśli gleba posiada krytyczną zwężłość w stanie mniejszego uwilgotnienia (np. 50% PPW), to na pewno nie będzie miała takiego charakteru przy wilgotności wyższej (np. 90% PPW). Natomiast w przypadku, gdy krytyczna zwężłość wystąpi przy wyższym uwilgotnieniu gleby, to tym bardziej wystąpi ona przy niższym, ponieważ zwężłość jeszcze samorzutnie wzrośnie.

Następnym parametrem modyfikowanym przez gęstość gleby jest dostępność tlenu dla korzeni roślin. Wyrażana jest za pomocą różnych wskaźników. Najwłaściwszym z nich wydaje się wydatek dyfuzji tlenu, tzw. ODR (skrót od angielskiego: oxygen diffusion rate), który określa ile tlenu w danych warunkach glebowych może drogą dyfuzji przeniknąć do korzeni roślin (44, 45, 46). Wraz ze zwiększeniem gęstości gleby ODR zmniejsza się i może powodować hamowanie wzrostu korzeni, analogicznie jak występowanie zbyt dużego oporu mechanicznego gleby. Stwierdzono jednak, że na skutek nadmiernego zagęszczenia gleby głównym czynnikiem, który może ograniczać plonowanie roślin na glebach ciężkich jest ich niedotlenienie, a na glebach średnich i lekkich – nadmierne opory mechaniczne (45).

Inną cechą fizyczną gleby, która bezpośrednio oddziałuje na vegetację roślin jest jej temperatura. Wpływ gęstości gleby na ten parametr jest stosunkowo niewielki. Z obserwacji przeprowadzonych w naszych warunkach klimatycznych wynika, że wzrost zagęszczenia gleby o $0,25 \text{ g cm}^{-3}$ w stosunku do stanu naturalnego zwiększał przewodnictwo cieplne i obniżał średnią temperaturę gleby w warstwie ornej o $1,3^{\circ}\text{C}$ (1, 29). Wydaje się zatem, że zmiany te są zbyt małe, aby mogły decydować o plonowaniu roślin.

Znaczenie stanu zagęszczenia gleby w warstwie podornej dla vegetacji i plonowania roślin

Wszystkie omówione zależności zachodzące między właściwościami fizycznymi gleby a rozwojem roślin dotyczyły przede wszystkim warstwy ornej, natomiast właściwości warstwy podornej nie były oceniane i w związku z tym cecha ta jest mniej poznana. Rozpatrywanie tych zagadnień wiąże się ściśle z rozwojem korzeni. Zależy

on od indywidualnych cech gatunkowych, a nawet odmianowych roślin oraz warunków glebowych i klimatycznych.

U większości roślin uprawnych główna masa korzeni znajduje się w warstwie ornej i ona dla roślin stanowi główny magazyn składników pokarmowych i wody, a tylko niewielka część korzeni przenika głębiej. Znaczenie tej stosunkowo małej ilości korzeni przerastających do głębszych partii profilu glebowego jest bardzo istotne, zwłaszcza w warunkach ekstremalnych, np. w okresie suszy, kiedy dostarczają one roślinie niezbędnej ilości wody, a także składników pokarmowych. Warstwa podorna powinna być zatem podatna na przerastanie korzeni, które dzięki temu mogą wykorzystywać większe ilości substancji odżywczych.

Plonotwórcze znaczenie warstwy podornej było doceniane przez praktykę rolniczą na ziemiach polskich już przed I wojną światową, a także w okresie międzywojennym, kiedy co kilka lat na glebach pszenno-buraczanych wykonywano bardzo głęboką orkę (ok. 40 cm) pługami o uciążu linowym, przy zastosowaniu lokomobil. Uzyskiwano wówczas bardzo duże plony buraków.

O istotnej roli stanu fizycznego gleby w warstwie podornej dla wzrostu i plonowania roślin mogą świadczyć także wyniki badań dotyczące tzw. orek melioracyjnych, które wykonywano dla poprawienia produktywności najsłabszych gleb piaskowych. Chociaż zabiegi te były bardzo energochłonne, to jednak w bilansie kilkuletnim przynosiły dodatni efekt finansowy i, mimo że przeprowadzone wówczas badania obecnie nie mają większego znaczenia praktycznego, mogą być cennym materiałem dowodowym świadczącym o wpływie warstwy podornej na plony roślin.

O znaczeniu warstwy podornej dla wzrostu roślin świadczą także rezultaty badań modelowych (tab. 2) wykonanych w Zakładzie Uprawy Roli IUNG w Jelczu-Laskowicach (35). Z równań przedstawionych w tabeli 2 wynika, że wzrost kukurydzy w początkowym okresie nie jest zależny od warstwy podornej. Jednak po około 7 tygodniach zwiększone zagęszczenie warstwy znajdującej się poniżej 30 cm wpłynęło istotnie negatywnie na wzrost kukurydzy. Należy zatem podkreślić, że w warunkach doświadczeń wazonowych, mimo że nie są one odzwierciedleniem warunków

Tabela 2

Równania regresji wielokrotnej opisujące zależność wysokości roślin (y) kukurydzy od gęstości gleby ($g \cdot \text{cm}^{-3}$) w warstwach zalegających poniżej: 0 cm (g_0), 10 cm (g_1), 20 cm (g_2), 30 cm (g_3)

Liczba dni po siewie	Średnia wysokość roślin (cm)	Równania znormalizowane (n = 60)	R ^{2**}	S _y *
42	119	$y = c - 0,40g_0 - 0,38g_1 - 0,35g_2$	0,89	8,2
52	150	$y = c - 0,30g_0 - 0,35g_1 - 0,34g_2 - 0,24g_3$	0,92	8,9
63	170	$y = c - 0,22g_0 - 0,31g_1 - 0,37g_2 - 0,28g_3$	0,85	12,4
73	179	$y = c - 0,19g_0 - 0,25g_1 - 0,38g_2 - 0,33g_3$	0,81	14,7

* standardowy błąd oceny

** współczynniki determinacji istotne przy $P = 0,001$

Źródło: Pabin J. i in., 1994 (35).

naturalnych, także warstwa ta nie jest dla roślin obojętna, lecz spełnia ważne funkcje mogące decydować o ich wzroście. Ze tego względu występuje potrzeba utrzymywania warstwy podornej w takim stanie fizycznym, który umożliwi korzeniom penetrację oraz wykorzystywanie składników pokarmowych i wody.

Wartości krytyczne stanu fizycznego gleby w warstwie podornej

Jednym z zasadniczych celów uprawy roli jest nadanie glebie odpowiedniego spulchnienia umożliwiającego swobodny rozwój korzeni roślin. Dotyczy to przede wszystkim warstwy powierzchniowej, natomiast głębsze warstwy najczęściej nie są spulchniane. Dlatego ulegają one kumulacyjnemu działaniu procesu osiadania i efektom tworzenia się tzw. „podeszwy płuznej” związanej z długotrwałym wykonywaniem orok na jednakową głębokość. Warstwa podorna, o czym wspomiano już wcześniej, ulega także ugniatającemu działaniu sprzętu, który porusza się po polach przy wykonywaniu różnych prac gospodarczych. W rezultacie czynniki te mogą doprowadzić do wystąpienia krytycznego zagęszczenia gleby w tej warstwie, czyli do takiego stanu, który ogranicza przerastanie korzeni do głębszych warstw. W ten sposób roślina pozbawiona zostaje pewnej objętości gleby, z której mogłaby wykorzystywać niezbędne substancje odżywcze.

Do opisu stanu fizycznego gleby w warstwie ornej najczęściej stosuje się wskaźniki gęstości i zwięzłości gleby. Istnieje potrzeba określenia dla roślin wartości tych czynników w warstwie podornej. Próbę wyznaczenia takich wartości krytycznych gęstości i zwięzłości gleby, przy których występowało całkowite zahamowanie wzrostu korzeni siewek grochu przeprowadzono w Zakładzie Technik Uprawy Roli i Nawożenia IUNG w Jelczu-Laskowicach (37). Interesujące zależności opisują równania, z których wynika, że wartość krytyczna gęstości (g) lub zwięzłości gleby (z) skorelowana jest negatywnie z ilością części spławialnych (s) w %, a dodatnio z wilgotnością gleby (w) wyrażoną w % PPW:

$$g = 1,51 - 0,01051s + 0,008394w \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3}\text{)},$$
$$z = 2,81 - 0,0597s + 0,0596w \text{ (MPa)}$$

przy s w zakresie: 10-50% i w : 30-100%.

Zatem można stwierdzić, że ustalone wartości krytyczne gęstości lub zwięzłości gleby, przy pewnym stanie jej uwilgotnienia, charakteryzujące się zatrzymywaniem wzrostu korzeni, nie będą miały takich własności, gdy wzrośnie wilgotność lub zmieni się gatunek gleby. Względnie, wartości tych parametrów gleby nie mające cech krytycznych mogą je nabyć przy obniżeniu wilgotności lub przy odniesieniu ich do innej jednostki glebowej zawierającej więcej części spławialnych. Wartości krytyczne gęstości lub zwięzłości gleb dla warstw podornych, podobnie jak omówione wcześniej dla warstwy ornej, są wielkościami zmieniającymi się w zależności od wilgotności i składu granulometrycznego gleby. Bardzo dobrze ilustrują to dane przedstawione

w tabeli 3. Posługując się przedstawionymi równaniami i znając aktualną gęstość i wilgotność oraz zawartość części spławialnych danej gleby można określić wartość krytyczną gęstości lub zwięzłości i przewidzieć w jakim zakresie wilgotności stan fizyczny tej gleby będzie przybierał wartości krytyczne, co pozwoli określić możliwości obniżenia plonów roślin.

Tabela 3

Wartości krytyczne gęstości ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) i zwięzłości (MPa) różnych gatunków gleby w warstwie podornej

Zawartość części spławialnych (%)	Gęstość krytyczna przy uwilgotnieniu		Zwięzłość krytyczna przy uwilgotnieniu	
	50% PPW	80% PPW	50% PPW	80% PPW
10	1,82	-	5,19	6,98
20	1,72	1,97	4,60	6,38
30	1,61	1,87	4,00	5,79
40	1,51	1,76	3,40	5,19

Źródło: Pabin J. i in., 1994 (35).

Znaczenie zabiegów agrotechnicznych dla ograniczania negatywnego wpływu zagęszczenia gleb

Jednym z podstawowych sposobów ograniczających negatywne skutki nadmiernego zagęszczenia gleby jest zwiększenie zawartości w niej substancji organicznej. Potrzeba taka udowodniona została eksperymentalnie w badaniach modelowych prowadzonych przez Zakład Technik Uprawy Roli i Nawożenia IUNG w Jelczu-Laskowicach (37). Efektem przeprowadzonych badań było określenie zależności wzrostu korzeni siewek grochu od wybranych cech fizycznych gleby, co opisuje następujące równanie:

$$y = 130,65 + 56,80c - 1,40s - 83,24g - 1,77z + 0,620w, R^2 = 0,775$$

gdzie:

y – względna długość korzeni w %

c – zawartość węgla organicznego gleby w %, w zakresie: 0,72-1,57

s – zawartość części spławialnych gleby w %, w zakresie: 10-50

g – gęstość gleby w g cm^{-3} , w zakresie: 1,3-1,7

z – zwięzłość gleby w MPa, w zakresie: 0,24-6,66

w – zawartość wody glebowej w % PPW, w zakresie: 30-100%

Z przedstawionego równania wynika, że zawartość C_{org} podobnie jak i wody, w glebie wpływa dodatnio na wzrost korzeni. Jeśli zatem wzrośnie zawartość węgla organicznego w glebie, to dzięki temu stanie się ona bardziej odporna na destrukcyjne działanie niektórych czynników środowiskowych i antropogenicznych. Innymi słowy,

gęstość lub zwięzłość krytyczna dla gleby o niskiej zawartości próchnicy ma niższą wartość niż takiej samej (gatunkowo) gleby, lecz zawierającej więcej próchnicy. Czyli, gdy rośliny na glebie słabo próchnicznej, ze względu na krytyczną wartość zagęszczenia, mają zahamowany wzrost korzeni, to przy tym samym zagęszczeniu na glebie zasobnej w próchnicę nie ma ono jeszcze znaczenia krytycznego i korzenie mogą swobodnie rosnać. Szczegółowo przedstawiają to wartości zawarte w tabeli 4, które odnoszą się do uwilgotnienia odpowiadającego 70% PPW; przy wyższej wilgotności poziom krytycznego zagęszczenia również będzie podniesiony. Z tych danych bardzo wyraźnie wynika znaczenie zawartości próchnicy (C_{org}) w przeciwdziałaniu czynnikiem negatywnie wpływającym na stan fizyczny gleby. W praktyce rolniczej pierwszorzędnym zadaniem jest stosowanie takiej agrotechniki, która prowadziłaby do podwyższenia zawartości C_{org} w glebie. Do takich działań należy zaliczyć stosowanie właściwego zmianowania, uwzględniającego rośliny motylkowate i trawiaste, a także nawożenie gleb obornikiem i kompostem. Pomocą w konstruowaniu właściwego zmianowania mogą służyć współczynniki reprodukcji i degradacji glebowej substancji organicznej opracowane przez E i c h a i K u n d l e r a (tab. 5). Wyszczególnione przez autorów rośliny i grupy roślin wpływają na obniżenie lub wzrost zawartości substancji organicznej w glebie. Wartości współczynników określają stopień wzbogacenia (+) lub

Tabela 4

Porównanie krytycznych wartości gęstości ($g \cdot cm^{-3}$) utworów glebowych uwilgotnionych do 70% PPW, zawierających różne ilości C_{org} .

Zawartość części spławialnych w glebie (%)	Gęstość krytyczna gleby przy zawartości C_{org}		
	0,7%	1,0%	1,2%
15	1,47	1,67	-
20	-	1,58	1,71
25	-	1,50	1,62

Źródło: Pabin i in., 1994 (35).

Tabela 5

Współczynniki reprodukcji i degradacji materii organicznej w glebie według Eicha i Kundlera

Roślina lub nawóz organiczny	Współczynniki reprodukcji (+) lub degradacji (-) dla gleb ($t \cdot ha^{-1}$)			
Okopowe	-1,26	-1,40	-1,54	-1,02
Kukurydza	-1,12	-1,15	-1,22	-0,91
Zboża i oleiste	-0,49	-0,53	-0,56	-0,38
Owies na ziel. m. i poplony ozime	-0,32	-0,35	-0,38	-0,25
Strączkowe	+0,32	+0,35	+0,38	+0,38
Wsiewki	+0,63	+0,70	+0,77	+0,77
Trawy	+0,95	+1,05	+1,16	+1,16
Motylkowate i mieszanki	+0,89	+1,96	+2,10	
Obornik		+0,35		
Gnojowica		+0,28		
Słoma		+0,21		

Źródło: Mercik S. i Fotyma M., 1992 (18).

zubożenia (-) gleby w tę substancję (w t · ha⁻¹) w wyniku jednorocznej uprawy danego gatunku rośliny lub po zastosowaniu odpowiedniej dawki nawozu naturalnego i organicznego. Właściwy dobór roślin w zmianowaniu powinien być taki, aby po zakończeniu rotacji na danym polu efekt oddziaływania roślin na zawartość substancji organicznej w glebie był dodatni.

O znaczeniu właściwego doboru roślin w zmianowaniu dla gospodarki próchnicznej mogą świadczyć również wyniki doświadczeń polowych przeprowadzonych w ZD IUNG Grabów na glebie żytnej bardzo dobrej (tab. 6). W zmianowaniu z 50% udziałem roślin okopowych po trzech rotacjach zawartość substancji organicznej w warstwie ornej gleby była o 0,26% mniejsza niż w zmianowaniu, które zawierało mieszankę koniczyny (50%) z trawami.

Doskonałym przykładem poprawy właściwości gleby na skutek wprowadzenia międzyplonów ścierniskowych do uprawy monokulturowej pszenżyta ozimego dostarczają badania P a r y l a k (38); (tab. 7). W tym przypadku zastosowane międzyplony ścierniskowe wzbogaciły glebę w substancję organiczną, co najprawdopodobniej wpłynęło na poprawę nie tylko właściwości chemicznych, ale również fizycznych gleby i w istotny sposób podniosło poziom plonowania pszenżyta ozimego.

Zwiększenie zawartości substancji organicznej w glebie można także uzyskać, wprowadzając system uprawy bezorkowej, zwanej konserwującym. W systemie tym resztki poźniwne, a niekiedy także słoma, w postaci siewki mieszane są z powierzchnią 10-15 cm warstwą gleby. Część (około 30%) słomy i resztek poźniwnych pozostaje na powierzchni roli w formie mulczu, który chroni glebę w pewnym stopniu przed erozją, zwiększa wsiąkanie wody w warstwę z wymieszaną substancją organiczną i przyspiesza jej rozkład. W takim systemie uprawy roli zamiast pługa podorywkowego stosuje się zestaw uprawowy, składający się z kultywatora o sztywnych łapach (lub brony rotacyjnej) i wału strunowego oraz sekcji brony talerzowej. Uprawa wykonana agregatem sprzyja nagromadzeniu się zwiększonej ilości próchnicy, która odgrywa rolę bufora przeciwdziałającego nadmiernemu zagęszczeniu gleby. Ponadto zaniechanie wykonywania orki podstawowej zmniejsza obciążenie gleby ugniatającymi przejazdami kół ciągnika, co pomaga w odzyskiwaniu przez glebę właściwej gęstości. Efektem bezpłużnej uprawy roli jest również poprawienie stabilności struktury gruzelkowej gleby; uprawa bezorkowa pozbawiona jest mankamentów uprawy płuż-

Tabela 6

Wpływ zmianowania na zawartość próchnicy w warstwie ornej gleby
(Grabów – 1986 r., po 12 latach trwania doświadczenia)

Zmianowanie	Zawartość próchnicy (%)
Ziemniak ¹⁾ – burak cukrowy – kukurydza – jęczmień jary	1,25
Burak cukrowy ¹⁾ – jęczmień jary + poplon ²⁾ – ziemniak – jęczmień jary	1,39
Owies + wsiewka ¹⁾ – koniczyna z trawami – kukurydza – jęczmień jary	1,51

¹⁾ obornik 30 t · ha⁻¹

²⁾ poplon z gorzycy białej

Źródło: Kuś J., 1995 (28).

Tabela 7

Wpływ stosowania międzyplonów ścierniskowych w monokulturze pszenżyta ozimego na zawartość C_{org} w glebie i plony roślin

Obiekt	C_{org} (%)	Plon ziarna (średnio 1992–1997) (t · ha ⁻¹)
Monokultura bez międzyplonu	0,78	3,77
Monokultura z międzyplonem (mieszanka motylkowatych)	0,84	4,38
Monokultura z międzyplonem (rzepak ozimy)	0,84	4,55

Źródło: Parylak D., 1998 (39).

nej, tj. tworzenia się podeszwy płuznej. Zjawisko to przy wykonywaniu orki z zastosowaniem uciągu ciągnikowego potęgowane jest ugniataniem kół ciągnika przetaczających się po dnie wyorywanej bruzdy. Odejście od uprawy płuznej będzie ograniczać występowanie warunków sprzyjających powstawaniu nadmiernego zagęszczenia warstwy podornej.

W uprawie konserwującej należy także stosować mulczowanie z roślin międzyplonowych i resztek poźniwnych, co wzbogaca glebę w próchnicę i podnosi jej aktywność biologiczną oraz poprawia liczebność pożytecznych mikro- i makroorganizmów glebowych. Stosowanie uprawy konserwującej chroni glebę przed erozją i zaskorupianiem się, a także przeciwdziała niszczeniu struktury gruzełkowej, która sprzyja tworzeniu się optymalnego stanu fizycznego gleby.

Należy także podkreślić istotną rolę uprawy w oddziaływaniu na gospodarkę wodną w układzie gleba – roślina. W praktyce szczególne znaczenie przypisuje się wykonywaniu uprawy poźniwnej, która chroni pozostające w glebie resztki wody i umożliwia wykonywanie uprawy podstawowej pod oziminy, a następnie zapewnia im właściwe warunki rozwoju. Wytworzona w trakcie poźniwnej uprawy roli spulchniona warstwa stanowi okrywą izolacyjną chroniącą warstwy głębsze przed utratą wody. Jak duże ilości wody można ochronić przed bezproduktywnym wyparowaniem przez wytworzenie na powierzchni spulchnionej warstwy, świadczą badania J a b ł o ņ s k i e g o (40). Ilość wody zaoszczędzonej w okresie miesiąca równała się opadowi wielkości 20 mm.

Spulchnienie warstwy uprawnej przyspiesza wsiąkanie wody opadowej do głębszych poziomów strefy korzeniowej i dzięki temu nie wyparowuje ona tak łatwo, jak w warunkach gleby zagęszczonej, która w trakcie opadów gromadzi wodę w warstwie powierzchniowej; w okresie bezopadowym znaczna część tej wody intensywnie paruje (33).

Usprawnienia gleby charakteryzującej się nadmierną gęstością w warstwie podornej można dokonać poprzez mechaniczne spulchnienie warstwy zagęszczonej, co najczęściej wykonuje się przy użyciu głębosza. Najogólniej rzecz biorąc plonotwórczy efekt głęboszowania jest uwarunkowany relacjami między poziomem żyzności gleby w warstwie ornej i podornej.

Szerokie badania nad skutkami spulchnienia podglebia, które przeprowadzono w Polsce w okresie powojennym (1948–1966) wykazały, że zabieg taki zwiększał plony roślin tylko w 25% przypadków, w 25% je obniżał, zaś w 50% nie powodował żadnej zmiany (47). Podobną reakcję roślin obserwowano również we wcześniejszych (1945–1953) i późniejszych (1965–1985) badaniach angielskich (10). Współczesne badania krajowe i zagraniczne dotyczące reakcji roślin uprawnych na spulchnienie podglebia charakteryzują się także dużą różnorodnością uzyskiwanych wyników. Większość badań z tego zakresu ograniczała się do określenia wpływu spulchniania na właściwości fizyczne gleby i plony roślin. Z przytoczonych badań nie można jednak wywnioskować, w jakich okolicznościach głęboka uprawa (zmniejszenie gęstości gleby w warstwie podornej) przynosi rezultaty pozytywne, a w jakich negatywne, względnie kiedy działanie jej jest obojętne.

Bardzo pouczające w tym zakresie są wyniki badań uzyskane przez K u s i a i in. (27) oraz I b r a h i m a i M i l l e r a (25), z których wynika, że samo spulchnienie warstwy podornej jest tylko zabiegiem pomocniczym, zwiększającym przestrzeń penetracji korzeni roślin w profilu glebowym. Reakcja roślin na spulchnienie nadmierne zagęszczonej warstwy podornej może być zatem trojakiemu rodzaju: pozytywna, obojętna i negatywna. Każdy z uzyskanych efektów jest uwarunkowany relacjami zachodzącymi między warstwą orną i podorną, a także przebiegiem pogody. Pozytywna reakcja wystąpi wtedy, gdy spulchniona warstwa podorna udostępni roślinie brakujące w warstwie ornej składniki pokarmowe lub wodę. Obojętna, gdy roślina nie odniesie takich korzyści, czyli wtedy, gdy podglebie jest mało zasobne w przyswajalne składniki pokarmowe i wodę, a także wówczas, gdy sama warstwa orna zapewnia roślinie dostateczną ilość niezbędnych jej do życia substancji.

Przykładem występowania niekorzystnego wpływu spulchniania warstwy podornej na plonowanie roślin mogą być wyniki badań uzyskane w Zakładzie Uprawy Roli IUNG w Jelczu-Laskowicach (36). Stwierdzono, że między wielkością plonu (y) korzeni buraka cukrowego a gęstością (g_3) i wilgotnością (w_3) gleby w warstwie 0-30 cm zachodzi następująca zależność:

$$y = 386,3 - 199,6g_3 + 1,48w_3$$

przy: $R^2 = 0,488$; $P_m = 0,0009$; $P_{w_3} = 0,23$; $P_{g_3} = 0,0003$

a także między wilgotnością gleby w warstwie 0-30 cm (w_3) oraz gęstością (g_6) i wilgotnością (w_6) gleby w warstwie 30-60 cm:

$$w_3 = -10,62 + 3,86g_6^2 + 1,03w_6$$

przy: $R^2 = 0,833$; $P_m = 0,0000$; $P_{g_6^2} = 0,09$; $P_{w_6} = 0,0000$

gdzie:

P_m – poziom istotności modelu równania,

P_{w_3} – poziom istotności dla regresji cząstkowej według zaznaczonego symbolu.

Z przedstawionych relacji wynika, że plon korzeni buraka cukrowego był dodatnio związany z wilgotnością gleby w warstwie ornej (0-30 cm), a ta jest dodatnio skorelowana z gęstością gleby w warstwie podornej (30-60 cm). Zatem spulchnienie warstwy podornej wpływało negatywnie na wilgotność gleby w warstwie ornej, co w konsekwencji odbijało się niekorzystnie na plonach. Ogólnie rzecz biorąc, reakcja negatywna wystąpi wówczas, gdy warstwa orna ma małą pojemność wodną. W takim przypadku zagęszczona warstwa podorna zatrzymuje wodę przesiąkającą i uzupełnia potrzeby wodne roślin. Spulchnienie jej w takim układzie, w latach cechujących się pewnym niedostatkiem opadów, będzie powodowało obniżki plonów roślin uprawnych. Ten ostatni przypadek może zachodzić tylko przy stosunkowo umiarkowanym niedoborze opadów, bowiem przy głębokiej suszy negatywna reakcja roślin będzie bardziej drastyczna na polu z nadmiernie zagęszczonym podglebiem niż z podglebiem spulchnionym.

Podsumowanie

Ubocznym, a zarazem niekorzystnym efektem mechanizacji prac polowych i stosowania do tych celów coraz cięższego sprzętu jest ugniatanie gleby w warstwie ornej i podornej. Konsekwencją tego jest ograniczenie zdolności penetracyjnych korzeni, zmniejszenie pobierania składników pokarmowych przez rośliny i obniżenie plonowania. Wartość gęstości gleby, która wpływa negatywnie na wzrost i plonowanie roślin nie jest wielkością stałą, zależy bowiem, między innymi, od wilgotności i zawartości węgla organicznego w glebie. Przy utracie wilgoci gleba o gęstości optymalnej może wejść w krytyczną i przy wzroście wilgotności ponownie odzyskać wartość optymalną. Podobne oddziaływanie ma zawartość C_{org} w glebie, jednak konsekwencje są groźniejsze, ponieważ zmiany tego czynnika w glebie są długotrwałe. Stąd podatność gleby na zagęszczenie narasta wraz ze stosowaniem zmianowań składających się z roślin zbożowych, pastewnych, okopowych i kukurydzy, a więc takich, których uprawa obniża zawartość próchnicy w glebie. Istnieje zatem konieczność wprowadzania do zmianowań roślin motylkowatych i trawiastych oraz stosowania nawozów naturalnych i organicznych, co sprzyja osiągnięciu dodatniego bilansu substancji organicznej w glebie. Do przeciwdziałania skutkom nadmiernego zagęszczenia gleby należy także wykorzystywać możliwości, które daje konserwujący system uprawy roli. Nadrzędnym celem wszystkich poczynań zmierzających do ograniczenia negatywnych skutków degradacji fizycznej gleby w warstwie ornej jest podniesienie w niej zawartości substancji organicznej oraz ograniczenie ilości przejazdów ciągników i innego sprzętu wykorzystywanego do prac polowych, co uzyskuje się przez agregatowanie narzędzi i stosowanie bezpługowego systemu uprawy roli.

Warstwa podorna gleby spełnia także istotną rolę w zaspokajaniu potrzeb życiowych roślin. Znaczenie jej stanu fizycznego i chemicznego w oddziaływaniu na plonowanie roślin zależy od żyzności warstwy ornej. Dobra zasobność tej warstwy we wszystkie składniki pokarmowe i wodę przez cały okres wegetacji pozwala uzyskać

wać wysokie plony roślin niezależnie od stanu fizykochemicznego gleby w warstwie podornej. Jeśli warunek ten nie jest spełniony, choćby tylko dla części okresu wegetacyjnego cechującego się wzmożonym zapotrzebowaniem rośliny na wodę i składniki pokarmowe, wówczas możliwość zaspokojenia tych potrzeb przez warstwę podorną podnosi jej potencjalną wartość plonotwórczą. Możliwość taka zachodzi tylko wówczas, jeśli warstwa podorna jest zasobna w przyswajalne dla roślin składniki pokarmowe, a jej stan fizyczny pozwala korzeniom na swobodną penetrację i pobieranie składników pokarmowych i wody

Szczególnym przypadkiem relacji między omawianymi warstwami gleby są mała pojemność i duża przepuszczalność wodna warstwy ornej, które sprawiają, że część wody opadowej przemieszcza się poza zasięg systemu korzeniowego. W takich warunkach, przy umiarkowanym niedoborze opadów, duże zagęszczenie gleby w warstwie podornej (tzw. „podeszwa płuzna”) wpływa korzystnie na plonowanie roślin wskutek ograniczenia przesiąkania wody opadowej. Jednak w przypadku występowania głębokiej suszy wpływ nadmiernie zagęszczonej warstwy podornej na plonowanie roślin jest zdecydowanie negatywny. Zniszczenie „podeszwy płuznej” poprzez głęboszowanie jest zabiegiem zawsze pożądanym i opłacalnym, jeśli szkodliwość jej występowania zostanie rzeczywiście stwierdzona.

Literatura

1. Baranowski R., Bakowski B.: Wpływ zróżnicowanego składu fazowego gleby na dynamikę jej temperatury. *Rocz. Glebozn.*, 1977, **28(1)**: 37-44.
2. Baranowski R.: Wpływ gęstości gleby na jej agrofizyczne właściwości. *Rocz. Glebozn.*, 1980, **31(2)**: 15-31.
3. Baranowski R., Pabin J.: Wpływ zagęszczenia gleby lekkiej na plonowanie buraków cukrowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1980, **227**: 61-67.
4. Baranowski R.: Bulk density and moisture as factors influencing the strength of a calcareous soil. *Sbornik Mechanizacni Fakulty Vysoke Skoly Zemedelske v Praze, 3rd Intern. Conf. "Physical properties of agricultural materials"*, 1985, 33-36.
5. Barley K. P.: Influence of soil strength on growth of roots. *Soil Sci.*, 1963, **96**: 175-180.
6. Blake G. R., Nelson W. W., Allmaras R. R.: Persistence of subsoil compaction in a Mollisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1976, **40(6)**: 943-948.
7. Buliński J.: Zagęszczenie gleby w różnych technologiach uprawy roślin i związane z tym opory orki. *SGGW Warszawa*, 1998, ss. 140.
8. Buliński J.: Wpływ czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych agregatu ciągnikowego na ugniatanie gleby. *Masz. Ciąg. Rol. Leś.*, 1991, **7**: 15-17.
9. Canarache A.: Factors and indices regarding excessive compactness of agricultural soil. *Soil Till. Res.*, 1991, **19**: 145-164.
10. Cannel R. Q.: Reduced tillage in north-west Europe – a review. *Soil Till. Res.*, 1985, **5**: 129-177.
11. Chamen W. C. T., Watts C. W., Leede P. R., Longstaff D. J.: Assessment of a wide span vehicle (gantry), and soil and cereal crop responses to its use a zero traffic regime. *Soil Till. Res.*, 1992, **24(4)**: 359-380.
12. Chamen W. C. T., Vermeulen G. D., Campbell D. J., Sommer C.: Reduction of traffic-induced soil compaction. *Soil Till. Res.*, 1992, **24(2)**: 303-318.
13. Danfors B.: Changes in sub soil porosity caused by heavy vehicles. *Soil Till. Res.*, 1994, **29**: 135-144.

14. Domżał H.: Wpływ zagęszczenia gleby na zawartość wody silnie związanej oraz retencję wody produkcyjnej i użytecznej. *Rocz. Glebozn.*, 1979, **30(3)**: 45-72.
15. Domżał H., Hodara J.: Physical properties of three soil compacted by machine wheels during field operations. *Soil Till. Res.*, 1991, **19**: 227-236.
16. Etana A., Hakansson I.: Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load. *Soil Till. Res.*, 1994, **29**: 167-172.
17. Ferrero A. F.: Effect of compaction simulating cattle trampling on soil physical characteristics in woodland. *Soil Till. Res.*, 1991, **19**: 319-329.
18. Fotyma M., Mercik S.: *Chemia rolna*. PWN Warszawa, 1992, ss. 323.
19. Gameda S., Raghavan G. S. V., Mckyes E., Theriault R.: Subsoil compaction in a clay soil. Vol. 2. Natural alleviation. *Soil Till. Res.*, 1987, **10**: 123-130.
20. Gameda S., Raghavan G. S. V., Mckyes E., Watson A. K., Mehuis G.: Long-term effects of a single incidence of high axle load compaction on a clay soil in Quebec. *Soil Till. Res.*, 1994, **29**: 173-177.
21. Gerard C. J., Mehta H. C., Hinojosa E.: Root growth in a clay soil. *Soil Sci.*, 1972, **144**: 37-50.
22. Grzebiś W.: Wzrost korzeni roślin uprawnych w glebie zagęszczonej. *Fragm. Agron.*, 1989, **3(23)**: 19-31.
23. Hakansson I., Reeder R. C.: Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extend, persistence and crop response. *Soil Till. Res.*, 1994, **29**: 277-304.
24. Hakansson I.: A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Till. Res.*, 1990, **16**: 105-120.
25. Ibrahim B. A., Miller D. F.: Effect of subsoiling on yield and quality of corn and potato at two irrigation frequencies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, **53**: 247-251.
26. Koopstra M. J., Boersma O. H.: Subsoil compaction in Dutch marine sandy loams: loosening practices and effects. *Soil Till. Res.*, 1994, **29**: 237-247.
27. Kuś J., Nawrocki S., Skrzypek Z.: Wpływ spulchniania i nawożenia podglebia na plonowanie roślin. *Pam. Puł.*, 1986, **87**: 7-18.
28. Kuś J.: Systemy gospodarowania w rolnictwie. *Mat. szkol.*, IUNG Puławy, 1995, **42/95**.
29. Lipiec J., Kossowski J., Tarkiewicz S.: The effect of soil compaction on its thermal relations in a model experiment. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1987, **346**: 71-76.
30. Miatkowski Z.: Wpływ zabiegów agromelioracyjnych na właściwości fizyczno-wodne gleb zwięzłych oraz ukorzenie i plony roślin. *IMUZ Bydgoszcz*, 2001, **99**: ss. 103.
31. Olsen H. J.: Calculation of subsoil stresses. *Soil Till. Res.*, 1994, **29**: 111-123.
32. Pabin J., Sienkiewicz J.: Wpływ zagęszczenia gleby i głębokości siewu nasion na wschody i plonowanie buraków cukrowych. *Rocz. Glebozn.*, 1984, **35(3-4)**: 75-86.
33. Pabin J., Włodek S.: Wpływ zagęszczenia gleby lekkiej na niektóre jej właściwości fizyczne oraz na plonowanie peluszek i jęczmienia jarego. I. Dynamika wody użytecznej w glebie a plony roślin. *Pam. Puł.*, 1986, **88**: 71-85.
34. Pabin J., Sienkiewicz J., Włodek S.: Effect of loosening and compacting on soil physical properties and sugar beet yield. *Soil Till. Res.*, 1991, **19**: 345-350.
35. Pabin J., Włodek S., Biskupski A., Kaus A.: Zależność wzrostu i plonowania kukurydzy od gęstości gleby w warstwie zalegającej na różnych głębokościach poziomu próchnicznego. *Pam. Puł.*, 1994, **105**: 27-39.
36. Pabin J.: Zależność plonowania roślin od właściwości fizycznych gleby lekkiej różnicowanych głębokościowo i ugniataniem. *IUNG Puławy*, 1995, **H(7)**: ss. 85.
37. Pabin J., Lipiec J., Włodek S., Biskupski A., Kaus A.: Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil Till. Res.*, 1998, **46**: 203-208.
38. Pabin J., Włodek S., Biskupski A.: Wartości krytyczne gęstości różnych gatunków gleb mineralnych. *Fol. Univ. Agric. Stein.* 195, 1999, *Agricultura*, **74**: 81-86.

39. P a r y l a k D.: Międzyplony ścierniskowe jako czynnik regeneracyjny w monokulturze pszenżyta ozimego uprawianego na glebie lekkiej. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1998, **460**: 709-718.
40. Podstawy agrotechniki. Praca zbiorowa pod red. W. Niewiadomskiego. PWRiL Warszawa, 1983, ss. 763.
41. R e e v e s D. W., R o g e r s H. H., D r o p p e r s J. A., P o w e l l J. B.: Wheel-traffic effects on corn as influenced by tillage system. Soil Till. Res., 1992, **23**: 177-192.
42. R o n a i M. D.: Influence of tire inflation pressure on soil bulk density. 3rd Intern. conf. on physical properties of agricultural materials and products, Prague, 1988, 867-872.
43. S o w i ń s k a - J u r k i e w i c z A., D o m z a ł H.: The structure of the cultivated horizon of a Stagnogleyic Luvisol developed from loam within the zone affected by tractor wheel traffic. Soil Till. Res., 1991, **19**: 245-253.
44. S t ę p n i e w s k i W., G l i ń s k i J.: Reakcja roślin na stan aeracji gleby. Probl. Agrofiz., 1985, **45**: 1-76.
45. S t ę p n i e w s k i W.: Zależność dyfuzji tlenu i zwięzłości od zagęszczenia gleby. Rozpr. hab., maszynopis. Zakład Agrofizyki PAN, Lublin, 1980, ss. 90.
46. S t o l z y L. H., L e t e y J., S z u s z k i e w i c z T. E., L u n t O. R.: Root growth and diffusion rates as function of oxygen concentration. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1961, **25**: 463-467.
47. Ś w i ę t o c h o w s k i B., S i e n k i e w i c z J., Ś m i e r z c h a l s k i L.: Wpływ pogłębienia warstwy ornej na plony i niektóre właściwości gleby w świetle doświadczeń ścisłych i produkcyjnych wykonanych w Polsce w latach 1948-1966. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1970, **100**: 193-204.
48. T a y l o r H. M., B r a r G. S.: Effect of soil compaction on root development. Soil Till. Res., 1991, **19**: 111-119.
49. V o o r h e e s W. B., N e l s o n W. W., R a n d a l l G. W.: Extend and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, **50**: 428-433.
50. W a d i n g t o n D. U., B a k e r J. M.: Influence of soil aeration on the growth and chemical composition of three grass species. Agron. J., 1965, **57**: 253-258.

Adres do korespondencji:

doc. dr hab. Jan Pabin
Zakład Herbologii i Techniki Uprawy Roli
IUNG - PIB
ul. Orzechowa 61
50-540 Wrocław
tel. (071) 363 87 07
e-mail: j.pabin@iung.wroclaw.pl