

WPLYW PROCESÓW MROZOWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI POWIETRZNE UGNIATANEJ RĘDZINY

Maja Bryk, Beata Kołodziej, Tomasz Serzysko

Instytut Gleboznawstwa i Kształtowania Środowiska, Akademia Rolnicza
ul. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin
e-mail: maja.bryk@ar.lublin.pl

Streszczenie. Badano wpływ procesów mrozowych na właściwości powietrzne (porowatość, pojemność i przepuszczalność powietrzną) ugniatanej rędziny czarnoziemnej wytworzonej z kredy piszącej (Sielec, Pagóry Chełmskie, pole uprawne). Próbki do badań pobrano z odleżalej powierzchniowej warstwy 0-10 cm. Procesy mrozowe zmodyfikowały porowatość dyferencjalną gleby, zależnie od jej zagęszczenia. Najsilniejszy wzrost przepuszczalności powietrznej, a zatem największą poprawę drożności porów, zanotowano dla trzykrotnie mrożonych, silnie ugniatanych próbek rędziny. Stwierdzono brak jednoznacznej korelacji między liczbą cykli mrożenia-zamarzania a intensywnością zaobserwowanych w wartościach badanych cech zmian, wywołanych przez mrożenie.

Słowa kluczowe: rędzina, właściwości powietrzne, ugniatanie, procesy mrozowe

WSTĘP

Powietrze glebowe jest nieodzownym, obok wody, elementem procesów zachodzących w środowisku glebowym; istotne są przy tym jego skład oraz zdolność gleby do jego wymiany (Stępniewski i Gliński 1984). Procesy fizyczne przenoszenia gazów zależą głównie od współczynnika ich dyfuzji (wymiany) w glebie, determinowanego przez objętość porów wypełnionych powietrzem (porowatość powietrzną), długość, kształt i ciągłość kanalików glebowych, a pośrednio przez wszystkie zabiegi je modyfikujące, np.: zagęszczanie, wilgotność, zaszkorupianie (Gliński i in. 1992).

Najlepszym wskaźnikiem o charakterze fizycznym drożności porów, a tym samym określającym potencjalne zdolności aeracyjne gleby, jest jej przepuszczalność powietrzna. Wartości przepuszczalności powietrznej gleby zależą bezpośrednio od porowatości gazowej, od kwadratu promienia porów glebowych, a pośrednio od

wszystkich czynników na nie wpływających, jak: wilgotność, zagęszczenie, czy specyfika układu glebowego (Stępniewski i Gliński 1984). Pomiary przepuszczalności powietrznej wykonywane są częściej w badaniach opisujących strukturę i stan fizyczny gleby niż wymianę gazową. Według Turskiego i in. (1978) przepuszczalność powietrzna, której wielkość jest związana głównie z obecnością przestrzeni międzyagregatowych i dużych porów międzyziarnowych, jest cennym wskaźnikiem stanu fizycznego gleby.

Gleby użytkowane rolniczo ulegają w znacznym stopniu degradacji fizycznej w wyniku ugniatania kołami maszyn i narzędzi rolniczych (Raper 2005). Przejawia się ona wzrostem zagęszczenia warstwy uprawnej i pogorszeniem struktury gleby, co pociąga za sobą zmianę właściwości fizycznych, odpowiedzialnych w dużej mierze za wzrost i plonowanie roślin oraz warunki życia organizmów glebowych.

W umiarkowanej strefie klimatycznej istnieje naturalny, niewymagający nakładów ekonomicznych, proces wpływający na poprawę struktury gleby, a co się z tym wiąże – modyfikujący między innymi właściwości powietrzne gleby. Jest on związany z występowaniem w porze zimowej ujemnych temperatur. W omawianym w pracy regionie (Pagóry Chełmskie) średnia liczba dni mroźnych (o temperaturze maksymalnej $\leq 0^{\circ}\text{C}$) mieści się w zakresie od 40 do 50, z czego dni bardzo mroźnych (o temperaturze maksymalnej $\leq -10^{\circ}\text{C}$) jest 6-8 (Krawczyk 1994).

W niniejszej pracy dokonano oceny wpływu procesów mrozowych na wybrane właściwości powietrzne, tj. porowatość, pojemność i przepuszczalność powietrzną, rędziny czarnoziemnej, poddanej silnemu ugniataniu, w zależności od stopnia zagęszczenia oraz sposobu działania ujemnych temperatur.

MATERIAŁ I METODY

Badania przeprowadzono na rędzinie czarnoziemnej wytworzonej z kredy piaszczącej (Sielec, Pagóry Chełmskie, pole uprawne). Gleba miała gliniasty skład granulometryczny (głina ciężka: $0,17 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ frakcji 1-0,1 mm; $0,18 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ frakcji 0,1-0,02 mm; $0,65 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ frakcji $<0,02$ mm oraz $0,35 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ frakcji $<0,002$ mm), zawierała $21,5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ węgla organicznego oraz $190 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ węglanów.

Próbki do badań pobrano z odleżałej powierzchniowej warstwy 0-10 cm. Najpierw pobrano w pięciu powtórzeniach dla każdego sposobu mrożenia próbki o nieznaruszanej strukturze do metalowych cylindrów o objętości 100 cm^3 . Próbki te nazywane będą dalej glebą ze stanu naturalnego. Ponadto do 15-litrowych pojemników pobrano glebę o niezachowanej makrostrukturze. W laboratorium z przywiezionej gleby przygotowano próbki także w metalowych cylindrach o pojemności 100 cm^3 w pięciu replikacjach dla każdego stanu zagęszczenia gleby do oznaczeń właściwości wodno-powietrznych. Próbki laboratoryjne przygotowano, modyfikując ich zagęszczenie, poziom wilgotności oraz mroząc w różny sposób.

Glebę ugniatano w zespole dwóch cylindrów w aparacie trójosiowym stosując nacisk odpowiednio 196 (gleba silnie zagęszczana) i 490 kPa (gleba bardzo silnie zagęszczana). Czas trwania nacisku wynosił 2 s. Po zagęszczaniu nadmiar gleby odcinano. Otrzymano w ten sposób próbki o dwóch zagęszczeniach, które wynosiły odpowiednio 1,28 i $1,40 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Próbki ze stanu naturalnego (gleba niezagęszczana) miały gęstość $1,27 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Wilgotność w momencie pobierania (wilgotność aktualna) dla próbek ze stanu naturalnego wynosiła $0,252 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ i odpowiadała potencjałowi $\psi = -49 \text{ kPa}$ (pF 2,7). Na tym samym poziomie ustabilizowano wilgotność pozostałych próbek, wykorzystując komory niskociśnieniowe.

Mrożenie próbek o zróżnicowanym zagęszczeniu i próbek ze stanu naturalnego prowadzono w komorze chłodniczej w temperaturze -15°C przez 72 godziny. Wyboru temperatury mrożenia dokonano na podstawie analizy średnich wieloletnich przebiegów temperatury w regionie, biorąc pod uwagę najniższą temperaturę występującą rokrocznie. Rozmarzanie następowało w temperaturze pokojowej w ciągu 48 godzin. Wykonano mrożenie 1- i 3-krotne, a część próbek pozostawiono bez mrożenia (obiekt kontrolny).

Mrożone i niemrożone próbki w metalowych cylindrach, zarówno ze stanu naturalnego, jak i przygotowane w laboratorium, wykorzystano do oznaczenia właściwości wodno-powietrznych gleby. W tym celu, po końcowym rozmarznieniu próbek mrożonych, wszystkie próbki zostały doprowadzone do stanu pełnego nasycenia wodą. Następnie oznaczono zawartość wody w glebie przy potencjale $-15,54 \text{ kPa}$ (pF 2,2; połowa pojemność wodna) w komorach niskociśnieniowych na porowatych płytach ceramicznych metodą Richardsa. Przy tym samym stanie wysycenia wodą dokonano pomiaru przepuszczalności powietrznej aparatem do badania przepuszczalności mas formierskich typu LPiR-1. Pomiar prowadzone były w stałej temperaturze otoczenia ($20 \pm 0,5^\circ\text{C}$), nie wymagały zatem uwzględnienia lepkości dynamicznej powietrza. Wyniki podano w $10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Tę samą glebę po usunięciu jej z cylindrów wykorzystano do oznaczenia zawartości wody w glebie przy potencjale -1550 kPa (pF 4,2; punkt trwałego wędnięcia roślin) w komorach wysokociśnieniowych stosując jako membranę celofan. Zawartość wody (wilgotność) po ustabilizowaniu potencjału oznaczono metodą grawimetryczną, po wysuszeniu próbek glebowych w temperaturze 105°C .

Porowatość ogólną gleby obliczono na podstawie rezultatów gęstości stałej fazy (oznaczonej piknometrycznie) i gęstości gleby (grawimetrycznie w 105°C), wyrażono ją w $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Porowatość dyferencjalną obliczono odpowiednio dla poszczególnych grup porów: zawartość makroporów (powyżej $20 \mu\text{m}$; w $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) jako różnicę między porowatością ogólną i połową pojemnością wodną; zawartość mezoporów (od $0,2$ do $20 \mu\text{m}$; w $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) jako różnicę między połową pojemnością wodną i wilgotnością punktu trwałego wędnięcia roślin; zawartość

mikroporów (poniżej $0,2 \mu\text{m}$; w $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) przyjęto jako równoważną wilgotności w punkcie trwałego wędnięcia roślin. Pojemność powietrzną gleby w stanie nasylenia wodą odpowiadającym potencjałowi $-15,54 \text{ kPa}$ obliczono jako różnicę między porowatością ogólną i pojemnością wodną w tym stanie wysycenia gleby wodą. Wyniki podano w $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Dokonano analizy statystycznej otrzymanych wyników. W celu stwierdzenia istotności różnic między rezultatami wykonano dla każdej z cech analizę wariancji dla klasyfikacji podwójnej (czynniki zmienności: liczba cykli zamarzania-rozmarzania i zagęszczenie) oraz pojedynczej (czynniki zmienności: liczba cykli zamarzania-rozmarzania; zagęszczenie). Testy statystyczne prowadzone były na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, przyjmowanym standardowo w badaniach przyrodniczych.

WYNIKI I DYSKUSJA

Porowatość ogólna dla niemrożonej rędziny w stanie naturalnym wynosiła $0,481 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (tab. 1). Ugniatanie ukształtowało wartości porowatości na poziomie odpowiednio $0,477$ i $0,432 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, jednak dopiero bardzo silny nacisk spowodował istotny spadek porowatości badanej gleby. Ponieważ mrożenie odbywało się w warunkach uniemożliwiających zmiany objętości gleby, wartości porowatości ogólnej nie zmieniały się pod wpływem działania mrozu. Ujęcie ich w omówieniu wyników ma na celu pogłębienie charakterystyki badanej gleby.

Porowatość dyferencjalna, nazywana też strukturą porów, określa objętość poszczególnych grup porów w całkowitej objętości gleby. W odróżnieniu od porowatości ogólnej, struktura porów ulegała zmianom pod wpływem działania niskich temperatur. Zawartość makroporów ($>20 \mu\text{m}$; porów aeracyjnych) w kontrolnych próbkach rędziny o zachowanej budowie wynosiła $0,133 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i wykazała wyraźny spadek w wyniku mrożenia, zarówno jedno-, jak i trzykrotnego, przyjmując dość zbliżone wartości – odpowiednio $0,080$ i $0,092 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Zmiana intensywności mrożenia nie wywołała jednak zróżnicowania zawartości makroporów. Objętość makroporów w silnie zagęszczanych próbkach tej gleby przed mrożeniem wynosiła $0,068 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, a mrożenie nie wpłynęło na wartość tej cechy. W bardzo silnie zagęszczanej rędzinie, dla której przed mrożeniem zawartość makroporów wynosiła $0,014 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, odnotowano znaczący wzrost zawartości porów aeracyjnych dopiero po trzykrotnym mrożeniu, do wartości $0,060 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Istotne okazały się natomiast różnice wywołane zmianami zagęszczenia. Dla badanej gleby zawartość makroporów spadła z $0,133$ dla gleby nieugniatanej do $0,014 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ dla gleby poddanej bardzo silnemu naciskowi.

Tabela 1. Wartości badanych cech
Table 1. Values of measured parameters

Cecha Parameter	Poziom mrożenia Freezing	Nacisk Compaction			NIR LSD
		brak uncom- pacted (0 kPa)	silny strong (196 kPa)	bardzo silny very strong (490 kPa)	
P_O , porowatość ogólna Total porosity ($m^3 \cdot m^{-3}$)	kontrola reference	0,481	0,477	0,432	
	1-krotne single	0,489	0,473	0,434	$1,36 \cdot 10^{-2}$
	3-krotne triple	0,482	0,477	0,428	
P_{MA} , zawartość makroporów Macropore volume ($m^3 \cdot m^{-3}$)	kontrola reference	0,133	0,068	0,014	
	1-krotne single	0,080	0,071	0,030	$3,73 \cdot 10^{-2}$
	3-krotne triple	0,092	0,097	0,060	
P_{ME} , zawartość mezoporów Mesopore volume ($m^3 \cdot m^{-3}$)	kontrola reference	0,053	0,104	0,108	
	1-krotne single	0,409	0,136	0,113	$3,47 \cdot 10^{-2}$
	3-krotne triple	0,388	0,096	0,070	
P_{MI} , zawartość mikroporów Micropore volume ($m^3 \cdot m^{-3}$)	kontrola reference	0,298	0,292	0,312	
	1-krotne single	0,289	0,267	0,287	$2,09 \cdot 10^{-2}$
	3-krotne triple	0,295	0,242	0,293	
P_p , połowa pojemność po- wietrzna Field air capacity($m^3 \cdot m^{-3}$)	kontrola reference	0,131	0,087	0,034	
	1-krotne single	0,105	0,089	0,051	$5,51 \cdot 10^{-2}$
	3-krotne triple	0,108	0,115	0,081	
D_p , połowa przepuszczalność powietrzna Field air permeability ($10^{-8} m^2 \cdot Pa^{-1} \cdot s^{-1}$)	kontrola reference	2,0	2,0	2,0	
	1-krotne single	6,5	183,2	285,4	484,8
	3-krotne triple	19,2	596,0	280,0	

Rędzina w stanie naturalnym zawierała przed mrożeniem $0,053 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ porów kapilarnych (mezoporów; $20, -0,2 \mu\text{m}$). W wyniku mrożenia, niezależnie od ilości przeprowadzonych cykli, nastąpił ponad siedmiokrotny wzrost wartości tej cechy do poziomu odpowiednio $0,409$ i $0,388 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Silnie zagęszczana rędzina charakteryzowała się w próbkach kontrolnych nieco wyższą od próbek ze stanu naturalnego zawartością mezoporów ($0,104 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

Po poddaniu próbek mrożeniu stwierdzono, że objętość mezoporów w silnie ugniatanej glebie po jednym cyklu mrożenia wyniosła $0,136 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i była istotnie wyższa niż dla próbek mrożonych trzykrotnie ($0,096 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$). Nie zarejestrowano natomiast różnicy między próbkami mrożonymi i kontrolnymi. Bardzo silnie zagęszczana rędzina zawierała w próbkach przed mrożeniem $0,108 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ porów kapilarnych. W wyniku trzykrotnego mrożenia nastąpił istotny spadek objętości tej grupy porów, do wartości $0,070 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Podobnie jak dla próbek silnie zagęszczanych, zmienna intensywność mrożenia spowodowała zróżnicowanie zawartości mezoporów.

Próbki ze stanu naturalnego rędziny zawierały przed mrożeniem $0,298 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ porów mikrokapilarnych (mikroporów; $< 0,2 \mu\text{m}$). Mrożenie nie miało wpływu na wartość tej cechy. Próbki poddawane zarówno silnemu, jak i bardzo silnemu naciskowi, charakteryzowały się praktycznie taką samą zawartością mikroporów, jak próbki ze stanu naturalnego. Wynosiła ona odpowiednio: $0,292$ i $0,312 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. W silnie zagęszczanych próbkach rędziny pod wpływem mrożenia zawartość omawianej kategorii porów zmniejszyła się istotnie, tym bardziej, im więcej cykli mrożenia przechodziła gleba. W bardzo silnie zagęszczanych próbkach rędziny jedynie jednokrotne mrożenie zredukowało zawartość mikroporów, do wartości $0,287 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Polowa pojemność powietrzna określa objętość porów glebowych wypełnionych powietrzem dla potencjału wody glebowej równego $-15,54 \text{ kPa}$ w stosunku do całkowitej objętości gleby. Odpowiednia aeracja gleby jest jednym z czynników warunkujących wzrost i rozwój roślin. Rędzina w stanie naturalnym miała połowę pojemność powietrzną wynoszącą w próbkach kontrolnych $0,131 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Mrożenie nie miało potwierdzonego statystycznie wpływu na wartość tej cechy. Również silny nacisk nie wywołał zmiany wartości połowej pojemności powietrznej. Dopiero pod wpływem bardzo silnego nacisku nastąpiło obniżenie wartości tej cechy o prawie $0,1$ – do $0,034 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. W próbkach silnie i bardzo silnie zagęszczanej rędziny nie stwierdzono wpływu mrożenia na wartość połowej pojemności powietrznej.

Przepuszczalność powietrzna gleby jest wskaźnikiem drożności porów, określającym potencjalne zdolności aeracyjne gleby. Charakteryzuje zdolność gleby do wymiany gazowej w sytuacji występowania różnicy ciśnień. Zależność ta stanowi też podstawę doświadczalnego wyznaczania przepuszczalności powietrznej. W ośrodku porowatym, złożonym z kapilar równoległych o jednakowym promie-

niu, przepuszczalność powietrzna (wzdłuż osi kapilar) zależy od powierzchni przekroju poprzecznego ośrodka dostępnego dla przepływu i kwadratu promienia kapilar. W przypadku ośrodka anizotropowego o zróżnicowanych porach, jakim jest gleba, przepuszczalność gazową można wyliczyć z rozkładu porów lub można ją wyznaczyć z bezpośrednich pomiarów (Marshall 1958).

Liczne prace (Domżał i in. 1980, Domżał i in. 1984, Słowińska-Jurkiewicz 1989) potwierdzają istotną zależność przepuszczalności powietrznej od stanu wysycenia gleby wodą. Przy zagęszczeniu nie przekraczającym pewnych charakterystycznych wartości dla poszczególnych gleb, w większości przypadków wyraźny wzrost przepuszczalności powietrznej następuje wówczas, gdy potencjał wody glebowej osiągnie wartości od $-9,81$ kPa do $-15,54$ kPa. W niniejszej pracy podano wyniki przepuszczalności powietrznej dla wartości potencjału wody glebowej równego $-15,54$ kPa.

Polowa przepuszczalność powietrzna rędziny w stanie naturalnym była bardzo niska i wynosiła w próbkach kontrolnych $2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (jest to najniższa wartość rejestrowana przez aparat pomiarowy). Zarówno jednokrotne, jak i trzykrotne mrożenie nie spowodowało potwierdzonych statystycznie zmian wartości tej cechy. Niemrożone próbki silnie i bardzo silnie zagęszczane charakteryzowały się identyczną, jak dla kontrolnych próbek ze stanu naturalnego, wartością przepuszczalności powietrznej. W próbkach poddanych silnemu naciskowi, pod wpływem trzykrotnego mrożenia, nastąpił wzrost przepuszczalności powietrznej; wartość tej cechy osiągnęła blisko $600 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Wzrost pojemności powietrznej gleby spowodowany odwodnieniem wywołuje niemal zawsze mniejsze lub większe zwiększenie przepuszczalności powietrznej. Natomiast spadek pojemności powietrznej związany ze wzrostem zagęszczenia gleby nie powoduje zawsze obniżenia przepuszczalności powietrznej, a często przy zmniejszeniu pojemności powietrznej następuje podwyższenie przepuszczalności powietrznej. Zazwyczaj zmiany tej cechy w funkcji zagęszczenia gleby przy wyższych wartościach potencjału wody mają przebieg zgodny ze zmianami objętości określonych grup porów (Domżał i in. 1984, Słowińska-Jurkiewicz 1989). W doświadczeniach polowych zaobserwowano stosunkowo słabą zależność przepuszczalności powietrznej od pojemności powietrznej (Turski i in. 1978). Należy zatem sądzić, że im bardziej objętość aktywnych porów glebowych będzie zbliżona do pojemności powietrznej gleby, tym silniejsza będzie zależność przepuszczalności powietrznej od pojemności powietrznej i zagęszczenia.

Dane zestawione w tabeli 2 pozwalają prześledzić skutki mrożenia niezależnie od zagęszczenia. Analizując przedstawione wyniki można zaobserwować pewne ogólne prawidłowości. Wartość porowatości ogólnej, jak wspomniano wcześniej, nie ulegała zmianom pod wpływem mrożenia, ponieważ przeprowadzono je w cylindrach o stałej objętości, co uniemożliwiało zmiany objętości gleby.

Tabela 2. Średnie wartości badanych cech dla trzech poziomów mrożenia; tymi samymi literami oznaczono pary wartości różniących się statystycznie

Table 2. Average values of studied parameters for three modes of freezing; identical letters denote pairs of statistically different data

Cecha Parameter	Poziom mrożenia – Freezing		
	kontrola reference	1-krotne single	3-krotne triple
P_O ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	0,463	0,465	0,462
		NIR (LSD) = $5,8 \cdot 10^{-3}$	
P_{MA} ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	0,072	0,060 a	0,083 a
		NIR (LSD) = $1,60 \cdot 10^{-2}$	
P_{ME} ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	0,088 a b	0,219 a c	0,185 b c
		NIR (LSD) = $1,49 \cdot 10^{-2}$	
P_{MI} ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	0,301 a b	0,281 a	0,277 b
		NIR (LSD) = $9,0 \cdot 10^{-3}$	
P_P ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	0,084	0,082	0,101
		NIR (LSD) = $2,36 \cdot 10^{-2}$	
D_p ($10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	2,0 a	158,4	298,4 a
		NIR (LSD) = 208,0	

*Objaśnienia symboli jak w tabeli 1 – Explanation of the symbols as in Table 1

Mrożenie wywołało zmiany zawartości omawianych grup porów glebowych. Nastąpiło zróżnicowanie zawartości makroporów w zależności od liczby cykli mrożenia-rozmarzania; w próbkach trzykrotnie mrożonych ich objętość była większa niż w próbkach po jednokrotnym mrożeniu i wyniosła odpowiednio $0,083 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ i $0,060 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; tym samym polepszyły się zdolności aeracyjne rędziny. Mrożenie spowodowało znaczący wzrost zawartości mezoporów. Już po jednym cyklu mrożenia i rozmarzania objętość porów kapilarnych wzrosła z $0,088$ do $0,219 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, a po trzech cyklach wyniosła $0,185 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Także w tym przypadku stwierdzono statystycznie istotne różnice między zawartością mezoporów w zależności od liczby cykli mrożenia. Pozytywnym efektem mrożenia było obniżenie zawartości mikroporów, retencjonujących wodę niedostępną dla korzeni roślin. Objętość mikroporów zmniejszyła się, w bardzo podobnym stopniu dla mrożenia jedno-, jak i trzykrotnego, spadając z $0,301$ do około $0,280 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Zastosowany nacisk, zarówno silny, jak i bardzo silny, spowodował spadek wartości porowatości ogólnej (tab. 3). Ugniatanie doprowadziło również do reorganizacji porów glebowych. Makroporowatość spadła znacząco już pod wpływem silnego

nacisku, z 0,102 dla stanu naturalnego – gleby nie poddawanej naciskowi – do $0,078 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, a nacisk bardzo silny spowodował efekt dwukrotnie silniejszy. Ugniatanie spowodowało niemal trzykrotną redukcję ilości mezoporów, przy czym skutki obu nacisków były bardzo zbliżone. Zawartość mikroporów zmalała pod wpływem silnego nacisku i nie uległa zmianie pod wpływem nacisku bardzo silnego.

Nie stwierdzono istotnego wpływu mrożenia na wartość połowej pojemności powietrznej (tab. 2). Wyraźny efekt dało natomiast bardzo silne ugniatanie, które spowodowało redukcję wartości tej cechy o około połowę (tab. 3).

Polowa przepuszczalność powietrzna wzrosła znacząco po trzech cyklach mrożenia-rozmarzania (tab. 2) oraz pod wpływem silnego ugniatania (tab. 3), co może świadczyć o takiej reorganizacji systemu porów, która znacznie poprawiła ich drożność.

Tabela 3. Średnie wartości badanych cech dla trzech zagęszczeń; tymi samymi literami oznaczono pary wartości różniących się statystycznie

Table 3. Average values of studied parameters for three compactions; identical letters denote pairs of statistically different data

Cecha Parameter	Nacisk – Compaction		
	brak uncompacted (0 kPa)	silny strong (196 kPa)	bardzo silny very strong (490 kPa)
$P_O (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	0,484 a b	0,476 a c	0,431 b c
		NIR (LSD) = $5,8 \cdot 10^{-3}$	
$P_{MA} (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	0,102 a b	0,078 a c	0,035 b c
		NIR (LSD) = $1,60 \cdot 10^{-2}$	
$P_{ME} (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	0,283 a b	0,112 a c	0,097 b c
		NIR (LSD) = $1,49 \cdot 10^{-2}$	
$P_{MI} (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	0,294 a	0,267 a b	0,297 b
		NIR (LSD) = $9,0 \cdot 10^{-3}$	
$P_P (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	0,115 a	0,097 b	0,055 a b
		NIR (LSD) = $2,36 \cdot 10^{-2}$	
$D_P (10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	9,2 a	260,4 a	189,1
		NIR (LSD) = 208,0	

*Objaśnienia symboli jak w tabeli 1 – Explanation of the symbols as in Table 1

Zmianom wywołanym przez procesy mrozowe w rędzinie sprzyjały niewątpliwie trzy czynniki: gliniasty skład granulometryczny, obecność węgla wapnia i wysycenie kompleksu sorpcyjnego jonami Ca^{2+} oraz wysoka zawartość węgla organicznego. Zależności te zaobserwowali także inni badacze (Gardner 1945, Norrish i Raussell-Colom 1962, Perfect i in. 1990, Van Vliet-Lanoë 1985).

Mało jest informacji o długotrwałości utrzymywania się stanu fizycznego, powstałego w glebach po zagęszczeniu. Badania, oceniające gęstość ugniecionych gleb, były prowadzone najczęściej przez okres krótszy niż dekada. Niemniej, większość uzyskanych danych sugeruje, że odzyskanie przez glebę jej początkowego zagęszczenia jest procesem wymagającym wielu lat, jeśli nie dekad (Shar-ratt i in. 1997). Badania zmian struktury i gęstości gleby po zagęszczeniu w funkcji czasu prowadzone były przez wielu autorów (Alakukku 1996, Etana i Håkansson 1994, Håkansson i in. 1987, Schjonning i Rasmussen 1994, Voorhees 1983). Mimo że przemarzanie gleby nie zawsze skutkuje wytworzeniem stabilnego systemu porów, a tym samym zmniejszeniem zagęszczenia, nie należy twierdzić, że nie przynosi wtedy żadnych korzyści glebom. W miejscach, gdzie w okresie zimowym tworzyły się formacje lodu, pomimo konsolidacji muszą istnieć płaszczyny naruszenia spójności gleby (Kay i in. 1985). Mechaniczne naciski wywołane wiosenną uprawą będą powodować pękanie gleby wzdłuż tych płaszczyn, ułatwiając powstawanie agregatów o zróżnicowanych rozmiarach. Ponadto prawdopodobne jest, że miejsca, w których znajdował się lód w poziomach gleby nie objętych uprawą, wykorzystywane będą przez korzenie roślin, ze względu na zmniejszony opór mechaniczny (Kay i in. 1985).

WNIOSKI

1. Mrożenie wywołało reorganizację porów glebowych w rędzinie. Efekty mrożenia były zróżnicowane w zależności od zagęszczenia gleby.
2. Pojemność powietrzna gleby nieugniatanej i ugniatanej nie ulegała zmianom pod wpływem mrożenia.
3. Najsilniejszy wzrost przepuszczalności powietrznej, a zatem największą poprawę drożności porów, zanotowano dla trzykrotnie mrożonych, silnie ugniatanych próbek rędziny.
4. Stwierdzono brak jednoznacznej korelacji między liczbą cykli mrożenia-zamarzania a intensywnością zaobserwowanych w wartościach badanych cech zmian, wywołanych przez mrożenie.

PIŚMIENNICTWO

- Alakukku L., 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. II. Long-term effects on the properties of fine-textured and organic soils. *Soil Till. Res.*, 37, 223-238.
- Domżał H., Hodara J., Słowińska-Jurkiewicz A., 1980. Zmiany przepuszczalności powietrznej gleby ugniatanej kołami ciągników i maszyn rolniczych. *Roczn. Glebozn.*, 31, 55-62.
- Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., Turski R., Hodara J., 1984. Ugniatanie jako czynnik kształtujący fizyczne właściwości gleby. *Roczn. Nauk Roln., Seria D, Monografie*, 198.

- Etana A., Håkansson I., 1994. Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load. *Soil Till. Res.* 29, 167-172.
- Gardner R., 1945. Some effects of freezing and thawing on the aggregation and permeability of dispersed soils. *Soil Sci.*, 60, 437-443.
- Gliński J., Stepniewska Z., Stepniewski W., Ostrowski J., 1992. Znaczenie warunków tlenowych gleb w programach melioracyjnych. *Problemy Agrofizyki*, 67, 65-84.
- Håkansson I., Voorhees W.B., Elonen P., Raghavan G.S., Lowery B., Van Wijk A.L., Rasmussen K., Riley H., 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil Till. Res.*, 10, 259-268.
- Kay B.D., Grant C. D., Groenevelt P.H., 1985. Significance of ground freezing on soil bulk density under zero tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 973-978.
- Krawczyk B., 1994. Średnia liczba dni bardzo mroźnych w roku (Tablica 5D). W: Atlas zasobów, walorów i zagrożeń środowiska geograficznego Polski (Red. S. Leszczycki). PAN, IGiPZ, Warszawa.
- Marshall T.H., 1958. A relation between permeability and size distribution of pores. *J. Soil Sci.*, 9, 1.
- Norrish K., Raussell-Colom J.A., 1962. Effects of freezing on the swelling of clay minerals. *Clay Miner. Bull.*, 5, 9-16.
- Perfect E., van Loon W.K.P., Kay B.D., Groenevelt P.H., 1990. Influence of ice segregation and solutes on soil structural stability. *Can. J. Soil. Sci.*, 70, 571-581.
- Raper R.L., 2005. Agricultural traffic impacts on soil. *J. Terramech.*, 42, 259-280.
- Rasmussen K., Riley H., 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil Till. Res.*, 10, 259-268.
- Schjonning P., Rasmussen K.J., 1994. Danish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Till. Res.*, 29, 215-227.
- Sharratt B.S., Voorhees W., McIntosh G., 1997. Amelioration of soil compaction by freezing and thawing. International Symposium on Physics, Chemistry, and Ecology of Seasonally Frozen Soils, Fairbanks, Alaska, 182-188.
- Słowińska-Jurkiewicz A., 1989. Struktura i właściwości wodno-powietrzne gleb wytworzonych z lessu. *Roczn. Nauk Roln., Seria D, Monografie*, 218, 76 ss.
- Stepniewski W., Gliński J., 1984. Procesy transportu gazów w glebie i skład powietrza glebowego. *Problemy Agrofizyki*, 42, 115 ss.
- Turski R., Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., 1978. Przepuszczalność powietrzna jako wskaźnik stanu fizycznego gleby. *Roczn. Glebozn.*, 29, 3-25.
- Van Vliet-Lanoë B., 1985. Frost effects in soils. [w:] Boardman, J. (Ed), *Soils and Quaternary Landscape Evolution*. Wiley, Chichester, 115-156.
- Voorhees, W.B., 1983. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating-wheel induced soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 129-133.

EFFECT OF FREEZING ON AIR PROPERTIES OF COMPACTED
MOLLIC LEPTOSOL

Maja Bryk, Beata Kołodziej, Tomasz Serzysko

Institute of Soil Science and Environmental Management, Agricultural University
ul. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin
e-mail: maja.bryk@ar.lublin.pl

Abstract. The influence of freezing processes on the air properties (porosity, air capacity, air permeability) of a compacted Mollic Leptosol derived from chalk (Sielec, Pagóry Chełmskie, cultivated field) was investigated. Soil samples for the experiment were taken from the seasoned superficial soil layer of 0-10 cm. The freezing processes caused an alteration in the differential porosity of the studied soil, related to its compaction. The strongest growth of air diffusivity – causing the greatest improvement of soil pore permeability – was observed for strongly compacted soil after 3 cycles of freezing and thawing. There was no apparent correlation between the number of freezing-thawing cycles and the intensity of changes detected in the measured properties, caused by freezing.

Key words: Mollic Leptosol, air properties, compaction, freezing