Acta Agrophysica, 2002,63, 49-62

WPŁYW STANU ZAGĘSZCZENIA GLEBY NA WZROST I FUNKCJONOWANIE ROŚLIN

J. Lipiec

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

S t r e s z c z e n i e. Wzrost roślin jest w dużym stopniu modyfikowany przez stan zagęszczenia gleby. W niniejszej pracy przeglądowej omówiono oddziaływanie stanu zagęszczenia na wybrane właściwości fizyczne gleby oraz na wzrost i funkcjonowanie korzeni i części nadziemnych roślin. Przedstawiono wpływ stanu zagęszczenia na opór mechaniczny i natlenienie w zależności od uwilgotnienia gleby. Zwrócono uwagę na zależności pomiędzy rozmieszczeniem przestrzennym makroporów glebowych i korzeni roślin. Podano przykłady zastosowania technik tomografii komputerowej i jądrowego rezonansu magnetycznego do badań rozmieszczenia przestrzennego korzeni i makroporów oraz wilgotności i gęstości gleby wokół korzeni roślin. Omówiono mechanizmy reakcji części nadziemnych roślin na niekorzystne warunki fizyczne gleby w strefie korzeniowej.

S ł o w a k l u c z o w e: zagęszczenie gleby, właściwości fizyczne gleby, wzrost roślin, metody badań

WSTĘP

Wzrost i funkcjonowanie korzeni oraz części nadziemnych roślin są w znacznym stopniu modyfikowane przez stan zagęszczenia gleby. Nadmierny stan zagęszczenia w obrębie strefy korzeniowej roślin powstaje pod wpływem przejazdów ciężkich maszyn i narzędzi rolniczych, zwłaszcza podczas jesiennego zbioru okopowych, kiedy gleba jest wilgotna i tym samym podatna na zagęszczenie. W tych warunkach zagęszczenie gleby sięga często do warstwy podornej, gdzie jest ono długotrwałe lub nieodwracalne. Czynnikami prowadzącymi do powstawania nadmiernego zagęszczenia gleby jest także stosowanie uproszczonego zmianowania roślin, z pominięciem roślin regenerujących strukturę gleby oraz mechaniczne oddziaływanie kropli deszczu [15,19,26,32].

Konsekwencją nadmiernego zagęszczenia gleby są zmiany struktury i zdeterminowane przez nią właściwości fizyczne warunkujące wzrost i funkcjonowanie

systemu korzeniowego roślin [10,13,17,32,55]. Wśród nich szczególne znaczenie mają nadmierny opór mechaniczny, niewystarczające natlenienie, struktura agregatowa i porowatość gleby oraz zmiana zdolności retencyjnych i przewodzących gleby. Wykazano, że zmniejszenie porowatości ogólnej wraz ze wzrostem gęstości gleby jest spowodowane zmniejszeniem udziału porów dużych o średnicy powyżej 100 μm [17,22,44]. Pory te zasiedlane są przez korzenie większości korzeni roślin uprawnych, które nie są w stanie wnikać do porów mniejszych od ich nominalnej średnicy [17].

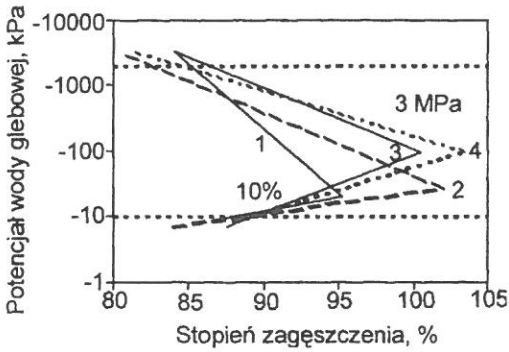
W niniejszej pracy omówiono oddziaływanie stanu zagęszczenia gleby na wybrane właściwości fizyczne gleby oraz na wzrost, przestrzenne rozmieszczenie i funkcjonowanie korzeni i części nadziemnych roślin.

WSKAŹNIKI STANU ZAGĘSZCZENIA

Najczęściej stosowanym parametrem do oceny stanu zagęszczenia gleby jest jej gęstość. Parametr ten dobrze charakteryzuje stan zagęszczenia danej gleby, ale w przypadku porównywania różnych gatunków gleb jego przydatność jest ograniczona, ponieważ zależy w dużym stopniu od uziarnienia gleby. Stąd taka sama wartość gęstości może wskazywać różne stany zagęszczenia. Na przykład gęstość 1,50 Mg m^{-3} wskazuje na stan luźny w glebie gruboziarnistej i na stan mocno zagęszczony w glebie drobnoziarnistej o większej zawartości próchnicy. Do porównania stanu zagęszczenia różnych gleb przydatne są zagęszczenia relatywne, w których gęstość wyraża się w procentach gęstości standardowej (w przybliżeniu maksymalnej) danej gleby [11,14,19]. Gęstość standardowa może być wyznaczana edometrycznie stosując ciśnienie 200 kPa na glebę mokrą lub testem Proctora [11,19].

WPŁYW STANU ZAGĘSZCZENIA NA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE GLEBY WARUNKUJĄCE WZROST ROŚLIN

Głównymi czynnikami warunkującymi wzrost korzeni w glebie zagęszczonej są opór mechaniczny, natlenienie i wilgotność. Wartości oporu mechanicznego >3 MPa i porowatości powietrznej <10% przyjmowane są na ogół jako wartości krytyczne dla wzrostu korzeni. Oddziaływanie tych czynników w glebie jest interakcyjne. Rysunek 1 wskazuje na to, że zależności wartości krytycznych oporu mechanicznego i porowatości powietrznej od potencjału wody glebowej i stopnia zagęszczenia są podobne we wszystkich glebach pomimo różnego uziarnienia i zdolności retencyjnych. Z zależności tej wynika, że zakres potencjału wody glebowej,



Rys. 1. Krytyczne wartości oporu mechanicznego (linie górne) i porowatości powietrznej (linie dolne) w funkcji stopnia zagęszczenia i potencjału wody glebowej w warstwie ornej piasku gliniastego [1], gliny lekkiej [2], gliny pylastej [3] i gliny ilastej [4] [26].

Fig. 1. Critical limits of penetration resistance (upper line) and air-filled porosity (lower line) as functions of the degree of compactness and matric water potential in the plough layer in a loamy sand [1], a light loam [2], a silty loam [3] and a clay loam [4] [26].

w którym natlenienie i opór mechaniczny nie ograniczają wzrostu korzeni, zmniejsza się wraz ze wzrostem gęstości gleby. Przy niskim potencjale wody glebowej i wysokim stanie zagęszczenia głównym czynnikiem ograniczającym wzrost korzeni jest nadmierny opór mechaniczny (Rys. 1, prawy górny róg) podczas gdy w warunkach wysokiego potencjału wody glebowej i gęstości odpowiadających obszarowi w prawym dolnym rogu – niedobór tlenu. Niski współczynnik przewodnictwa wodnego gleby i ograniczona powierzchnia kontaktu pomiędzy korzeniami i glebą są najprawdopodobniej głównymi czynnikami ograniczającymi wzrost korzeni roślin w glebie luźnej przy niskich wartościach potencjału wody glebowej (obszar w lewym górnym rogu). Wyniki wskazują na to, że wraz ze wzrostem gęstości gleby zwiększa się prawdopodobieństwo wystąpienia nadmiernego oporu mechanicznego lub niedotlenienia podczas sezonu wegetacyjnego, przy czym w latach suchych dominującym czynnikiem ograniczającym wzrost korzeni będzie nadmierny opór mechaniczny, a w latach mokrych niedotlenienie strefy korzeniowej. Ponadto w glebie bardziej zagęszczonej stosunkowo małe zmiany uwilgotnienia gleby prowadzą do znacznych zmian oporu mechanicznego i natlenienia, a tym samym do wzrostu systemu korzeniowego [19,26].

Warto zwrócić uwagę, że linie krytycznych wartości oporu mechanicznego (3 MPa) i porowatości powietrznej (10 %) na Rys. 1 przecinają linie potencjału wody glebowej -1500 i -10 kPa przy zbliżonych wartościach stopnia zagęszczenia (86-88%). Przy tych wartościach stopnia zagęszczenia plony roślin uprawnych są najwyższe [19,27]. Relatywne zagęszczenie w porównaniu do gęstości lub porowatości ogólnej jest bardziej przydatnym parametrem w przewidywaniu oddziaływania przejazdów maszyn i narzędzi rolniczych na właściwości gleb i wzrost roślin przy użyciu modeli matematycznych [24].

Wraz ze wzrostem zagęszczenia gleby i ściślejszym upakowaniem cząstek glebowych zwiększa się przewodnictwo cieplne i pojemność cieplna gleby [49]. Zmiany te wywierają istotny wpływ na temperaturę gleby i jej zmienność czasowo-przestrzenną. Wzrost zagęszczenia gleby prowadzi do zmniejszenia szybkości nagrzewania i ochładzania jak też dobowych zmian temperatury wierzchniej warstwy gleby [1,5,27]. Obniżenie temperatury wierzchniej warstwy gleby zagęszczonej związane jest w dużym stopniu z relatywnie wysokim uwilgotnieniem i parowaniem [36]. W okresie wczesnowiosennym obniżenie to jest czynnikiem opóźniającym początkowy wzrost korzeni [5,9]. W późniejszym okresie wegetacji, głównym czynnikiem kształtującym temperaturę gleby jest okrywa roślinna, niezależnie od gęstości gleby.

REAKCJA KORZENI ROŚLIN

Wzrost stanu zagęszczenia gleby prowadzi do zmniejszenia długości i głębokości systemu korzeniowego roślin [17,32] oraz odległości między korzeniami [23]. Wyniki zamieszczone w Tabeli 1 wskazują na to, że połowa odległości między najbliższymi korzeniami kukurydzy, wynosiła na płaszczyznach poziomych w glebie luźnej poniżej 0,81 cm do głębokości 20 cm i zmniejszała się wraz ze wzrostem stopnia zagęszczenia. W glebie najbardziej zagęszczonej wartość ta wynosiła poniżej 5,64 cm. Ponadto wykazano, że w glebie bardziej zagęszczonej wzrasta nierównomierność rozmieszczenia przestrzennego korzeni, związana z większą zmiennością struktury gleby. Konsekwencją tego jest brak korzeni w ogóle

Tabela 1. Połowa odległości (cm) między najbliższymi korzeniami kukurydzy w zależności od stopnia zagęszczenia gleby [23]

Table 1. Half distance (cm) between neighouring roots of maize as affected by degree of soil compactness [23]

Głębokość	Stopień zagęszczenia gleby (%)			
(cm)	75	87	90	93
0-5	0,63	0,65	0,81	0,64
5-10	0,77	0,86	1,07	1,37
10-15	0,81	0,92	1,33	3,26
15-20	0,81	0,99	1,41	5,64
20-25	1,09	1,09	1,56	-
25-30	2,00	3,26	1,99	-
30-35	2,82	4,61	3,99	-
35-40	3,99	5,64	-	-
40-45	5,64	-	-	-

w niektórych fragmentach gleby i ich obfitość – w innych.

Odległość między najbliższymi korzeniami jest ważnym czynnikiem warunkującym absorpcję składników pokarmowych i wody [23]. Absorpcja ta ma miejsce przede wszystkim w warstwie gleby otaczającej korzenie, której grubość wynosi w przybliżeniu 5-7 mm dla azotu, 7-8 mm dla potasu, 2 mm dla fosforu oraz 3-4 mm dla wapnia i magnezu. Zatem dostępność i pobieranie składników mineralnych zmniejsza się wraz ze wzrostem stopnia zagęszczenia gleby, pomimo zwiększonej ich zawartości na jednostkę objętości gleby. Nie pobrane składniki mineralne są wymywane poniżej strefy korzeniowej i powodują zanieczyszczenie wód podziemnych.

Wzrost korzeni w profilu glebowym jest w znacznym stopniu modyfikowany przez warstwy zbite takie jak podeszwa płużna czy poziomy genetyczne B [32,38,53]. Warstwy te ograniczają wzrost korzeni głównie poprzez nadmierny opór mechaniczny i niewystarczające natlenienie. Negatywny wpływ tych warstw na wzrost korzeni zwiększa się wraz ze zmniejszeniem ich głębokości występowania i wzrostem miąższości. Wpływ ten może być złagodzony przez kompensacyjny wzrost korzeni w warstwach wyżej położonych, pod warunkiem ich dobrego zaopatrzenia w wodę i składniki pokarmowe.

Zmniejszony i nierównomiernie rozmieszczony system korzeniowy w glebie zagęszczonej ma istotny wpływ na pobieranie wody i składników pokarmowych. Wykazano, że ilość wody pobranej na jednostkę długości korzeni grochu, kukurydzy, jęczmienia i ryżu [17,30,31,47] jest większa w glebie umiarkowanie zagęszczonej niż luźnej. Wzrost ten był głównie wynikiem większej powierzchni kontaktu gleby z korzeniami roślin i zwiększonego współczynnika przewodnictwa wodnego. W większości badań zwiększona efektywność korzeni była niewystarczająca, aby skompensować zmniejszony system korzeniowy w wyniku zagęszczenia, czego efektem było zmniejszone całkowite zużycie wody przez rośliny.

Podobny wpływ zagęszczenia gleby obserwowano w odniesieniu do pobierania składników pokarmowych. Jak wynika z danych w Tabeli 2 [50] całkowita ilość pobranych azotanów, określona na podstawie różnicy zawartości azotanów w roztworze odżywczym i glebie (ΔNO_3) była największa w glebie umiarkowanie zagęszczonej, pomimo znacznie większej długości korzeni w glebie luźnej. Wartości ilorazu pobranych azotanów i długości korzeni w jednostce objętości gleby wskazują na to, że mniejsza ilość korzeni w glebie zagęszczonej była bardziej efektywna w absorpcji azotanów. Po uwzględnieniu powierzchni kontaktu korzeni z glebą, wyznaczonej przy użyciu szlifów glebowych, stosunkowo małe różnice w wartościach ilorazu pobranego azotu i długości korzeni między obiektami

Tabela 2. Pobieranie azotanów w zależności of porowatości gleby i długości korzeni [50]
Table 2. Uptake of nitrates as affected by soil porosity and root length [50]

Parametr[a]	Porowatość ogólna (%, v/v)		
	59,6	50,6	43,7
$\Delta(NO_3)$(mmol dm^{-3})	14,1	14,8	12,4
$\Delta(NO_3)/Lv$(mmol dm^{-1})	5,4	8,1	13,0
$\Delta(NO_3)/Lv^*$(mmol dm^{-1})	11,6	13,0	16,9

[a]$\Delta(NO_3)$ = różnica w zawartości azotanów w roztworze (16 mmol dm^{-3}) i glebie; Lv = długość korzeni (km m^{-3}); Lv* = długosć korzeni z uwzględnieniem powierzchni kontaktu korzeni z gleby

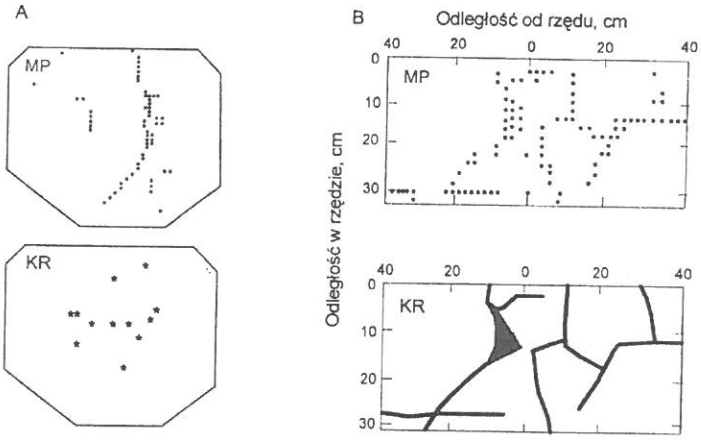
wskazują na znaczny wpływ powierzchni kontaktu korzeni z glebą na pobieranie azotanów. Zaobserwowano, że mała powierzchnia kontaktu korzeni z glebą może być kompensowana wytwarzaniem większej ilości korzeni drobnych, przy mniejszym zużyciu asymilatów na jednostkę długości [29]. Nierównomierne pobieranie wody przez korzenie roślin ma duże znaczenie w modelowaniu pobie-rania wody i składników odżywczych oraz ich rozmieszczenia w profilu glebowym [12,37,42,53].

ROLA PORÓW GLEBOWYCH

Korzenie większości gatunków roślin nie są w stanie wnikać do porów mniejszych od ich nominalnej średnicy [17]. Makropory lub pory większe od korzeni umożliwiają korzeniom ominięcie obszarów o nadmiernym oporze mechanicznym i zwiększają w ten sposób potencjalne możliwości wzrostu korzeni. Natomiast są one tylko w małym stopniu rejestrowane przez penetrometry glebowe. Szczególne znaczenie mają pory skierowane pionowo, gdyż nie są one na ogół niszczone w wyniku przejazdów maszyn rolniczych.

Podobne rozmieszczenie przestrzenne makroporów i korzeni roślin na Rys. 2 potwierdza preferencyjny wzrost korzeni do makroporów [20,21,48]. Udział korzeni zasiedlających istniejące makropory zwiększa się w niżej położonych i zwięzłych warstwach podornych, gdzie makropory stanowią często jedyne ścieżki wzrostu korzeni roslin [17,18]. Wykazano, że objętość makroporów w słabo przepuszczalnych glebach użytkowanych rolniczo nie powinna być mniejsza niż 5 m^3 m^{-3} [34].

Pory wytworzone przez dżdżownice i korzenie roślin poprzedzających, zwane biologicznymi, mają szczególne znaczenie w warstwach zagęszczonych (np. podeszwa płużna), w których wzrost korzeni jest jedynie możliwy przez te pory. Oddziałują one także korzystnie na wzrost korzeni w glebach wilgotnych, gdyż są one odwadniane przy większych potencjałach wody glebowej (większa wilgotność)



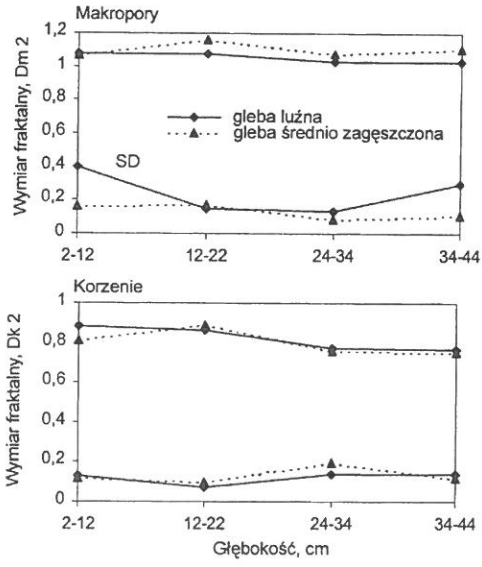
Rys. 2. Rozmieszczenie makroporów i korzeni kukurydzy. A - doświadczenie wazonowe [21]; B - doświadczenie polowe; MP = makropory; KR = korzenie [48].
Fig. 2. Distribution patterns of macropores and roots of maize. A - pot experiment [21]; B - field experiment; MP = macropores; KR = roots [48]

i pozostają zatem wypełnione powietrzem przez dłuższy okres czasu. Ważną cechą tych porów jest to, że są one odporne na pionowy nacisk kół maszyn i narzędzi rolniczych i na procesy pęcznienia [54]. Makropory otwarte na powierzchni gleby wywierają istotny wpływ na wzrost infiltracji wody do gleby [43,52] (przepływ preferencyjny) oraz zmniejszenie wymywanego azotu i zanieczyszczenie wody gruntowej [33]. Skierowane pionowo makropory wytworzone przez dżdżownice są stosunkowo odporne na zagęszczenie gleby i z tego względu ich zawartość jest ważnym wskaźnikiem jakości gleby [2,24]. Uwzględnienie przepływu preferencyjnego w modelowaniu poprawia znacznie efektywność modeli w przewidywaniu wilgotności profilu glebowego i strat chemikaliów w wyniku wymywania [52]. Występowanie ruchu wody jedynie w makroporach, przy zmniejszonej infiltracji przez szkielet glebowy, może prowadzić do ograniczonego zwilżenia strefy korzeniowej gleby.

W glebach drobnoziarnistych rozkład porów glebowych i wzrost korzeni zależą w dużym stopniu od wielkości agregatów glebowych [7,56]. Wykazano, że wzrost korzeni jest zwykle słabszy w glebach złożonych z dużych niż małych (poniżej 3 mm) agregatów. Wewnętrzne części agregatów dużych, zwłaszcza zagęszczonych i wilgotnych, są w małym stopniu zasiedlane przez korzenie roślin [7,17].

Zależność pomiędzy rozmieszczeniem makroporów i korzeni może być opisana za pomocą wymiaru fraktalnego wyznaczonego na podstawie analizy obrazu [20,28]. Podobny przebieg wartości wymiaru fraktalnego D2 dla makroporów i

korzeni, pokazany na Rys. 3, wskazuje na istnienie zależności pomiędzy rozmieszczeniem przestrzennym porów i korzeni [28].



Rys. 3. Wymiar fraktaly makroporów (Dm2) i wymiar fraktalny korzeni (Dk2) w zależności od stanu zagęszczenia gliny pylastej. SD = odchylenie standardowe [28]

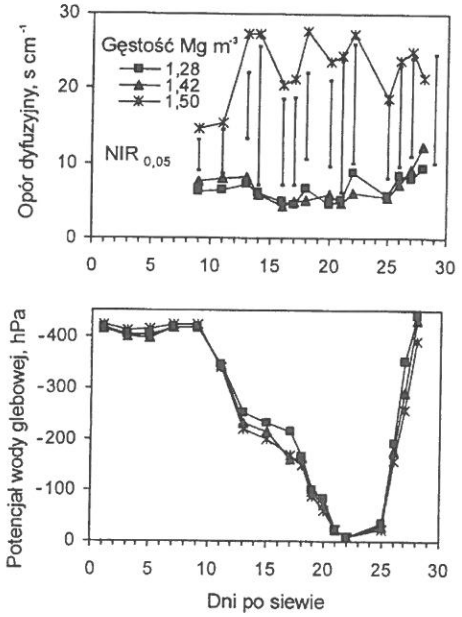
Fig. 3. Fractal dimensions of internal structure of macropores (Dm2) and root distribution patterns (Dk2) in loose and medium compacted silty loam. SD = standard deviation [28]

Powyższe wyniki wskazują na to, że parametry charakteryzujące zmienność przestrzenną porowatości są ważnym uzupełnieniem do pomiarów penetrometrycznych lub gęstości gleby, używanych najczęściej do charakterystyki oporu mechanicznego dla wzrostu korzeni.

REAKCJA CZĘŚCI NADZIEMNYCH

Warunki glebowe w strefie korzeniowej wywierają istotny wpływ na transpirację pary wodnej poprzez regulację stopnia otwarcia szparek liści. Miarą otwarcia szparek jest opór dyfuzyjny liści. Badania w warunkach fitotronowych przy wysokim i zmiennym uwilgotnieniu gleby wykazały, że wartości i wahania oporu dyfuzyjnego podczas wzrostu przy zmieniającym się potencjale wody glebowej były największe w glebie najbardziej zagęszczonej (Rys. 4). Znaczny wzrost oporu dyfuzyjnego wystąpił wraz ze wzrostem początkowego potencjału wody glebowej (-420 hPa do -220 hPa) i tym samym zmniejszeniem natlenienia w okresie 9-13 dni po siewie. Należy zwrócić uwagę, że opór dyfuzyjny liści w końcowej fazie doświadczenia był większy niż w początkowej, pomimo podobnych wartości potencjału macierzystego. Stosunek suchej masy korzeni do części nadziemnych w tym doświadczeniu był największy w obiekcie z glebą najbardziej zagęszczoną, natomiast stosunek długości korzeni do powierzchni liści w glebie luźnej.

Również w glebie słabo wilgotnej lub suchej w doświadczeniu polowym największy opór dyfuzyjny liści stwierdzono w glebie najbardziej zagęszczonej [25]. Różnice pomiędzy obiektami o różnym zagęszczeniu gleby ujawniły się w największym stopniu w okresie o najmniejszej ilości opadów deszczu, głównie w



Rys. 4. Opór dyfuzyjny w aparatach szparkowych liści kukurydzy w zależności od gęstości gleby i potencjału wody glebowej [30]

Fig. 4. Stomatal resistance of maize as affected by bulk density and soil water potential [30]

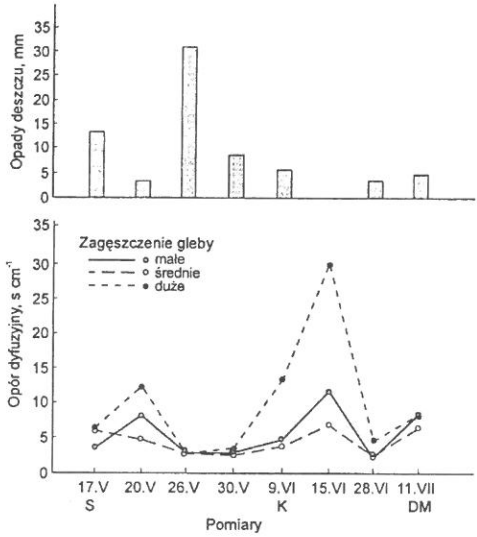
wyniku wzrostu oporu dyfuzyjnego w obiekcie z glebą najbardziej zagęszczoną (Rys. 5). Wzrost ten wynika przede wszystkim z płytkiego ukorzenienia roślin i ograniczonego pobierania wody. Plon ziarna z poletek najbardziej zagęszczonych był o 22% mniejszy niż z gleby luźnej.

Powyższe wyniki wskazują na to, że reakcja aparatów szparkowych liści jest czułym wskaźnikiem warunków stresowych w obrębie strefy korzeniowej, związanych zarówno z niedotlenieniem jak też niedoborem wody. Mechanizmy reakcji aparatów szparkowych na niekorzystne warunki fizyczne gleby nie są jeszcze dokładnie poznane. Dane literaturowe wskazują na to, że ważnymi czynnikami powodującymi zamknięcie aparatów szparkowych jest płytki system korzeniowy oraz zwiększona oporność hydrauliczna korzeni. Sygnały o warunkach stresowych w obrębie korzeni są prawdopodobnie przenoszone przez hormony wzrostu, a wzrost stężenia kwasu abscyzynowego i obniżenie ciśnienia turgorowego w komórkach szparkowych prowadzą do zmniejszenia stopnia otwarcia szparek liści [17,51].

WYBRANE METODY BADAŃ

Szereg rożnych metod jest używanych do badań reakcji porowatości i struktury agregatowej oraz korzeni roślin na zagęszczenie gleby.

Metody morfologiczne i morfometryczne zgładów glebowych umożliwiają określenie typu struktury, rzeczywistych wymiarów porów [44-46] jak też powierzchni kontaktu korzeni z glebą [50]. Przy użyciu tych metod wykazano, że zagęszczenie gleby prowadzi do zmniejszenia różnorodności struktury porów [28]. Zaletą tych metod jest to, że eliminują one efekt histerezy, wpływający na objętość porów wyznaczanych na pod-stawie infiltracji oraz zależności potencjał wody – wilgotność gleby [51].



Rys. 5. Opór dyfuzyjny w aparatach szparkowych liści pszenicy jarej w zależności od stopnia zagęszczenia gleby. D = stopień zagęszczenia; S = strzelanie w źdźbło; K = kwitnienie; DM = dojrzałość mleczna [25]

Fig. 5. Stomatal resistance of spring wheat as affected by degree of soil compaction. D = degree of compactness; S = shooting; K = flowering; DM = milk maturity [25]

Objętość makroporów można wyznaczyć pośrednio na podstawie pomiarów infiltracji przy pełnym i niepełnym nasyceniu gleby wodą. Można też je obliczyć z zależności potencjał wody wilgotność gleby. Wartości stosunków przepuszczalności do objętości makroporów [8] lub do porowatości powietrznej [4] są użytecznymi wskaźnikami ciągłości makroporów. Małe wartości tych stosunków dobrze charakteryzowały zmniejszoną ciągłość makroporów w glebie zagęszczonej [25,35]. System makroporów i preferencyjny przepływ wody można dobrze opisać za pomocą modeli fizyczno-matematycznych [52,53].

Zastosowanie skaningowej mikroskopii elektronowej pozwala na ilościowe określenie zmienności przestrzennej porowatości i gęstości gleby wokół korzeni roślin. Bruand i in. [6] wykazali, że porowatość gleby w 150 μm warstwie wokół korzeni kukurydzy była o 24% mniejsza niż szkieletu glebowego. Gęstość gleby wynosiła odpowiednio 1,80 Mg m^{-3} i 1,54 Mg m^{-3}. Badania modelowe wykazały, że gęstość gleby maleje według funkcji wykładniczej wraz z odległością od powierzchni korzeni, przy czym wartość wykładnika jest proporcjonalna do średnicy korzenia [13]. Wpływ korzeni na gęstość gleby jest większy w glebie zagęszczonej, gdzie korzenie są zwykle grubsze [17,32].

Stosowane ostatnio techniki tomografii komputerowej i magnetycznego rezonansu jądrowego pozwalają na nieniszczące badania ilościowe porów glebowych i korzeni roślin w przestrzeni dwu i trójwymiarowej [3,39,57].

Zastosowanie nowych kamer CCD i skanerów o wysokiej rozdzielczości (<10 μm) umożliwia dokładną kwantyfikację struktury gleby w zależności od sposobu jej użytkowania [16,57]. Jednak badania przy tak wysokiej rozdzielczości ograniczone są obecnie do stosunkowo małych objętości gleby z uwagi na niewystarczającą

pamięć komputerów. Na przykład analiza obrazu próby 1 cm^3 przy rozdzielczości 2 μm wymaga około jednego terabajta pamięci komputerowej [57].

Zastosowanie źródła niskiej (np. Cs-137) i wysokiej (np. Am-235) energii gamma w tomografii komputerowej pozwala na nieniszczące i dokładne określenie rozmieszczenia przestrzennego gęstości i wilgotności gleby wokół korzenia roślin [3,40]. Innym zastosowaniem tomografii komputerowj jest użycie jądrowego rezonansu magnetycznego do pomiaru pobierania wody wokół korzenia roślin [57] oraz trójwymiarowej wizualizacji korzeni na podstawie matryc dwuwymiarowych [3]. Analiza promieniowaniem rentgenowskim przy użyciu skanera o dwu poziomach energetycznych tj. 80 i 120 kV pozwala na nieniszczące określenie rozmieszczenia przestrzennego gęstości i wilgotności gleby [41].

PODSUMOWANIE

Relatywne wskaźniki zagęszczenia w porównaniu do gęstości są bardziej przydatne do porównania wpływu stanu zagęszczenia na wzrost roslin w glebach o różnym uziarnieniu. Wraz ze wzrostem gęstości zwiększa się prawdopodobieństwo wystąpienia nadmiernego oporu mechanicznego lub niedotlenienia dla wzrostu korzeni w zależności od uwilgotnienia gleby. Negatywny wpływ nadmiernego oporu mechanicznego i niedotlenienia na wzrost korzeni jest mniejszy w glebie z makroporami niż w glebie jednorodnej. Techniki tomografii komputerowej i magnetycznego rezonansu jądrowego pozwalają na nieniszczące badania ilościowe porów glebowych i korzeni roślin. Zależności pomiędzy rozmieszczeniem przestrzennym makroporów i korzeni w glebie zagęszczonej można dobrze opisać przy użyciu analizy fraktalnej. Wzrost zagęszczenia gleby prowadzi do zmniejszenia szybkości nagrzewania i ochładzania gleby i dobowych zmian temperatury wierzchniej warstwy gleby i wzrostu temperatury w niżej położonych warstwach profilu glebowego. Sygnały o występowaniu niekorzystnych warunków w obrębie korzeni przenoszone są prawdopodobnie przez hormony wzrostu do części nadziemnych i prowadzą do wzrostu oporu dyfuzyjnego liści i zmniejszenia fotosyntezy.

PISMIENNICTWO

1. **Abu-Hamdeh N.H.:** Effect of tillage treatments on soil thermal conductivity for some Jordanian clay loam and loam soils. Soil Till. Res., 56, 154-151, 2000.
2. **Alakukku L.:** Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Long-term effects on the properties of fine-textured soils. Soil Till. Res., 37, 223-238, 1996.
3. **Asseng S., Aylmore L.A.G., MacFall J.S., Hopmans J.W., Gregory P.J.:** Computer-assisted tomography and magnetic resonance imaging. In: Root Methods A Handbook (Eds A.L. Smit,

A.G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin, S.C. van de Geijn). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 343-363, 2000.

4. **Blackwell P., S., Ringrose-Voase A.J., Jayawardane N.S., Olsson K.A., Mason W.K.:** The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to characterize structure of macropore space of saturated hydraulic conductivity of clay soils. J. Soil Sci., 41, 215-228, 1990.
5. **Boone F.R., Veen B.W.:** Responses of temperate crops to soil compaction. In: Soil Compaction in Crop Production (Eds B.D. Soane, C. van Ouwerkerk). Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 237-264, 1994.
6. **Bruand A., Cousin I., Nicoullaud B., Duval O., Begon J.C.:** Backscattered electron scanning images of soil porosity for analyzing soil compaction around roots. Soil Sci. Soc. Am. J., 60, 895-901, 1996.
7. **Busscher W., Lipiec J.:** Early growth of maize in compacted soil with fine and coarse structure. Int. Agrophysics, 7, 77-83, 1992.
8. **Carter M.R., White R.P., Ivany J.A.:** Characterizing macropore continuity and aeration in fine sandy loams in tillage studies. Proc. 13th Conf. Int. Soil Tillage Research Org. (ISTRO), Aalborg, Denmark, 1, 7-12, 1994.
9. **Cox W.T., Zobel R.W., van Es H.M., Otis, D.J.:** Growth, development and yield of maize under three tillage systems in the northeastern USA. Soil Tillage Res., 18, 295-310, 1990.
10. **Czyż E., Tomaszewska J.:** Changes of aeration conditions and the yield of sugar beet on sandy soil of different density. Polish J. Soil Sci., 26, 1-9, 1993.
11. **Da Silva A.P., Kay B.D., Perfect E.:** Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. Soil Till. Res., 44, 81-93, 1997.
12. **De Willigen P., van Noordwijk, M.:** Roots, plant production and nutrient use efficiency, PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1987.
13. **Dexter A.R.:** Compression of soil around roots. Plant Soil, 97, 401-406, 1987.
14. **Dexter A.R., Czyż E.A.:** Soil physical quality and the effects of management. In: (Eds M.J. Wilson, B. Maliszewska-Kordybach). Kluwer Acad. Publ., 153-165, 2000.
15. **Domżał H., Gliński J., Lipiec J.:** Soil compaction research in Poland. Soil Till. Res., 19, 99-109, 1991.
16. **Gantzer C.J., Anderson S.H.:** Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. Soil Till. Res., 64, 101-111, 2002.
17. **Gliński J., Lipiec J.:** Soil Physical Conditions and Plant Roots. CRC Press, Boca Raton, FL, U.S.A., 250, 1990.
18. **Goss M.J.:** Consequences of the activity of roots on soil. In: Plant Root Growth. An Ecological Perspective (Ed. A. Atkinson (Ed.). Special Publ. No. 10 of the British Ecol. Society, Blackwell Sci. Publ., 171-186, 1991.
19. **Håkansson I., Lipiec J., 2000.:** A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. Soil Till. Res., 53, 71-85, 2000.
20. **Hatano R., Booltink H.W.G.:** Using fractal dimension of stained flow patterns in clay soils to predict bypass flow. In: Fractals in Soil Science (Eds P. Baveye, J.Y. Parlange, B.A. Stewart). CRC Press, Boca Raton, USA, FL, 250, 1998.
21. **Hatano R., Sakuma T.:** The role of macropores on rooting pattern and movement of water and solutes in various field soils. Trans 14th Int. Cong. Soil Sci., 2, 30-135, 1990.
22. **Horn R., Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., Van Ouwerkerk, C.:** Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. Soil Till. Res., 35, 23-36, 1995.
23. **Lipiec J.:** Stan fizyczny gleby i jego wpływ na wzrost i funkcjonowanie korzeni roślin. Wybrane metody badań. Mat. X. Szkoły Fizyka z elementami agrofizyki, Lublin, 22-23 września p.t. Fizyczne właściwości gleby a rozwój roślin. Metody badań, 5-29, 1998.
24. **Lipiec J., Arvidsson J., Murer E.:** Review of modelling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. Soil Till. Res., 2002 (w druku).

25. **Lipiec J., Gliński J.:** Field soil compaction: effects on soil physical properties and stomatal resistance of wheat. Proc. Intern. Symp. "Soil, human and environment interactions", May 4-11, 1997, China Science and Technology Press, 422-427, 1997.
26. **Lipiec J., Håkansson I.:** Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. Soil Till. Res., 53, 87-94, 2000.
27. **Lipiec J., Håkansson I., Tarkiewicz S., Kossowski J.:** Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. Soil Till. Res., 19, 307-317, 1991.
28. **Lipiec J., Hatano R., Słowińska-Jurkiewicz S.:** The fractal dimension of pore distribution patterns in variously compacted soil. Soil Till. Res., 47, 61-66, 1998.
29. **Lipiec J., Ishioka T., Hatano R., Sakuma T.:** Effects of structural discontinuity on root and shoot growth and water use of maize. Plant Soil, 157, 65-74, 1993.
30. **Lipiec J., Ishioka T., Szustak A., Pietrusiewicz J., Stępniewski W.:** Effects of soil compaction and transient oxygen deficiency on growth, water use and stomatal resistance of maize. Acta Agric. Scand. sect. B: Soil Plant Sci., 46, 186-191, 1996.
31. **Lipiec J., Kossowski J., Tarkiewicz S.:** Spring barley yield and root growth in response to the degree of compactness of soil and weather conditions. Proc. Int. Conference "Soil Compaction and Soil Management" 8-12 June 1992, Tallinn, Estonia, 86-89, 1992.
32. **Lipiec J., Simota C.:** Role of soil and climate factors influencing crop responses to compaction in Central and Eastern Europe. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), Soil Compaction in Crop Production. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 365-390, 1994.
33. **Lipiec J., Stępniewski W.:** Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. Soil Till. Res., 35, 37-52, 1995.
34. **McQueen D.J., Shepherd T.G.:** Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping Manawatu Region, New Zealand. Soil Till. Res., 63, 93-107, 2002.
35. **Munkholm L.J., Schjřnning P., Kay B.D.:** Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. Soil Till. Res., 64, 125-135, 2002.
36. **Nassar I.N., Horton R.:** Salinity and compaction effects on soil waterr evaporation and water and solute distributions. Soil Sci. Soc. Am. J., 63, 752-758, 1999.
37. **Novak V.:** Evaporation of water in the environment and methods of its modelling. Slovakia Aacademy of Sciences, VEDA, 253, 1995.
38. **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., 46, 203-208, 1998.
39. **Perret J.P., Prasher S.O., Kantzas A., Langford C.:** Preferential flow in intact soil columns measured by SPECT scanning. Soil Sci. Soc. Am. J., 64, 469-477, 2000.
40. **Phogot V.K., Alymore L.A.G., Schuller R.D.:** Simultaneous measurement of the spatial distribution of soil water content and bulk density. Soil Sci. Soc. Am. J., 55, 908-915, 1991.
41. **Rogasik H., Crawford J.W., Wendroth O., Young I.M., Joschko M., Ritz K.:** Discrimination of soil phases by dual energy X-ray tomography. Soil Sci. Soc. Am. J., 63, 741-751, 1999.
42. **Schmidhalter U., Selim H.M., Oertli J.J.:** Measuring and modelling root water uptake based on ^{36}chloride discrimination in a silt loam soil affected by groundwater. Soil Sci., 158, 97-105, 1994.
43. **Sławiński C.:** Modelowe badania preferencyjnego przepływu wody w ośrodku glebowym. Praca doktorska, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 1997.
44. **Słowińska-Jurkiewicz A.:** Struktura gleby i jej rola w kształtowaniu stanu fizycznego środowiska glebowego. Mat. X. Szkoły Fizyka z elementami agrofizyki, Lublin, 22-23 września p.t. Fizyczne właściwości gleby a rozwój roślin- metody badań, 55-73, 1998.
45. **Słowińska-Jurkiewicz A., Domżał H.:** The structure of the cultivated horizon of soil compacted by the wheels of agricultural tractors. Soil and Tillage Research, 19, 215-226, 1991.

46. **Słowińska-Jurkiewicz A., Pranagal J., Łazarz M.:** Morphological characteristics of soil structural aggregates in soils derived from silt. Polish J. Soil Sci., 31, (2), 23-32, 1998.
47. **Smucker A.J.M., Aiken R.M.:** Dynamic root response to water deficits. Soil Sci., 154, 269-280, 1992.
48. **Tardieu, F., Manichon, H.:** Characterization en taut que capteur d'eau de l'enracinement du mais en parcelle cultivee. Agronomie, 6, 18-37, 1986.
49. **Usowicz B., Tarkiewicz S., Lipiec J.:** Compaction effects on soil thermal properties. Proc. Int. Symp. "Soil Tillage - Present and Future" 22-23 June 1995, Cluj-Napoca, Romania, vol. II, 312-321, 1995.
50. **Veen B.W., van Noordwijk M., de Willigen P., Kooistra M.J.:** Root-soil contact of maize as measured by a thin-section technique. III. Effects on shoot growth, nitrate and water uptake efficiency. Plant Soil, 139, 131-138, 1992.
51. **Walczak R.T.:** Model investigations of water binding energy in soils of different compaction. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 197, 11-43, 1997.
52. **Walczak R.T., Sobczuk H., Sławiński C.:** Submodel of bypass flow in cracking soils - Part 2. Experimental validation. Int. Agrophysics, 10, 197-207, 1996.
53. **Walczak R.T., Witkowska-Walczak B., Baranowski P.:** Soil structure parameters in models of crop growth and yield prediction. Physical models. Int. Agrophysics, 11, 111-127, 1997.
54. **Whalley W.R., Dexter A.R.:** Root development and earthworm movement in relation to soil strength and structure. Arch. Acker-Pfl.Boden., 38, 1-40, 1994.
55. **Whalley W.R., Lipiec J., Stępniewski W., Tardieu F.:** Control and measurement of the physical environment in root growth experiments. In: Root Methods A Handbook (Eds A.L. Smit, A.G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin, S.C. van de Geijn). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 76-112, 2000.
56. **Witkowska-Walczak B.:** Wpływ struktury agregatowej gleb mineralnych na ich hydrofizyczne charakterystyki. Acta Agrophysica, 30, 5-96, 2000.
57. **Young I.M., Crawford J.W., Rappoldt C.:** New methods and models for characterising structural heterogeneity of soil. Soil Till. Res., 61, 33-45, 2001.

EFFECT OF SOIL COMPACTNESS ON PLANT GROWTH AND FUNCTION

J. Lipiec

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

S u m m a r y. The paper presents effects of soil compaction on selected soil physical properties and root and shoot growth and function. Effect of soil compaction on mechanical impedance and aeration in relation to soil wetness is discussed. Attention is paid to the relationships between the spatial distribution of macropores and plant roots. Examples of application of computer-assisted tomography (CAT) and nuclear magnetic resonance (NMR) techniques for studying spatial distribution of macropores and roots and soil water content and bulk density around the roots. Mechanisms of shoot response to unfavorable soil physical conditions in root zone are discussed.

K e y w o r d s: soil compaction, physical properties, root growth, methods of studying.