

BEATA KOŁODZIEJ, MAJA BRYK, TOMASZ SERZYSKO

WPLYW PROCESÓW MROZOWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI POWIETRZNE UGNIATANEJ GLEBY PŁOWEJ

EFFECT OF FREEZING ON AIR PROPERTIES OF COMPACTED LESSIVÉ SOIL

Instytut Gleboznawstwa i Kształtowania Środowiska, Akademia Rolnicza, Lublin

Abstract: The aim of this paper was to determine the effect of freezing on porosity and permeability of a compacted soil. Soil samples were taken from the cultivated layer of Haplic Luvisol derived from loess. The natural samples and laboratory compacted samples were subjected to the single and triple freezing. The differential porosity changed under the subzero temperature. Single freezing induced the increase in the value of field air permeability factor in the very strongly compacted soil. Less compacted soil samples (i.e. natural and strongly compacted) were affected by freezing more easily in comparison to the very strongly compacted soil.

Key words: Haplic Luvisol, air properties, compaction, freezing.

Słowa kluczowe: gleba płowa, właściwości powietrzne, ugniatanie, mrożenie.

WSTĘP

Intensywne użytkowanie gleb i związane z nim wielokrotne przejazdy ciężkiego sprzętu rolniczego powodują degradację gleby. Problemy związane z ugniataniem gleb są w świecie bardzo powszechne i mają wpływ na wiele elementów środowiska przyrodniczego [Håkansson i in. 1987; Soane, van Ouwerkerk 1994; Horn i in. 1995]. Nadmierne zagęszczenie gleby pogarsza jej stosunki wodno-powietrzne i biologiczne, przyczyniając się do zmniejszenia porowatości i wzrostu zwięzłości. Ugniatanie powoduje również zmiany w strukturze gleby, które dotyczą kształtu, wielkości oraz liczebności makroagregatów glebowych, zawartości dużych porów w tych agregatach i materiale nieagregatowym, a także upakowania cząstek elementarnych w masie glebowej. Ponadto na skutek przejazdów maszyn rolniczych po powierzchni gleby zmniejsza się objętość przestrzeni powietrznych oraz zmienia się ich kształt [Kooistra, Tovey 1994]. Jednym z naturalnych czynników wpływających na regenerację struktury gleby jest

mróz. Korzystny wpływ przemarzania na zdolność gleby do rozpadania się na agregaty po okresie zimy znany jest w praktyce rolniczej od dawna. Rolnicy starają się ułatwić penetrację mrozu poprzez wykonywanie orki zimowej w „ostrą skibę”. Między odwróconą warstwą orną a warstwą leżącą poniżej tworzy się wówczas izolacyjna warstwa powietrza. Na skutek tej izolacji, przez pewien czas, temperatury ujemne występują tylko w warstwie ornej, która zimą całkowicie przemarza, a podczas wiosennej uprawy z łatwością rozpada się na agregaty.

W niniejszej pracy dokonano oceny wpływu procesów mrozowych na wybrane właściwości powietrzne, tj. porowatość i przepuszczalność powietrzną, gleby płowej typowej, poddanej silnemu ugniataniu, w zależności od jej zagęszczenia i intensywności działania ujemnych temperatur.

MATERIAŁ I METODY

Badania przeprowadzono na glebie płowej typowej wytworzonej z lessu (Huta Turobińska, Roztocze Zachodnie, pole uprawne). Gleba o składzie granulometrycznym pyłu ilastego (1% frakcji 1–0,1 mm; 58% frakcji 0,1–0,02 mm; 41% frakcji <0,02 mm oraz 9% frakcji <0,002 mm) zawierała $8,0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ węgla organicznego oraz nie zawierała węglanów. Glebę do badań pobrano z odleżałej powierzchniowej warstwy 0–10 cm. Najpierw do metalowych cylindrów o objętości 100 cm^3 pobrano w pięciu powtórzeniach próbki o nienaruszonej strukturze. Probki te nazywane będą dalej glebą ze stanu naturalnego.

Oprócz tego z pola pobrano do 20-litrowego kontenera uśrednioną próbkę gleby o niezachowanej makrostrukturze. W laboratorium z tej gleby przygotowano próbki w metalowych cylindrach o pojemności 100 cm^3 w pięciu powtórzeniach dla każdego stanu gleby, zgodnie ze schematem doświadczenia. Probki laboratoryjne przygotowano modyfikując ich zagęszczenie i sposób mrożenia. Najpierw 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 wynoszących odpowiednio $1,37$ i $1,46 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Oznaczono wilgotność aktualną (wilgotność w momencie pobierania) dla próbek ze stanu naturalnego; wynosiła ona $0,213 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, co odpowiadało potencjałowi $\psi = -49 \text{ kPa}$ (pF 2,7). W komorach niskociśnieniowych do tej samej wartości doprowadzono wilgotności próbek laboratoryjnych.

Następnie wykonano 1- i 3-krotne mrożenie gleby zagęszczanej i ze stanu naturalnego, a część próbek pozostawiono bez mrożenia (kontrola). Mrożenie próbek prowadzono w komorze chłodniczej w temperaturze -15°C przez okres 72 godzin. Wyboru temperatury mrożenia dokonano na podstawie analizy średnich wieloletnich przebiegów temperatury na Wyżynie Lubelsko-Lwowskiej, biorąc pod uwagę najniższą temperaturę występującą rokrocznie. W rejonie pobierania próbek (Roztocze Zachodnie) 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 średnio 4–6 [Krawczyk 1994]. Rozmarzanie następowało w temperaturze pokojowej w ciągu 48 godzin.

Próbki w cylindrach wykorzystano do oznaczenia właściwości wodno-powietrznych gleby. W tym celu po końcowym rozmarznięciu zostały one doprowadzone do stanu pełnego nasycenia wodą. Następnie wykonano oznaczenie zawartości wody w glebie przy potencjale $-15,54$ kPa (pF 2,2; połowa pojemność wodna) w komorach niskociśnieniowych na porowatych płytach ceramicznych metodą Richardsa. Tę samą glebę po usunięciu jej z cylindrów wykorzystano do oznaczenia zawartości wody w glebie w stanie potencjału -1550 kPa (pF 4,2; punkt trwałego wędnięcia roślin) w komorach wysokociśnieniowych, stosując jako membranę celofan. Zawartość wody (wilgotność), po ustabilizowaniu potencjału, oznaczono grawimetrycznie, po wysuszeniu próbek glebowych w temperaturze 105°C .

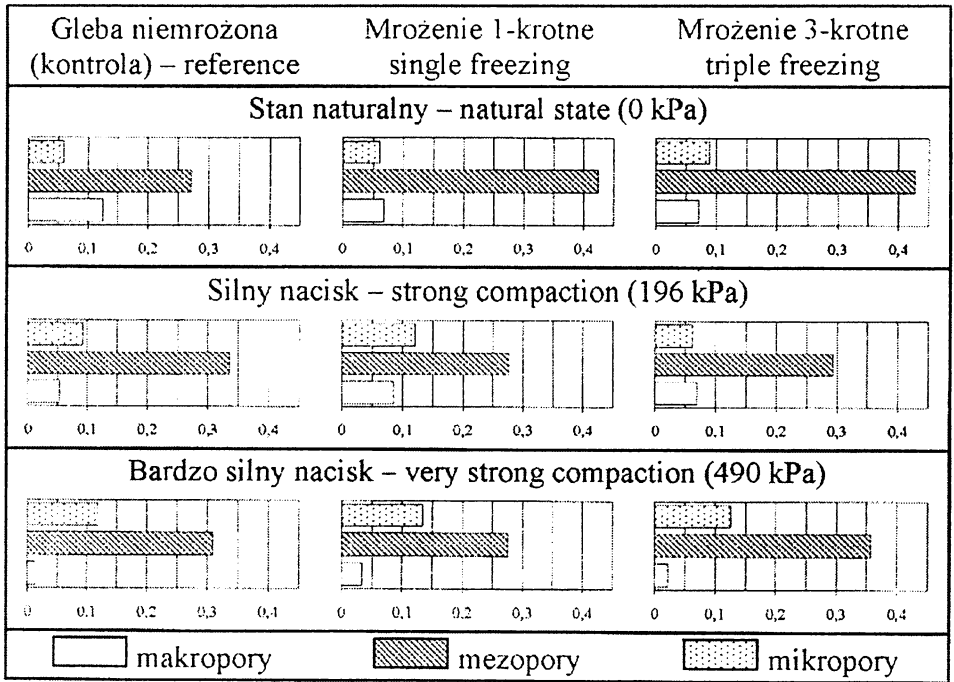
Dokonano pomiaru przepuszczalności powietrznej gleby w cylindrach przy potencjale $-15,54$ kPa, wykorzystując aparat do badania przepuszczalności mas formierskich typu LPIR-1. Pomiary prowadzone były w stałej temperaturze otoczenia ($20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$), nie wymagały zatem uwzględniania lepkości dynamicznej powietrza. Wartości przepuszczalności powietrznej gleby mieszczą się na ogół w dość szerokim zakresie (od $1 \cdot 10^{-8}$ do $5000 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) i nie tworzą rozkładu normalnego (rozkładu Gaussa), lecz rozkład asymetryczny. Konieczne zatem było sprowadzenie rozkładu wartości wyjściowych do rozkładu normalnego przez ich zlogarytmowanie. Wykorzystano logarytm dziesiętny, a zlogarytmowaniu poddano wartości przepuszczalności powietrznej po wcześniejszym podzieleniu ich przez 10^{-8} . Uzyskany w ten sposób bezwymiarowy parametr w dalszej części pracy będzie nazywany wskaźnikiem przepuszczalności powietrznej gleby.

Porowatość ogólną gleby obliczono na podstawie wartości gęstości stałej fazy gleby (oznaczonej piknometrycznie) i gęstości gleby (oznaczonej grawimetrycznie w 105°C); wyrażono ją w $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Obliczono także porowatość dyferencjalną, tj. zawartość makroporów (powyżej $20 \mu\text{m}$, odpowiadającą połowie pojemności powietrznej gleby) jako różnicę między porowatością ogólną i połową pojemnością wodną wyrażoną w $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; zawartość mezoporów (od $0,2$ do $20 \mu\text{m}$) jako różnicę między połową pojemnością wodną i wilgotnością w punkcie trwałego wędnięcia roślin wyrażoną w $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; zawartość mikroporów (poniżej $0,2 \mu\text{m}$) przyjęto jako równoważną wilgotności w punkcie trwałego wędnięcia roślin wyrażonej w $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

Dla każdej cechy wykonano analizę wariancji dla klasyfikacji podwójnej ortogonalnej (czynniki zmienności: liczba cykli zamarzania-rozmarzania i zagęszczenie) na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

WYNIKI I DYSKUSJA

Wartości badanych cech zestawiono w tabeli 1. W próbkach kontrolnych (niemrożonych) bardzo silny nacisk spowodował zmniejszenie porowatości ogólnej gleby z $0,487$ do $0,440 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Niemrożona gleba ze stanu naturalnego charakteryzowała się wysoką w porównaniu z pozostałymi próbkami zawartością makroporów: $0,125 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Silny, a także bardzo silny nacisk spowodował znaczne zmniejszenie ich objętości, jednocześnie niemal dwukrotnie wzrosła zawartość mikroporów (rys. 1). Udział mezoporów w niemrożonej glebie ze stanu naturalnego praktycznie nie zmienił się pod wpływem nacisku. Można zatem stwierdzić, że ugniatanie wywołało reorganizację systemu porów w glebie przy stosunkowo małych zmianach porowatości ogólnej.



RYSUNEK 1. Zawartość makroporów, mezoporów i mikroporów [$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$]
 FIGURE 1. Volume of macropores, mesopores and micropores [$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$]

Pod wpływem mrożenia właściwości powietrzne gleby zmieniały się w zróżnicowany sposób zależnie od zagęszczenia. Na porowatość ogólną liczba cykli mrożenia nie miała wpływu, gdyż mrożenie odbywało się w warunkach uniemożliwiających zmiany objętości gleby. Natomiast porowatość dyferencjalna (zwana również strukturą porów) ulegała zmianom pod wpływem działania ujemnych temperatur (rys. 1). W próbkach ze stanu naturalnego zarówno jednokrotne, jak i trzykrotne mrożenie wywołało obniżenie zawartości makroporów o niemal połowę. Wpływ mrozu był podobny, niezależnie od liczby cykli mrożenia-zamarzania. W próbkach silnie ugniatanych po jednokrotnym mrożeniu zawartość porów aeracyjnych wzrosła z 0,053 do 0,085 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, nie stwierdzono natomiast wpływu większej liczby cykli mrożenia na wartość omawianej cechy. Mrożenie spowodowało ujednocnienie zawartości makroporów dla gleby ze stanu naturalnego i gleby silnie ugniatanej na poziomie około 0,07 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Natomiast mrożenie gleby bardzo silnie zagęszczonej nie wywołało zmian objętości makroporów.

W glebie w stanie naturalnym jedno- i trzykrotne mrożenie wywołało zasadniczy wzrost objętości mezoporów (rys. 1). Zawartość mezoporów w próbkach silnie ugniatanych zmalała zarówno po jednym, jak i po trzech cyklach mrożenia, przy czym silniej po jednokrotnym mrożeniu. W glebie bardzo silnie zagęszczonej jednokrotne mrożenie spowodowało spadek, natomiast mrożenie trzykrotne – wzrost objętości mezoporów.

Gleba ze stanu naturalnego mrożona jednokrotnie charakteryzowała się praktycznie taką samą zawartością mikroporów, jak gleba niemrożona (rys. 1). Dopiero trzy cykle mrożenia-rozmarzania spowodowały zwiększenie objętości tych porów. W próbkach silnie ugniatanych objętość mikroporów zwiększyła się wyraźnie pod wpływem 1-krotnego i spadła pod wpływem 3-krotnego mrożenia, w podobnym stopniu w odniesieniu do stanu początkowego. Mrożenie nie miało wpływu na zawartość mikroporów w glebie bardzo silnie ugniatanej.

Przepuszczalność powietrzna gleby jest właściwością charakteryzującą zdolność gleby do wymiany gazowej w sytuacji występowania różnicy ciśnień. Jest ona wskaźnikiem drożności porów, określającym potencjalne zdolności aeracyjne gleby.

TABELA 1. Wartości badanych cech; dla każdej cechy osobno takimi samymi literami oznaczono wybrane pary danych różniących się statystycznie

TABLE 1. Values of measured parameters; for each parameter separately identical letters denote selected pairs of statistically different data

Cecha – Parameter	Poziom mrożenia Freezing	Nacisk – Compaction			NIR LSD
		stan naturalny natural state (0 kPa)	silny strong (196 kPa)	bardzo silny very strong (490 kPa)	
P _O , porowatość ogólna Total porosity [cm ³ · cm ⁻³]	kontrola – reference	0,487	0,479	0,440 ab	1,84 · 10 ⁻²
	1-krotne – single	0,494	0,482	0,441	
	3-krotne – triple	0,500	0,474	0,439	
P _{MA} , zawartość makroporów Macropore volume [cm ³ · cm ⁻³]	kontrola – reference	0,125 abde	0,053 cdf	0,014 ef	2,29 · 10 ⁻²
	1-krotne – single	0,067 a	0,085 c	0,032	
	3-krotne – triple	0,071 b	0,069	0,022	
P _{ME} , zawartość mezoporów Mesopore volume [cm ³ · cm ⁻³]	kontrola – reference	0,271 abij	0,335 cdik	0,309 fgjk	1,53 · 10 ⁻²
	1-krotne – single	0,424 a	0,276 ce	0,275 fh	
	3-krotne – triple	0,427 b	0,293 de	0,357 gh	
P _{MP} , zawartość mikroporów Micropore volume [cm ³ · cm ⁻³]	kontrola – reference	0,059 afg	0,092 cdf	0,118 g	2,62 · 10 ⁻²
	1-krotne – single	0,060 b	0,120 ce	0,134	
	3-krotne – triple	0,089 ab	0,062 de	0,126	
D _p , wskaźnik polowej przepuszczalności powietrznej Field air permeability factor	kontrola – reference	0,389	0,301 a	0,301	6,513 · 10 ⁻¹
	1-krotne – single	0,301	0,997 ab	0,320	
	3-krotne – triple	0,785	0,301 b	0,301	

Wskaźnik polowej przepuszczalności powietrznej próbek kontrolnych w stanie naturalnym praktycznie nie zmieniał się pod wpływem ugniatania (tab. 1). W próbkach gleby ze stanu naturalnego i bardzo silnie zagęszczonych nie uległ także zmianie pod wpływem mrożenia. Jedynie w przypadku próbek silnie ugniatanych jednokrotne mrożenie wywołało istotny wzrost wartości wskaźnika polowej przepuszczalności powietrznej z 0,301 do 0,997.

Zamarzanie i rozmarzanie gleby może spowodować modyfikację jej struktury ze względu na reorganizację cząstek glebowych, powstawanie płaszczyzn naruszenia spójności gleby i zmiany zagęszczenia [Eigenbrod i in. 1996; Viklander, Eigenbrod 2000]. Konsekwencją tego jest zmiana mikrostruktury gleby, co wywołuje często zmiany przepuszczalności (wodnej i powietrznej).

Uzyskane w niniejszych badaniach wyniki pozwalają stwierdzić, że zarówno pojawienie się zmian właściwości powietrznych wywołanych przez procesy mrozowe, jak i kierunek tych zmian zależały od zagęszczenia gleby i intensywności działania ujemnych temperatur. Mrożenie najsilniej wpłynęło na strukturę porów glebowych, reorganizując ich wzajemne stosunki objętościowe. Bardziej podatne na działanie mrozu okazały się próbki gleby ze stanu naturalnego oraz gleby silnie ugniatanej. Zmiany struktury gleby po bardzo silnym ugniataniu, a w konsekwencji jej właściwości powietrznych utrzymywały się, o czym świadczy stałość zmierzonych cech niezależnie od liczby cykli mrożenia-rozmarzania.

Inni autorzy badający wpływ mrożenia na gleby o podobnym składzie granulometrycznym uzyskiwali różnicowane wyniki. Florkemeier i in. [1989], badając wpływ mrozu na gleby lessowe stwierdzili, że wielokrotne cykle zamarzania i rozmarzania z zastosowaniem różnicowanych temperatur nie wywołały wzrostu porowatości. Mróz na zagęszczoną glebę wpływał rozluźniająco, na co wskazuje wzrost zawartości makroporów, nie zmniejszyła się jednak objętość mikroporów. Konrad [1989] natomiast stwierdził, że cykle mrożenia zwiększały porowatość gleby o składzie pyłu ilastego bez względu na jej stopień zagęszczenia, w związku z czym następował wzrost pionowej przepuszczalności wodnej gleby po rozmarznięciu. Zmiany te zachodziły po trzech cyklach mrożenia. Inne badania gleb o drobnym uziarnieniu wykazały, że możliwe są zmiany przepuszczalności wodnej po cyklu mrożenia-rozmarzania sięgające nawet kilku rzędów wielkości [Wong, Haug 1991; Chamberlain i in. 1990; Eigenbrod 1996], przy czym największe zmiany zachodziły po pierwszym cyklu [Othman, Benson 1993]. W glebach o małej plastyczności obserwowano jedynie niewielkie zmiany przepuszczalności wodnej. W uprawnej warstwie gleby, poddanej zamarzaniu-rozmarzaniu, zachodziła migracja najdrobniejszych frakcji, sortowanie cząstek glebowych według rozmiarów oraz ogólne zmiany struktury gleby.

WNIOSKI

1. Pod wpływem działania ujemnych temperatur przeobraziła się struktura porów glebowych (porowatość dyferencjalna) nieugniatanej i ugniatanej gleby płowej, przy czym najwyraźniej zmieniała się objętość mezoporów.

2. Połowa przepuszczalność powietrzna wzrosła jedynie w próbkach gleby silnie ugniatanej mrożonych jednokrotnie.
3. Gleby o mniejszym zagęszczeniu (tj. gleba ze stanu naturalnego i gleba silnie ugniatana) łatwiej niż gleba bardzo silnie ugniatana poddawały się działaniu mrozu.

LITERATURA

- CHAMBERLAIN E., ISKANDAR I., HUNSICKERT S.E. 1990: Effect of freeze-thaw cycles on the permeability and macrostructure of soils. W: Cooley K.R. (red.) CRREL, Hanover, NH, USA, Proc. International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agriculture, Range, and Forest Lands, Washington DC, USA: 145–155.
- EIGENBROD K.D. 1996: Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils. *Canad. Geotech. J.* **33**: 529–537.
- EIGENBROD K.D., KNUTSSON S., SHENG D. 1996: Pore water pressures in freezing and thawing fine-grained soils. *J. Cold Regions Engineering* **10**: 76–92.
- FLORKEMEIER H., FREDE H. G., MEYER B. 1989: Lockerung dichter Aggregate loessgebürtiger Boden durch Frost. *Mitteil. der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **59**: 145–150.
- 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 Tillage Res.* **10**: 259–268.
- HORN R., DOMZAŁ H., SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ A., VAN OUWERKERK C. 1995: Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Tillage Res.* **35**: 23–36.
- KONRAD J. M. 1989: Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts. *Cold Regions Science and Technology* **16**: 291–303.
- KOOISTRA M. J., TOVEY N. K. 1994: Effects of compaction on soil microstructure. W: B. D. Soane and van Ouwerkerk (eds) *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam: 91–112.
- KRAWCZYK B. 1994: Średnia liczba dni bardzo mroźnych w roku (Tablica 5D). W: Atlas zasobów, walorów i zagrożeń środowiska geograficznego Polski. S. Leszczycki (red.) PAN, IGiPZ, Warszawa.
- OTHMAN M.A., BENSON C.H. 1993: Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay. *Canad. Geotechn. J.* **30**: 236–246.
- SOANE B. D., VAN OUWERKERK C. 1994: Soil compaction problems in world agriculture. W: B. D. Soane, van Ouwerkerk (eds), *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam: 1–21.
- VIKLANDER P., EIGENBROD D. 2000: Stone movements and permeability changes in till caused by freezing and thawing. *Cold Regions Science and Technology* **31**: 151–162.
- WONG L.C., HAUG M.D. 1991: Cyclical closed-system freeze-thaw permeability testing of soil liner and cover material. *Canad. Geotechn. J.* **28**: 784–793.

Dr inż. Beata Kołodziej
Instytut Gleboznawstwa i Kształtowania Środowiska AR
ul. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin
e-mail: beata.kolodziej@ar.lublin.pl
e-mail: maja.bryk@ar.lublin.pl