



**Analiza jednostkowych nacisków kół pojazdów i maszyn rolniczych na glebę  
w aspekcie jej ochrony przed nadmiernym zagęszczeniem**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Kinga Śnieg

PROMOTOR: dr hab. inż. Dariusz Błażejczak, prof. ZUT

Szczecin 2021

# Spis treści

|                                                                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Wykaz ważniejszych oznaczeń .....                                                                                           | 3         |
| <b>1. Wstęp i cel pracy .....</b>                                                                                           | <b>4</b>  |
| <b>2. Analiza stanu zagadnienia w świetle literatury .....</b>                                                              | <b>5</b>  |
| <b>2.1. Problem nadmiernego zagęszczania gleb.....</b>                                                                      | <b>5</b>  |
| <b>2.2. Obciążenia kół i naciski jednostkowe wywierane na glebę .....</b>                                                   | <b>7</b>  |
| <b>2.3. Dopuszczalne obciążenia kół i naciski jednostkowe wywierane na glebę a naprężenia w jej warstwie podornej .....</b> | <b>9</b>  |
| <b>2.4. Rozkład naprężeń w glebie a naprężenie graniczne.....</b>                                                           | <b>10</b> |
| <b>3. Założenia badawcze i zakres pracy .....</b>                                                                           | <b>13</b> |
| <b>4. Omówienie wyników badań przedstawionych w cyklu publikacji .....</b>                                                  | <b>15</b> |
| <b>5. Podsumowanie i wnioski.....</b>                                                                                       | <b>35</b> |
| <b>Bibliografia .....</b>                                                                                                   | <b>39</b> |
| <b>Streszczenie .....</b>                                                                                                   | <b>46</b> |
| <b>Abstract .....</b>                                                                                                       | <b>47</b> |
| <b>Cykl Publikacji .....</b>                                                                                                | <b>48</b> |
| <b>Załącznik 1- Oświadczenie o wkładzie autora w powstanie poszczególnych artykułów</b>                                     |           |

## Wykaz ważniejszych oznaczeń

- $\rho_d$  – gęstość objętościowej szkieletu gleby  
 $\rho_{ds}$  – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gleby oznaczona metodą Proctora  
 $\rho_{dm}$  – gęstość objętościowa szkieletu gleby obliczona modelem – wielomianem opisującym punkty doświadczalne w teście Proctora  
 $\rho_n$  – gęstość objętościowa naturalna  
 $\rho_{dp}$  – gęstość objętościowa uzyskana dla poszczególnych wartości wilgotności ( $w_s$ )  
 $P_d$  – gęstość objętościowa części mineralnych (packing density)  
 $P_m$  – nacisk formowania próbki  
 $P_{pm+0,05}$  – nacisk jednostkowy na próbkę, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_{dm} + 0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$   
 $P_{pm+0,10}$  – nacisk jednostkowy na próbkę, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_{dm} + 0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$   
 $P_{\rho dp}$  – nacisk jednostkowy wywierany na próbkę gleby w teście jednoosiowego ściskania  
 $P_{\rho d+0,05}$  – nacisk jednostkowy na próbkę o nienaruszonej strukturze, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_d + 0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$   
 $P_{\rho d+0,10}$  – nacisk jednostkowy na próbkę o nienaruszonej strukturze, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_d + 0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$   
 $P_{\rho ds}$  – nacisk jednostkowy na próbkę, przy którym uzyskano gęstość równą maksymalnej gęstości ( $\rho_{ds}$ ) oznaczonej w teście Proctora  
 $\rho_{dj}$  – gęstość uzyskana w teście jednoosiowego ściskania  
 $w_a$  – wilgotność aktualna gleby  
 $w_{opt}$  – wilgotność optymalna gleby  
 $w_s$  – wilgotność próbki  
 $\Delta H_{+0,05}$  – odkształcenie próbki, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_{dm} + 0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$   
 $\Delta H_{+0,10}$  – odkształcenie próbki, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_{dm} + 0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$   
 $NS$  – próbka gleby o nienaruszonej strukturze  
 $P_L$  – granica plastyczności  
 $L_L$  – granica płynności  
 $S_c$  – opór ścinania gleby w ruchu obrotowym  
 $Z_w$  – zwięzłość gleby  
 $NP$  – Nowy Przylep  
 $Ob$  – Obojno  
 $Os$  – Ostoja  
 $Ku$  – Kurcewo  
 $Re$  – Reńsko  
 $Sk$  – Skarbimierzyce  
 $W$  – wiosenne zabiegi uprawowe  
 $J$  – jesienne zabiegi uprawowe  
 $pyg$  – pył gliniasty  
 $gz$  – glina zwykła  
 $gpyi$  – glina pylasto-ilasta  
 $ipy$  – il pylasty  
 $gl$  – glina lekka  
 $gpi$  – glina piaszczysto-ilasta  
 $gi$  – glina ilasta  
 $pyi$  – pył ilasty  
 $\delta_p$  – błąd względny prognozy

## 1. Wstęp i cel pracy

Nadmierne zagęszczanie gleb przez mechanizmy jezdne maszyn i pojazdów rolniczych, powodujące niekorzystne zmiany właściwości gleby, to jeden z istotnych problemów rolnictwa. Aktualne stosowane technologie uprawy roli i roślin, powiązane są często z użytkowaniem coraz cięższych agregatów ciągnikowych, stąd też ograniczenie wartości nacisków jednostkowych wywieranych na glebę przez mechanizmy jezdne jest trudne do zrealizowania. Jednym z rozwiązań tego problemu jest poszukiwanie możliwości dostosowania wartości nacisków, wynikających z charakterystyki zastosowanego pojazdu, odpowiednio do aktualnego wytrzymałościowego stanu danej gleby, tak aby nie powodować jej nadmiernego zagęszczenia, szczególnie w warstwie podornej.

W literaturze przedmiotu zauważa się potrzebę opracowania metody określania nacisków dopuszczalnych wykorzystującej znajomość naprężenia granicznego gleby. Wyznaczana wartość tego naprężenia, co udowodniono w różnych eksperymentach, zależy jednak nie tylko od rodzaju i stanu gleby lecz również od zastosowanej procedury jego wyznaczania. Poszukuje się zatem takiego sposobu wyznaczania naprężenia granicznego, który byłby ogólnie akceptowalny i możliwy do zweryfikowania w różnych warunkach. Złożoność środowiska glebowego i jego reakcja na obciążenia oraz wymogi uzyskania odpowiedniej jakości danych wyjściowych powodują, że prace te prowadzone są głównie w warunkach laboratoryjnych, często z wykorzystaniem próbek modelowych.

Trudności z pomiarem naprężenia granicznego sprawiają, że istnieje potrzeba opracowania, na użytek dobrych praktyk rolniczych, uproszczonego modelu prognozowania naprężenia granicznego gleby i odpowiadających mu wartości jednostkowych nacisków kół pojazdów i maszyn rolniczych na glebę, w aspekcie jej ochrony przed nadmiernym zagęszczeniem. Uzyskane dotychczas modele empiryczne prognozowania naprężenia granicznego gleby, ze względu na ich ograniczenia, nie znalazły szerszego zastosowania. Powodem były zarówno niedoskonałości istniejących procedur wyznaczania naprężenia granicznego, jak i złożoność środowiska glebowego oraz jego zmienna reakcja na zadawane obciążenia. Należy stwierdzić, że zasadne jest zatem zaproponowanie innego podejścia do rozwiązania tego zagadnienia. Taką próbę podjęto w niniejszej pracy.

**Zasadniczym celem pracy** było zaproponowanie uproszczonego sposobu prognozowania naprężeń granicznych, będących podstawą oceny nacisków jednostkowych wywieranych na glebę przez koła pojazdów i maszyn rolniczych, na potrzeby przeciwdziałania dalszemu zagęszczaniu warstwy podornej.

## **2. Analiza stanu zagadnienia w świetle literatury**

### **2.1. Problem nadmiernego zagęszczania gleb**

Nadmierne zagęszczanie gleb to znany od wielu lat i ciągle nierozwiązany jeden z poważniejszych problemów rolnictwa (Soane i van Ouwerkerk, 1994; Håkansson i in., 1995; Van den Akker i in., 2003; Dawidowski i Walczykova, 2011; Schjønning i in., 2015; Keller i in., 2019). Za główną przyczynę powstawania nadmiernego zagęszczania gleb uważa się ugniatające oddziaływanie mechanizmów jednych maszyn i pojazdów rolniczych. Nierzadkie są przykłady upraw, gdzie ciągnik przejeżdża w przeliczeniu na hektar ponad 100 km rocznie, niejednokrotnie po tym samym śladzie (Stasiak, 2003). W wielu stosowanych technologiach uprawy roli i roślin sumaryczna powierzchnia śladów kół jest kilkakrotnie większa od powierzchni pola (Walczyk, 1995; Błażejczak, 2010). Ponadto obciążenie kół niektórych maszyn rolniczych przekracza maksymalny nacisk określony dla pojazdów drogowych (Szeptycki, 2003).

O nadmiernym zagęszczaniu mówi się wtedy, gdy dochodzi do niekorzystnych zmian właściwości gleby (Soane i van Ouwerkerk, 1994; Poniatowska, 2003). Narastające, nadmierne zagęszczenie gleby prowadzi do zwiększenia gęstości i wytrzymałości gleby (Lebert i Horn, 1991; Arvidsson, 2001), zmniejszenia porowatości gleby, zmiany kształtu porów i rozkładu ich wielkości (Pagliai i in., 2003), zmniejszenia aeracji gleby (Czyż i in., 2013), zmniejszenia infiltracji wody (Kulli i in., 2003). Powoduje zwiększony spływ wód opadowych, co w konsekwencji prowadzi do zwiększonej erozji wodnej (Fleige i Horn, 2000) oraz sprzyja przedostawaniu się do cieków i zbiorników wodnych pestycydów i nawozów (Alakukku, 1996). Nadmierne zagęszczenia gleby pogarsza warunki rozwoju korzeni roślin (Gysi, 2001). Prowadzi do niekorzystnych, długotrwałych zmian struktury gleby oraz innych jej właściwości, w tym wzrostu jej wytrzymałości (Eckelmann i in., 2006; Dawidowski i Walczykova, 2011), co powoduje zwiększenie zapotrzebowania na siłę uciągu maszyn do uprawy gleby, a zatem również zwiększa emisję szkodliwych spalin, oraz zwiększa zużycie elementów roboczych (Oskoui i Voorhees, 1991). W warunkach nadmiernego zagęszczenia obserwuje się gorsze wykorzystywanie przez rośliny nawozów (Heyder i in., 1985) oraz wzrost zapotrzebowania na środki ochrony roślin, wynikający z niedostatecznego ich odżywiania, co pogarsza ich odporność na choroby i zmniejsza ich konkurencyjność w stosunku do chwastów (Börner, 1990). Zmiany wywołane nadmiernym zagęszczeniem gleby prowadzą w efekcie do

zmniejszenia plonowania roślin (Hadas i in., 1990; Bicki and Siemens, 1991; Wojtasik, 1995, Arvidsson, 2001), wzrostu kosztów produkcji (Oskoui i Voorhees, 1991) oraz wpływają ujemnie na środowisko.

Autorzy różnych publikacji (Dawidowski i Walczykova, 2011; Keller i in., 2019) podkreślając istotność problemu nadmiernego ugniatania gleb przytaczają wyniki Oldemana i in. (1991), którzy oszacowali, że w Europie areał gleby zdegradowanej wskutek jej nadmiernego zagęszczenia wynosi 33 miliony ha. Birkas (2008) podaje, że w siedmiu krajach Europy Wschodniej nadmierne zagęszczenie gleby, spowodowane działalnością człowieka, dotknęło około 37,5% spośród 54 milionów hektarów gruntów rolniczych. Według Krasowicza i in. (2011) łączna powierzchnia gleb średnio i wysoce narażonych na nadmierne zagęszczenie w Polsce stanowi od 2,6 do 3,7 mln ha, a do gleb szczególnie podatnych na skutki ugniatania należą gliny ciężkie, łąły oraz gliny lekkie.

Niebezpieczne jest przede wszystkim nadmierne zagęszczanie warstwy podornej, ponieważ skutki ugniecenia tej warstwy są długotrwałe (Peng i Horn, 2008), zaś jego likwidacja poprzez głębokie spulchnienie jest energochłonna i często bywa nieskuteczna (Szeptycki, 2003). Ocenia się, że ponad 30% powierzchni użytków rolnych jest bardzo podatnych na zagęszczanie tej warstwy (Van den Akker i in., 1999). Ponadto warstwa podorna jest ważna z punktu widzenia ekosystemu glebowego, który determinuje plonowanie roślin (Lynch i Wojciechowski, 2015). Andersen i in. (2013) stwierdzili, że nadmierne zagęszczenie warstwy podornej redukuje dostępność wody glebowej w strefie rozwoju korzeni roślin. Nadmierne zagęszczona warstwa podorna gleby sprzyja zatem powstawaniu warunków beztlenowych w latach mokrych oraz stwarza złe warunki rozwoju korzeni roślin w latach suchych. Należy dodać, że zmiany zagęszczenia zachodzące w warstwie ornej, poddawanej zabiegom uprawowym, mają natomiast inny charakter. W tej warstwie w czasie roku zmienia się struktura i zagęszczenie gleby (Håkansson, 1994; Allakukku, 1996).

Dotychczasowe wyniki badań nadmiernego zagęszczania gleby pozwoliły na opracowanie zaleceń, które stanowią uproszczone kryteria dla podejmowania decyzji w sprawie wyboru systemu zapobiegania temu zjawisku (Dawidowski i Walczykova, 2011). W celu przeciwdziałania lub ograniczania nadmiernego ugniatania gleb zaleca się m.in.: ograniczenie wartości nacisków wywieranych na glebę przez mechanizmy jezdne pojazdów rolniczych, uprawę gleby przy optymalnej wilgotności uprawowej, zmniejszenie liczby przejazdów przez maszyny rolnicze, ograniczenie ruchu pojazdów do niektórych obszarów pola (ruch kontrolowany), zwiększenie zawartości materii organicznej, głębokie spulchnianie gleby, stosowanie płodozmianu obejmującego rośliny głęboko korzeniące się, a także stosowanie

odpowiedniego nawożenia roślin (Hamza i Anderson, 2005). Problem nadmiernego zagęszczania gleb, ze względu na ich naturalną zmienność, złożoność procesów w niej zachodzących oraz uwarunkowania ekonomiczne i biologiczne wymuszające działania niezgodne z ww. zaleceniami, nie został dotychczas rozwiązany. Przykładem takiego działania może być zwiększanie obciążenia koła, które zwiększa zagęszczenie gleby lecz ma pozytywny wpływ na uzyskiwaną siłę trakcyjną (Piecarka i in., 2018).

## **2.2. Obciążenia kół i naciski jednostkowe wywierane na glebę**

Problem nadmiernego zagęszczania gleb nie traci na znaczeniu m.in. z powodu ciągle zwiększających się mas maszyn i pojazdów rolniczych oraz stosowania w nich coraz większych zbiorników na płody rolne i środki produkcji. Schjønning i in. (2015) podają, że obciążenia kół na przedniej osi dla typowych kombajnów w Danii w latach 1958–2009 wzrosły z około 15 do prawie 90 kN. Vermeulen i in. (2013) oszacowali, że typowe obciążenia kół przy stosowaniu gnojowicy w Holandii wzrosły z około 35 w roku 1980 do 56 kN w 2010 r. Obciążenie kół ciągników wzrosło w latach 1960–2000 z około 15 do 40 kN (Keller i in., 2019). Szeptycki (2003) podkreśla, że obciążenie kół niektórych maszyn rolniczych, pracujących przy pełnym obciążeniu, osiąga poziom 130 kN, przekraczając znacznie maksymalny nacisk określony dla pojazdów drogowych. Należy dodać, że maksymalne dopuszczalne obciążenie przypadające na pojedynczą oś nie napędową pojazdu, poruszającego się po drodze publicznej, w Polsce wynosi 100 kN (Dz.U. nr 32, poz. 262. 2003 ze zm.). Schjønning i in. (2015) wykazali, że ewolucja powierzchni styku opony z glebą nie nadąża za ewolucją obciążeń kół, ponieważ przy sześciokrotnym wzroście obciążenia koła w okresie 50 lat wzrost powierzchni styku gleby z oponami zwiększył się jedynie 3,5 raza, co powoduje wywieranie na gleby coraz większych nacisków jednostkowych. Naciski jednostkowe wywierane przez aktualnie stosowane maszyny mogą zatem przekraczać wytrzymałość wielu gleb uprawnych (Horn i Fleige, 2003; Schjønning i in., 2015).

Należy jednak zauważyć, że jednoznaczne określenie czym jest nacisk jednostkowy wywierany kołem na glebę, nastręcza duże trudności. Pojęcie to nie jest standaryzowane (Burt i in., 1990) i nie ma jednolitego sposobu jego określania (Walczyk, 1995; Jurga, 2008). Określenie wartości nacisku wywieranego kołem na glebę było w przeszłości przedmiotem licznych badań. Według Fekete (1977) nacisk ten zmienia się od zera, na obrzeżu opony, do wartości maksymalnej w środkowej i tylnej części powierzchni styku z glebą. Inni autorzy badając ten problem podają, że nacisk występow bieżnika jest 1,5 do 2,5 raza większy od wartości nacisku średniego. Söhne (1958) przedstawił zależność, według której nacisk

maksymalny, w zależności od rodzaju podłoża (twarde, suche, miękkie, mokre miękkie), jest od około 1 do 2 razy większy od nacisku średniego. Grecenko (1963) podał, że średni nacisk jednostkowy opon rolniczych na podłożu twardym wynosi 1,5, a na podłożu miękkim 1-1,4 razy więcej od ciśnienia powietrza w ogumieniu, dla ciśnień w zakresie 80-100 kPa. Z badań Burt'a i in. (1989) wynika, że średni nacisk opony na twardym podłożu zbliżony jest do wartości ciśnienia w ogumieniu, a iloraz obciążenia koła i powierzchni styku koła z podłożem glebowym zbliżony jest do połowy wartości ciśnienia w ogumieniu, niezależnie od typu gleby i warunków glebowych. Schjønning i in. (2008) podali, że maksymalne wartości nacisku koła utrzymują się na poziomie o około 90 kPa większym od ciśnienia powietrza w ogumieniu.

Najczęściej wartość nacisku jednostkowego oblicza się z ilorazu statycznego obciążenia koła i powierzchni jego styku z glebą. Należy dodać, że w takim przypadku powinien być podany sposób wyznaczania powierzchni zetknięcia koła z glebą. Jest to istotne ponieważ istnieje wiele sposobów wyznaczania tej powierzchni (Błaszczewicz, 1997; Jurga, 2008). Dla prawidłowego wyznaczenia nacisku jednostkowego jest ważne także uwzględnienie zmian reakcji (obciążenia koła) w zależności od warunków pracy i rodzaju agregatu ciągnikowego (Walczyk, 1995).

Przeprowadzone dotychczas badania wskazały, że naciski jednostkowe wywierane na glebę przez koła pojazdów i maszyn rolniczych są zróżnicowane. Pomimo ciągłego postępu w konstruowaniu maszyn i pojazdów rolniczych wiele z nich ciągle wywiera naciski podawane wcześniej przez Byszewskiego i Hamana (1977), tj. najczęściej w przedziale od 100 do 350 kPa. Potwierdzają to badania wykonane m.in. przez Walczyk (1995) lub Jurgę (2009). Walczyk (1995) uwzględniając zmienny rozkład sił w agregacie ciągnikowym wykazała, że naciski jednostkowe, zależnie od wielkości ciągnika i zagregatowanego z nim narzędzia lub maszyny, wynosiły od około 10 do 300 kPa. Przy czym do obliczania pola styku koła z glebą zastosowała empiryczną zależność iloczynu średnicy koła i szerokości opony. Jurga (2009) wykonując badania na grupie 8-miu różnych ciągników uzyskał, że zależnie od rozmiaru opony, obciążenia koła, głębokości koleiny i ciśnienia w ogumieniu, wartość nacisku jednostkowego wynosiła od 38 do 162 kPa. Rezultaty te otrzymano mierząc pole powierzchni styku koła z glebą metodą pośrednią, określając ślad odcisku opony po przejeździe ciągnika, za pomocą szablonu wykonanego z przezroczystej folii. W tym przypadku wartości nacisków jednostkowych wynosiły od około 0,30 do 1,00 wartości ciśnienia w ogumieniu.

## **2.3. Dopuszczalne obciążenia kół i naciski jednostkowe wywierane na glebę a naprężenia w jej warstwie podornej**

Wywieranie na powierzchnię gleby nacisków przez koła pojazdów skutkuje powstawaniem w niej określonego stanu naprężeń, który może powodować negatywne zmiany w postaci wzrostu jej zagęszczenia. Zwykle zasięg występowania negatywnych zmian w glebie, nawet w warunkach znacznego jej uwilgotnienia, nie przekracza głębokości 60 cm (Poodt i in., 2003; Keller i in., 2002; Keller i Arvidsson, 2004; Olsen, 1994). Stwierdzana przez różnych autorów głębokość występowania negatywnych zmian zagęszczenia była różna i zależała od różnych czynników. Pytka (2005) uzyskał, że ciśnienie napompowania opon miało znaczący wpływ na naprężenie w glebie mierzone do głębokości 30 cm. Na głębokości 50 cm nie stwierdził natomiast znaczącej różnicy naprężeń pionowych między różnymi ciśnieniami powietrza w oponach. Wyniki te są zgodne z Arvidsson i in. (2002), którzy donieśli o znacznych różnicach naprężeń z powodu zmieniającego się ciśnienia w oponach na głębokości 0,3 m, ale nie głębiej. Danfors (1990) stwierdził, że przy nacisku koła, wynoszącym 40-60 kN, zmniejszenie ciśnienia w ogumieniu ze 150 do 100 lub nawet 50 kPa ogranicza jedynie w niewielkim stopniu zagęszczenie gleby znajdującej się na głębokości od 30 do 50 cm. Filipovic i in. (2016) mierzyli naprężenia w gruncie na głębokościach 10, 30 i 50 cm. Stwierdzili, że maksymalne naprężenia w warstwie ornej były istotnie większe od zmierzonych w warstwie podornej. Przy czym na głębokości 50 cm wartości te wynosiły, zależnie od ciśnienia w ogumieniu, od około 11 do 20% naprężenia zmierzonego na głębokości 10 cm. Keller i in. (2019) przeprowadzili symulacje i stwierdzili, że głębokość, na której osiąga się naprężenie pionowe 50 kPa, wzrosła z około 0,25 m w 1940 r. do około 0,75 m w 2010 r.

Z punktu widzenia ochrony warstwy podornej ważnym zagadnieniem jest opracowanie praktycznej metody pomiaru przejezdności (trafficability), rozumianej jako tolerancja na mechaniczną nośność gleby bez negatywnego wpływu na jej strukturę (Sommer i in., 2003). Opracowanie takiej metody jest trudne, ponieważ w zależności od rodzaju i stanu gleby ten sam nacisk powoduje różne jej zagęszczenie i różne zmiany porowatości. Według Söhne (1969) porowatość gleby gliniastej ulega znacznemu zmniejszeniu przy przekroczeniu nacisku jednostkowego na glebę 98,1 kPa. Sitkei i Fekete (1975) stwierdzili, że na glinie piaszczystej i glinie pylastej przekroczenie nacisków 78,5 kPa powoduje znaczny wzrost gęstości gleby. Na glebach piaszczystych stosowanie nacisków 49,0-98,1 kPa, a nawet większych, wywołuje niewielkie zmiany gęstości gleby (Trzecki, 1972). Przytaczane w pracach Tijink i in. (1995) i Tijink (1998) dopuszczalne naciski na powierzchni styku koła z glebą powinny mieścić się

w granicach 50-180 kPa (wiosna) i 80-210 kPa (lato/jesień). Spoor i in. (2003) analizując m.in. wyniki Tijinka i in. (1995), podają dla praktyki, że wartość 50 kPa odnosi się do unikania zagęszczenia gleby podczas sezonu wegetacyjnego w wilgotnych warunkach, a wartość 100 kPa, gdy gleba zyskała na wytrzymałości podczas wysychania i osiadania.

W niektórych opracowaniach proponuje się stosowanie granicznych wartości składowej pionowej naprężenia normalnego w glebie na konkretnej głębokości. Przestrzeganie ich ma chronić glebę przed dalszym zagęszczaniem. W przypadku dopuszczalnych wartości naprężenia w glebie, konkretne limity naprężeń w glebie na głębokości 0,5 m podał Rusanov (1994), które mieszczą się w zakresach 25-35 kPa (wiosna) i 30-50 kPa (lato/jesień). Podane wartości uzależnia się od stanu nasycenia gleby wodą. Schjønning i in. (2012), na podstawie pomiarów Kellera i in. (2012) zaproponowali naprężenie pionowe wynoszące 50 kPa na głębokości 0,5 m jako przybliżoną granicę, powyżej której należy spodziewać się odkształcenia plastycznego w podłożu podczas ugniatania gleb ornych kołami przy wilgotności zbliżonej do polowej pojemności wodnej. Niektórzy autorzy wiążą także nośność podłoża z dopuszczalnym obciążeniem koła. Według badań holenderskich (Tijink i in., 1995; Tijink, 1998), w warunkach kiedy nośność gleby przekracza 100 kPa, można obciążać koła ciągnika i środka transportu rolniczego siłą 50 kN, pod warunkiem, że jest ono wyposażone w oponę niskociśnieniową, o nacisku jednostkowym wynoszącym w przybliżeniu około 100 kPa. W przypadku kombajnów wyposażonych w zbiorniki dopuszcza się w takich warunkach obciążenie koła siłą 75 kN, pod warunkiem wyposażenia kombajnu w odpowiednie, dla tych obciążeń, ogumienie.

## **2.4. Rozkład naprężeń w glebie a naprężenie graniczne**

Przewidywanie wpływu obciążeń przyłożonych na powierzchni gleby na jej zagęszczenie na danej głębokości, wymaga znajomości modeli rozchodzenia się i rozkładu naprężeń w glebie, a także zależności wiążących naprężenia z odkształceniami (Nowowiejski 2004).

Zagadnienie rozkładu oraz wielkości naprężeń powstałych w glebie pod wpływem oddziaływania kół pojazdów rolniczych było przedmiotem wielu badań (Wulfson, 2002; Jakliński, 1999; Nowowiejski, 2004; Stasiak, 2008; Söhne, 1970; Sołtyński, 1966; Nowowiejski i in., 2005; Horn i Fleige, 2000; Olsen, 1994; Dawidowski i in., 2006). Obszerne omówienie różnych modeli zagęszczenia można znaleźć w pracy Johnson'a i Bailey'a (2002). Rozkład naprężeń występujących w glebie podczas przejazdu pojazdów rolniczych przedstawiany jest w literaturze najczęściej za pomocą izobar. Wspomniane izobary wprowadził Söhne (Söhne, 1951, 1953). Opracowywane modele opisujące propagację naprężeń pozwalają, również w przypadku uwzględnienia istnienia tzw. podeszwy płuźnej

(Jakliński i Pilarczyk, 2008), na obliczenie wartości naprężenia na danej głębokości, jednak nie udzielają odpowiedzi na pytanie: czy obliczone naciski mogą powodować wzrost zagęszczenia gleby? Do udzielenia odpowiedzi na tak postawione pytanie potrzebna jest znajomość maksymalnej, dopuszczalnej wartości naprężenia. Za taką wartość referencyjną uważa się wartość naprężenia granicznego gleby (Błażejczak, 2010; Śnieg, 2012).

Naprężenie graniczne jest wskaźnikiem wytrzymałości i stabilności mechanicznej gleby (Lipiec i Hatano, 2003). Obciążenie gleby wywołujące mniejsze naprężenia niż naprężenie graniczne gleby powoduje głównie odkształcenia sprężyste, natomiast większe obciążenia zwiększają zagęszczenie gleby (Koolen i Kuipers, 1983). Informacja o wartości tego naprężenia w dowolnym punkcie (głębokości) warstwy podornej pozwala, w połączeniu ze znajomością rozkładu naprężeń, opisanych wybranym modelem, na prognozowanie wartości obciążeń mechanizmów jezdnych, których przekraczanie stwarza zagrożenie wzrostu zagęszczenia gleby (Błażejczak, 2010; Horn i Fleige, 2003; Van den Akker, 2004). Poza tym znajomość tego naprężenia i właściwości fizycznych gleby jest przydatnym narzędziem do udzielania rekomendacji dotyczących zrównoważonego użytkowania gruntów (Horn i Fleige, 2000) lub oceny zmian, w kontekście rozwiązań prawnych, ukierunkowanych na ochronę gleb (Lebert i in., 2007).

Utylitarne znaczenie naprężenia granicznego sprawia, że parametr ten jest przedmiotem badań w wielu ośrodkach na całym świecie. Jednak złożoność środowiska glebowego i jego reakcja na obciążenia powodują, że dotychczas nie opracowano ogólnie akceptowalnej i zweryfikowanej standardowej metody wyznaczania naprężenia granicznego (Błażejczak, 2010). Stosowane dotychczas metody doświadczalne są pracochłonne i często wymagają dużego doświadczenia oraz specjalistycznej wiedzy (Śnieg, 2012). Zwraca się przy tym uwagę na fakt, że wartość naprężenia granicznego zależy nie tylko od właściwości gleby lecz także metody jego określania a istniejące metody cechuje subiektywny wpływ badacza na wynik pomiaru (Lebert i in., 1989; Arvidsson i Keller, 2004; Keller i in., 2004; Błażejczak, 2010; Śnieg, 2012). Niezbędne dane, do wyznaczenia naprężenia granicznego, uzyskuje się w procesie jednoosiowego zagęszczania gleby przy pomocy edometru lub maszyny wytrzymałościowej, a pomiary prowadzone są na próbkach modelowych lub o tzw. nienaruszonej strukturze, w warunkach niemożliwej lub możliwej rozszerzalności bocznej gleby (Błażejczak, 2010). W dobie rolnictwa precyzyjnego zasadne byłoby wyznaczanie naprężenia granicznego bezpośrednio w warunkach polowych. W przeszłości podejmowano takie próby (Alexandrou i Earl, 1995; Mosaddeghi i in., 2006; Dawidowski i in., 2001). W tym przypadku warunki prowadzenia badań powodują jednak trudności w uzyskaniu danych

o odpowiedniej jakości, które pozwoliłyby na wyznaczenie tego naprężenia (Błażejczak, 2010), co może tłumaczyć zainteresowanie badaniami prowadzonymi w warunkach laboratoryjnych. Należy podkreślić, że badania laboratoryjne wykonywane na próbkach modelowych, pomimo iż dają możliwość powtarzalności warunków pomiarów, to mogą dawać wyniki odmienne od tych uzyskiwanych na próbkach o tzw. nienaruszalnej strukturze (Horn i Lebert, 1994). Istnieje zatem potrzeba poszukiwania również przełożenia (przelicznika) pomiędzy wynikami uzyskiwanymi na próbkach modelowych, a tymi otrzymywanymi na próbkach o tzw. nienaruszonej strukturze.

Podjęmowane są także próby opracowania modelu służącego do prognozowania naprężenia granicznego gleby. Złożoność środowiska glebowego sprawia, że tworzone modele mają postać empirycznych równań regresji. Praktyczne wykorzystanie takich równań bywa kłopotliwe i pracochłonne, ze względu na liczbę i charakter wymaganych zmiennych niezależnych (Lebert, 1989; Nissen, 1998) a adekwatność tworzonych modeli empirycznych stwierdzana jest dla określonych lokalnych warunków (Fritton, 2008). Cechą proponowanych modeli jest również częste wykorzystywanie parametrów opisujących wilgotność lub gęstość gleby (Cramer, 2006; Lebert, 1989; Nissen, 1998; Błażejczak, 2010). W przypadku wilgotności należy zwrócić uwagę na fakt, że ma ona zasadniczy wpływ na podatność danej gleby na zagęszczanie. Wskazują na to m.in. wyniki testu Proctora (Aragón i in., 2000; Barzegar i in., 2000), który pozwala określić warunki maksymalnej podatności gleby na zagęszczanie w postaci gęstości maksymalnej i optymalnej wilgotności zagęszczania. Modele tworzone są zatem dla określonego stanu uwilgotnienia (Cramer 2006) lub okresu agrotechnicznego, w którym zagrożenie nadmiernym zagęszczeniem, ze względu na wilgotność aktualną gleby, jest największe (Błażejczak, 2010). Zmienność środowiska glebowego powoduje, że proponowane rozwiązania odnoszą się do określonych gatunków gleb (Cramer, 2006) lub wąskich przedziałów zmienności ich składu granulometrycznego (Błażejczak, 2010).

### 3. Założenia badawcze i zakres pracy

W pracy założono, że uproszczony sposób prognozowania naprężenia granicznego gleby będzie miał postać równań regresji. Zebranie niezbędnych danych wymagało przeprowadzenia serii badań polowych i laboratoryjnych. Założono, że badania powinny zostać przeprowadzone na wybranych glebach, które potencjalnie umożliwiają uzyskiwanie wysokich plonów, są zagrożone nadmiernym zagęszczaniem w warunkach intensywnego ich użytkowania.

Wobec braku standardowej procedury wyznaczania naprężenia granicznego gleby założono, że w pracy zostanie zaproponowana uproszczona metoda wyznaczania tego parametru wytrzymałościowego na podstawie badań laboratoryjnych próbek modelowych, odzwierciedlających wilgotnością i gęstością warunki polowe. Przyjęto przy tym, że materiał badawczy powinien zostać pobrany z warstwy podornej profili glebowych o zróżnicowanym uziarnieniu. Przeprowadzenie testu jednoosiowego ściskania gleby, który jest wykorzystywany w badaniach zależności odkształcenia od nacisku jednostkowego, a także interpretacja uzyskanych rezultatów, wymagało odniesienia do warunków osiągania przez daną glebę maksymalnej podatności na jej zagęszczanie. Założono, że w tym przypadku podstawą rozważań powinna być analiza wartości nacisków jednostkowych wywieranych stemplem na próbkę gleby i odpowiadającym im wartości odkształceń, odniesionych do stosowanych w teście Proctora wilgotności gleby i uzyskiwanych poziomów jej zagęszczenia.

Przyjęto, że kolejne kroki związane z zaproponowaniem sposobu wyznaczania naprężenia granicznego oraz modelu do prognozowania jego wartości, a będące wynikiem prac na próbkach modelowych, powinny odnosić się do rezultatów uzyskiwanych w warunkach terenowych. Uzyskiwane wartości nacisków jednostkowych w teście jednoosiowym powinny być konfrontowane z naciskami jednostkowymi wywieranymi przez koła pojazdów i maszyn rolniczych na glebę opisanymi w literaturze przedmiotu. Model do prognozowania wartości naprężenia granicznego powinien zaś uwzględniać różnice pomiędzy wytrzymałością próbek o tzw. nienaruszonej strukturze a próbkami wytwarzanymi w warunkach laboratoryjnych.

Zakres pracy, przedstawiony w poszczególnych publikacjach (A1-A4), obejmował:

- Identyfikację właściwości warstw podornych wybranych gleb i ocenę ich aktualnego stanu zagęszczenia na tle gęstości objętościowej szkieletu glebowego oznaczonej metodą Proctora (A1).
- Określenie warunków odkształcania próbek, dla potrzeb wyznaczenia relacji pomiędzy rezultatami zagęszczania materiału glebowego, prowadzonego za pomocą testów Proctora i jednoosiowego ściskania, a także ustalenie zależności pomiędzy wynikami obu testów (A2).
- Opracowanie modelu empirycznego do prognozowania nacisku jednostkowego niezbędnego do wytworzenia określonego zagęszczenia próbki gleby (A3).
- Opracowanie modelu empirycznego do prognozowania wartości naprężenia granicznego na podstawie wyznaczanego nacisku jednostkowego na glebę, zwiększającego początkowe zagęszczenie próbki glebowej o założoną wartość (A4).

## 4. Omówienie wyników badań przedstawionych w cyklu publikacji

A1. Śnieg K., Błażejczak D. 2017. Evaluation of subsoil compaction of plastic soils. Agricultural Engineering, 21(1), 85-94.

Bezpośrednie wykorzystanie wyników oznaczeń gęstości objętościowej szkieletu gleby do oceny stanu jej zagęszczenia, w kontekście oddziaływania na warunki rozwoju roślin, sprawia wiele trudności (Błażejczak i Dawidowski, 2013). Trudności te powodują, że jako wskaźnika oceny warunków rozwoju roślin próbuje się stosować względne miary zagęszczenia gleby (Håkansson i Lipiec, 2000). Parametrami, które z jednej strony stanowią punkt odniesienia w ocenie stanu zagęszczenia gruntu, a z drugiej charakteryzują warunki maksymalnej podatności na jego zagęszczanie, są wyniki badań uzyskiwane metodą Proctora, których wykorzystanie do oceny gleb rolniczych należy uznać za zasadne (Wagner i in., 1994; Aragón i in., 2000; Soane i in., 1980/1981).

**Celem badań była ocena zagęszczenia gleby w jej warstwie podornej za pomocą wybranych wskaźników oraz wyznaczenie relacji pomiędzy nimi, ze szczególnym uwzględnieniem wyników uzyskanych metodą Proctora.**

W tabeli A1-1 zamieszczono wyniki oznaczeń cech własnych badanych gleb. Można zauważyć, że materiał badawczy pochodził z gleb, które ugniatane w stanie wysokiej wilgotności są narażone na trwałą i silną deformację. Gleby były zróżnicowane głównie pod względem uziarnienia oraz zawartości próchnicy i węglanu wapnia, co znalazło prawdopodobnie odzwierciedlenie w rozstępie wartości granic plastyczności i płynności, które mieściły się odpowiednio w przedziałach 14,1 – 31,4% wag. i 15,4 – 73,0% wag. W mniejszym stopniu były zróżnicowane gęstość właściwa i odczyn gleby, których wartości zawierały się odpowiednio w przedziałach 2,39 – 2,67 g·cm<sup>-3</sup> i pH 5,08 – 6,86.

Tabela A1-1

Średnie wartości cech własnych gleby dla poszczególnych obiektów i warstw pomiarowych

| Obiekt | Warstwa<br>(cm) | Grupa<br>granulo-<br>metryczna<br>(PTG<br>2008) | Zawartość<br>części<br><0,002<br>[PN-R-<br>04033]<br>(%) | Zawartość<br>węglanu<br>wapnia<br>(%) | Gęstość<br>właściwa<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | Odczyn<br>(w KCl)<br>(pH) | Zawartość<br>próchnicy<br>(%) | Granica<br>plastycz-<br>ności<br>(% wag.) | Granica<br>płynności<br>(% wag.) |
|--------|-----------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|
| 1      | 2               | 3                                               | 4                                                        | 5                                     | 6                                            | 7                         | 8                             | 9                                         | 10                               |
| NP     | 25-30           | pyg                                             | 11,0                                                     | 1,29                                  | 2,45                                         | 6,32                      | 3,10                          | 22,0                                      | 29,5                             |
|        | 35-40           | pyg                                             | 11,0                                                     | 2,53                                  | 2,46                                         | 6,34                      | 2,02                          | 21,3                                      | 31,2                             |
|        | 45-50           | pyg                                             | 9,0                                                      | 2,76                                  | 2,45                                         | 6,29                      | 2,30                          | 23,7                                      | 32,0                             |
|        | 55-60           | gz                                              | 15,0                                                     | 0,68                                  | 2,47                                         | 6,21                      | 1,09                          | 20,3                                      | 31,3                             |

cd. tabeli A1-1

| 1         | 2     | 3           | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-----------|-------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Ob</i> | 25-30 | <i>gz</i>   | 27,0 | 0,10 | 2,45 | 6,86 | 4,17 | 25,9 | 44,2 |
|           | 35-40 | <i>gz</i>   | 27,0 | 0,07 | 2,49 | 6,84 | 3,77 | 28,0 | 47,9 |
|           | 45-50 | <i>gpyi</i> | 25,0 | -    | 2,52 | 6,78 | 2,34 | 30,4 | 58,7 |
|           | 55-60 | <i>ipy</i>  | 17,0 | -    | 2,40 | 6,52 | 1,70 | 31,4 | 73,0 |
| <i>Os</i> | 25-30 | <i>gl</i>   | 9,0  | -    | 2,52 | 5,08 | 1,03 | 14,1 | 17,0 |
|           | 35-40 | <i>gz</i>   | 15,0 | -    | 2,66 | 5,13 | 0,61 | 18,4 | 27,6 |
|           | 45-50 | <i>gz</i>   | 21,0 | -    | 2,67 | 5,23 | 0,69 | 19,8 | 30,3 |
|           | 55-60 | <i>gz</i>   | 20,0 | -    | 2,55 | 5,63 | 0,57 | 18,0 | 28,8 |
| <i>Re</i> | 25-30 | <i>pyg</i>  | 13,7 | 5,02 | 2,43 | 6,21 | 3,32 | 23,5 | 32,2 |
|           | 35-40 | <i>gz</i>   | 14,0 | 4,82 | 2,41 | 6,45 | 3,17 | 22,4 | 31,9 |
|           | 45-50 | <i>gz</i>   | 12,0 | 5,13 | 2,39 | 6,50 | 4,00 | 25,9 | 37,0 |
|           | 55-60 | <i>gz</i>   | 14,0 | 0,52 | 2,44 | 6,43 | 2,91 | 22,0 | 31,8 |
| <i>Sk</i> | 25-30 | <i>gpi</i>  | 22,0 | -    | 2,50 | 6,23 | 1,78 | 21,8 | 39,2 |
|           | 35-40 | <i>gpi</i>  | 25,0 | -    | 2,64 | 6,25 | 1,05 | 17,9 | 27,5 |
|           | 45-50 | <i>gi</i>   | 29,0 | -    | 2,60 | 6,21 | 0,75 | 24,9 | 61,0 |
|           | 55-60 | <i>pyi</i>  | 20,0 | -    | 2,53 | 6,22 | 0,68 | 27,4 | 52,5 |
| <i>Ku</i> | 25-30 | <i>gz</i>   | 11,5 | -    | 2,66 | 6,82 | 0,54 | 14,2 | 15,4 |
|           | 35-40 | <i>gz</i>   | 20,4 | -    | 2,63 | 6,36 | 0,42 | 19,0 | 39,2 |
|           | 45-50 | <i>gz</i>   | 23,3 | -    | 2,60 | 6,16 | 0,31 | 20,8 | 38,3 |
|           | 55-60 | <i>gz</i>   | 24,3 | -    | 2,59 | 6,69 | 0,34 | 26,7 | 46,2 |

Oznaczenia grup granulometrycznych: pyg - pył gliniasty, gz - glina zwykła, gpyi - glina pylasto-ilasta, ipy - il pylasty, gl - glina lekka, gpi - glina piaszczysto-ilasta, gi - glina ilasta, pyi - pył ilasty

Oznaczenia obiektów: NP – Nowy Przylep, Ob – Obojno, Os – Ostoja, Ku – Kurcewo, Re – Reńsko, Sk – Skarbimierz

W tabeli A1-2 zamieszczono wyniki oznaczeń właściwości aktualnych badanych gleb (gęstości objętościowej szkieletu -  $\rho_d$ , wilgotności aktualnej -  $w_a$ , zwięzłości -  $Z_w$ , oporu ścinania w ruchu obrotowym -  $S_c$  oraz wyniki obliczeń gęstości naturalnej -  $\rho_n$ ). W glebach obiektów NP i Os (warstwa: 25 - 30 cm) oraz Sk (warstwy: 25 - 30 i 35 - 40 cm), z powodu powtarzającej się corocznie wielotygodniowej suszy, nie udało się wykonać badań w okresie W. W ww. przypadkach pomiary wykonano w różnych latach dla okresu J, a uzyskane różnice  $\rho_d$ , za wyjątkiem obiektu Os, nie przekraczały wartości  $0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , czyli tej, którą Komornicki i Zasoński (1965) uważają za graniczną dla potrzeb praktycznego interpretowania różnicy gęstości objętościowej gleby. W okresie W notowano często większą wartość  $\rho_d$  przy mniejszej wilgotności. Oznaczone większe wartości  $\rho_d$  dla okresu W można tłumaczyć kurczeniem się gleby pod wpływem zmniejszenia się jej wilgotności. Według Dobrzańskiego i Zawadzkiego (1993) wahania wilgotności gleby mogą powodować zmiany jej objętości do 32%, zależnie od rodzaju utworu glebowego. Na podstawie wyników  $Z_w$  można przypuszczać, że warunki rozwoju roślin były w 17 przypadkach utrudnione, ponieważ przeciętna zwięzłość przekraczała wartość 2000 kPa, tj. uznawaną za graniczną dla prawidłowego rozwoju korzeni (Gregorich

i Carter, 1997). Uzyskane natomiast wysokie wartości ścinania gleby w ruchu obrotowym ( $S_c$ ), często przekraczające 100 kPa, wskazują, że badane gleby w okresach *W* lub *J* charakteryzowały się małą podatnością na zagęszczanie. Wynika to z faktu, że wraz ze wzrostem  $S_c$  rosną wartości naprężenia granicznego gleby, które jest miarą podatności gleby na zagęszczanie (Błażejczak 2010). Małą podatność na zagęszczanie badanych gleb można tłumaczyć ich aktualną wilgotnością, której średnia wartość wynosiła 0,84% wartości  $P_L$ .

Tabela A1-2

Średnie wartości gęstości objętościowej szkieletu ( $\rho_d$ ), wilgotności aktualnej ( $w_a$ ), zwięzłości ( $Z_w$ ), oporu ścinania ( $S_c$ ) gleb badanych obiektów w warstwach dla wiosennych (*W*) i jesiennych (*J*) okresów pomiarów polowych oraz oceny zagęszczenia gleby wg Iancu (2001) i Wojtasika (1995)

| Obiekt | Warstwa | Okres<br>pomiarów | $\rho_d$              | $w_a$      | $Z_w$       | $S_c$    | Ocena<br>zagęszczenia wg<br>Iancu (2001) na<br>podstawie $\rho_d/Z_w$ | Ocena<br>zagęszczenia wg<br>Wojtasika<br>(1995) |
|--------|---------|-------------------|-----------------------|------------|-------------|----------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|        | (cm)    |                   | (g·cm <sup>-3</sup> ) | (% wag.)   | (kPa)       | (kPa)    |                                                                       |                                                 |
| 1      | 2       | 3                 | 4                     | 5          | 6           | 7        | 8                                                                     | 9                                               |
| NP     | 25-30   | <i>J</i>          | 1,51 (0,01)           | 17,4 (0,2) | 2349 (637)  | 126 (12) | -/-                                                                   | 1c                                              |
|        |         | <i>J</i>          | 1,46 (0,09)           | 21,4 (1,1) | 1010 (360)  | 83 (28)  | -/-                                                                   | n                                               |
|        | 35-40   | <i>W</i>          | 1,55 (0,04)           | 19,5 (0,3) | 1417 (486)  | 98 (17)  | -                                                                     | 1c                                              |
|        |         | <i>J</i>          | 1,56 (0,06)           | 22,0 (1,3) | 1020 (660)  | 88 (36)  | +/-                                                                   | 1c                                              |
|        | 45-50   | <i>W</i>          | 1,54 (0,06)           | 19,5 (0,1) | 1274 (658)  | 140 (13) | -/-                                                                   | n                                               |
|        |         | <i>J</i>          | 1,46 (0,04)           | 20,2 (1,0) | 1720 (280)  | 154 (37) | -/-                                                                   | n                                               |
|        | 55-60   | <i>W</i>          | 1,60 (0,03)           | 18,9 (0,6) | 1440 (338)  | 140 (19) | +/-                                                                   | 1c                                              |
|        |         | <i>J</i>          | 1,44 (0,05)           | 17,3 (0,8) | 1240 (470)  | 206 (21) | -/-                                                                   | n                                               |
|        | 25-30   | <i>W</i>          | 1,56 (0,06)           | 18,5 (0,8) | 3650 (320)  | 234 (35) | +/+                                                                   | 3c                                              |
|        |         | <i>J</i>          | 1,40 (0,07)           | 23,8 (2,7) | 1230 (490)  | 102 (32) | -/-                                                                   | 1c                                              |
| Ob     | 35-40   | <i>W</i>          | 1,56 (0,04)           | 15,3 (0,4) | 4350 (560)  | 184 (52) | +/+                                                                   | 2c                                              |
|        |         | <i>J</i>          | 1,44 (0,11)           | 24,4 (1,6) | 1560 (540)  | 107 (22) | -/-                                                                   | 1c                                              |
|        | 45-50   | <i>W</i>          | 1,59 (0,03)           | 16,6 (1,3) | 3900 (440)  | 156 (37) | +/-                                                                   | 3c                                              |
|        |         | <i>J</i>          | 1,49 (0,02)           | 24,6 (0,8) | 1840 (310)  | 154 (33) | +/-                                                                   | 3c                                              |
|        | 55-60   | <i>W</i>          | 1,65 (0,03)           | 16,2 (2,2) | 2700 (380)  | 154 (29) | +/-                                                                   | 3c                                              |
|        |         | <i>J</i>          | 1,47 (0,02)           | 26,0 (0,5) | 1740 (270)  | 136 (16) | +/-                                                                   | 1c                                              |
|        | 25-30   | <i>J</i>          | 1,66 (0,04)           | 14,9 (0,6) | 1620 (840)  | 99 (19)  | +/-                                                                   | n                                               |
|        |         | <i>J</i>          | 1,53 (0,08)           | 15,9 (0,4) | 2000 (980)  | 99 (32)  | -/-                                                                   | 1a                                              |
|        | 35-40   | <i>W</i>          | 1,67 (0,03)           | 12,3 (0,7) | 3310 (1130) | 68 (13)  | +/-                                                                   | n                                               |
|        |         | <i>J</i>          | 1,66 (0,06)           | 16,0 (0,5) | 1362 (587)  | 89 (14)  | +/-                                                                   | n                                               |
| Os     | 45-50   | <i>W</i>          | 1,64 (0,03)           | 13,9 (2,4) | 3430 (560)  | 53 (16)  | +/-                                                                   | n                                               |
|        |         | <i>J</i>          | 1,56 (0,04)           | 21,5 (1,3) | 1693 (360)  | 112 (18) | -/-                                                                   | 1a                                              |
|        | 55-60   | <i>W</i>          | 1,62 (0,05)           | 15,5 (0,4) | 4060 (1010) | 39 (10)  | +/-                                                                   | n                                               |
|        |         | <i>J</i>          | 1,60 (0,03)           | 19,6 (0,6) | 1682 (255)  | 107 (20) | +/-                                                                   | n                                               |
|        | 25-30   | <i>W</i>          | 1,55 (0,03)           | 21,7 (0,5) | 1160 (440)  | 126 (21) | -/-                                                                   | 1c                                              |
|        |         | <i>J</i>          | 1,41 (0,07)           | 26,1 (0,5) | 910 (310)   | 60 (66)  | -/-                                                                   | n                                               |
|        | 35-40   | <i>J</i>          | 1,46 (0,09)           | 19,3 (0,6) | 2449 (520)  | 166 (15) | -/-                                                                   | n                                               |
|        |         | <i>W</i>          | 1,61 (0,09)           | 19,0 (1,9) | 1560 (940)  | 124 (20) | +/-                                                                   | 1c                                              |
|        | 45-50   | <i>J</i>          | 1,32 (0,03)           | 24,9 (0,2) | 1982 (410)  | 132 (25) | -/-                                                                   | 1a                                              |
|        |         | <i>W</i>          | 1,48 (0,02)           | 22,2 (1,6) | 1000 (450)  | 87 (23)  | -/-                                                                   | n                                               |
| Re     | 55-60   | <i>J</i>          | 1,45 (0,03)           | 21,3 (1,0) | 1693 (313)  | 113 (19) | -/-                                                                   | n                                               |
|        |         | <i>W</i>          | 1,56 (0,04)           | 21,6 (1,5) | 1160 (390)  | 140 (21) | +/-                                                                   | 1c                                              |
|        | 25-30   | <i>J</i>          | 1,71 (0,02)           | 14,4 (0,4) | 1280 (380)  | 96 (22)  | +/-                                                                   | 1c                                              |
|        |         | <i>J</i>          | 1,73 (0,04)           | 16,2 (0,9) | 1210 (500)  | 130 (34) | +/-                                                                   | 1c                                              |
|        | 35-40   | <i>J</i>          | 1,67 (0,07)           | 16,8 (0,6) | 1748 (471)  | 178 (36) | +/-                                                                   | 1c                                              |
|        |         | <i>J</i>          | 1,64 (0,04)           | 16,7 (0,6) | 2313 (1053) | 125 (30) | +/-                                                                   | 1c                                              |
|        | 45-50   | <i>W</i>          | 1,62 (0,01)           | 21,3 (0,3) | 1430 (475)  | 124 (19) | +/-                                                                   | 1c                                              |
|        |         | <i>J</i>          | 1,58 (0,06)           | 17,7 (1,4) | 1986 (475)  | 89 (17)  | +/-                                                                   | n                                               |
|        | 55-60   | <i>W</i>          | 1,54 (0,01)           | 25,0 (0,4) | 1508 (477)  | 106 (12) | +/-                                                                   | n                                               |
|        |         | <i>J</i>          | 1,66 (0,06)           | 15,5 (1,2) | 2046 (499)  | 177 (36) | +/-                                                                   | 1c                                              |

cd. Tabeli A1-2

| 1  | 2     | 3 | 4           | 5          | 6           | 7        | 8   | 9  |
|----|-------|---|-------------|------------|-------------|----------|-----|----|
| Ku | 25-30 | W | 1,63 (0,11) | 13,5 (0,6) | 2853 (766)  | 226 (27) | +/- | n  |
|    |       | J | 1,50 (0,06) | 12,6 (0,6) | 760 (840)   | 89 (57)  | -/- | n  |
|    | 35-40 | J | 1,62 (0,06) | 16,0 (0,7) | 2211 (212)  | 204 (24) | +/- | 1c |
|    |       | W | 1,61 (0,06) | 16,9 (0,7) | 4220 (1492) | 221 (19) | -/+ | n  |
|    | 45-50 | J | 1,63 (0,04) | 15,9 (0,2) | 2216 (283)  | 243 (18) | +/- | 1c |
|    |       | W | 1,57 (0,04) | 18,5 (1,1) | 3400 (1660) | 218 (25) | -/- | n  |
|    | 55-60 | J | 1,62 (0,04) | 13,6 (1,2) | 2729 (515)  | 256 (6)  | +/- | 1c |
|    |       | W | 1,60 (0,06) | 12,4 (0,8) | 5410 (1891) | 205 (35) | +/+ | 1c |

Uwaga: w nawiasach podano wartości odchyłeń standardowych; „+” lub „-” - przekroczenie lub brak przekroczenia wartości krytycznej; 1a - gleba lekko spulchniona, n - gleba o gęstości naturalnej, 1c – gleba lekko zagęszczona, 2c - gleba średnio zagęszczona, 3c - gleba silnie zagęszczona

W celu dokonania oceny aktualnego stanu zagęszczenia uzyskane rezultaty (tab. A1-2) porównano z progowymi wartościami  $\rho_d$  lub  $Z_w$ , zaproponowanymi dla warstwy uprawowej różnych rodzajów gleb o określonych parametrach (Iancu, 2001). Przy czym progową wartość  $Z_w$  ustalano, zgodnie z zaproponowaną metodyką, dodając lub odejmując określoną wartość poprawki (250 kPa), zależnie od różnicy wilgotności zmierzonej i stabelaryzowanej. Brano także pod uwagę zawartość części spławialnych (<0,002 mm) i wskaźnik plastyczności, czyli różnicę pomiędzy granicami płynności i plastyczności (tab. A1-1). Przekroczenie progowych wartości  $\rho_d$  stwierdzono w 29-ciu przypadkach pomiarów. Przy czym przekroczenie to dla okresów W lub J w danej warstwie stwierdzono w 9-ciu przypadkach. Można zauważyć, że liczba przypadków przekroczenia progowej  $\rho_d$  jest najmniejsza dla obiektów NP i Re (po 2), tj. gleb o uziarnieniach pył gliniasty i glina zwykła o zawartości cząstek <0,002 mm mieszczących się w przedziale od 9 do 15% (tab. A1-1). Największą liczbę przypadków przekroczenia progowej  $\rho_d$  stwierdzono dla obiektu Sk, tj. gleby o uziarnieniach glina piaszczysto-ilasta, glina ilasta i pył ilasty o zawartości cząstek <0,002 mm mieszczących się w przedziale od 22 do 29%. Przekroczoną natomiast progową wartość  $Z_w$ , świadczącą o nadmiernym zagęszczeniu gleby, stwierdzono tylko w 4-rech przypadkach. Powodem tego mogło być to, że zaproponowane progowe wartości dotyczą warstwy uprawowej. W niniejszej pracy analizowano natomiast stan zagęszczenia warstwy podornej, w której zabiegi uprawowe wykonywane są sporadycznie (np. głęboszowanie), a własności tej warstwy odbiegają często od warstwy ornej. Nie bez znaczenia jest też fakt, że przydział badanych gleb do zaproponowanych przez Iancu (2001) grup utworów glebowych może być traktowany orientacyjnie – różnice w klasyfikacjach gleb między krajami. Ze względu na mankamenty powyższej procedury do oceny aktualnego zagęszczenia warstwy podornej wykorzystano również obliczone wartości naturalnej gęstości objętościowej ( $\rho_n$ ) wg Wojtasika (1995), na podstawie której gleba może być zaliczana do kategorii gęstość naturalna jeśli wartość  $\rho_d$  mieści się w przedziale  $\rho_n \pm 0,05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Gleba może być zaliczona także do lekko, średnio lub silnie zagęszczonych jeśli różnica  $\rho_d$  i  $\rho_n$  ma wartość dodatnią i mieści się odpowiednio w przedziałach: (0,05 - 0,15>, (0,15 - 0,25> i >0,25  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . W przypadku

odwrotnym, gdy różnica  $\rho_d$  i  $\rho_h$  ma wartość ujemną gleba może być zaliczona do lekko, średnio lub silnie spulchnionych. Badane obiekty (tab. A1-2) zostały zaliczone do gleb od lekko do silnie zagęszczonych w 25-ciu przypadkach. Przy czym zbieżność z procedurą Iancu (2001) uzyskano w 20-tu przypadkach. Można zatem stwierdzić, że obydwie procedury oceny zagęszczenia gleby są porównywalne.

Wyniki oznaczeń wilgotności optymalnej ( $w_{opt}$ ), ilorazu aktualnej gęstości objętościowej szkieletu ( $\rho_d$ ) i gęstości maksymalnej ( $\rho_{ds}$ ) zamieszczono w tabeli A1-3. Wartości  $\rho_d/\rho_{ds}$  zawierały się przedziale od 0,74 do 0,98, a ich mediana równa była 0,87. Wyniki te były zbliżone do uzyskanych przez innych autorów dla warstwy ornej (Carter, 1990). W warunkach polowych  $\rho_d$  w żadnym z badanych obiektów nie przekroczyła zatem wartości  $\rho_{ds}$ . Potwierdzone zostało zatem, że przyjmowanie w rozważaniach poziomu zagęszczenia gleby założenia, że  $\rho_d \leq \rho_{ds}$  uznać należy za zasadne. Porównując wartości ilorazów z wynikami oceny zagęszczenia gleb (tab. A1-2) uzyskano, że glebę można uważać za nadmiernie zagęszczoną, spełniając łącznie wymogi procedur Iancu (2001) i Wojtasika (1995), jeśli wartość  $\rho_d/\rho_{ds}$  przekracza 0,87. Gleba nie jest natomiast w stanie nadmiernie zagęszczonym, gdy  $\rho_d/\rho_{ds}$  nie przekracza 0,77. Wartości  $\rho_d/\rho_{ds}$  pomiędzy 0,77 i 0,87 pozwalają, zależnie od składu granulometrycznego gleby, uznać jej stan zagęszczenia za podwyższony. W tabeli 3 zamieszczono także wyniki obliczeń wartości gęstości objętościowej części mineralnych ( $P_d$ ). Wartości  $P_d$ , (Jones i in. 2003), pozwalają na ocenę podatności warstwy podornej na zagęszczanie. W 22 przypadkach stwierdzono, iż badane gleby w niewielkim stopniu są podatne na zagęszczenie, ponieważ  $P_d > 1,75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Średnią podatność ( $1,40 \leq P_d \leq 1,75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) uzyskano natomiast w 26 przypadkach. Nie stwierdzono gleb o dużej podatności na zagęszczanie ( $P_d < 1,40$ ). Porównując wartości  $P_d$  z wynikami oznaczeń metodą Proctora można wykazać (dla  $P_d > 1,75$ ), że gleba jest mało podatna na zagęszczanie jeśli średnia wartość  $\rho_d/\rho_{ds} > 0,89$ . Można także zauważyć, że wartości  $\rho_d/\rho_{ds}$  zwiększają się wraz ze wzrostem  $P_d$ . Przeprowadzone badanie współczynnika korelacji ( $r$ ) pomiędzy wartościami  $\rho_d/\rho_{ds}$  a  $P_d$  wykazało, że ogólnie siła tego związku była średnia ( $r=0,56$ ). Przy czym najmniejszą nieistotną statystycznie wartość  $r$  uzyskano dla obiektu *Ob* ( $r=0,41$ ) a największą dla *Ku* ( $r=0,97$ ), czyli odpowiednio dla gleb o stosunkowo najmniejszej i największej zawartości frakcji piasku. W tabeli A1-3 zamieszczono również wyniki porównania gęstości  $\rho_d$  i  $\rho_{dm}$ . Można zauważyć, że w zdecydowanej większości przypadków wartość  $\rho_d$  była mniejsza od  $\rho_{dm}$ . Kilka przypadków, dla których  $\rho_{dm} \geq \rho_d$  należy uznać za przypadkowe i za praktycznie nieistotne, ponieważ różnica  $\rho_d - \rho_{dm}$  mieściła się w przedziale  $\pm 0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Świadczyć to może o tym, że

również przy uwilgotnieniu gleby różniącym się od optymalnej wilgotności jej zagęszczania nie została w warunkach polowych przekroczona wartość  $\rho_{ds}$ .

Tabela A1-3

Wartości wilgotności optymalnej ( $w_{opt}$ ), iloraz gęstości objętościowej szkieletu i gęstości maksymalnej ( $\rho_d/\rho_{ds}$ ) gleb, gęstość objętościowa części mineralnych ( $P_d$ ), różnica gęstości objętościowej szkieletu i prognozowanej gęstości objętościowej szkieletu gleb ( $\rho_d - \rho_{dm}$ )

| Obiekt | Warstwa<br>(cm) | Okres<br>pomiarów | $w_{opt}$<br>(% wag.) | $\rho_d/\rho_{ds}$<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | $P_d$<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | $\rho_d - \rho_{dm}$<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|--------|-----------------|-------------------|-----------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|
| NP     | 25-30           | J                 | 17,0                  | 0,88                                        | 1,61                           | -0,19                                         |
|        |                 | J                 | 17,0                  | 0,85                                        | 1,56                           | -0,08                                         |
|        | 35-40           | W                 | 15,7                  | 0,89                                        | 1,65                           | -0,06                                         |
|        |                 | J                 | 15,7                  | 0,90                                        | 1,66                           | 0,00                                          |
|        | 45-50           | W                 | 14,5                  | 0,88                                        | 1,62                           | -0,10                                         |
|        |                 | J                 | 14,5                  | 0,77                                        | 1,44                           | -0,26                                         |
|        | 55-60           | W                 | 13,2                  | 0,89                                        | 1,74                           | -0,07                                         |
|        |                 | J                 | 13,2                  | 0,80                                        | 1,58                           | -0,29                                         |
| Ob     | 25-30           | W                 | 19,0                  | 0,98                                        | 1,80                           | -0,05                                         |
|        |                 | J                 | 19,0                  | 0,88                                        | 1,64                           | pz                                            |
|        | 35-40           | W                 | 13,2                  | 0,82                                        | 1,80                           | -0,27                                         |
|        |                 | J                 | 13,2                  | 0,75                                        | 1,68                           | -0,21                                         |
|        | 45-50           | W                 | 11,5                  | 0,82                                        | 1,82                           | -0,28                                         |
|        |                 | J                 | 11,5                  | 0,77                                        | 1,72                           | -0,12                                         |
|        | 55-60           | W                 | 10,5                  | 0,86                                        | 1,80                           | -0,24                                         |
|        |                 | J                 | 10,5                  | 0,77                                        | 1,62                           | pz                                            |
| Os     | 25-30           | J                 | 11,7                  | 0,86                                        | 1,74                           | -0,18                                         |
|        |                 | J                 | 11,7                  | 0,79                                        | 1,61                           | -0,29                                         |
|        | 35-40           | W                 | 10,1                  | 0,87                                        | 1,81                           | -0,19                                         |
|        |                 | J                 | 10,1                  | 0,86                                        | 1,80                           | -0,19                                         |
|        | 45-50           | W                 | 11,7                  | 0,85                                        | 1,83                           | -0,19                                         |
|        |                 | J                 | 11,7                  | 0,81                                        | 1,75                           | -0,12                                         |
|        | 55-60           | W                 | 10,6                  | 0,85                                        | 1,80                           | -0,17                                         |
|        |                 | J                 | 10,6                  | 0,84                                        | 1,78                           | -0,05                                         |
| Re     | 25-30           | W                 | 16,9                  | 0,92                                        | 1,70                           | -0,02                                         |
|        |                 | J                 | 16,9                  | 0,84                                        | 1,52                           | pz                                            |
|        | 35-40           | J                 | 15,6                  | 0,86                                        | 1,59                           | -0,17                                         |
|        |                 | W                 | 15,6                  | 0,95                                        | 1,54                           | -0,03                                         |
|        | 45-50           | J                 | 15,2                  | 0,75                                        | 1,43                           | -0,12                                         |
|        |                 | W                 | 15,2                  | 0,85                                        | 1,59                           | -0,05                                         |
|        | 55-60           | J                 | 14,4                  | 0,82                                        | 1,58                           | 0,02                                          |
|        |                 | W                 | 14,4                  | 0,89                                        | 1,69                           | 0,05                                          |
| Sk     | 25-30           | J                 | 13,0                  | 0,96                                        | 1,91                           | 0,00                                          |
|        |                 | J                 | 13,0                  | 0,97                                        | 1,93                           | -0,05                                         |
|        | 35-40           | J                 | 18,0                  | 0,98                                        | 1,90                           | -0,11                                         |
|        |                 | J                 | 18,0                  | 0,96                                        | 1,87                           | -0,14                                         |
|        | 45-50           | W                 | 15,9                  | 0,91                                        | 1,88                           | pz                                            |
|        |                 | J                 | 15,9                  | 0,89                                        | 1,84                           | -0,08                                         |
|        | 55-60           | W                 | 16,8                  | 0,86                                        | 1,72                           | pz                                            |
|        |                 | J                 | 16,8                  | 0,92                                        | 1,84                           | -0,13                                         |
| Ku     | 25-30           | W                 | 11,2                  | 0,83                                        | 1,73                           | -0,29                                         |
|        |                 | J                 | 11,2                  | 0,74                                        | 1,55                           | -0,33                                         |
|        | 35-40           | J                 | 13,9                  | 0,87                                        | 1,80                           | -0,13                                         |
|        |                 | W                 | 13,9                  | 0,87                                        | 1,79                           | 0,00                                          |
|        | 45-50           | J                 | 15,4                  | 0,92                                        | 1,84                           | -0,15                                         |
|        |                 | W                 | 15,4                  | 0,88                                        | 1,78                           | -0,15                                         |
|        | 55-60           | J                 | 16,8                  | 0,93                                        | 1,84                           | -0,04                                         |
|        |                 | W                 | 16,8                  | 0,92                                        | 1,82                           | -0,01                                         |

Uwaga: „pz” - oznacza, że niemożliwe było wyznaczenie  $\rho_{dm}$ , ponieważ przekroczony został zakres zastosowania modelu

A2. Błażejczak D., Śnieg K., Słowik M. 2018. Comparison of Proctor and uniaxial compression tests for selected soils. Agricultural Engineering, Vol. 22(1), 5-13.

Parametrami, które z jednej strony mogą stanowić punkt odniesienia w ocenie stanu zagęszczenia gleby, a z drugiej charakteryzują warunki maksymalnej podatności na jej zagęszczanie, są wyniki badań uzyskiwane za pomocą aparatu Proctora w postaci gęstości maksymalnej i optymalnej wilgotności zagęszczania (Wagner i in., 1994; Aragón i in., 2000; Nhantumbo i Cambule, 2006; Tarkiewicz i Nosalewicz, 2005). Maksymalna wartość gęstości objętościowej ( $\rho_{ds}$ ), uzyskiwana w standardowej metodzie Proctora, jest uważana za maksymalną możliwą do uzyskania dla danej gleby (Kumar i in., 2009). Z punktu widzenia przeciwdziałania nadmiernemu zagęszczaniu gleby wyniki uzyskiwane w teście Proctora są jednak niewystarczające. Nie dostarczają one bowiem np. informacji o wartości obciążenia (naprężenia), które jest w stanie wytworzyć określone zagęszczenie gleby. Taką informację można pozyskać przeprowadzając test jednoosiowego ściskania gleby. Zasadne zatem jest opracowanie procedur, umożliwiających porównywanie wyników uzyskiwanych w testach Proctora i jednoosiowym, na użytek przeciwdziałania nadmiernemu zagęszczaniu gleby.

**Celem badań było porównanie rezultatów zagęszczania materiału glebowego, prowadzonego za pomocą testów Proctora i jednoosiowego ściskania, ukierunkowane na poszukiwanie zależności pomiędzy parametrami i wynikami obu metod, na potrzeby ochrony gleb przed nadmiernym ich zagęszczaniem kołami maszyn i pojazdów rolniczych.**

W pracy A2 poszukiwano odpowiedzi na następujące pytania:

1. W jakich warunkach (możliwa lub niemożliwa rozszerzalność boczna gleby) należy odkształcać glebę w teście jednoosiowym, aby można było poszukiwać zależności pomiędzy wynikami obu testów?
2. Czy stosując test jednoosiowy z możliwą boczną rozszerzalnością gleby można określić zmianę stanu zagęszczenia gleby pod stemplem na podstawie jego przemieszczenia?
3. Czy nacisk jednostkowy stempla na próbkę w teście jednoosiowego ściskania zależy istotnie od wilgotności gleby i uzyskiwanego jej zagęszczenia w teście Proctora?

W tabeli A2-1 zamieszczono wyniki oznaczeń cech własnych materiału glebowego. Można zauważyć, że w badaniach zastosowano materiał glebowy o zróżnicowanym uziarnieniu. Największe zawartości frakcji: piaszczystej, pyłowej i ilastej zawierał materiał pobrany odpowiednio z obiektów: Ostoja (Os), Nowy Przylep (NP) i Obojno (Ob). Wystąpiły także wyraźne różnice pomiędzy obiektami w zawartości próchnicy oraz wartościach odczynu

i gęstości właściwej. Stwierdzono, że materiał pochodził z gleb spoistych – różnica między granicami płynności i plastyczności była większa od 1,0% wag.

Tabela A2-1.

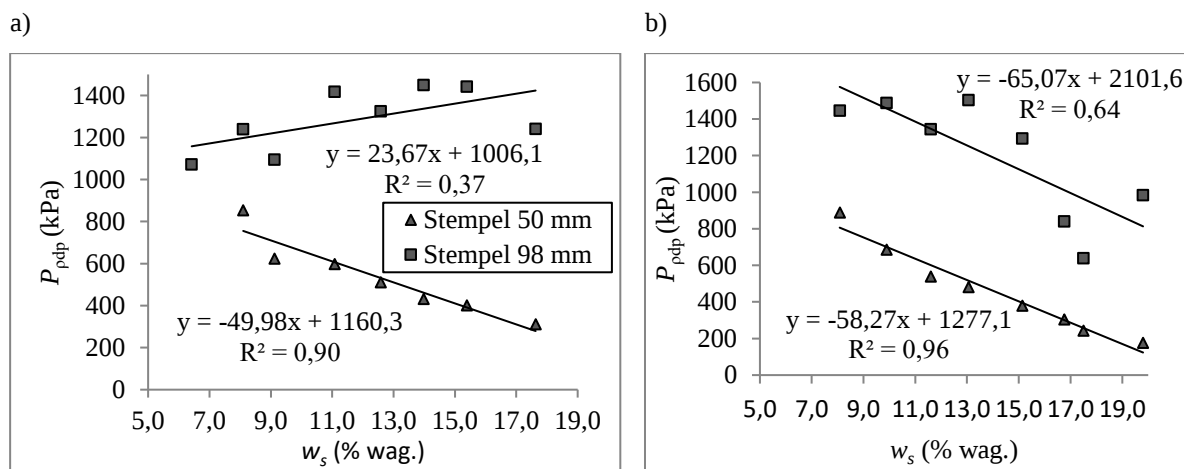
Średnie wartości cech własnych gleby dla poszczególnych obiektów i warstw pomiarowych

| Obiekt | Warstwa<br>(cm) | Grupa<br>granulo-<br>metryczna<br>(PTG 2009) | Zawartość frakcji<br>wg PTG (2009) |      |      | Gęstość<br>właściwa<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | Odczyn<br>(w KCl)<br>(pH) | Zawartość<br>próchnicy<br>(%) | Granica<br>plastycz-<br>ności<br>(% wag.) | Granica<br>płynności |
|--------|-----------------|----------------------------------------------|------------------------------------|------|------|----------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|
|        |                 |                                              | Piasek                             | Pył  | Il   |                                              |                           |                               |                                           |                      |
| NP     | 35-40           | pyg                                          | 36,0                               | 53,4 | 10,6 | 2,46                                         | 6,34                      | 2,02                          | 21,3                                      | 31,2                 |
|        | 45-50           | pyg                                          | 34,1                               | 56,9 | 9,0  | 2,45                                         | 6,29                      | 2,30                          | 23,7                                      | 32,0                 |
|        | 55-60           | gz                                           | 37,6                               | 48,4 | 14,0 | 2,47                                         | 6,21                      | 1,09                          | 20,3                                      | 31,3                 |
| Ob     | 35-40           | gz                                           | 25,0                               | 48,0 | 27,0 | 2,49                                         | 6,84                      | 3,77                          | 28,0                                      | 47,9                 |
|        | 45-50           | gpyi                                         | 14,0                               | 48,0 | 38,0 | 2,52                                         | 6,78                      | 2,34                          | 30,4                                      | 58,7                 |
|        | 55-60           | ipy                                          | 12,0                               | 46,0 | 42,0 | 2,40                                         | 6,52                      | 1,70                          | 31,4                                      | 73,0                 |
| Os     | 35-40           | gz                                           | 45,0                               | 40,3 | 14,7 | 2,66                                         | 5,13                      | 0,61                          | 18,4                                      | 27,6                 |
|        | 45-50           | gz                                           | 50,0                               | 29,4 | 20,6 | 2,67                                         | 5,23                      | 0,69                          | 19,8                                      | 30,3                 |
|        | 55-60           | gz                                           | 48,3                               | 31,2 | 20,5 | 2,55                                         | 5,63                      | 0,57                          | 18,0                                      | 28,8                 |

Oznaczenia grup granulometrycznych: pyg - pył gliniasty, gz - glina zwykła, gpyi - glina pylasto-ilasta, ipy - il pylasty

Zgodnie z przyjętym tokiem postępowania na wstępie testowano wpływ sposobu odkształcania próbek na poszukiwane zależności pomiędzy obydwoma testami. Wykazano, że wartości nacisku jednostkowego ( $P_{\text{dp}}$ ) niezbędne do wytworzenia zagęszczenia równoważnego gęstości objętościowej ( $\rho_{\text{dp}}$ ) uzyskiwanej w aparacie Proctora, w zależności od wilgotności próbki ( $w_s$ ), przyjmują zróżnicowany przebieg dla zastosowanych średnic stempla. Wybrany przykład dla obiektu NP przedstawiono na rysunku A2-2. Uzyskane dla stempla o średnicy  $d_{50}$  wartości współczynnika determinacji świadczą o dobrym dopasowaniu punktów pomiarowych do linii regresji –  $R^2 \geq 0,90$ . W przypadku stempla o średnicy  $d_{98}$  współczynnik determinacji przyjmował zdecydowanie mniejsze wartości ( $R^2 \leq 0,65$ ), a punkty pomiarowe są na wykresie bardziej rozrzucone. Odmienny przebieg linii regresji (rys. A2-2a) dla zastosowanych stempli można tłumaczyć zjawiskami zachodzącymi pomiędzy krawędzią stempla a ścianką cylindra pomiarowego, co miało wpływ na rejestrowany przebieg nacisku jednostkowego od wartości odkształcania próbki (Błażejczak i Dawidowski, 2016). Analizując wykres na rysunku A2-2b zauważa się, że pomimo podobnego trendu linii regresji wartości  $P_{\text{dp}}$  są wyraźnie większe dla stempla  $d_{98}$ . Podobne rezultaty do przedstawionych na rysunku 2 uzyskano dla obiektów Ob i Os. Przy czym najmniejsze różnice pomiędzy wartościami  $R^2$  dla stempli  $d_{50}$  i  $d_{98}$  stwierdzono dla obiektu Os. Powodem mógł być skład granulometryczny materiału glebowego o stosunkowo dużej zawartości piasku (tab. A2-1), co znacznie ułatwia filtrację wody i powietrza nawet przy zastosowaniu stempla o średnicy zbliżonej do średnicy wewnętrznej

cylindra. Podkreślić należy, że w każdym z badanych przypadków wartości  $P_{pdp}$  odczytane dla  $d_{98}$  mm przyjmowały dla poszczególnych  $w_s$  większe wartości.



Rysunek A2-2. Wartości nacisku jednostkowego ( $P_{pdp}$ ) niezbędne do wytworzenia zagęszczenia równoważnego gęstości objętościowej uzyskiwanej w aparacie Proctora ( $\rho_{dp}$ ) dla średnic stempla 50 lub 98 mm w zależności od wilgotności próbki ( $w_s$ ) – obiekt NP: a) warstwa 35 – 40 cm, b) warstwa 45-50 cm

Analizując wartości nacisku jednostkowego ( $P_{pdp}$ ) przedstawione na rysunku A2-2, można stwierdzić, że w przypadku stempla o średnicy 98 mm były one znacznie większe od wyznaczonych średnich nacisków jednostkowych wywieranych na glebę przez koła pojazdów i maszyn rolniczych nawet dla najcięższych pojazdów, wykorzystywanych w pracach polowych (Walczyk, 1995; Jurga, 2009; Filipovic i in., 2016). Na przykład naciski jednostkowe wyznaczone przez Walczyk (1995) wynosiły maksymalnie około 300 kPa. Minimalna natomiast wartość nacisku jednostkowego uzyskana w warunkach ograniczonej rozszerzalności próbki przekraczała 600 kPa (rys. A2-2b). Podsumowując tę część badań należy stwierdzić, że dla celów porównywania wyników testów jednoosiowego ściskania z rezultatami ubijania gleby w aparacie Proctora, w kontekście badania procesu jej zagęszczania przez ciągniki i maszyny rolnicze, jednoosiowe odkształcanie próbek należy wykonywać w warunkach możliwej ich bocznej rozszerzalności. Wynikać to może również stąd, że jednoosiowe odkształcanie w takich warunkach w większym stopniu odwzorowuje odkształcanie w aparacie Proctora oraz w warunkach polowych, gdzie ściskaniu (ugniataniu) gleby towarzyszy przemieszczanie mas gleby poza strefę bezpośredniego oddziaływania kół lub elementów roboczych maszyn i pojazdów rolniczych.

Kontynuując program badań wykonywano zagęszczanie materiału glebowego w aparacie Proctora oraz w teście jednoosiowego odkształcania próbek z zastosowaniem stempla o średnicy 50 mm, czyli w warunkach możliwej bocznej rozszerzalności gleby.

W pierwszej kolejności testowano słuszność założenia, że zagęszczenie ugniataanej próbki zmienia się liniowo wraz ze wzrostem zagłębienia stempla. Wyniki porównania wartości

gęstości objętościowych szkieletu gleby wyliczonych ze zmierzonych zamieszczono w tabeli A2-2. Uzyskano, że wartości te nie różniły się istotnie –  $p > 0,05$ . W tym przypadku brak różnic można tłumaczyć stosunkowo niewielką wysokością próbek modelowych ( $H_{30}$ ) i wartością odkształcenia (6,0 – 8,2 mm), co powodowało, że przemieszczenie cząstek gleby poza cylindryczny obszar bezpośredniego oddziaływania stempla było niewielkie. Należy dodać, że rozkład naprężeń pod stemplem przebiega pod określonym kątem, a przemieszczanie cząstek wymaga utworzenia zagęszczonego stożka glebowego, zgodnie z teorią Terzagiego (Błażejczak i in., 2017).

Tabela A2-2.

Wyniki porównania wartości zmierzonych i obliczonych gęstości objętościowych szkieletu próbek modelowych po odkształceniu

| Obiekt | Wilgotność<br>próbki<br>(% wag.) | Początkowa<br>gęstość<br>objętościowa<br>szkieletu próbki<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | Odkształcenie<br>próbki<br>(mm) | Gęstość objętościowa szkieletu<br>próbki po odkształceniu |                                    | Wartość $p$ |
|--------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------|
|        |                                  |                                                                                    |                                 | obliczona                                                 | zmierzona<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) |             |
| NP     | 18,1                             | 1,28                                                                               | 8,0                             | 1,68                                                      | 1,71                               | 0,234       |
| Ob     | 22,8                             | 1,25                                                                               | 6,0                             | 1,64                                                      | 1,66                               | 0,345       |
| Os     | 11,1                             | 1,41                                                                               | 8,2                             | 1,86                                                      | 1,88                               | 0,583       |

Oznaczenia:  $p$  – prawdopodobieństwo graniczne ( $\alpha=0,05$ )

Parametry wyjściowe oraz wyniki testów Proctora i jednoosiowego ściskania zamieszczono w tabeli A2-3. Analizując wyniki w obrębie poszczególnych obiektów można zauważyć, że minimalne wartości nacisków jednostkowych na próbkę ( $P_{\rho dp}$ ), przy których uzyskano gęstość objętościową szkieletu gleby równą wynikowi gęstości otrzymanej w teście Proctora ( $\rho_{dp}$ ), były zbliżone do wartości nacisków wywieranych na glebę przez koła pojazdów rolniczych (Walczyk, 1995; Jurga, 2009).

Tabela A2-3

Parametry wyjściowe i wyniki testów Proctora oraz jednostkowego ściskania próbek modelowych z zastosowaniem stempla o średnicy 50 mm

| Obiekt | Warstwa<br>(cm) | $w_s$<br>(% wag.) | $\rho_{dp}$<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | $\rho_{dm}$<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | $P_m$<br>(kPa) | $P_{\rho dp}$<br>(kPa) |
|--------|-----------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------|------------------------|
| NP     | 35-40           | 8,1 - 19,2        | 1,58 - 1,74                          | 1,26 - 1,29                          | 55 - 364       | 250 - 881              |
|        | 45-50           | 9,9 - 19,8        | 1,64 - 1,79                          | 1,25 - 1,28                          | 45 - 334       | 173 - 688              |
|        | 55-60           | 9,3 - 19,7        | 1,65 - 1,79                          | 1,24 - 1,26                          | 29 - 280       | 136 - 891              |
| Ob     | 35-40           | 10,6 - 25,7       | 1,49 - 1,64                          | 1,28 - 1,30                          | 91 - 384       | 148 - 998              |
|        | 45-50           | 15,7 - 32,0       | 1,40 - 1,67                          | 1,25 - 1,28                          | 34 - 193       | 75 - 778               |
|        | 55-60           | 15,7 - 30,3       | 1,41 - 1,65                          | 1,24 - 1,28                          | 30 - 294       | 73 - 838               |
| Os     | 35-40           | 8,7 - 18,2        | 1,74 - 1,89                          | 1,48 - 1,52                          | 99 - 407       | 148 - 1194             |
|        | 45-50           | 9,9 - 19,7        | 1,67 - 1,78                          | 1,44 - 1,48                          | 128 - 559      | 201 - 1433             |
|        | 55-60           | 11,3 - 21,3       | 1,59 - 1,84                          | 1,43 - 1,46                          | 68 - 388       | 83 - 1031              |

Oznaczenia:  $w_s$  – wilgotność materiału podczas testów Proctora i jednoosiowego ściskania,  $\rho_{dp}$  – gęstość objętościowa szkieletu otrzymana w teście Proctora,  $\rho_{dm}$  – gęstość objętościowa szkieletu próbek modelowych (po uformowaniu),  $P_m$  – nacisk formowania próbek modelowych,  $P_{\rho dp}$  – nacisk jednostkowy na próbkę, przy którym uzyskano gęstość równą wynikowi gęstości ( $\rho_{dp}$ ) otrzymanej w teście Proctora

Do doboru równań prognozowania nacisku jednostkowego ( $P_{\rho dp}$ ), niezbędnego do wytworzenia zagęszczenia równoważnego gęstości objętościowej szkieletu gleby uzyskiwanego w teście Proctora ( $\rho_{dp}$ ) przy określonej wilgotności, zastosowano w pierwszej kolejności regresję wieloraką. Oceniając zmienne niezależne uzyskanych modeli stwierdzono, że nacisk  $P_{\rho dp}$  niezbędny do wytworzenia  $\rho_{dp}$  nie zależy istotnie od tej gęstości ( $\rho_{dp}$ ). W następnej kolejności do doboru równań prognozowania  $P_{\rho dp}$  zastosowano regresję liniową stosując jako zmienną niezależną wilgotność próbki ( $w_s$ ). Uzyskane równania zamieszczono w tabeli A2-4. Modele są wysoce istotne ( $p < 0,001$ ) oraz dobrze dopasowane do punktów pomiarowych – współczynnik determinacji ( $r^2$ ) zawierał się w przedziale od 0,91 do 0,98.

Tabela A2-4

Równania regresji do prognozowania nacisku jednostkowego ( $P_{\rho dp}$ ) niezbędnego do wytworzenia zagęszczenia równoważnego gęstości objętościowej ( $\rho_{dp}$ ) uzyskiwanej w aparacie Proctora oraz ich ocena statystyczna

| Obiekt | Warstwa<br>(cm) | Równanie                             | Ocena statystyczna równania |       |
|--------|-----------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------|
|        |                 |                                      | $p$                         | $r^2$ |
| NP     | 35-40           | $P_{\rho dp} = - 40,2 w_s + 1023,8$  | <0,0001                     | 0,98  |
| NP     | 45-50           | $P_{\rho dp} = - 49,2 w_s + 1151,0$  | <0,0001                     | 0,96  |
| NP     | 55-60           | $P_{\rho dp} = - 53,3 w_s + 1238,6$  | <0,0001                     | 0,98  |
| Ob     | 35-40           | $P_{\rho dp} = - 62,7 w_s + 1780,1$  | <0,0001                     | 0,98  |
| Ob     | 45-50           | $P_{\rho dp} = - 55,2 w_s + 1626,2$  | <0,0001                     | 0,95  |
| Ob     | 55-60           | $P_{\rho dp} = - 48,6 w_s + 1533,0$  | <0,0001                     | 0,91  |
| Os     | 35-40           | $P_{\rho dp} = - 124,4 w_s + 2375,4$ | <0,0001                     | 0,98  |
| Os     | 45-50           | $P_{\rho dp} = - 127,1 w_s + 2689,2$ | <0,0001                     | 0,98  |
| Os     | 55-60           | $P_{\rho dp} = - 92,2 w_s + 1972,9$  | <0,0001                     | 0,95  |

Oznaczenia:  $w_s$  – wilgotność próbki gleby,  $p$  – poziom istotności ( $\alpha=0,05$ ),  $r^2$  – współczynnik determinacji regresji liniowej

Równania regresji (tab. A2-4) uzyskano na wytwarzanych próbkach modelowych o jednorodnej początkowej gęstości objętościowej ( $\rho_{dm}$ ) – rozstęp wartości dla poszczególnych warstw nie przekraczał  $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (tab. A2-3). W warunkach polowych gęstość objętościowa szkieletu glebowego ulega natomiast zmianie w wyniku oddziaływania zarówno czynników naturalnych, jak i antropogenicznych. W dalszych pracach należałoby zatem zbadać także wpływ gęstości początkowej próbki na prognozowaną wartość nacisku jednostkowego niezbędnego do wytworzenia określonego stanu zagęszczenia gleby.

A3. Śnieg K., Błażejczak D., Słowik M. 2018. Predicting unit pressure for generation of specific compaction of a soil sample. Agricultural Engineering, vol. 22(3), 85-92.

W wypracowaniu uproszczonego sposobu wyznaczenia naprężenia granicznego gleby, które pozwala na określenie dopuszczalnych obciążeń wywieranych na glebę, przydatne mogą być wyniki badań uzyskiwane podczas testów Proctora oraz jednoosiowego ściskania (Nawaz i in., 2013). Kontynuując badania Błażejczaka i in. (2018) uznano, że należy zbadać wpływ gęstości początkowej próbki na prognozowaną wartość nacisku jednostkowego niezbędnego do wytworzenia określonego stanu zagęszczenia gleby, a rozważania należy ograniczyć do jej stanu odpowiadającego wilgotności, w zakresie której prowadzone są prace polowe a gleba jest podatna na zagęszczanie, czyli wilgotnością optymalną gleby wg Proctora ( $w_{opt}$ ) a granicą jej plastyczności ( $P_L$ ). W warunkach polowych relacja pomiędzy wilgotnością optymalną zagęszczania gleby a jej granicą plastyczności może być modyfikowana przez różne czynniki (Mosaddeghi i in., 2000). Mosaddeghi i in. (2009) stwierdzili, że wilgotność optymalna zagęszczania jest zbliżona do wartości optymalnej wilgotności uprawowej. Należy dodać, że wilgotność gleby, przy której uzyskiwana jest najlepsza efektywność uprawy, może się różnić w zależności od zastosowanego narzędzia i jego głębokości roboczej (Larson i in., 1994), a jej zakres mieści się pomiędzy wilgotnością optymalną gleby wg Proctora a granicą jej plastyczności (Mueller i in., 2003).

**Celem badań było opracowanie modelu empirycznego do prognozowania nacisku jednostkowego niezbędnego do wytworzenia określonego zagęszczenia próbki gleby w zależności od jej wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu.**

W pracy A3 poszukiwano odpowiedzi na następujące pytania:

1. Czy zagęszczenie początkowe próbki ma wpływ na wyznaczany nacisk jednostkowy ( $P_{pdp}$ ) niezbędny do wytworzenia w teście jednoosiowym jej gęstości objętościowej ( $\rho_{dj}$ ) o wartości równej tej uzyskiwanej w aparacie Proctora ( $\rho_{dp}$ )?
2. Jaki jest zakres zmian gęstości gleby uzyskiwanej w aparacie Proctora ( $\rho_{dp}$ ) podczas zagęszczania materiału glebowego o zawartości wody w przedziale pomiędzy wilgotnością optymalną ( $w_{opt}$ ) a granicą plastyczności ( $P_L$ )?
3. Jak można opisać zależność nacisku jednostkowego ( $P_{pdp}$ ), niezbędnego do wytworzenia w teście jednoosiowym gęstości objętościowej szkieletu próbki ( $\rho_{dj}$ ) o wartości równej tej uzyskiwanej w aparacie Proctora ( $\rho_{dp}$ ), od stanu początkowego próbki gleby?

W tabeli A3-1 zamieszczono wyniki oznaczeń cech własnych materiału glebowego. Można zauważyć, że w badaniach zastosowano materiał glebowy o zróżnicowanym uziarnieniu. Największe zawartości frakcji: piaszczystej, pyłowej i ilastej zawierał materiał pobrany odpowiednio z obiektów: Ostoja (Os), Nowy Przylep (NP) i Obojno (Ob). Wystąpiły także wyraźne różnice pomiędzy obiektami w zawartości próchnicy oraz wartościach odczynu i gęstości właściwej. Stwierdzono, że materiał pochodził z gleb spoistych – różnica między granicami płynności i plastyczności była większa od 1,0% wag.

Tabela A3-1.

Średnie wartości cech własnych gleby dla poszczególnych obiektów w warstwie 35-40 cm

| Obiekt | Grupa granulometryczna wg PTG/USDA (PTG 2009) | Zawartość frakcji wg PTG (2009) |         |      | Gęstość właściwa (g·cm <sup>-3</sup> ) | Odczyn (w KCl) (pH) | Zawartość próchnicy (%) | $P_L$ (% wag.) | $L_L$ |
|--------|-----------------------------------------------|---------------------------------|---------|------|----------------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------|-------|
|        |                                               | Piasek                          | Pył (%) | Il   |                                        |                     |                         |                |       |
| NP     | pyg/SL                                        | 36,0                            | 53,4    | 10,6 | 2,46                                   | 6,34                | 2,02                    | 21,3           | 31,2  |
| Ob     | gz/L                                          | 25,0                            | 48,0    | 27,0 | 2,49                                   | 6,84                | 3,77                    | 28,0           | 47,9  |
| Os     | gz/L                                          | 45,0                            | 40,3    | 14,7 | 2,66                                   | 5,13                | 0,61                    | 18,4           | 27,6  |

Oznaczenia grup granulometrycznych: pyg/SL - pył gliniasty/sandy loam, gz/L - glina zwykła/loam,  $P_L$  – granica plastyczności,  $L_L$  – granica płynności

Zgodnie z przyjętym tokiem postępowania w pierwszej kolejności poszukiwano odpowiedzi na pytanie dotyczące wpływu gęstości początkowej ugniatanej próbki na wyznaczaną wartość nacisków jednostkowych ( $P_{pdp}$ ) niezbędnych do wytworzenia zagęszczenia ( $\rho_{dj}$ ) równoważnego wartości uzyskiwanej w aparacie Proctora ( $\rho_{dp}$ ). Wyniki porównania wartości nacisku  $P_{pdp}$  dla zróżnicowanych początkowych gęstości próbek modelowych ( $\rho_{dm}$ ) przy jednakowej ich wilgotności wagowej ( $w_s$ ) zamieszczono w tabeli A3-2. Uzyskano, że wartości te różniły się istotnie –  $p < 0,05$ . Większe wartości nacisku  $P_{pdp}$  dla próbek o większej początkowej gęstości objętościowych szkieletu ( $\rho_d$ ) można tłumaczyć większymi oporami przemieszczania cząstek glebowych poza strefę bezpośredniego oddziaływania stempla oraz większymi oporami ścinania gleby przez jego krawędź.

Tabela A3-2.

Wyniki porównania nacisków jednostkowych ( $P_{pdp}$ ) niezbędnych do wytworzenia w teście jednoosiowym zagęszczenia ( $\rho_{dj}$ ) równoważnego wartości uzyskiwanej w aparacie Proctora ( $\rho_{dp}$ ) dla różnych początkowych gęstości objętościowych szkieletu modelowej próbki gleby ( $\rho_{dm}$ )

| Obiekt | $w_s$ (% wag.) | $\rho_{dm}$ (g·cm <sup>-3</sup> ) | $\rho_{dj} = \rho_{dp}$ (g·cm <sup>-3</sup> ) | $P_{pdp}$ (kPa) | Wartość $p$ (dla $P_{pdp}$ ) |
|--------|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------|------------------------------|
| NP     | 18,0 (0,1)     | 1,27 (0,03)                       | 1,71                                          | 317 (25)        | < 0,001                      |
|        |                | 1,48 (0,02)                       |                                               | 487 (10)        |                              |
| Ob     | 23,3 (0,3)     | 1,29 (0,02)                       | 1,58                                          | 291 (5)         | < 0,001                      |
|        |                | 1,42 (0,02)                       |                                               | 675 (21)        |                              |
| Os     | 15,7 (0,1)     | 1,48 (0,02)                       | 1,85                                          | 332 (3)         | < 0,001                      |
|        |                | 1,67 (0,01)                       |                                               | 432 (14)        |                              |

Oznaczenia:  $w_s$  – wilgotność próbki,  $\rho_{dm}$  - początkowa gęstość objętościowych szkieletu próbki modelowej,  $p$  – poziom prawdopodobieństwa; Uwaga: w nawiasach podano wartość odchylenia standardowego

W tabeli A3-3 zamieszczono wyniki testów Proctora oraz jednostkowego ściskania dla rozpatrywanego zakresu wilgotności gleby, tj. w przybliżeniu pomiędzy wilgotnością optymalną ( $w_{opt}$ ) a granicą plastyczności ( $P_L$  - tab. A3-1). Zakres zmian wartości gęstości uzyskiwanych w aparacie Proctora ( $\rho_{dp}$ ) w przedziale wilgotności pomiędzy  $w_{opt}$  a  $P_L$  można uznać za znaczący, ponieważ przekracza  $0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Dla badanych obiektów *NP*, *Ob* i *Os* zakres ten wynosił odpowiednio:  $1,61 - 1,73$ ,  $1,52 - 1,67$  i  $1,74 - 1,88 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Można zauważyć również (tab. A3-3), że wyznaczone wartości nacisków jednostkowych  $P_{pdp}$  i  $P_{pds}$  niezbędne do wytworzenia odpowiednio gęstości  $\rho_{dp}$  i  $\rho_{ds}$  są zbliżone.

Tabela A3-3.

Parametry wyjściowe i wyniki testów Proctora oraz jednoosiowego ściskania próbek modelowych

| Obiekt    | $w_s$<br>(% wag.) | $\rho_{dm}$<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $w_{opt}$<br>(% wag.) | $\rho_{ds}$<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $\rho_{dp}$<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $P_{pdp}$<br>(kPa) | $P_{pds}$<br>(kPa) |
|-----------|-------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| <i>NP</i> | 16,3 – 21,5       | 1,36 – 1,60                                      | 15,7                  | 1,74                                             | 1,61 – 1,73                                      | 159 - 685          | 175 - 706          |
| <i>Ob</i> | 18,0 – 27,3       | 1,27 – 1,51                                      | 17,7                  | 1,68                                             | 1,52 – 1,67                                      | 135 - 695          | 182 - 712          |
| <i>Os</i> | 13,7 – 18,4       | 1,46 – 1,71                                      | 13,1                  | 1,88                                             | 1,74 – 1,88                                      | 148 - 803          | 192 - 805          |

Oznaczenia:  $w_{opt}$  – wilgotność optymalna wg Proctora,  $\rho_{ds}$  – gęstość objętościowa maksymalna wg Proctora,  $\rho_{dp}$  – gęstość objętościowa uzyskana dla poszczególnych wartości wilgotności ( $w_s$ ),  $P_{pds}$  – nacisk jednostkowy na próbkę, przy którym uzyskano gęstość równą maksymalnej gęstości ( $\rho_{ds}$ ) oznaczonej w teście Proctora; pozostałe oznaczenia zob. tab. A3-2

Poszukując odpowiedzi na trzecie z postawionych pytań badawczych, wykorzystując wytworzone w drugim etapie eksperymentu próbki, których właściwości ( $w_s$ ,  $\rho_{dm}$ ) opisano w tabeli A3-3, stosowano regresję wieloraką. Oceniając zmienne niezależne uzyskanych modeli (tab. A3-4) stwierdzono, że nacisk  $P_{pdp}$  niezbędny do wytworzenia  $\rho_{dj} = \rho_{dp}$  zależy istotnie od wilgotności ( $w_s$ ) i gęstości objętościowej szkieletu ( $\rho_{dm}$ ) próbki. Uzyskane równania są istotne ( $p < 0,001$ ) oraz bardzo dobrze dopasowane do punktów pomiarowych – współczynnik determinacji ( $R^2$ ) zawierał się w przedziale od 0,92 do 0,97. Równania regresji poddano ocenie za pomocą przypadków wchodzących w skład zbioru walidacyjnego. Obliczone średnie wartości błędów względnych prognozy ( $\delta_p$ ), rozumianych jako różnica wartości zmierzonych i prognozowanych podzielona przez wartości zmierzone, były mniejsze od 6%, co należy uznać za bardzo dobry wynik dla potrzeb szacowania nacisku  $P_{pdp}$ . Biorąc pod uwagę ocenę statystyczną uzyskanych równań oraz wartości błędów prognozy należy uznać, że stosowanie równań regresji wielorakiej do prognozowania wartości nacisków  $P_{pdp}$  jest zasadne. Analizując wartości współczynników równań regresji zauważamy, że zbliżone ich wartości uzyskano dla obiektów *NP* i *Ob*, co można tłumaczyć podobnymi właściwościami próbek (tab. A3-3) oraz odmiennymi cechami obiektu *Os* takimi, jak zawartości frakcji piasku i próchnicy (tab. A3-1), które mogły mieć wpływ na rejestrowane opory zagęszczania.

Tabela A3-4

Równania regresji do prognozowania nacisku jednostkowego ( $P_{\rho dp}$ ) niezbędnego do wytworzenia w teście jednoosiowym zagęszczenia ( $\rho_{dj}$ ) równoważnego gęstości objętościowej szkieletu próbki ( $\rho_{dp}$ ) uzyskiwanej w aparacie Proctora oraz ich ocena statystyczna

| Obiekt    | Równanie                                              | Ocena statystyczna równania |       | $\delta_p$<br>(%) |
|-----------|-------------------------------------------------------|-----------------------------|-------|-------------------|
|           |                                                       | $p$                         | $R^2$ |                   |
| <i>NP</i> | $P_{\rho dp} = - 71,9 w_s + 723,4 \rho_{dm} + 782,8$  | <0,0001                     | 0,92  | 5,6 (3,6)         |
| <i>Ob</i> | $P_{\rho dp} = - 70,8 w_s + 675,2 \rho_{dm} + 1102,0$ | <0,0001                     | 0,92  | 4,4 (2,7)         |
| <i>Os</i> | $P_{\rho dp} = - 79,9 w_s + 416,7 \rho_{dm} + 994,4$  | <0,0001                     | 0,97  | 4,7 (3,4)         |

Oznaczenia:  $R^2$  – współczynnik determinacji,  $\delta_p$  - błąd względny prognozy; pozostałe oznaczenia zob. tab. 2;  
Uwaga: w nawiasach podano wartość odchylenia standardowego

Równania regresji (tab. A3-4) uzyskano na wytwarzanych próbkach w warunkach laboratoryjnych, czyli na materiale o prawdopodobnie mniejszej wytrzymałości niż gleba o strukturze naturalnej, o czym świadczą m.in. wyniki badań prezentowane przez Horna i Leberta (1994). Uznano zatem, że należy w przyszłości uzyskane w niniejszej pracy rezultaty zweryfikować dla warunków polowych, tj. na próbkach o tzw. nienaruszonej strukturze.

A4. Śnieg K., Błażejczak D. 2019. Prediction of pre-compaction stress of soil with uniaxial test. Agricultural Engineering, vol. 23(1), 95-103.

Na podstawie analizy wyników uzyskanych przez innych autorów (Wagner i in., 1994; Aragón i in., 2000; Nhantumbo i Cambule, 2006; Tarkiewicz i Nosalewicz, 2005; Nawaz i in., 2013; Kumar i in., 2009) oraz rezultatów badań własnych (Błażejczak i in., 2018; Śnieg i in., 2018) stwierdzono, że w wypracowaniu procedury wyznaczania dopuszczalnych obciążeń na glebę przydatne mogą być wyniki badań uzyskiwane podczas testów Proctora oraz jednoosiowego ściskania. Stwierdzono także (Śnieg i in., 2018), że wartość nacisku jednostkowego wywieranego na glebę w teście jednoosiowego ściskania, niezbędna do wytworzenia zagęszczenia równoważnego gęstości objętościowej uzyskiwanej w aparacie Proctora, zależy istotnie od wilgotności i początkowej gęstości objętościowej szkieletu próbki, oraz że do opisu tej zależności wystarczające jest zastosowanie regresji wielorakiej. Sformułowano zatem przypuszczenie, że również w teście jednoosiowego ściskania możliwe jest prognozowanie wartości nacisku jednostkowego, utożsamianego z wartością naprężenia granicznego, wywieranego na glebę w celu wytworzenia określonego jej zagęszczenia.

**Celem badań było opracowanie modelu empirycznego do prognozowania wartości naprężenia granicznego na podstawie wyznaczanego nacisku jednostkowego na glebę, zwiększającego początkowe zagęszczenie próbki glebowej o założoną wartość. Biorąc po uwagę praktyczną dokładność wyznaczania gęstości objętościowej szkieletu gleby przyjęto, że**

badania należy przeprowadzić dla wartości przyrostu zagęszczenia próbki równej  $+0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (Wojtasik, 1995) lub  $+0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (Komornicki i Zasoński, 1965).

Realizując cel badań (A4) poszukiwano odpowiedzi na następujące pytania:

1. Jak kształtuje się relacja pomiędzy wartościami nacisków jednostkowych ( $P_{\rho m+0,05}$  lub  $P_{\rho m+0,10}$ ), zwiększających początkowe zagęszczenie próbki modelowej ( $\rho_{dm}$ ) o wartość  $+0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  lub  $+0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  w odniesieniu do nacisków jednostkowych ( $P_m$ ) zastosowanych do uformowania próbek?
2. Jak kształtuje się relacja pomiędzy wartościami nacisków jednostkowych ( $P_{\rho d+0,05}$  lub  $P_{\rho d+0,10}$ ), niezbędnych do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki glebowej o tzw. nienaruszonej strukturze (NS), o wartość  $+0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  lub  $+0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , w odniesieniu do nacisków jednostkowych wywieranych na glebę przez koła pojazdów i maszyn rolniczych?
3. Jak można prognozować wartości nacisków jednostkowych niezbędnych do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki NS o założoną wartość?

W tabeli A4-1 zamieszczono wyniki oznaczeń cech własnych materiału glebowego. Można zauważyć, że w badaniach zastosowano materiał glebowy o zróżnicowanym uziarnieniu. Największe zawartości frakcji: piaszczystej, pyłowej i ilastej zawierał materiał pobrany odpowiednio z obiektów: Ostoja (Os), Nowy Przylep (NP) i Obojno (Ob). Wystąpiły także wyraźne różnice pomiędzy obiektami w zawartości próchnicy oraz wartościach odczynu i gęstości właściwej. Stwierdzono, że materiał pochodził z gleb spoistych – różnica między granicami płynności i plastyczności była większa od 1,0% wag.

Tabela A4-1.

Średnie wartości cech własnych gleby dla poszczególnych obiektów w warstwie 35-40 cm (Śnieg i in., 2018)

| Obiekt | Grupa granulometryczna wg. PTG/USDA (PTG 2009) | Zawartość frakcji wg PTG (2009) |      |      | $\rho_s$ | Odczyn (w KCl) | $Z_{pr}$ | $P_L$ | $L_L$ | $w_{opt}$ | $\rho_{ds}$ |
|--------|------------------------------------------------|---------------------------------|------|------|----------|----------------|----------|-------|-------|-----------|-------------|
|        |                                                | Piasek                          | Pył  | Il   |          |                |          |       |       |           |             |
|        |                                                | (%)                             |      |      |          |                |          |       |       |           |             |
| NP     | pyg/SL                                         | 36,0                            | 53,4 | 10,6 | 2,46     | 6,34           | 2,02     | 21,3  | 31,2  | 15,7      | 1,74        |
| Ob     | gz/L                                           | 25,0                            | 48,0 | 27,0 | 2,49     | 6,84           | 3,77     | 28,0  | 47,9  | 17,7      | 1,68        |
| Os     | gz/L                                           | 45,0                            | 40,3 | 14,7 | 2,66     | 5,13           | 0,61     | 18,4  | 27,6  | 13,1      | 1,88        |

Oznaczenia grup granulometrycznych: pyg/SL - pył gliniasty/sandy loam, gz/L - glina zwykła/loam,  $\rho_s$  gęstość właściwa,  $Z_{pr}$  - zawartość próchnicy,  $P_L$  - granica plastyczności,  $L_L$  - granica płynności,  $W_{opt}$  - wilgotność optymalna wg Proctora,  $\rho_{ds}$  - gęstość maksymalna wg Proctora

W tabeli A4-2 zamieszczono wyniki badań początkowych gęstości ( $\rho_{dm}$ ) i wilgotności ( $w_s$ ) próbek modelowych oraz relacji pomiędzy wartościami nacisków  $P_{\rho m+0,05}$  i  $P_{\rho m+0,10}$  a naciskami jednostkowymi ( $P_m$ ) zastosowanymi do ich uformowania. Można zauważyć, że naciski  $P_{\rho m+0,05}$  niezbędne do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki modelowej ( $\rho_{dm}$ )

o wartość  $+0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  były większe od około 1,03 do 1,11 wartości  $P_m$ . Naciski  $P_{\rho m+0,10}$  niezbędne do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki modelowej ( $\rho_{dm}$ ) o wartość  $+0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  były natomiast większe od około 1,42 do 1,93 wartości  $P_m$ . Przeciętne wartości odkształcenia próbek  $\Delta H_{+0,05}$  i  $\Delta H_{+0,10}$ , przy których osiągnięto wzrost wartości  $\rho_{dm}$  o  $+0,05$  lub  $+0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  wynosiły odpowiednio około 1 i 2 mm. Należy dodać, że zgodnie z wcześniejszymi wynikami badań wartość naprężenia granicznego powinna być zbliżona do wartości  $P_m$  (Błazejczak, 2010). Biorąc pod uwagę, wyżej opisane relacje, jak również to, że uzyskane wartości  $P_{\rho m+0,05}$  były zbliżone do  $P_m$ , można stwierdzić, że wartość naprężenia granicznego próbek modelowych należy wyznaczać przy odkształceniu mieszczącym się w przedziale od około 0,84 do 1,20 mm.

Tabela A4-2

Parametry wyjściowe i wyniki testu jednostkowego ściskania próbek modelowych

| Obiekt | $w_s$       | $\rho_{dm}$                       | $P_m$    | $P_{\rho m+0,05}$ | $P_{\rho m+0,10}$ | $\Delta H_{+0,05}$ | $\Delta H_{+0,10}$ |
|--------|-------------|-----------------------------------|----------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
|        | (% wag.)    | ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | (kPa)    |                   |                   | (mm)               |                    |
| NP     | 16,3 – 21,1 | 1,38 – 1,62                       | 66 - 257 | 73 - 276          | 126 – 474         | 0,89 – 1,15        | 1,78 – 2,01        |
| Ob     | 17,5 – 27,2 | 1,28 – 1,52                       | 49 - 377 | 54 - 396          | 87 – 564          | 0,99 – 1,20        | 1,94 – 2,22        |
| Os     | 13,4 – 18,5 | 1,47 – 1,68                       | 68 - 321 | 74 - 332          | 112 – 502         | 0,84 – 1,06        | 1,71 – 1,96        |

Oznaczenia:  $w_s$  – wilgotność próbki,  $\rho_{dm}$  – gęstość objętościowa szkieletu próbki,  $P_m$  - nacisk formowania próbki,  $P_{\rho m+0,05}$  – nacisk jednostkowy na próbkę, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_{dm} +0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $P_{\rho m+0,10}$  – nacisk jednostkowy na próbkę, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_{dm} +0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $\Delta H_{+0,05}$  – odkształcenie próbki, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_{dm} +0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $\Delta H_{+0,10}$  – odkształcenie próbki, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_{dm} +0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

W tabeli A4-3 zamieszczono wyniki oznaczeń wilgotności wagowej ( $w_a$ ) oraz gęstości objętościowej szkieletu glebowego ( $\rho_d$ ) próbek NS, które poddano testowi jednoosiowego ściskania, w sposób identyczny jak próbki modelowe. Można zauważyć, że zakresy zmian oznaczonych wartości  $w_a$  i  $\rho_d$  były zbliżone do wartości parametrów próbek modelowych ( $w_s$ ,  $\rho_{dm}$ ) zamieszczonych w tabeli A4-2. Podobnie zakresy zmian wartości nacisków  $P_{\rho d+0,05}$  i  $P_{\rho d+0,10}$  oraz odkształceń próbek  $\Delta H_{+0,05}$  i  $\Delta H_{+0,10}$  były zbliżone do wartości uzyskanych w badaniach próbek modelowych (tab. A4-2). Można także zauważyć, że wartości  $P_{\rho d+0,05}$  i  $P_{\rho d+0,10}$  są często większe od wyznaczanych średnich nacisków jednostkowych wywieranych na glebę przez koła pojazdów i maszyn rolniczych (Walczyk, 1995; Jurga, 2009; Filipovic i in., 2016). W odniesieniu do badanej warstwy gleby, leżącej na głębokości 35 – 40 cm, za wartości szczególnie odbiegające, tzn. zawierające się poza zakresem rozważań, należy uznać wartości  $P_{\rho d+0,10}$ . Wynika to z tego, że wraz ze wzrostem głębokości wartości naprężeń od wywieranych na powierzchnię gleby obciążeń maleją (Pytko, 2005). Na przykład według Filipovic i in. (2016) rejestrowane naprężenia na głębokości 30 cm stanowią około 37% wartości rejestrowanej na głębokości 10 cm. Przekroczenie zatem wartości naprężenia granicznego

w rozpatrywanej warstwie będzie możliwe jeśli średni nacisk jednostkowy wywierany na glebę przez koło będzie znacząco większy od naprężenia granicznego. Biorąc powyższe pod uwagę dalsze rozważania prowadzono w odniesieniu do nacisków jednostkowych niezbędnych do zwiększenia zagęszczenia gleby o wartość  $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Tabela A4-3

Parametry wyjściowe i wyniki testu jednostkowego ściskania próbek o nienaruszonej strukturze (NS)

| Obiekt | $w_a$       | $\rho_d$                          | $P_{pd+0,05}$ | $P_{pd+0,10}$ | $\Delta H_{+0,05}$ | $\Delta H_{+0,10}$ |
|--------|-------------|-----------------------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|
|        | (% wag.)    | ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | (kPa)         |               | (mm)               |                    |
| NP     | 18,9 – 21,6 | 1,36 – 1,59                       | 75 - 371      | 124 – 530     | 0,84 – 1,10        | 1,70 – 2,06        |
| Ob     | 18,0 – 26,5 | 1,35 – 1,58                       | 50 - 488      | 115 – 714     | 0,92 – 1,04        | 1,80 – 1,94        |
| Os     | 13,4 – 17,1 | 1,53 – 1,75                       | 86 - 282      | 170 – 539     | 0,79 – 0,89        | 1,59 – 1,74        |

Oznaczenia:  $w_a$  – wilgotność próbki NS,  $\rho_d$  – gęstość objętościowa szkieletu próbki NS,  $P_{pd+0,05}$  – nacisk jednostkowy na próbkę NS, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_d + 0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,  $P_{pd+0,10}$  – nacisk jednostkowy na próbkę NS, przy którym uzyskano gęstość  $\rho_d + 0,10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; pozostałe oznaczenia zob. tab. 2

Poszukiwanie sposobu prognozowania wartości nacisków jednostkowych, niezbędnych do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbek NS o wartość  $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , wykonywano etapami. Dane o próbkach NS podzielono na dwa podzbiory, tj. NS1 służący do opracowania modelu oraz NS2, który wykorzystano do jego weryfikacji.

W etapie pierwszym dane o wartościach  $w_s$  i  $\rho_{dm}$  próbek modelowych (tab. A4-2) wykorzystano do budowy równań regresji wielorakiej do prognozowania wartości  $P_{pm+0,05}$ . Uzyskane modele (tab. A4-4) były wysoce istotne ( $p < 0,001$ ) oraz dobrze dopasowane do punktów pomiarowych – współczynnik determinacji ( $R^2$ ) zawierał się w przedziale od 0,89 do 0,91.

Następnie, w etapie drugim, badano relacje pomiędzy wartościami nacisków jednostkowych  $P_{pd1+0,05}$ , zmierzonymi na próbkach NS1, a wartościami  $P_{pm+0,05}$ , obliczając ilorazy (przeliczniki)  $q = P_{pd1+0,05}/P_{pm+0,05}$ . Przy czym wartości  $P_{pm+0,05}$  wyznaczano za pomocą równań regresji (tab. A4-4) przyjmując  $w_s = w_a$  i  $\rho_{dm} = \rho_d$ . Można zauważyć, że zmierzone na próbkach modelowych średnie wartości  $P_{pd1+0,05}$  były około 1,00 do 1,15 krotnie większe od prognozowanych wartości  $P_{pm+0,05}$ , co jest zgodne z wynikami Horna i Leberta (1994), którzy podają, że próbki o tzw. nienaruszonej strukturze wykazują większą wytrzymałość od wytwarzanych w warunkach laboratoryjnych.

W etapie trzecim sprawdzano możliwość prognozowania wartości nacisków jednostkowych ( $P_{pd2+0,05}$ ) niezbędnych do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbek NS o wartość  $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , za pomocą równań zamieszczonych w tabeli A4-4, wykorzystując podzbiór NS2. Stwierdzono, że prognozowanie nacisków  $P_{pd2+0,05}$  za pomocą równań postaci

$$P_{pd2+0,05} = (a \cdot w_s + b \cdot \rho_{dm} + c) \cdot q, \quad (\text{A4-1})$$

tj. z wykorzystaniem otrzymanych modeli regresji wielorakiej do prognozowania  $P_{pm+0,05}$  oraz przelicznika  $q$ , zwiększającego wartość prognozy o wynik obliczonego ilorazu, jest obarczone dużym błędem. Świadczą o tym wyliczone stosunkowo duże wartości błędu względnego prognozy ( $\delta_p$ ), uzyskane dla próbek ze zbioru sprawdzającego ( $NS2$ ), tj. od 41 do 84%, co było następstwem dużego rozrzutu wartości ilorazów  $q$ , których odchylenia standardowe zawierały się w przedziale od 0,27 do 0,69. Błąd  $\delta_p$  obliczano jako iloraz różnicy wartości zmierzonej i prognozowanej podzielonej przez wartość zmierzoną.

Tabela A4-4

Równania regresji do prognozowania nacisku jednostkowego  $P_{pm+0,05}$  niezbędnego do wytworzenia zagęszczenia próbki modelowej równego  $\rho_{dm}$  powiększonej o  $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  i ich ocena statystyczna oraz wartości przeliczników  $q$  i średniego błędu prognozy nacisku jednostkowego  $P_{pd2+0,05}$  próbek podzbioru  $NS2$

| Objekt    | Równanie                                          | Ocena statystyczna<br>równania |       | $N_{NS1}/N_{NS2}$ | $q$<br>(-)  | $\delta_p$<br>(%) |
|-----------|---------------------------------------------------|--------------------------------|-------|-------------------|-------------|-------------------|
|           |                                                   | $p$                            | $R^2$ |                   |             |                   |
|           |                                                   |                                |       |                   |             |                   |
| <i>NP</i> | $P_{pm+0,05} = -24,1w_s + 593,7\rho_{dm} - 236,3$ | <0,001                         | 0,89  | 37/30             | 1,15 (0,33) | 58                |
| <i>Ob</i> | $P_{pm+0,05} = -37,9w_s + 853,0\rho_{dm} - 125,9$ | <0,001                         | 0,91  | 43/28             | 1,14 (0,69) | 84                |
| <i>Os</i> | $P_{pm+0,05} = -20,0w_s + 458,8\rho_{dm} - 256,1$ | <0,001                         | 0,90  | 40/29             | 1,02 (0,27) | 41                |

Oznaczenia:  $p$  - prawdopodobieństwo,  $R^2$  – współczynnik determinacji,  $N_{NS1}$  i  $N_{NS2}$  – liczba próbek,  $q$  – wartość ilorazu  $P_{pd1+0,05} / P_{pm+0,05}$ ,  $\delta_p$  - błąd względny prognozy  $P_{pd2+0,05}$ , pozostałe oznaczenia zob. tab.A4-2; Uwaga: w nawiasach podano wartość odchylenia standardowego

Z powodu niezadawalających wyników prognozowania wartości  $P_{pd2+0,05}$ , za pomocą równań regresji wielorakiej i wartości ilorazów  $q$  (tab. A4-4), dalsze prace ukierunkowano na poszukiwanie równań regresji liniowej (tab. A4-5). Równania dobrano do wąskiego przedziału zmienności gęstości objętościowej szkieletu próbek modelowych, tj. wartość  $\rho_{dm} \pm 0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , co jest uzasadnione w świetle badań Wojtasika (1995). Predyktorem były wartości  $w_s$ . Uzyskano modele były wysoce istotne ( $p < 0,001$ ) oraz dobrze dopasowane do punktów pomiarowych – współczynnik determinacji ( $R^2$ ) zawierał się w przedziale od 0,91 do 0,98. Można zauważyć, że uzyskane (tab. A4-5) wartości ilorazów  $q$  ( $P_{pd1+0,05}/P_{pm+0,05}$ ) były zróżnicowane w obrębie obiektów i malały wraz ze wzrostem zagęszczenia próbek. Prognozowanie nacisków  $P_{pd2+0,05}$  za pomocą równań regresji zamieszczonych w tabeli A4-5, z wykorzystaniem obliczonego ilorazu  $q$ , było obarczone stosunkowo małym błędem, biorąc pod uwagę zmienność środowiska glebowego. Średnie wartości błędu  $\delta_p$ , uzyskane dla próbek zbioru sprawdzającego ( $NS2$ ) zawierały się w przedziale od 7 do 26%. Wartości odchylen standardowych ilorazów  $q$  zawierały się w granicach od 0,04 do 0,22.

Tabela A4-5

Równania regresji do prognozowania nacisku jednostkowego ( $P_{\rho m+0,05}$ ) niezbędnego do wytworzenia zagęszczenia próbki modelowej równego wartości gęstości  $\rho_{dm}$  powiększonej o  $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  i ich ocena statystyczna oraz wartości przeliczników  $q$  i średniego błędu prognozy nacisku jednostkowego  $P_{pd2+0,05}$  próbek podzbioru NS2

| Obiekt | Zakres $\rho_{dm}$<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | Równanie                               | Ocena statystyczna<br>równania |       | $N_{NS1}/$<br>$N_{NS2}$ | $q$<br>(-)  | $\delta_p$<br>(%) |
|--------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------------|-------------------|
|        |                                                         |                                        | $p$                            | $R^2$ |                         |             |                   |
| NP     | (1,35-1,45)                                             | $P_{\rho m+0,05} = -14,37w_s + 395,8$  | <0,001                         | 0,92  | 11/10                   | 1,27 (0,17) | 19                |
|        | <1,45-1,55)                                             | $P_{\rho m+0,05} = -32,30w_s + 811,5$  | <0,001                         | 0,96  | 12/8                    | 1,24 (0,21) | 17                |
|        | <1,55-1,65)                                             | $P_{\rho m+0,05} = -58,58w_s + 1392,6$ | <0,001                         | 0,94  | 14/12                   | 1,10 (0,04) | 12                |
| Ob     | (1,30-1,40)                                             | $P_{\rho m+0,05} = -15,86w_s + 484,6$  | <0,001                         | 0,98  | 16/8                    | 1,36 (0,11) | 26                |
|        | <1,40-1,50)                                             | $P_{\rho m+0,05} = -25,66w_s + 803,2$  | <0,001                         | 0,93  | 14/9                    | 1,24 (0,19) | 18                |
|        | <1,50-1,60)                                             | $P_{\rho m+0,05} = -36,25w_s + 1076,3$ | <0,001                         | 0,97  | 13/11                   | 1,07 (0,22) | 14                |
| Os     | (1,40-1,50)                                             | $P_{\rho m+0,05} = -16,24w_s + 356,6$  | <0,001                         | 0,91  | 14/11                   | 1,29 (0,09) | 22                |
|        | <1,50-1,60)                                             | $P_{\rho m+0,05} = -24,41w_s + 507,8$  | <0,001                         | 0,91  | 12/8                    | 1,14 (0,17) | 12                |
|        | <1,60-1,70)                                             | $P_{\rho m+0,05} = -60,76w_s + 1177,7$ | <0,001                         | 0,98  | 14/10                   | 1,04 (0,08) | 7                 |

Oznaczenia:  $R^2$  – współczynnik determinacji regresji liniowej, pozostałe oznaczenia zob. tab. A4-4

## 5. Podsumowanie i wnioski

W dążeniu do opracowania propozycji uproszczenia sposobu prognozowania naprężenia granicznego gleby skoncentrowano się na czynnikach charakteryzujących jej podatność na zagęszczanie, które opisują aktualny jej stan fizyczny, tj. wilgotność i gęstość objętościową szkieletu gleby. Kształtowanie się zaś fizycznego stanu gleby uzależnione jest od jej składu i wpływu czynników zewnętrznych, do których należą naciski wywierane na glebę przez układy jezdne pojazdów rolniczych. Badania zależności między wymienionymi wyżej czynnikami były podstawą przyjętego toku postępowania, niezbędnego do zebrania danych na potrzeby budowy i oceny zaproponowanego modelu. Takie podejście do osiągnięcia zasadniczego celu pracy spowodowało, że każde z otrzymanych równań regresji ma zastosowanie do prognozowania naprężenia granicznego wybranej do badań gleby, w odniesieniu do próbki modelowej lub próbki o nienaruszonej strukturze, pobranej z określonej jej warstwy, po uwzględnieniu wyznaczonego przelicznika ( $q$ ).

Realizując pracę wykonano szereg eksperymentów na próbkach modelowych oraz o tzn. nienaruszonej strukturze, pobranych z warstwy podornej wybranych gleb. Wyniki identyfikacji aktualnych właściwości gleb oraz rezultaty testu Proctora umożliwiły precyzyjne zaplanowanie doświadczeń.

Badania wykonane na próbkach modelowych pozwoliły na wyznaczenie relacji pomiędzy rezultatami zagęszczania materiału glebowego, prowadzonego za pomocą testów Proctora i jednoosiowego ściskania, a także ustalenie zależności pomiędzy wynikami obu testów oraz opracowanie modelu empirycznego do prognozowania nacisku jednostkowego, niezbędnego do wytworzenia określonego zagęszczenia próbki gleby. Wymagało to przyjęcia sposobu jednoosiowego odkształcania próbek. Analizując zmianę stanu zagęszczenia gleby pod stemplem, na podstawie jego przemieszczenia oraz wartości nacisków niezbędnych do jego wytworzenia, wybrano możliwą boczną rozszerzalność gleby. Badania te wykonano stosując określony rozmiar cylindereków, tj. o średnicy wewnętrznej ( $D$ ) i wysokości ( $H$ ) wynoszących odpowiednio 100 i 30 mm. Średnica stempla była zaś równa 50 mm.

Nieodłączną częścią pracy było zaproponowanie uproszczonej metody wyznaczania naprężenia granicznego gleby. Należy podkreślić, że metoda ta ogranicza subiektywny wpływ badacza na wynik obliczeń, ponieważ naprężenie graniczne równe jest naciskowi jednostkowemu необходимemu do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki o przyjętą wartość, tj. o  $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Ma ona zastosowanie do pomiarów wykonywanych w warunkach

laboratoryjnych, zarówno w odniesieniu do próbek modelowych, jak i, po uwzględnieniu przelicznika  $q$ , do próbek o tzw. nienaruszonej strukturze.

Na podstawie zrealizowanej pracy sformułowano, zamieszczone w poszczególnych publikacjach (A1 – A4), niżej podane wnioski.

### **A1:**

- A1-1. Badane gleby zależnie od okresu i głębokości pomiaru oraz ich składu granulometrycznego można zaliczyć do nadmiernie zagęszczonych. Przy czym najmniej przypadków nadmiernego zagęszczenia stwierdzono dla gleb o uziarnieniach pył gliniasty i glina zwykła o zawartości cząstek  $<0,002$  mm mieszczących się w przedziale od 9 do 15%.
- A1-2. Glebę można uważać za nadmiernie zagęszczoną, gdy iloraz aktualnej gęstości objętościowej szkieletu ( $\rho_d$ ) i gęstości maksymalnej ( $\rho_{ds}$ ), oznaczonej normalną (standardową) metodą Proctora, przekracza wartość 0,87. Gleba nie jest w stanie nadmiernie zagęszczonym, gdy wartość ilorazu  $\rho_d/\rho_{ds}$  nie przekracza 0,77. Wartości  $\rho_d/\rho_{ds}$  pomiędzy 0,77 i 0,87 pozwalają zależnie od składu granulometrycznego gleby uznać jej stan zagęszczenia za podwyższony.
- A1-3. Badane gleby, na podstawie analizy wartości zwięzłości gleby i jej ścinania w ruchu obrotowym oraz gęstości objętościowej części mineralnych, można zaliczyć do podatnych na zagęszczanie w stopniu średnim lub małym.
- A1-4. Aktualna gęstość objętościowa szkieletu badanych gleb nie osiągnęła wartości gęstości objętościowych maksymalnych, oznaczonych metodą Proctora, co świadczy, że gleby te mogą podlegać procesowi dalszego zagęszczania.
- A1-5. Zagęszczenie badanych gleb nie przekroczyło znacząco wartości gęstości objętościowych odczytanych z krzywej Proctora dla wilgotności oznaczonych w warunkach polowych.

### **A2:**

- A2-1. Dla celów porównywania wyników testów jednoosiowego ściskania z rezultatami ubijania gleby w aparacie Proctora, w kontekście badania jej zagęszczania przez maszyny i pojazdy rolnicze, próbki należy odkształcać w warunkach możliwej ich bocznej rozszerzalności.

- A2-2. W przypadku modelowych próbek o średnicy 100 i wysokości 30 mm, stosując test jednoosiowy z możliwą boczną rozszerzalnością gleby, można do określenia uzyskiwanego zagęszczenia wykorzystać wartość przemieszczenia stempla.
- A2-3. Wartość nacisku jednostkowego wywieranego na próbkę gleby w teście jednoosiowego ściskania, pozwalająca na uzyskanie gęstości objętościowej szkieletu gleby otrzymanej w aparacie Proctora, zależy istotnie od wilgotności próbki.

### A3:

- A3-1. Zagęszczenie początkowe próbki gleby ma wpływ na wyznaczaną wartość nacisków jednostkowych niezbędnych do wytworzenia w teście jednoosiowym zagęszczenia równoważnego wartości gęstości objętościowej uzyskiwanej w aparacie Proctora.
- A3-2. Różnica maksymalnej i minimalnej wartości gęstości objętościowych szkieletu gleby uzyskiwanej w aparacie Proctora, dla materiału glebowego o uziarnieniu pyłu gliniastego lub gliny zwykłej oraz jego wilgotności mieszczącej się w przedziale pomiędzy wilgotnością optymalną a granicą plastyczności, wynosi od 0,12 do 0,15 g·cm<sup>-3</sup>.
- A3-3. Do opisu zależności nacisk jednostkowy, niezbędny do wytworzenia w teście jednoosiowym zagęszczenia równoważnego wartości gęstości objętościowej szkieletu gleby uzyskiwanej w aparacie Proctora, od początkowej gęstości objętościowej i wilgotności próbek, mieszczącej się w przedziale pomiędzy wilgotnością optymalną a granicą plastyczności, można stosować regresję wieloraką. Świadczą o tym wysoka statystyczna ocena uzyskanych równań regresji ( $R^2 \geq 0,92$ ,  $p < 0,001$ ) oraz małe wartości błędów względnych prognozy zmiennej zależnej ( $\delta p \leq 6\%$ ).

### A4:

- A4-1. Naciski niezbędne do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki modelowej o wartości +0,05 lub +0,10 g·cm<sup>-3</sup> były większe od nacisku formowania ( $P_m$ ) odpowiednio o 1,03 - 1,11 oraz 1,42 – 1,93 razy.
- A4-2. Prognozowanie wartości naprężenia granicznego w warstwie podornej badanych gleb, na podstawie informacji o naciskach jednostkowych ( $P_{pd+0,10}$ ), niezbędnych do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki o wartość +0,10 g·cm<sup>-3</sup> nie jest zasadne. Wyznaczone wartości  $P_{pd+0,10}$  były często większe od wyznaczanych średnich nacisków jednostkowych wywieranych na glebę przez koła pojazdów i maszyn rolniczych, co jest sprzeczne z teorią rozkładu naprężeń w glebie.

- A4-3. Dla celów poszukiwania sposobu prognozowania wartości naprężenia granicznego w warstwie podornej badanych gleb zasadne jest wykorzystanie informacji o naciskach jednostkowych ( $P_{\rho m+0,05}$ ), niezbędnych do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki o wartość  $+0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Wyznaczone wartości  $P_{\rho m+0,05}$  były zbliżone do nacisków formowania próbek modelowych, co odpowiada w przybliżeniu wartości naprężenia granicznego.
- A4-4. Do prognozowania wartości nacisków jednostkowych, niezbędnych do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki glebowej o wartość  $+0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , czyli w przybliżeniu wartości naprężenia granicznego, można wykorzystać modele regresji liniowej do prognozowania  $P_{\rho m+0,05}$  oraz obliczony dla aktualnego stanu gleby przelicznik ( $q$ ).

## Bibliografia

1. Alexandrou A., Earl R. 1995. In situ determination of the pre-compaction stress of a soil. *J. Agric. Eng. Res.* 61, 67-72.
2. Allakukku, 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 Tillage Res.* 37, 223-238.
3. Andersen, M.N., Munkholm, L.J., Nielsen, A.L., 2013. Soil compaction limits root development, radiation use efficiency and yield of three winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Acta Agric. Scand. B Soil Plant Sci.* 63, 409e419.
4. Aragón, A., García, M.G., Filgueira, R.R., Pachepsky, Ya, A. 2000. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; The relationship with organic carbon and water content. *Soil and Tillage Research*, 56, 197-204.
5. Arvidsson J., Keller T. 2004. Soil precompaction stress I. A survey of Swedish arable soils. *Soil & Tillage Research* 77, 85-95.
6. Arvidsson J., Trautner A., Keller T. 2002. Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. In: Pagliai M., Jones R. (eds): *Sustainable Land Management – Environmental Protection. Advances in GeoEcology* 35. Reiskirchen, Catena Verlag: 331–338.
7. Arvidsson, J., 2001. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil Till. Res.* 60, 67-78.
8. Barzegar, A.R., Asoodar, M. A., Ansari, M. 2000. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. *Soil & Tillage Research* 57, 167-172.
9. Bicki, T.J., and Siemens, J.C., 1991. Crop response to wheel traffic soil compaction. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 34, 909-913.
10. Birkas, M. 2008. Environmentally-sound adaptable tillage. *Akademiai Kiado*, Budapest, ISBN 978 963 05 8631 3
11. Błaszczewicz Z. 1997. Badania wpływu wybranych parametrów opon rolniczych na ugniatanie gleby. *Rozprawy naukowe. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu.* z. 271. ISBN 83-7160-036-4.
12. Błażejczak, D. 2010. Prognozowanie naprężenia granicznego w warstwie podornej gleb ugniatanych kołami pojazdów rolniczych. *Wyd. ZUT w Szczecinie.* ISBN 978-83-7663-050-2.
13. Błażejczak, D., Dawidowski, J.B. 2013. Problem wykorzystania gęstości objętościowej gleby w ocenie jej zagęszczenia. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 58(1), 17-20.
14. Błażejczak, D., Dawidowski, J.B. 2016. The impact of the plate diameter on the determined value of pre-compaction stress of samples made of silt soil. *Agricultural Engineering*, Vol. 20, No 2, 5-14.
15. Błażejczak, D., Nowowiejski R., Dawidowski J.B. 2017. Impact of friction on the uniaxial soil sample copression proces. *Agricultural Engineering*, Vol. 21, No 2, 101 - 112.
16. Błażejczak, D., Śnieg, K., Słowik, M. 2018. Comparison of Proctor and uniaxial compression tests for selected soils. *Agricultural Engineering*, Vol. 22, No 1, 5 - 13.
17. Börner H. 1990. *Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz.* UTB Ulmer Verlag, Stuttgart.

18. Burt E. C., Wood R.K., Bailey A.C. 1989.: Effects of dynamic load on normal soil-tire interface stresses, Trans, of the ASAE 32(6), s. 1843-1846.
19. Burt E. C., Wood R.K., Bailey A.C. 1990.: Some comparisons of average to peak soil – tire contact pressures. ASAE Paper No 90 – 1094.
20. Byszewski, W., Haman, J. 1997. Gleba, maszyna, roślina. PWN, Warszawa (1977).
21. Carter, M. R. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, 70, 425-433.
22. Cramer B., 2006. Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerboden in Nordrhein – Westfalen. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Dissertation, 235 s.
23. Czyż E. A., Łopatka A., Dexter A. R., Łysiak M., Stanek-Tarkowska J. 2013. Podatność gleb na zagęszczenie. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 35 (9), 57-95.
24. Danfors B. 1990. Soil compaction in the subsoil. Proc. Int. Conf. Agric. Eng., Berlin 24-26 October 1990. VDI-Gesellschaft Agrartechnik, Dusseldorf, 27-29.
25. Dawidowski J.B., Morrison J.E. Jr., Śnieg M. 2001. Measurement of soil layer strength with plate sinkage and uniaxial confined methods. Trans. ASAE 44 (5), 1059-1064.
26. Dawidowski J.B., Nowowiejski R., Chigarev Y. 2006. Ocena przydatności rozwiązania Boussinesqa-Fröhlicha do określania naprężeń w glebie w warunkach laboratoryjnych. *Inżynieria Rolnicza*, 5, 113-122.
27. Dawidowski J.B., Walczykowa M. 2011. Ekspertyza: Techniczne i eksploatacyjne metody zapobiegania nadmiernemu zagęszczeniu gleb rolnych i leśnych. [https://www.researchgate.net/publication/307858370\\_Techniczne\\_i\\_eksploatacyjne\\_metody\\_zapobiegania\\_nadmiernemu\\_zageszczeniu\\_gleb\\_rolniczych\\_i\\_lesnych](https://www.researchgate.net/publication/307858370_Techniczne_i_eksploatacyjne_metody_zapobiegania_nadmiernemu_zageszczeniu_gleb_rolniczych_i_lesnych) dostęp: 07.06.2021, godz. 22:00.
28. Dobrzański B. Zawadzki S. (red.) 1993. Gleboznawstwo. PWRiL, Warszawa, ISBN 83-09-00083-9.
29. Dz.U. nr 32, poz. 262. 2003 ze zm. Dz. U. z 2003 r. Nr 32, poz. 262 ze zm. ROZPORZĄDZENIE MINISTRA INFRASTRUKTURY z dnia 31 grudnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia
30. Eckelmann, W., Baritz, R., Bialousz, S., Bielek, P., Carre, F., Houšková, B., Jones, R.J.A., Kibblewhite, M.G., Kozak, J., Le Bas, C., Tóth, G., Tóth, T., Várallyay, G., Yli Halla, M. & Zupan, M. (2006). Common Criteria for Risk Area Identification according to Soil Threats. European Soil Bureau Research Report No.20, EUR 22185 EN, 94pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
31. Fekete A. 1977. Some observation of the contact pressure of tyres. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 183, 145-157.
32. Filipovic D., Kovacev I., Copec K., Fabijanic G., Kosutic S., Husnjak S. 2016. Effect of tractor bias-ply tyre inflation pressure on stress distribution in silty loam soil. *Soil & Water Research*, 11 (3), 190-195.
33. Fleige, H., Horn, R., 2000. Field experiments on the effect of soil compaction on soil properties, runoff, interflow and erosion. In: Horn, R., Van den Akker, J.J.H., Arvidsson, J. (Eds.), *Subsoil, Compaction, Distribution, Processes and Consequences: Advances in GeoEcology 32*. Catena Verlag GmbH, Reiskirchen, Germany, pp. 258–268.
34. Fritton D. D. 2008. Evaluation of pedotransfer and measurement approaches to avoid soil compaction. *Soil & Tillage Research* 99, 268–278.
35. Grecenko A. 1963. Kolove a pasove traktory, SZN, Praha.
36. Gregorich, E. G., Carter, M.R. 1997. Soil quality for crop production and ecosystem health. *Developments in soil science 25*. Elsevier, Amsterdam, ISBN 0-444-86661-5.

37. Gysi, M., 2001. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: Field data and a critical state soil mechanics model approach. *Soil Till. Res.* 61, 133-142.
38. Hadas A., Shmulevich O., Hadas O., Wolf D. 1990. Forage wheat yields as affected by compaction and convention vs. wide frame tractor traffic patterns. *Trans. ASAE* 33 (1), 79–85.
39. Håkansson, I. (ed.), 1994. Subsoil compaction by high axle load traffic. Special Issue of *Soil Tillage Res.* 29, 105-306.
40. Håkansson I., Van Ouwerkerk C., Soane B. D. 1995. Conclusions of ISTRO Workshop on “The Effects of soil Compaction on Physical, Chemical and Biological Faktors in the Environment”. 25 August 1993, Metropol, Ukraine. *Soil & Tillage Research* 35, 111 – 113.
41. Håkansson, I., Lipiec, J. (2000). A revive of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research* 53, 71-85.
42. Hamza M.A., Anderson W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research* 82, 121–145.
43. Heyder D., Lessmann-Schoch U., Zakosek H. 1985. Denitrification im Boden und Untergrund. *Z. für Kulturtechnik und Flurber.* 26, 377–385.
44. Horn R., Fleige H. 2000. Prediction of the mechanical strength and ecological properties of subsoils for a sustainable landuse. W: Horn R., Van den Akker J. J. H., Arvidsson J. (Editors). “Experiences with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent subsoil compaction” *Proceedings of the 3rd workshop*, 14-16 June 2000, Uppsala, Sweden. 109-121.
45. Horn R., Fleige, H. 2003. A method for assesing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil & Tillage Research* 73, 89-99.
46. Horn R., Lebert M. 1994. Soil Compactability and Compressibility. In: *Soil Compaction in Crop Production*, Soane B.D. and Ouwerkerk (Eds.), Elsevier Science B.V. s. 45-66. ISBN: 9780444882868.
47. Iancu M. 2001. Technique for Reducing Subsoil Compaction of Pedogenetic Origin. *Proceedings of the 3rd INCO Copernicus Workshop on Subsoil Compaction*, Busteni-Romania, June 14-18, 2001, 437-451.
48. Jaklinski L. 1999. Modele oddziaływania koła pneumatycznego na glebę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, *Prace Naukowe, Mechanika*, z.175.
49. Jakliński L., Pilarczyk S., 2008. Badanie rozkładu nacisków jednostkowych w glebie z uwzględnieniem występowania podeszwy płużnej. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2008, Vol. 53 (3), 96-102.
50. Johnson C. E., Bailey A. C., 2002. Soil Compaction. W: *Advances in Soil Dynamics*, Vol. 2, Chapter 3. St. Joseph, Mich.: ASAE, 155-178.
51. Jones, R. J. A., Spoor, G., Thomasson A. J. 2003. Vulnerability of subsoil in Europe to compaction: a preliminary analysis. *Soil & Tillage Research* 73, 131-143.
52. Jurga J. 2008. Metoda prognozowania zmian gęstości objętościowej gleby na podstawie geometrycznych parametrów koleiny. *Wyd. AR Szczecin, rozprawy nr 248*. ISSN 0239-6467.
53. Jurga J. 2009. The verification of mathematical model designed to determining the area of the contact surface as well as unit pressure exerted onto soil by wheels of the agricultural vehicles. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 54(1), 83-88.

54. Keller T., Arvidsson J. 2004. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil & Tillage Research* 79, 191–205.
55. Keller T., Sandin M., Colombi T., Horn R., Or D. 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil & Tillage Research* 194, 104293.
56. Keller T., Trautner A., Arvidsson J., 2002. Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. *Soil & Tillage Research* 68, 39-47.
57. Keller, T., Arvidsson, J., Dawidowski, J. B., Koolen, A. J., 2004, Soil precompression stress II: A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling, *Soil Tillage Research*, 77(1), 97 – 108.
58. Keller, T., Arvidsson, J., Schjonning, P., Lamande, M., Stettler, M., Weisskopf, P., 2012. In situ subsoil stress-strain behavior in relation to soil precompression stress. *Soil Sci.* 177, 490–497.
59. Komornicki, T., Zasoński, S. (1965). Powtarzalność wyników oznaczeń niektórych właściwości fizycznych gleb. *Roczniki Gleboznawcze*, T. XV, z. 2. PWN Warszawa, 315-330.
60. Koolen, A.J., Kuipers, H., 1983, *Agricultural soil mechanics: Advanced series in agricultural science*, Vol. 13, Heidelberg: Springer.
61. Krasowicz S., Oleszek W., Horabik J., Dębicki R., Jankowiak J., Stuczyński T., Jadczyzyn J. 2011. Racjonalne gospodarowanie środowiskiem glebowym Polski. *Polish Journal of Agronomy*, nr 7, 43-58.
62. Kulli B., Gysi M., Flühler H. 2003. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. *Soil and Tillage Research*, Volume 70, Issue 1, March 2003, Pages 29-40.
63. Kumar D., Bansal M. L., Phogat V. K. 2009. Compactability in relation to texture and organic matter content of alluvial soils. *Indian J. Agric. Res.*, 43 (3), 180-186.
64. Larson, W.E.; Eynard, A.; Hadas, A.; Lipiec, J. 1994. Control and Avoidance of Soil Compaction in Practice. In: *Soil Compaction in Crop Production*. 597-601.
65. Lebert M. 1989. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. *Bayereuther Bodenkundliche Berichte* 1989, Berichte 12, ISSN 0931-6442.
66. Lebert M., Böken H., Glante F. 2007. Soil compaction- indicators for the assessment of harmful changes to the soil in the context of the German Federal Soil Protection Act. *Journal of Environmental Management* 82, 388-397.
67. Lebert M., Burger N., Horn R., 1989. Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. In: *Processes in Structured Agricultural Soils*. Eds. W. E. Larson, G. R. Blake, R. R. Allmars, W. B. Voorhers, S. Gupta. *Mechanics and Related NATO ASI Series E, Applied Science*, vol. 172. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Bosto-London 73-80. ISBN 0-7923-0342-3.
68. Lebert M., Horn R. 1991. A method to predict the mechanical strenght of agricultural soils. *Soil & Tillage Research*, 19, 275–286.
69. Lipiec J., Hatano R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* 116, 107– 136.
70. Lynch, J.P., Wojciechowski, T., 2015. Opportunities and challenges in the subsoil: pathways to deeper rooted crops. *J. Exp. Bot.* 66, 2199-2210.
71. Mosaddeghi, M.R.; Hajabbasi, M.A.; Hemmat, A.; Afyuni, M. 2000. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil & Tillage Research*, 55, 87-97.

72. Mosaddeghi, M.R.; Hemmat, A.; Hajabbasi, M.A.; Vafaeian M., Alexandrou A. 2006. Plate sinkage versus confined compression test for in situ soil compressibility studies. *Biosystems Eng.* 93(3), 325-334.
73. Mosaddeghi, M.R.; Morshedizad, M.; Mahboubi, A.A.; Dexter, A.R.; Schulin, R. 2009. Laboratory evaluation of a model for soil crumbling for prediction of the optimum soil water content for tillage. *Soil & Tillage Research*, 105, 242-250.
74. Mueller, L.; Schindler, U.; Fausey, N.R.; Lal, R. 2003. Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. *Soil & Tillage Research*, 72, 9-20.
75. Nawaz, M., F.; Bourrié, G.; Trolard, F. 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development.*, 33, 291–309.
76. Nhantumbo, A. B. J. C.; Cambule, A. H. 2006. Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. *Soil & Tillage Res.* 87, 231-239.
77. Nissen B. 1998. Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland - bodenphysikalischer Ansatz, Schriftenreihe Inst. Pflanzenernähr. u. Bodenk., Universität Kiel, Berichte 50, 159s.
78. Nowowiejski R., Dawidowski J.B., Kostencki P. 2005 Wpływ warunków obciążenia gleby i współczynnika koncentracji naprężeń na zasięg naprężeń dopuszczalnych. *Inżynieria Rolnicza* 4, 67-76.
79. Nowowiejski R. 2004. Analiza oddziaływania nacisków na zagęszczenie gleby – badania modelowe i polowe. Rozprawa doktorska, AR Wrocław.
80. Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A., Sombroek, W.G., 1991. World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation. An Explanatory Note. ISRIC Wageningen, Netherlands/UNEP, Nairobi, Kenya. 34 pp.
81. Olsen H.J. 1994. Calculation of subsoil stresses. *Soil & Tillage Res.* 29, 111–123.
82. Oskoui K.E., Voorheers W.B. 1991. Economical consequences of soil compaction. *Transactions of the ASAE* 34 (6), 2317–2323.
83. Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N., Pellegrini, S., 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil Till. Res.* 73, 67-76.
84. Peng, X., Horn, R., 2008. Time-dependent, anisotropic pore structure and soil strength in a 10-year period after intensive tractor wheeling under conservation and conventional tillage. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 171, 936-944.
85. Pieczarka K., Pentoś K., Lejman K., Owsiak Z. 2018. The use of artificial intelligence methods for optimization of tractive properties on silty clay loam. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 63(1), 63-68.
86. PN-88/B-04481 (1988). Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
87. Polskie Towarzystwo Gleboznawcze 2009. Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008. *Roczniki Gleboznawcze*, 60 (2), 5-16.
88. Poniatowska J. 2003. Gęstość objętościowa gleb mineralnych i jej znaczenie dla warunków rozwoju roślin. *Roczniki Gleboznawcze*, t. LIV, nr 4, 103–113.
89. Poodt M.P., Koolen A.J., van der Linden J.P 2003. FEM analysis of subsoil reaction on heavy wheel loads with emphasis on soil precompaction stress and cohesion. *Soil & Tillage Research* 73, 67–76.
90. Pytka J. 2005: Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. *Soil & Tillage Research*, 82: 77–88.
91. Rusanov V.A. 1994. USSR standards for agricultural mobile machinery: permissible influences on soils and methods to estimate contact pressure and stress at a depth of 0.5 m.. *Soil & Tillage Research*, 29(1994): 249-252.

92. Schjønning P., Lamandé M., Tøgersen F.A., Arvidsson J., Keller T., 2008. Distribution of vertical stress at the soil-tyre interface: Effects of tyre inflation pressure and the impact on stress propagation in the soil profile. *Biosystems Engineering*. Vol.99/1, 119-133
93. Schjønning P., van den Akker J.H., Keller T., Greve M. H., \*, Lamandé M., Simojoki A., Stettler M., Arvidsson J., Breuning-Madsen H. 2015. Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction: A European Perspective. *Advances in Agronomy*, Volume 133, ISSN 0065-2113, <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.001>.
94. Schjønning, P., Lamandé, M., Keller, T., Pedersen, J., Stettler, M., 2012. Rules of thumb for minimizing subsoil compaction. *Soil Use Manage.* 28, 378-393.
95. Sitkei G., Fekete A. Die Bemessung Von Landwirtschaftlichen Fahrwerken Auf Minimale Bodenverdichtung. *Proceedings 5th International Conference ISTVS*, June 2-6, Detroit 1975, Vol. II. S. 533-54.
96. Śnieg K., Błażejczak D., Słowik M. 2018. Predicting unit pressure indispensable for generation of specific compaction of a soil sample. *Agricultural Engineering*, Vol 22, No 3, pp. 85-92.
97. Śnieg M. 2012. Metoda wyznaczania naprężenia granicznego gleby w celu zapobiegania jej nadmiernemu zagęszczaniu mechanizmami jezdnych pojazdów rolniczych. Wyd. ZUT w Szczecinie. ISBN 978-83-7663-134-9.
98. Soane, B.D. and van Ouwerkerk, C., 1994. Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier, 660pp.
99. Soane, B.D., Blackwell, P.S., Dickson, J.W., Painter, D.J. 1980/1981. Compaction by agricultural vehicles: a review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil Till. Res.* 23, 207-237.
100. Söhne W. 1951. Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen unter rollenden Rädern, sowie bei der Bodenbearbeitung. *Grundl. Landtech.* 9 (1), 87-94.
101. Söhne W. 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres. *Agric. Eng.*, 39, 276-281.
102. Söhne W. 1969. *Agricultural Engineering and Terramechanics*. J. of Terramechan, Vol.. 6, No. 2.
103. Söhne W. 1970. Rad und Gleiskettenfahrzeug: Bewertung und Entscheidung aufgrund von Theorie und Forschung. Vortag SFM Studiedagger, Skorde.
104. Söhne, W. 1953. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grdlgn. d. Landtechn.* Heft 5/1953.
105. Sołtyński A. 1966. *Mechanika układu pojazd-teren*. MON, Warszawa.
106. Sommer C., Lebert M., Jakliński L., Jasiński B. 2003. Strategie i techniki zabezpieczenia gleby przed niszczącym ugniataniem. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej*, 8, 3-4, 7.
107. Spoor G., Tijink F.G.J., Weisskopf P. 2003. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil & Tillage Research* 73, 175-182.
108. Stasiak W. 2008. Analiza modeli opisujących rozkład naprężeń w glebie. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 53(2), 39-43.
109. Stasiak, W. 2003: Modele propagacji nacisków w glebie generowanych przez oponę. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Płock.
110. Szeptycki, A. 2003. Wpływ ciężkich maszyn rolniczych na fizykomechaniczne właściwości gleby. *Journal of Research and Application in Agricultural Engineering*, vol. 48(2), 38-42.

111. Tarkiewicz S., Nosalewicz A. 2005. Effect of organic carbon content on the compactibility and penetration resistance of two soils formed from loess. *International Agrophysics*, 19, 345-350.
112. Tijink F.G.J., 1998. Mechanisation strategies to reduce traffic-induced soil compaction. Development, verification and use of the subsoil compaction model SOCOMO. Proceedings of the 1st workshop of the Concerted Action "Experiences with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent subsoil compaction", 28-30 May 1998, Wageningen 1999, Report 168, 309-316
113. Tijink, F.G.J., Doll, H., Vermeulen, G.D., 1995. Technical and economic feasibility of low ground pressure running gear. *Soil Till. Res.* 35, 99–110.
114. Trzecki St. 1972. Badania modelowe nad kierunkiem zmian stopnia zbitości w warstwie ornej. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 1972, z. 137.
115. Van den Akker J. J. H., Arvidsson J., Horn R. 1999. Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community (in: Experiences with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent subsoil compaction) Proc. Of the concerted action, Wageningen 28-30 May 1998. Report 168 DLO Winand Staring Centre, Wageningen.
116. Van den Akker, J. J. H. 2004. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stress and the subsoil carrying capacity. *Soil & Tillage Research* 79, 113 – 127.
117. Van den Akker, J. J. H., Arvidsson, J., Horn, R. 2003. Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil & Tillage Research*, 73, 1-8.
118. Vermeulen, G.D., Verwijs, B.R., van den Akker, J.J.H., 2013. Comparison of Loads on Soils during Agricultural Field Work in 1980 and 2010 (In Dutch with English Summary). Plant Research International, Rapport 501, Wageningen.
119. Wagner, L. E., Ambe, N. M., Ding D. 1994. Estimating a Proctor Density Curve from Intrinsic Soil Properties. *Transactions of the ASAE*, Vol. 37(4), 1121-1125.
120. Walczyk M. 1995. Wybrane techniczne i technologiczne aspekty ugniatania gleb rolniczych agregatami ciągnikowymi. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie*, Rozpr. 202, ISSN 1233-4189.
121. Wojtasik M. 1995. Gęstość naturalna gleb mineralnych. WSP Bydgoszcz, 120, ISBN 83-7096-076-6.
122. Wulfson D., 2002. Elastoplastic Soil Mechanics. Part I. Constitutive Modelling of Soils. W: *Advances in Soil Dynamics Volume 2*, 1-70. St. Joseph, Mich.: ASAE.

## Streszczenie

Zasadniczym celem pracy było zaproponowanie uproszczonego sposobu prognozowania naprężeń granicznych, będących podstawą oceny nacisków jednostkowych wywieranych na glebę przez koła pojazdów i maszyn rolniczych, na potrzeby przeciwdziałania dalszemu zagęszczaniu warstwy podornej.

Zaproponowany, uproszczony sposób prognozowania naprężenia granicznego gleby ma postać serii równań regresji. Dane niezbędne do modelu pozyskano wykonując badania polowe i laboratoryjne. Obiektem badań były wybrane gleby plastyczne z obszaru Niziny Szczecińskiej. Materiał badawczy pobrano z warstwy podornej do głębokości 60 cm.

Realizując cel pracy dokonano wyboru metody wyznaczania naprężenia granicznego oraz wyodrębniono zbiór wielkości zmiennych niezależnych, co wiązało się z wykonaniem szeregu eksperymentów na próbkach modelowych oraz na próbkach o tzn. nienaruszonej strukturze, pobranych z wybranych gleb.

Wyniki uzyskane na próbkach modelowych pozwoliły na wyznaczenie relacji pomiędzy rezultatami zagęszczania materiału glebowego, prowadzonego za pomocą testu Proctora i jednoosiowego ściskania, a także ustalenie zależności pomiędzy wynikami obu testów oraz opracowanie modelu empirycznego do prognozowania nacisku jednostkowego niezbędnego do wytworzenia określonego zagęszczenia próbki gleby. Wymagało to przyjęcia sposobu jednoosiowego odkształcania próbek. Na podstawie porównania rezultatów testu jednoosiowego z naciskami jednostkowymi wywieranymi przez koła pojazdów i maszyn rolniczych na glebę, opisanymi w literaturze przedmiotu, wybrano możliwą boczną rozszerzalność gleby. Analiza wyników uzyskanych na próbkach modelowych pozwoliła także na zaproponowanie uproszczonej metody wyznaczania naprężenia granicznego gleby. Metoda ogranicza subiektywny wpływ badacza na wynik obliczeń, ponieważ naprężenie graniczne równe jest naciskowi niezbędnemu do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki o przyjętą wartość, tj. o  $0,05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Wyniki jednoosiowego odkształcania próbek o tzw. nienaruszonej strukturze pozwoliły na opracowanie modelu empirycznego do prognozowania wartości naprężenia granicznego gleby, który uwzględnia różnice pomiędzy wytrzymałością próbek o tzw. nienaruszonej strukturze a próbkami wytwarzanymi w warunkach laboratoryjnych.

## Abstract

The main aim of the thesis was to suggest a simplified method to predict pre-compaction stress, which is the basis for evaluating a unit stress on the soil caused by the wheels of a car or farming vehicles in order to prevent a further subsoil compaction.

The suggested, simplified method to predict pre-compaction stress is presented in a series of regression equations. All data was collected by conducting a field and laboratory research. The selected plastic soils collected from the area of the Szczecin Lowlands were the subject of this study. The sample was taken from subsoil at the depth of 60 centimeters.

In the course of the research, a method was selected a pre-compaction stress and a set of independent variables were selected which meant a series of testing on model samples and on samples with the so-called intact structure collected from selected soils.

The results of the model samples allowed to set a relation between the results of soil compaction, obtained from Proctor Test and uniaxial test moreover, a correlation between the results of both tests was established and an empirical model for predicting a unit stress was created. This is essential to produce a set of a soil compaction sample. Based on the comparison of the uniaxial test results with the unit pressure exerted by the wheels of vehicles and agricultural machines on the soil, described in the literature on the subject, the possible lateral expansion of the soil was selected. The analysis of the results obtained from model samples also allowed to introduce a simplified method of pre-compaction stress. The method restricts a subjective impact of a researcher on the outcome of calculations as the pre-compaction stress equals the stress essential to increase the initial compaction of a sample by assumed value, i.e. by  $0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

The results of single-axis deformation of the samples with the so-called intact structures allowed to set an empirical model for predicting a value of pre-compaction soil stress which includes differences between sample strength of the so-called intact structures and the ones produced in a laboratory.

## **Cykl Publikacji**

Stanowiący wskazanie osiągnięcia wynikające z Art. 13 Ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65, poz. 595 ze zm.) pod tytułem:

**Analiza jednostkowych nacisków kół pojazdów i maszyn rolniczych na glebę w aspekcie jej ochrony przed nadmiernym zagęszczeniem**

### Załącznik 1- Oświadczenie o wkładzie autora w powstanie poszczególnych artykułów

| Lp.          | Publikacja                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Punktacja<br>MNiSW<br>(wg roku wydania) |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>A1</b>    | Śnieg K., Błażejczak D. 2017. Evaluation of subsoil of plastic soils. Agricultural Engineering, 21(1), 85-94.<br><i>indywidualny wkład w: przygotowaniu projektu badań, pracy; zbieraniu danych, prowadzeniu badań; przeprowadzeniu analizy statystycznej; interpretacji wyników; opracowaniu manuskryptu; wyszukiwaniu literatury – udział własny szacuję na 50%</i>                                                          | 10                                      |
| <b>A2</b>    | Błażejczak D., Śnieg K., Słowik M. 2018. Comparison of Proctor and uniaxial compression tests for selected soils. Agricultural Engineering, Vol. 22(1), 5-13.<br><i>indywidualny wkład w: przygotowaniu projektu badań, pracy; zbieraniu danych, prowadzeniu badań; przeprowadzeniu analizy statystycznej; interpretacji wyników; opracowaniu manuskryptu; wyszukiwaniu literatury – udział własny szacuję na 50%</i>          | 10                                      |
| <b>A3</b>    | Śnieg K., Błażejczak D., Słowik M. 2018. Predicting unit pressure for generation of specific compaction of a soil sample. Agricultural Engineering, vol. 22(3), 85-92.<br><i>indywidualny wkład w: przygotowaniu projektu badań, pracy; zbieraniu danych, prowadzeniu badań; przeprowadzeniu analizy statystycznej; interpretacji wyników; opracowaniu manuskryptu; wyszukiwaniu literatury – udział własny szacuję na 50%</i> | 10                                      |
| <b>A4</b>    | Śnieg K., Błażejczak D. 2019. Prediction of pre-compression stress of soil with uniaxial test. Agricultural Engineering, vol. 23(1), 95-103.<br><i>indywidualny wkład w: przygotowaniu projektu badań, pracy; zbieraniu danych, prowadzeniu badań; przeprowadzeniu analizy statystycznej; interpretacji wyników; opracowaniu manuskryptu; wyszukiwaniu literatury – udział własny szacuję na 55%</i>                           | 20                                      |
| <b>Razem</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>50</b>                               |

mgr. inż. Kinga Śnieg .....

### Potwierdzenie współautorów o prawdziwości podanych powyżej informacji

dr hab. inż. Dariusz Błażejczak, prof. ZUT

mgr. inż. Małgorzata Słowik

.....

.....



## EVALUATION OF SUBSOIL COMPACTION OF PLASTIC SOILS<sup>1</sup>

Kinga Śnieg, Dariusz Błażejczak

Department of Construction and Usage of Technical Devices,  
West Pomeranian University of Technology in Szczecin

\* Corresponding author: e-mail: [dariusz.blazejczak@zut.edu.pl](mailto:dariusz.blazejczak@zut.edu.pl)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: October 2016

Received in the revised form:

October 2016

Accepted: November 2016

#### Key words:

soil,

density,

evaluation,

dry density,

Proctor's method

### ABSTRACT

The objective of the research was to evaluate soil compaction with selected indexes and to determine the relation between them including results obtained with Proctor's method. Measurements of penetration resistance and shear vane, dry density of soil particles ( $\rho_d$ ) and their moisture were made in layers in the following depths: 25-30, 35-40, 45-50 and 55-60 cm. Moreover, the maximum volumetric density of soil particles, particles size distribution, content of calcium carbonate and humus, density of solid particles, reaction, plastic and liquid limit were determined with Proctor's method ( $\rho_{ds}$ ). Also, packing density and natural density were measured. It was found out that the investigated soils may be generally included to excessively compacted and susceptible to compaction to an average and small degree. It was shown that soil may be recognized as excessively compacted when the quotient  $\rho_d/\rho_{ds}$  exceeds the value of 0.87.

## Introduction

Excessive soil density, which results from mechanization of works, is one of the most serious problems of modern agriculture (van den Akker et al., 2003). Heavy clays, clays, and sandy loams are soils, which are particularly susceptible to compaction (Krasowicz et al., 2011). Excessive compaction of subsoil is mainly dangerous because the effects of compaction of this layer are long-lasting and its eradication through deep scarification is energy consuming and often ineffective (Szeptycki, 2003). A rational approach to counter-acting this phenomenon requires evaluation of the present soil density and identification of conditions in which it takes place.

Dry density of solid particles is popular in the density tests. Direct application of results of measurements of dry density of solid particles for evaluation of its compaction condition in the context of its influence on the plants growth conditions causes many problems (Błażejczak and Dawidowski, 2013). These difficulties cause that scientists try to apply relevant measures of soil compaction as an indicator of evaluation of plant growth conditions (Hakansson and Lipiec, 2000).

<sup>1</sup> This publication was written as a part of the project financed from the means of the National Scientific Centre (Contract no. 7808/B/P01/2011/40)

Research results obtained with Proctor's method in the form of the maximum density and optimal moisture are parameters which are commonly used in geo-technology, which on one hand constitute a reference point in the evaluation of the soil density condition and on the other hand characterize the conditions of the maximum susceptibility. In the past, Proctor's method was used for description of susceptibility to compaction of agricultural soils (Wagner et al., 1994; Aragon et al., 2000). According to Soanne et al., (1980/1981) the use of Proctor's method for evaluation of the density of agricultural soils may be recognized as reasonable. The maximum value of dry density ( $\rho_{ds}$ ), obtained in the standard Proctor's method, is considered as the maximum value possible to be obtained for a given soil (Kumar et al., 2009). It results from the fact that in this method homogeneous soil mass is compacted. The mass is susceptible to compaction more than soil with a natural structure and compaction energy is higher than the energy of the wheel impact on soil even in case of vehicles with considerably big weight (Barzegar et al., 2000).

## Objective, scope and methods of research

The objective of the research was to evaluate the soil compaction in its subsoil with the selected indicators and to determine the relation between them including the results obtained with Proctor's method.

Plastic soils, located within the following towns constituted the research object: Nowy Przylep (*NP*), Obojno (*Ob*), Ostoja (*Os*), Kurcewo (*Ku*), Reńsko (*Re*) and Skarbimierzyce (*Sk*). These soils possibly enable obtaining high crops and are threatened by excessive compaction as a result of intense use. Research was carried out in 2012-2016 in layers at the following depths: 25-30, 35-40, 45-50 and 55-60 cm, in periods when spring (*W*) and winter (*J*) cultivation treatments are performed.

Penetration resistance ( $Z_w$ ) and shear vane were tested ( $S_c$ ) and actual moisture ( $w_a$ ) and dry density of solid particles were determined ( $\rho_d$ ). A penetrometer (Eijkelkamp, Penetrologger), equipped with a cone with a vertical angle of  $30^\circ$  and the area of its base of  $1 \text{ cm}^2$ , at the feed speed of  $2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  were applied. To measure  $S_c$ , Geonor, Vane Tester H-60 equipped with the tip with dimensions of  $16 \times 32 \text{ mm}$ , with the measurement scope from 0 to 260 kPa was used. To measure  $w_a$  and  $\rho_d$  samples collected with the use of Kopecky's cylinders were used. When, during collection of samples, soil cracking was reported in cylinders as a result of moisture deficiency in a given layer, the field research was repeated in another period (*W* or *J*), along with measurements of  $Z_w$  and  $S_c$ . Measurements were carried out in two iterations, in points distanced from each other by 2-3 m, except for handlands and technological roads.

Moreover, soil material in the form of loose mass was collected from layers and it was later used to determine the selected properties with the methods provided in brackets, i.e.: textural group (Bouyoucosa-Casagrande's after Prószyński's modification), density of solid particles (a pycnometer method), humus content (Tiurin's method), calcium carbonate content (Scheibler's method), soil reaction (an electrometric method), maximum density and optimal moisture (Proctor's method), plastic limit (a surface rolling method), liquid limit, (Casagrande's method). Testing the maximum density ( $\rho_{ds}$ ) and optimal moisture ( $w_{opt}$ ) of soils was carried out according to PN-88/B-04481, using a cylinder with the volume of  $1000 \text{ cm}^3$  and compacting energy of  $0.59 \text{ J}$  per  $1 \text{ cm}^3$  of soil. Values  $\rho_{ds}$  and  $w_{opt}$  were cal-

culated in the spot (point), where polynomials describing a particular experiment assumed the maximum value (Błażejczak et al., 2013). With the use of polynomials also dry density of solid particles was forecasted ( $\rho_{dm}$ ) calculated for the present moisture ( $w_a$ ). However, the scope of use of the forecasting model  $\rho_{dm}$  differed from the scope of moisture values obtained during determination of  $\rho_{ds}$ . The bottom limit corresponded to the minimum moisture measured in the field and the top of its maximum value obtained in the Proctor's method. The results of field research and soil properties allowed calculation of packing density ( $P_d$ ) after Jones et al., (2003) and natural dry density ( $\rho_n$ ) acc. to Wojtasik (1995).

## Results and their analysis

Table 1 presents results of determination of own properties of the investigated soils. It may be noted that the research material which came from soils which were compacted in the state of high moisture face permanent and strong deformation. Soils measurements were carried mainly on account of their textural group, humus and calcium carbonate content, which was most probably reflected in the range of plastic and liquid limits which were respectively 14.1-31.4% of moisture content and 15.4-73.0% of moisture content. Specific density and soil reaction were less varied and they were respectively within 2.39-2.67 g·cm<sup>-3</sup> and pH 5.08-6.86.

Table 2 presents results of measurement of actual properties of the investigated soils (dry density of solid particles –  $\rho_d$ , present moisture –  $w_a$ , permission resistance –  $Z_w$ , shear vane –  $S_c$  and results of natural density calculations  $\rho_n$ ). In soils of objects *NP* and *Os* (layer: 25-30 cm) and *Sk* (layer: 25-30 and 35-40 cm), due to annually reoccurring draught, which lasts several weeks there was no possibility to carry out measurements in the *W* period. In the above mentioned cases measurements were carried out in various years for the *J* period, and the obtained differences  $\rho_d$ , except for object *Os*, did not exceed the value of 0.1 g·cm<sup>-3</sup>, namely the one which Komornicki and Zasoński (1965) claim to be a border one for the purposes of practical; interpretation of the difference of packing density. In the period *W* often higher value  $\rho_d$  was reported at lower moisture. Measured higher values  $\rho_d$  for the period *W* may be justified with shrinking of soil as a result of decrease in its moisture. According to Dobrzański and Zawadzki (1993) fluctuations of soil moisture may result in the changes of its volume to 32% in relation to the type of soil opening. Based on the results  $Z_w$  it may be assumed that conditions of plant growth were impeded in 17 cases because the average permission resistance exceeded the value of 2000 kPa i.e. recognized as a border one for correct growth of roots (Gregorich and Carter, 1997). On the other hand high values of soil shear in rotational movement which were obtained ( $S_c$ ), that often exceeded 100 kPa, indicate that the investigated soils in the periods *W* or *J* had low susceptibility to compaction. It results from the fact that along with the increase of  $S_c$  values of pre-compaction stress of soil, which are the measure of soil susceptibility to compaction, grow (Błażejczak, 2010). Low susceptibility to compaction of the investigated soils may be justified with their present moisture, whose average value was 0.84% of the value  $P_L$ .

Table 1.  
Average values of own properties of soils for the selected objects and measured layers

| Site | Layer | Granulometric group | Content of particles<br><0.002<br>[PN-R-04033] | Calcium carbonate<br>content | Specific density<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | Reaction (in KCl) | Humus content | Plastic limit | Liquid limit |
|------|-------|---------------------|------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------|-------------------|---------------|---------------|--------------|
|      | (cm)  |                     | (%)                                            | (%)                          | (g·cm <sup>-3</sup> )                     | (pH)              | (%)           | (% w/w)       | (% w/w)      |
| NP   | 25-30 | SiL                 | 11.0                                           | 1.29                         | 2.45                                      | 6.32              | 3.10          | 22.0          | 29.5         |
|      | 35-40 | SiL                 | 11.0                                           | 2.53                         | 2.46                                      | 6.34              | 2.02          | 21.3          | 31.2         |
|      | 45-50 | SiL                 | 9.0                                            | 2.76                         | 2.45                                      | 6.29              | 2.30          | 23.7          | 32.0         |
|      | 55-60 | L                   | 15.0                                           | 0.68                         | 2.47                                      | 6.21              | 1.09          | 20.3          | 31.3         |
| Ob   | 25-30 | L                   | 27.0                                           | 0.10                         | 2.45                                      | 6.86              | 4.17          | 25.9          | 44.2         |
|      | 35-40 | L                   | 27.0                                           | 0.07                         | 2.49                                      | 6.84              | 3.77          | 28.0          | 47.9         |
|      | 45-50 | SiCL                | 25.0                                           | -                            | 2.52                                      | 6.78              | 2.34          | 30.4          | 58.7         |
|      | 55-60 | SiC                 | 17.0                                           | -                            | 2.40                                      | 6.52              | 1.70          | 31.4          | 73.0         |
| Os   | 25-30 | SL                  | 9.0                                            | -                            | 2.52                                      | 5.08              | 1.03          | 14.1          | 17.0         |
|      | 35-40 | L                   | 15.0                                           | -                            | 2.66                                      | 5.13              | 0.61          | 18.4          | 27.6         |
|      | 45-50 | L                   | 21.0                                           | -                            | 2.67                                      | 5.23              | 0.69          | 19.8          | 30.3         |
|      | 55-60 | L                   | 20.0                                           | -                            | 2.55                                      | 5.63              | 0.57          | 18.0          | 28.8         |
| Re   | 25-30 | SiL                 | 13.7                                           | 5.02                         | 2.43                                      | 6.21              | 3.32          | 23.5          | 32.2         |
|      | 35-40 | L                   | 14.0                                           | 4.82                         | 2.41                                      | 6.45              | 3.17          | 22.4          | 31.9         |
|      | 45-50 | L                   | 12.0                                           | 5.13                         | 2.39                                      | 6.50              | 4.00          | 25.9          | 37.0         |
|      | 55-60 | L                   | 14.0                                           | 0.52                         | 2.44                                      | 6.43              | 2.91          | 22.0          | 31.8         |
| Sk   | 25-30 | SCL                 | 22.0                                           | -                            | 2.50                                      | 6.23              | 1.78          | 21.8          | 39.2         |
|      | 35-40 | SCL                 | 25.0                                           | -                            | 2.64                                      | 6.25              | 1.05          | 17.9          | 27.5         |
|      | 45-50 | CL                  | 29.0                                           | -                            | 2.60                                      | 6.21              | 0.75          | 24.9          | 61.0         |
|      | 55-60 | SiL                 | 20.0                                           | -                            | 2.53                                      | 6.22              | 0.68          | 27.4          | 52.5         |
| Ku   | 25-30 | L                   | 11.5                                           | -                            | 2.66                                      | 6.82              | 0.54          | 14.2          | 15.4         |
|      | 35-40 | L                   | 20.4                                           | -                            | 2.63                                      | 6.36              | 0.42          | 19.0          | 39.2         |
|      | 45-50 | L                   | 23.3                                           | -                            | 2.60                                      | 6.16              | 0.31          | 20.8          | 38.3         |
|      | 55-60 | L                   | 24.3                                           | -                            | 2.59                                      | 6.69              | 0.34          | 26.7          | 46.2         |

Symbols of textural groups (acc. to USDA – PTG 2009): SiL – silt loam, L – loam, SiCL – silty clay loam, SiC – silty clay, SL – sandy loam, SCL – sandy clay loam, CL – clay loam

In order to carry out an assessment of the present compaction state, the obtained results (Table 2) were compared with threshold values  $\rho_d$  or  $Z_w$ , suggested for the cultivated layer of various types of soils with specific parameters (Iancu, 2001). But the threshold value  $Z_w$  was determined according to the suggested methodology adding or deducting a specific value of adjustment (250 kPa) in relation to the difference of moisture measured and provided in tables. Moreover, content of silt and clay fraction (<0.002 mm) and plasticity index, namely a difference between the liquid and plastic limit were also taken into consideration (Table 1). Exceeding the threshold values  $\rho_d$  was reported in case of 29

instances of measurements. But this case of exceeding  $W$  or  $J$  in a particular layer was reported in 9 cases. It may be noted that the number of cases when the threshold value was exceeded  $\rho_d$  is the lowest for objects  $NP$  and  $Re$  (2 for each), i.e. soils with granulation of silt loam and loam with the content of particles of  $<0.002$  mm which are within 9 to 15% (Table 1). The highest number of instances where the threshold value was exceeded  $\rho_d$  was reported for the object  $Sk$ , i.e. soils with granulation of sandy clay loam, silt loam with the content of particles of  $<0.002$  mm which are within 22 to 29%. Contrary, the threshold value  $Z_w$ , which proves excessive compaction of soil, was exceeded. It was reported only in 4 cases. It might have resulted from the fact that the suggested threshold values are related to the cultivation layer. On the other hand, this paper analyses the compaction state for the subsoil, where cultivation treatments are carried out from time to time (e.g. subsoiling) and properties of this layer diverge often from the arable layer. Also, the fact that distribution of the investigated soils to groups of soil forms suggested by Iancu (2001) may be treated approximately – differences in soil classification between the countries, is not without significance. Due to drawbacks of the above procedure for assessment of present permission resistance of subsoil the calculated values of natural volumetric density were used ( $\rho_n$ ) acc. to Wojtasik (1995) based on which soil may be included to the category of natural density if the value  $\rho_d$  is within  $\rho_n \pm 0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Soil may be also included to slightly, medium or strongly compacted if the difference  $\rho_d$  and  $\rho_n$  has a positive value and is respectively within:  $(0.05-0.15>$ ,  $(0.15-0.25>$  and  $>0.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . In a reverse situation, when the difference  $\rho_d$  and  $\rho_n$  has a negative value, soil may be included to slightly, medium or considerably scarified. The investigated objects (Table 2) were included to soils from slightly to strongly compacted in 25 cases. But, similarity to Iancu's procedure (2001) was obtained in 20 cases. Thus, it may be assumed that both procedures of assessment of soil compaction are comparable.

Table 2.

*Average values of dry density of solid particles ( $\rho_d$ ), present moisture ( $w_a$ ), penetration resistance ( $Z_w$ ), shear resistance ( $S_c$ ) of soils of investigated objects in layers for spring ( $W$ ) and fall ( $J$ ) periods of field measurements and assessment of soil density assessment acc. to Iancu (2001) and Wojtasik (1995)*

| Facility Layer | Period of measurements | $\rho_d$                          | $w_a$      | $Z_w$      | $S_c$    | Assessment of density acc. to Iancu (2001) based on $\rho_d/Z_w$ | Assessment of density acc. to Wojtasik (1995) |
|----------------|------------------------|-----------------------------------|------------|------------|----------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                | (cm)                   | ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | (% w/w)    | (kPa)      | (kPa)    |                                                                  |                                               |
| <i>NP</i>      | 25-30                  | <i>J</i> 1.51 (0.01)              | 17.4 (0.2) | 2349 (637) | 126 (12) | -/-                                                              | 1c                                            |
|                |                        | <i>J</i> 1.46 (0.09)              | 21.4 (1.1) | 1010 (360) | 83 (28)  | -/-                                                              | n                                             |
|                | 35-40                  | <i>W</i> 1.55 (0.04)              | 19.5 (0.3) | 1417 (486) | 98 (17)  | -                                                                | 1c                                            |
|                |                        | <i>J</i> 1.56 (0.06)              | 22.0 (1.3) | 1020 (660) | 88 (36)  | +/-                                                              | 1c                                            |
|                | 45-50                  | <i>W</i> 1.54 (0.06)              | 19.5 (0.1) | 1274 (658) | 140 (13) | -/-                                                              | n                                             |
|                |                        | <i>J</i> 1.46 (0.04)              | 20.2 (1.0) | 1720 (280) | 154 (37) | -/-                                                              | n                                             |
|                | 55-60                  | <i>W</i> 1.60 (0.03)              | 18.9 (0.6) | 1440 (338) | 140 (19) | +/-                                                              | 1c                                            |
|                |                        | <i>J</i> 1.44 (0.05)              | 17.3 (0.8) | 1240 (470) | 206 (21) | -/-                                                              | n                                             |
|                | <i>Ob</i> 25-30        | <i>W</i> 1.56 (0.06)              | 18.5 (0.8) | 3650 (320) | 234 (35) | +/+                                                              | 3c                                            |

| Facility Layer | Period of measurements | $\rho_d$              | $w_a$       | $Z_w$      | $S_c$       | Assessment of density acc. to Iancu (2001) based on $\rho_d/Z_w$ | Assessment of density acc. to Wojtasik (1995) |    |
|----------------|------------------------|-----------------------|-------------|------------|-------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----|
|                | (cm)                   | (g·cm <sup>-3</sup> ) | (% w/w)     | (kPa)      | (kPa)       |                                                                  |                                               |    |
|                | 35-40                  | <i>J</i>              | 1.40 (0.07) | 23.8 (2.7) | 1230 (490)  | 102 (32)                                                         | -/-                                           | 1c |
|                |                        | <i>W</i>              | 1.56 (0.04) | 15.3 (0.4) | 4350 (560)  | 184 (52)                                                         | +/-                                           | 2c |
|                | 45-50                  | <i>J</i>              | 1.44 (0.11) | 24.4 (1.6) | 1560 (540)  | 107 (22)                                                         | -/-                                           | 1c |
|                |                        | <i>W</i>              | 1.59 (0.03) | 16.6 (1.3) | 3900 (440)  | 156 (37)                                                         | +/-                                           | 3c |
|                | 55-60                  | <i>J</i>              | 1.49 (0.02) | 24.6 (0.8) | 1840 (310)  | 154 (33)                                                         | +/-                                           | 3c |
|                |                        | <i>W</i>              | 1.65 (0.03) | 16.2 (2.2) | 2700 (380)  | 154 (29)                                                         | +/-                                           | 3c |
|                |                        | <i>J</i>              | 1.47 (0.02) | 26.0 (0.5) | 1740 (270)  | 136 (16)                                                         | +/-                                           | 1c |
| <i>Os</i>      | 25-30                  | <i>J</i>              | 1.66 (0.04) | 14.9 (0.6) | 1620 (840)  | 99 (19)                                                          | +/-                                           | n  |
|                |                        | <i>J</i>              | 1.53 (0.08) | 15.9 (0.4) | 2000 (980)  | 99 (32)                                                          | -/-                                           | 1a |
|                | 35-40                  | <i>W</i>              | 1.67 (0.03) | 12.3 (0.7) | 3310 (1130) | 68 (13)                                                          | +/-                                           | n  |
|                |                        | <i>J</i>              | 1.66 (0.06) | 16.0 (0.5) | 1362 (587)  | 89 (14)                                                          | +/-                                           | n  |
|                | 45-50                  | <i>W</i>              | 1.64 (0.03) | 13.9 (2.4) | 3430 (560)  | 53 (16)                                                          | +/-                                           | n  |
|                |                        | <i>J</i>              | 1.56 (0.04) | 21.5 (1.3) | 1693 (360)  | 112 (18)                                                         | -/-                                           | 1a |
|                | 55-60                  | <i>W</i>              | 1.62 (0.05) | 15.5 (0.4) | 4060 (1010) | 39 (10)                                                          | +/-                                           | n  |
|                |                        | <i>J</i>              | 1.60 (0.03) | 19.6 (0.6) | 1682 (255)  | 107 (20)                                                         | +/-                                           | n  |
| <i>Re</i>      | 25-30                  | <i>W</i>              | 1.55 (0.03) | 21.7 (0.5) | 1160 (440)  | 126 (21)                                                         | -/-                                           | 1c |
|                |                        | <i>J</i>              | 1.41 (0.07) | 26.1 (0.5) | 910 (310)   | 60 (66)                                                          | -/-                                           | n  |
|                | 35-40                  | <i>J</i>              | 1.46 (0.09) | 19.3 (0.6) | 2449 (520)  | 166 (15)                                                         | -/-                                           | n  |
|                |                        | <i>W</i>              | 1.61 (0.09) | 19.0 (1.9) | 1560 (940)  | 124 (20)                                                         | +/-                                           | 1c |
|                | 45-50                  | <i>J</i>              | 1.32 (0.03) | 24.9 (0.2) | 1982 (410)  | 132 (25)                                                         | -/-                                           | 1a |
|                |                        | <i>W</i>              | 1.48 (0.02) | 22.2 (1.6) | 1000 (450)  | 87 (23)                                                          | -/-                                           | n  |
|                | 55-60                  | <i>J</i>              | 1.45 (0.03) | 21.3 (1.0) | 1693 (313)  | 113 (19)                                                         | -/-                                           | n  |
|                |                        | <i>W</i>              | 1.56 (0.04) | 21.6 (1.5) | 1160 (390)  | 140 (21)                                                         | +/-                                           | 1c |
| <i>Sk</i>      | 25-30                  | <i>J</i>              | 1.71 (0.02) | 14.4 (0.4) | 1280 (380)  | 96 (22)                                                          | +/-                                           | 1c |
|                |                        | <i>J</i>              | 1.73 (0.04) | 16.2 (0.9) | 1210 (500)  | 130 (34)                                                         | +/-                                           | 1c |
|                | 35-40                  | <i>J</i>              | 1.67 (0.07) | 16.8 (0.6) | 1748 (471)  | 178 (36)                                                         | +/-                                           | 1c |
|                |                        | <i>J</i>              | 1.64 (0.04) | 16.7 (0.6) | 2313 (1053) | 125 (30)                                                         | +/-                                           | 1c |
|                | 45-50                  | <i>W</i>              | 1.62 (0.01) | 21.3 (0.3) | 1430 (475)  | 124 (19)                                                         | +/-                                           | 1c |
|                |                        | <i>J</i>              | 1.58 (0.06) | 17.7 (1.4) | 1986 (475)  | 89 (17)                                                          | +/-                                           | n  |
|                | 55-60                  | <i>W</i>              | 1.54 (0.01) | 25.0 (0.4) | 1508 (477)  | 106 (12)                                                         | +/-                                           | n  |
|                |                        | <i>J</i>              | 1.66 (0.06) | 15.5 (1.2) | 2046 (499)  | 177 (36)                                                         | +/-                                           | 1c |
| <i>Ku</i>      | 25-30                  | <i>W</i>              | 1.63 (0.11) | 13.5 (0.6) | 2853 (766)  | 226 (27)                                                         | +/-                                           | n  |
|                |                        | <i>J</i>              | 1.50 (0.06) | 12.6 (0.6) | 760 (840)   | 89 (57)                                                          | -/-                                           | n  |
|                | 35-40                  | <i>J</i>              | 1.62 (0.06) | 16.0 (0.7) | 2211 (212)  | 204 (24)                                                         | +/-                                           | 1c |
|                |                        | <i>W</i>              | 1.61 (0.06) | 16.9 (0.7) | 4220 (1492) | 221 (19)                                                         | -/+                                           | n  |
|                | 45-50                  | <i>J</i>              | 1.63 (0.04) | 15.9 (0.2) | 2216 (283)  | 243 (18)                                                         | +/-                                           | 1c |
|                |                        | <i>W</i>              | 1.57 (0.04) | 18.5 (1.1) | 3400 (1660) | 218 (25)                                                         | -/-                                           | n  |
|                | 55-60                  | <i>J</i>              | 1.62 (0.04) | 13.6 (1.2) | 2729 (515)  | 256 (6)                                                          | +/-                                           | 1c |
|                |                        | <i>W</i>              | 1.60 (0.06) | 12.4 (0.8) | 5410 (1891) | 205 (35)                                                         | +/-                                           | 1c |

Notice: brackets include values of standard deviations; "+" or "-" exceeding or lack of exceeding of the critical value; 1a – slightly scarified soil, n – soil with natural density, 1c – slightly compacted soil, 2c – averagely compacted soil, 3c – strongly compacted soil

Results of determination of the optimal moisture content ( $w_{opt}$ ), ratio of present dry density of solid particles ( $\rho_d$ ) and maximum density ( $\rho_{ds}$ ) were presented in table 3. Values  $\rho_d/\rho_{ds}$  were within 0.74 to 0.98 and their median was equal to 0.87. Those results were similar to the ones obtained by other authors for the arable layer (Carter, 1990). In the field conditions  $\rho_d$  in any of the investigated objects did not exceed the value of  $\rho_{ds}$ . Therefore, it was confirmed that assuming in the discussion on the level of soil density that  $\rho_d \leq \rho_{ds}$  should be recognized as justified. When comparing the value of the ratio with the results of assessment of soil density (Table 2) it was obtained that soil may be recognized as excessively compacted, meeting jointly requirements of Iancu's (2001) and Wojtasik (1995) procedures if the value of  $\rho_d/\rho_{ds}$  exceeds 0.87. On the other hand, soil is not excessively compacted when  $\rho_d/\rho_{ds}$  does not exceed 0.77. Values  $\rho_d/\rho_{ds}$  between 0.77 and 0.87 allow, in relation to the granulometric composition of soils, recognition of its density degree as raised. Table 3 presents also results of calculations of the packing density value ( $P_d$ ).

Table 3.

*Values of optimal moisture content ( $w_{opt}$ ), ratio of dry density of solid particles and maximum density ( $\rho_d/\rho_{ds}$ ) soils, packing density ( $P_d$ ), difference of the volumetric density of solid particles and forecast volumetric density of solid particles of soil ( $\rho_d - \rho_{dm}$ )*

| Facility | Layer (cm) | Period of measurements | $w_{opt}$ (% w/w) | $\rho_d/\rho_{ds}$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $P_d$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $\rho_d - \rho_{dm}$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) |
|----------|------------|------------------------|-------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| NP       | 25-30      | J                      | 17.0              | 0.88                                                 | 1.61                                    | -0.19                                                  |
|          |            | J                      | 17.0              | 0.85                                                 | 1.56                                    | -0.08                                                  |
|          | 35-40      | W                      | 15.7              | 0.89                                                 | 1.65                                    | -0.06                                                  |
|          |            | J                      | 15.7              | 0.90                                                 | 1.66                                    | 0.00                                                   |
|          | 45-50      | W                      | 14.5              | 0.88                                                 | 1.62                                    | -0.10                                                  |
|          |            | J                      | 14.5              | 0.77                                                 | 1.44                                    | -0.26                                                  |
|          | 55-60      | W                      | 13.2              | 0.89                                                 | 1.74                                    | -0.07                                                  |
|          |            | J                      | 13.2              | 0.80                                                 | 1.58                                    | -0.29                                                  |
| Ob       | 25-30      | W                      | 19.0              | 0.98                                                 | 1.80                                    | -0.05                                                  |
|          |            | J                      | 19.0              | 0.88                                                 | 1.64                                    | pz                                                     |
|          | 35-40      | W                      | 13.2              | 0.82                                                 | 1.80                                    | -0.27                                                  |
|          |            | J                      | 13.2              | 0.75                                                 | 1.68                                    | -0.21                                                  |
|          | 45-50      | W                      | 11.5              | 0.82                                                 | 1.82                                    | -0.28                                                  |
|          |            | J                      | 11.5              | 0.77                                                 | 1.72                                    | -0.12                                                  |
|          | 55-60      | W                      | 10.5              | 0.86                                                 | 1.80                                    | -0.24                                                  |
|          |            | J                      | 10.5              | 0.77                                                 | 1.62                                    | pz                                                     |
| Os       | 25-30      | J                      | 11.7              | 0.86                                                 | 1.74                                    | -0.18                                                  |
|          |            | J                      | 11.7              | 0.79                                                 | 1.61                                    | -0.29                                                  |
|          | 35-40      | W                      | 10.1              | 0.87                                                 | 1.81                                    | -0.19                                                  |
|          |            | J                      | 10.1              | 0.86                                                 | 1.80                                    | -0.19                                                  |
|          | 45-50      | W                      | 11.7              | 0.85                                                 | 1.83                                    | -0.19                                                  |
|          |            | J                      | 11.7              | 0.81                                                 | 1.75                                    | -0.12                                                  |
|          | 55-60      | W                      | 10.6              | 0.85                                                 | 1.80                                    | -0.17                                                  |
|          |            | J                      | 10.6              | 0.84                                                 | 1.78                                    | -0.05                                                  |

| Facility  | Layer (cm) | Period of measurements | $w_{opt}$ (% w/w) | $\rho_d / \rho_{ds}$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $P_d$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $\rho_d - \rho_{dm}$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) |
|-----------|------------|------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <i>Re</i> | 25-30      | <i>W</i>               | 16.9              | 0.92                                                   | 1.70                                    | -0.02                                                  |
|           |            | <i>J</i>               | 16.9              | 0.84                                                   | 1.52                                    | pz                                                     |
|           | 35-40      | <i>J</i>               | 15.6              | 0.86                                                   | 1.59                                    | -0.17                                                  |
|           |            | <i>W</i>               | 15.6              | 0.95                                                   | 1.54                                    | -0.03                                                  |
|           | 45-50      | <i>J</i>               | 15.2              | 0.75                                                   | 1.43                                    | -0.12                                                  |
|           |            | <i>W</i>               | 15.2              | 0.85                                                   | 1.59                                    | -0.05                                                  |
|           | 55-60      | <i>J</i>               | 14.4              | 0.82                                                   | 1.58                                    | 0.02                                                   |
|           |            | <i>W</i>               | 14.4              | 0.89                                                   | 1.69                                    | 0.05                                                   |
| <i>Sk</i> | 25-30      | <i>J</i>               | 13.0              | 0.96                                                   | 1.91                                    | 0.00                                                   |
|           |            | <i>J</i>               | 13.0              | 0.97                                                   | 1.93                                    | -0.05                                                  |
|           | 35-40      | <i>J</i>               | 18.0              | 0.98                                                   | 1.90                                    | -0.11                                                  |
|           |            | <i>J</i>               | 18.0              | 0.96                                                   | 1.87                                    | -0.14                                                  |
|           | 45-50      | <i>W</i>               | 15.9              | 0.91                                                   | 1.88                                    | pz                                                     |
|           |            | <i>J</i>               | 15.9              | 0.89                                                   | 1.84                                    | -0.08                                                  |
|           | 55-60      | <i>W</i>               | 16.8              | 0.86                                                   | 1.72                                    | pz                                                     |
|           |            | <i>J</i>               | 16.8              | 0.92                                                   | 1.84                                    | -0.13                                                  |
| <i>Ku</i> | 25-30      | <i>W</i>               | 11.2              | 0.83                                                   | 1.73                                    | -0.29                                                  |
|           |            | <i>J</i>               | 11.2              | 0.74                                                   | 1.55                                    | -0.33                                                  |
|           | 35-40      | <i>J</i>               | 13.9              | 0.87                                                   | 1.80                                    | -0.13                                                  |
|           |            | <i>W</i>               | 13.9              | 0.87                                                   | 1.79                                    | 0.00                                                   |
|           | 45-50      | <i>J</i>               | 15.4              | 0.92                                                   | 1.84                                    | -0.15                                                  |
|           |            | <i>W</i>               | 15.4              | 0.88                                                   | 1.78                                    | -0.15                                                  |
|           | 55-60      | <i>J</i>               | 16.8              | 0.93                                                   | 1.84                                    | -0.04                                                  |
|           |            | <i>W</i>               | 16.8              | 0.92                                                   | 1.82                                    | -0.01                                                  |

Notice: „pz” – means that it was impossible to determine  $\rho_{dm}$ , because the scope of the model use was exceeded

Values  $P_d$  (Jones et al., 2003) allow assessment of susceptibility of subsoil to density. In 22 instances it was found out that the investigated soils are susceptible to compaction to a small degree because  $P_d > 1.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Average susceptibility ( $1.40 \leq P_d \leq 1.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) was obtained in 26 cases. Soils with high susceptibility to compaction were not reported ( $P_d < 1.40$ ). Comparing values of  $P_d$  with the results of Proctor's method of determination it may be proved (for  $P_d > 1.75$ ), that soil is low susceptible to compaction if the average value  $\rho_d / \rho_{ds} > 0.89$ . It may be also noticed that the values  $\rho_d / \rho_{ds}$  increase with the growth of  $P_d$ . The research on the coefficient of correlation on ( $r$ ) between the values  $\rho_d / \rho_{ds}$  a  $P_d$  proved that in general, the force of this relation was average ( $r=0.56$ ). However, the lowest statistically insignificant value  $r$  was obtained for the object *Ob* ( $r=0.41$ ) and the highest *Ku* ( $r=0.97$ ), namely respectively for soils with considerably the lowest and the highest content of sand fraction content. Table 3 also presents results of comparison of density  $\rho_d$  and  $\rho_{dm}$ . It may be noticed that in the decisive majority of cases the value  $\rho_d$  was lower than  $\rho_{dm}$ . Several instances  $\rho_{dm} \geq \rho_d$  should be recognized as random and practically insignificant because the difference  $\rho_d - \rho_{dm}$  was within  $\pm 0.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . It may prove that also at the moisture level of soil which differs from the optimal moisture content of its density in field conditions the value  $\rho_{ds}$  was not exceeded.

## Conclusions

1. The investigated soils in relation to the period and depth of measurement and their granulation group may be included to excessively compacted. But the lowest number of cases of excessive compaction was reported for soils with granulation of silt loam and loam with the content of particles  $<0.002$  mm which are within 9 to 15%.
2. Soil may be considered as excessively compacted when the ratio of present dry density of solid particles ( $\rho_d$ ) and the maximum density ( $\rho_{ds}$ ), determined with Proctor's standard method, exceeds the value of 0.87. Soil is not excessively densified when the ratio  $\rho_d/\rho_{ds}$  does not exceed 0.77. Values  $\rho_d/\rho_{ds}$  between 0.77 and 0.87 allow, in relation to the granulometric composition of soils, recognize its density degree as raised.
3. The investigated soils, based on the analysis of the soil compaction values and its shear vane test and volumetric density of its mineral particles, may be included to susceptible to compaction in the average or small degree.
4. Present volumetric density of the solid particles of the investigated soils did not achieve the maximum values of volumetric densities, determined with the Proctor's method, which proves that these soils may be subjected to the process of further compaction.
5. Density of the investigated soils did not considerably exceed the values of volumetric densities read out from Proctor's curve for the moisture determined in the field conditions.

## References

- Aragón, A., García, M.G., Filgueira, R.R., Pachepsky, Ya.A. (2000). Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; The relationship with organic carbon and water content. *Soil and Tillage Research*, 56, 197-204.
- Barzegar, A.R., Asoodar, M. A., Ansari, M. (2000). Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. *Soil & Tillage Research*, 57, 167-172.
- Błażejczak, D. (2010). *Prognozowanie naprężenia granicznego w warstwie podornej gleb ugniatanych kołami pojazdów rolniczych*. Wyd. ZUT w Szczecinie. ISBN 978-83-7663-050-2.
- Błażejczak, D., Dawidowski, J.B. (2013). Problem wykorzystania gęstości objętościowej gleby w ocenie jej zagęszczenia. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 58(1), 17-20.
- Carter, M. R. (1990). Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, 70, 425-433.
- Dobrzański B. Zawadzki S. (red.), (1993): *Gleboznawstwo*. PWRiL, Warszawa, ISBN 83-09-00083-9.
- Gregorich, E. G., Carter, M.R. (1997). *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Developments in soil science 25. Elsevier, Amsterdam, ISBN 0-444-86661-5.
- Hakansson, I., Lipiec, J. (2000). A revive of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, 53, 71-85.
- Iancu, M. (2001). *Technique for Reducing Subsoil Compaction of Pedogenetic Origin*. Proceedings of the 3rd INCO Copernicus Workshop on Subsoil Compaction, Busteni-Romania, June 14-18, 2001, 437-451.
- Jones, R. J. A., Spoor, G., Thomasson A. J. (2003). Vulnerability of subsoil in Europe to compaction: a preliminary analysis. *Soil & Tillage Research*, 73, 131-143.
- Komornicki, T., Zasoński, S. (1965). Powtarzalność wyników oznaczeń niektórych właściwości fizycznych gleb. *Roczniki Gleboznawcze*, T. XV, z. 2. PWN Warszawa, 315-330.

- Krasowicz, S., Oleszek, W., Horabik, J., Dębicki, R., Jankowiak, J., Stuczyński, T., Jadczyński, J. (2011). Racjonalne gospodarowanie środowiskiem glebowym Polski. *Polish Journal of Agronomy*, 7, 43-58.
- Kumar D., Bansal M. L., Phogat V. K. (2009). Compactability in relation to texture and organic matter content of alluvial soils. *Indian Journal of Agricultural Research*, 43(3), 180-186.
- PN-88/B-04481 (1988). *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*.
- Soane, B.D., Blackwell, P.S., Dickson, J.W., Painter, D.J., (1980/1981). Compaction by agricultural vehicles: a review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil & Tillage Research*, 23, 207-237.
- Szeptycki, A. (2003). Wpływ ciężkich maszyn rolniczych na fizykomechaniczne właściwości gleby. *Journal of Research and Application in Agricultural Engineering*, 48(2), 38-42.
- Van den Akker, J. J. H., Arvidsson, J., Horn, R. (2003). Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil & Tillage Research*, 73, 1-8.
- Wagner, L. E., Ambe, N. M., Ding D. (1994). Estimating a Proctor Density Curve from Intrinsic Soil Properties. *Transactions of the ASAE*, 37(4), 1121-1125.
- Wojtasik, M. (1995). *Gęstość naturalna gleb mineralnych*. WSP Bydgoszcz. ISBN 83-7096-076-6.

## OCENA ZAGĘSZCZENIA WARSTWY PODORNEJ GLEB PLASTYCZNYCH

**Streszczenie.** Celem badań była ocena zagęszczenia gleby za pomocą wybranych wskaźników oraz wyznaczenie relacji pomiędzy nimi, ze szczególnym uwzględnieniem wyników uzyskanych metodą Proctora. Pomiary zwięzłości i oporów ścinania w ruchu obrotowym, gęstości objętościowej szkieletu gleby ( $\rho_d$ ) oraz jej wilgotności wykonano w warstwach na głębokościach: 25-30, 35-40, 45-50 i 55-60 cm. Oznaczono także: maksymalną gęstość objętościową szkieletu metodą Proctora ( $\rho_{ds}$ ), skład granulometryczny, zawartości węgla wapnia i próchnicy, gęstość fazy stałej, odczyn oraz granice plastyczności i płynności. Obliczano także gęstość objętościową części mineralnych oraz gęstość naturalną. Stwierdzono, że zbadane gleby można ogólnie zaliczyć do nadmiernie zagęszczonych i podatnych na zagęszczanie w stopniu średnim lub małym. Wykazano, że glebę można uważać za nadmiernie zagęszczoną, gdy iloraz  $\rho_d/\rho_{ds}$  przekracza wartość 0,87.

**Słowa kluczowe:** gleba, zagęszczenie, ocena, gęstość objętościowa, metoda Proctora

## COMPARISON OF PROCTOR AND UNIAXIAL COMPRESSION TESTS FOR SELECTED SOILS

Dariusz Błażejczak\*, Kinga Śnieg, Małgorzata Słowik

Department of Construction and Usage of Technical Devices, West Pomeranian University of Technology in Szczecin

\*Corresponding author: e-mail: [dariusz.blazejczak@zut.edu.pl](mailto:dariusz.blazejczak@zut.edu.pl)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: January 2018  
Received in the revised form:  
January 2018  
Accepted: February 2018

#### Key words:

soil,  
compaction,  
Proctor test,  
uniaxial test

### ABSTRACT

The objective of this paper was to compare the results of soil material compaction carried out with the use of the Proctor and uniaxial compression tests in order to find relations between these methods. Soil material in the form of loose mass was collected from the layer deposited at the depth from 35 to 60 cm in order to determine its typical properties (textural group, density of solid particles, humus content, reaction, plastic and liquid limits) and in order to compact it in the Proctor apparatus and in the uniaxial compression test. Results of both tests were used for construction of regression models reflecting the course of the unit stress ( $P_{\rho_{dp}}$ ), necessary to generate compaction equal to the dry density of solid particles obtained in the Proctor apparatus ( $\rho_{dp}$ ) in relation to the sample moisture ( $w_s$ ). It was stated that the stress value  $P_{\rho_{dp}}$  on the soil sample in the uniaxial compression test depends significantly on  $w_s$ . It was proved that for the purpose of comparing the results of both tests, the uniaxial stress of samples must be performed in conditions of their lateral expansion. It was also proved that the use of the uniaxial test with possible lateral expansion of soil with a model sample, a diameter of which is 100 and the height is 30 mm, one may determine the obtained compaction with the use of the plate movement value.

## Introduction

Excessive soil compaction which results from the impact of wheels of agricultural machines and vehicles is one of the most serious problems of modern agriculture (van den Akker et al., 2003). Soils which are particularly susceptible to compaction are as follows: heavy clays, clays, and sandy loams (Krasowicz et al., 2011). Excessive compaction of subsoil is mainly dangerous because the effects of compaction of this layer are long-lasting and its liquidation through deep loosening is energy consuming and often ineffective (Szepczycki, 2003). A rational approach to counteracting this phenomenon requires evaluation of the present soil density and identification of conditions in which it takes place.

Dry density of solid particles is popular in the density tests. Direct use of results of measurements of dry density of solid particles in the context of its influence on the plant growth conditions causes many problems (Błażejczak and Dawidowski, 2013). These diffi-

culties cause that there are attempts to use relevant measures of soil compaction as an indicator of evaluation of plant growth conditions (Håkansson and Lipiec, 2000).

On the other hand, identification of conditions, in which the risk of excessive soil compaction raises considerably, consists mainly in determination of the soil moisture value at which its maximum compaction is possible. Parameters which, on one hand, may constitute the reference point in evaluation of the soil compaction conditions and on the other hand, describe the conditions of the maximum susceptibility on its compaction, are results of research obtained with the Proctor apparatus in the form of the maximum density and optimal compaction moisture (Wagner et al., 1994; Aragón et al., 2000; Nhantumbo and Cambule 2006; Tarkiewicz and Nosalewicz, 2005). The maximum value of dry density ( $\rho_{ds}$ ) obtained in the standard Proctor method is considered as the maximum possible to be obtained for particular soil (Kumar et al., 2009).

From the point of view of counteracting the excessive soil compaction, the results obtained in the Proctor test are insufficient. Since, for example, they do not provide information on the stress value which can produce particular soil compaction. Such information may be obtained with the use of the uniaxial soil compression test. Thus, it is justified to develop procedures that enable comparison of the results obtained in the Proctor and uniaxial test to counteract excessive soil compaction.

## Objective and scope of the paper and research methods

The objective of the paper was to compare the results of soil material compaction made with the Proctor and uniaxial compression tests in order to search for relations between parameters of results of both methods to protect soil against excessive compaction with farming machine wheels. It was assumed that the analysis of the uniaxial unit stress value of the plate on the soil sample, obtained in the uniaxial test referred to soil moisture applied in the Proctor test and levels of its compaction that were obtained should be the basis for discussions.

Answers to the following questions were searched for:

1. What conditions are necessary (possible or impossible lateral expansion of soil) to deform soil in the uniaxial test to search for relations between the results of both tests?
2. Is it possible to determine the change of the soil compaction condition under the plate based on its movement with the use of the uniaxial test with possible lateral soil expansion?
3. Does the unit stress of the plate on the sample in the uniaxial compression test significantly depend on the soil moisture and its obtained compaction in the Proctor test?

While selecting material for research an assumption that was taken into consideration was that its properties should be variable mainly with regard to the textural group. Based on the analysis of information included in soil and agricultural maps and results of previous research (Błażejczak et al., 2010; Śnieg and Błażejczak 2017) fields of rural areas edges were selected for collecting the material: Nowy Przylep (*NP*), Obojno (*Ob*) and Ostoja (*Os*) – Nizina Szczecińska. Field investigations were carried out in layers which are at the depth of: 35-40, 45-50 and 55-60 cm. Soil material in the form of loose mass was collected therefrom in order to determine typical soil properties, to carry out compaction in the Proctor apparatus and the uniaxial compression test. A textural group was determined with the

Bouyoucosa-Casagrande method in Prószyński's modification. A pycnometer method was used for determination of the density of solid particles. The humus content was determined with Tiurin's method and soil reaction with the electrometrical method. The plastic limit was measured with the rolling method and the liquid limit with the use of the Cassagrande apparatus.

Soil material designated for the Proctor tests or uniaxial compression was sieved through a 6 mm screen. After sieving, material was divided into 8 portions moistened with a varied amount of water according to PN-88/B-04481 and placed in a separate container. The amount of material for each container (moisture level) was selected so as to be sufficient for compression in the Proctor apparatus and forming 4 model samples which were then uniaxially compressed. Compaction in the Proctor apparatus was carried out with the use of a cylinder with the volume of  $1000 \text{ cm}^3$  with the unit compaction energy which was  $0.59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$  of soil. Forming of samples consisted in the initial soil compaction in steel rings (cylinders - figure 1a) to density lower by approx.  $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  than the minimum values reported in field conditions (Śnieg and Błażejczak, 2017). The internal diameter (D) and height of cylinders (H) were respectively 100 and 30 mm. Then, samples were subjected to the secondary uniaxial compaction with the speed of  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  with an electric press with continuous registration of the stress made and sample deformation (figure 1b). Plates with diameters (d) of 50 or 98 mm were used in order to check the impact of the samples deformation conditions on the investigated relations between the tests. A principle was assumed that for basic tests which aim at the performance of the assumed objective of the paper, a plate will be applied, the use of which will cause achieving results that enable obtaining a regression equation with their higher evaluation.

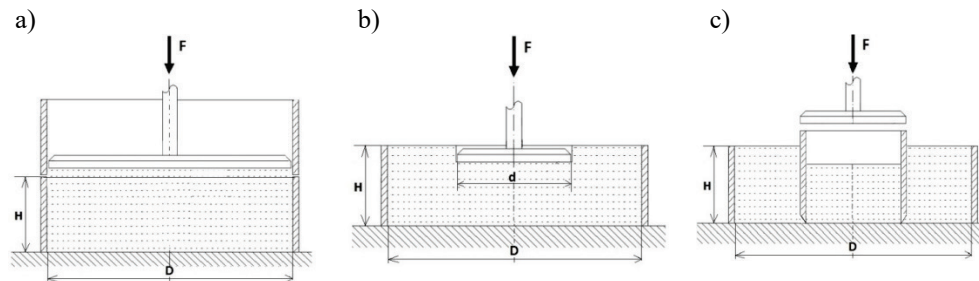


Figure 1. Stages of uniaxial compression test of samples: a) formation, b) uniaxial deformation, c) control of soil material compaction under the plate

Knowledge of the uniaxial test parameters and initial dry density of model samples enabled calculation of changes of dry density of solid particles under the plate under the unit stress on the sample. In case the plate  $d50$  was applied for deformation of the model samples, an assumption was made that compaction of the sample changes lineary along with the increase of the plate depth as in case of the plate  $d98$ . Reasonableness of this assumption was verified by comparison of the dry density of solid particles calculated for the specific sample deformation with the measured ones with cylinders with the internal diameter of 50 mm (fig. 1c). In this case formed model samples were subjected to the secondary compac-

tion of samples to the maximum dry density obtained in the Proctor test which in relation to the object corresponded to deformation from 6 to approximately 8 mm.

The obtained results of the Proctor test and uniaxial compression were used for construction of regression models for forecasting unit stress indispensable for production of compaction equal to the dry density obtained in the Proctor apparatus at the determined moisture.

## Results of research and their analysis

Table 1 presents results of determination of own properties of the soil material. One may notice that soil material with the varied textural group was used. The highest content of fractions: sand, dust and loamy included material collected respectively from the following facilities: Ostoja (*Os*), Nowy Przylep (*NP*) and Obojno (*Ob*). Moreover, considerable differences between the facilities with regard to the humus content and values of reaction and relative moisture occurred. It was found out that the material came from compact soils - difference between limits of liquidity and plasticity was higher than 1.0% moisture content

Table 1.

*Average values of own properties of soils for the selected objects and measured layers*

| Object | Layer | Textural group acc. to USDA (PTG 2009) | Fraction content acc. to PTG (2009) |      |      | Specific density      | Reaction (in KCl) | Humus content | Plastic limit | Liquid limit |
|--------|-------|----------------------------------------|-------------------------------------|------|------|-----------------------|-------------------|---------------|---------------|--------------|
|        |       |                                        | Sand                                | Silt | Loam |                       |                   |               |               |              |
|        | (cm)  |                                        | (%)                                 |      |      | (g·cm <sup>-3</sup> ) | (pH)              | (%)           | (% w/w)       |              |
| NP     | 35-40 | SL                                     | 36.0                                | 53.4 | 10.6 | 2.46                  | 6.34              | 2.02          | 21.3          | 31.2         |
|        | 45-50 | SiL                                    | 34.1                                | 56.9 | 9.0  | 2.45                  | 6.29              | 2.30          | 23.7          | 32.0         |
|        | 55-60 | L                                      | 37.6                                | 48.4 | 14.0 | 2.47                  | 6.21              | 1.09          | 20.3          | 31.3         |
| Ob     | 35-40 | L                                      | 25.0                                | 48.0 | 27.0 | 2.49                  | 6.84              | 3.77          | 28.0          | 47.9         |
|        | 45-50 | SCL                                    | 14.0                                | 48.0 | 38.0 | 2.52                  | 6.78              | 2.34          | 30.4          | 58.7         |
|        | 55-60 | SL                                     | 12.0                                | 46.0 | 42.0 | 2.40                  | 6.52              | 1.70          | 31.4          | 73.0         |
| Os     | 35-40 | L                                      | 45.0                                | 40.3 | 14.7 | 2.66                  | 5.13              | 0.61          | 18.4          | 27.6         |
|        | 45-50 | L                                      | 50.0                                | 29.4 | 20.6 | 2.67                  | 5.23              | 0.69          | 19.8          | 30.3         |
|        | 55-60 | L                                      | 48.3                                | 31.2 | 20.5 | 2.55                  | 5.63              | 0.57          | 18.0          | 28.8         |

Symbols of textural groups: SiL - silt loam, L- loam, SCL - sandy clay loam, SL - silty loam

According to the assumed course of the procedure, initially the impact of the manner of samples deformation on the searched relations between both tests was tested. It was proved that values of the unit stress ( $P_{\rho_{dp}}$ ) indispensable for production of compaction equal to dry density ( $\rho_{dp}$ ) obtained in the Proctor apparatus in relation to the sample moisture ( $w_s$ ) assume a varied course for applied plate diameters. The selected example for NP facility was presented in figure 2. Values of determination coefficient obtained for the plate with the diameter  $d_{50}$  prove good adjustment of measurement points to regression lines –  $R^2 \geq 0.90$ . In case of the plate with the diameter  $d_{98}$ , the coefficient of determination assumed consid-

erably lower values ( $R^2 \leq 0.65$ ) and measurement points are more scattered on the diagram. A different course of the regression line (fig. 2a) for applied plates may be justified with the phenomena that take place between the plate edge and the measuring cylinder wall which affected the recorded course of the unit stress from the value of sample deformation (Błażejczak, Dawidowski, 2016). Analysis of the diagram in figure 2b shows that despite a similar trend in regression line value  $P_{pdp}$  they are considerably higher than for the plate  $d98$ . Similar results to those presented in figure 2 were obtained for facilities *Ob* and *Os*. But the smallest differences between values  $R^2$  for plates  $d50$  and  $d98$  were reported for the facility *Os*. It might have resulted from the textural group of soil material with a considerably high content of sand (table 1) which considerably facilitates water and air filtration even with the use of a plate with a diameter close to the internal diameter of the cylinder. It should be emphasised that in each of the investigated cases values  $P_{pdp}$  read for  $d98$  mm assumed higher values for particular  $w_s$ .

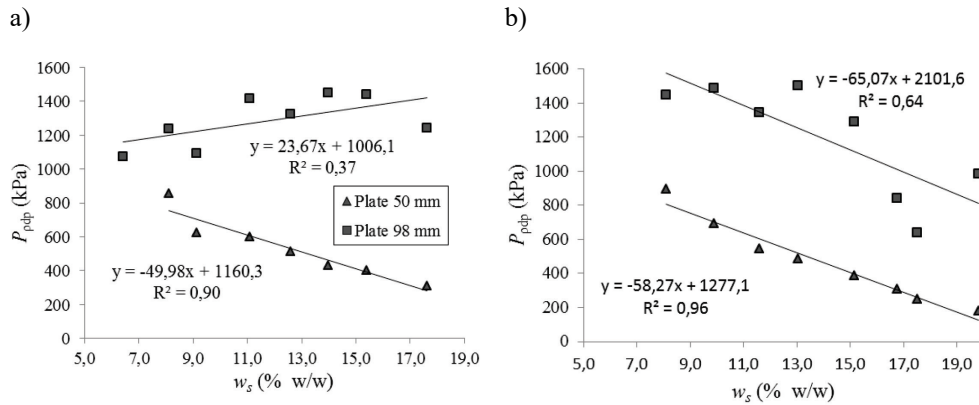


Figure 2. Values of the unit stress ( $P_{pdp}$ ) indispensable for production of equal compaction of dry density obtained in Proctor apparatus ( $\rho_{dp}$ ) for the plate diameters 50 or 98 mm in relation to the sample moisture ( $w_s$ ) – facility NP: a) layer 35-40 cm, b) layer 45-50 cm

Analysis of the unit stress value ( $P_{pdp}$ ) presented in figure 2 enables a statement that in case of the plate with 98 mm diameter, they were considerably higher than the determined average unit stress on soil by wheels of agricultural vehicles and machine even for the heaviest vehicles used in field works (Walczyk, 1995; Jurga, 2009; Filipovic et al., 2016; Silva et al., 2016). For instance, unit stresses determined by Walczyk (1995) were at the maximum 300 kPa. On the other hand, the minimum value of the unit stress obtained in the conditions of the limited expansion of the sample exceeded 600 kPa (fig. 2b). To conclude this part of research, one shall state that for the purposes of comparison of the unit compression tests with the soil compaction results in the Proctor apparatus in the context of testing the process of its compaction by agricultural tractors and machines, uniaxial deformation of samples should be carried out in conditions of their possible lateral expansion. It may also result from the fact that the uniaxial deformation in such conditions more reflects deformation in the Proctor apparatus and in the field conditions where soil compaction is

accompanied by moving soil masses outside the sphere of direct impact of wheels or working elements of agricultural machines and vehicles.

The research program was continued by soil material compaction in the Proctor apparatus and in the uniaxial sample deformation test with the use of a 50 mm plate, namely, under the conditions of possible lateral soil expansion.

Firstly, rightness of the assumption that compaction of the pressed sample changes linearly along with the increase of the plate depth was verified. Results of the comparison of the dry density of solid particles values calculated with the measured ones were presented in table 2. It was found out that these values did not differ significantly –  $p > 0.05$ . In this case, lack of differences may be justified with a considerably low height of model samples ( $H_{30}$ ) and deformation value (6.0-8.2 mm) which resulted in the fact that relocation of soil particles outside a cylindrical area of direct effect of the plate was low. It should be added that distribution of stresses under the plate with a specific angle and relocation of particles requires formation of the compacted soil conic according to Terzaghy's theory (Błażejczak et al., 2017).

Table 2.

*Results of comparison of values of measured and calculated dry density of solid particles of model samples after deformation*

| Object    | Sample moisture<br>(% w/w) | Initial dry density of solid particles of a sample<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | Sample deformation<br>(mm) | Dry density of solid particles after deformation<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) |          | Value $p$ |
|-----------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|
|           |                            |                                                                                         |                            | calculated                                                                            | measured |           |
| <i>NP</i> | 18.1                       | 1.28                                                                                    | 8.0                        | 1.68                                                                                  | 1.71     | 0.234     |
| <i>Ob</i> | 22.8                       | 1.25                                                                                    | 6.0                        | 1.64                                                                                  | 1.66     | 0.345     |
| <i>Os</i> | 11.1                       | 1.41                                                                                    | 8.2                        | 1.86                                                                                  | 1.88     | 0.583     |

Symbols: border probability ( $\alpha=0.05$ )

Output parameters and results of the Proctor and uniaxial compression tests were presented in table 3. By analysis of the results within particular facilities one may notice that the minimum values of the unit stress on sample ( $P_{\rho_{dp}}$ ) at which dry density of solid particles equal to the density obtained in the Proctor test ( $\rho_{dp}$ ) were similar to the values of stress on soil by agricultural vehicles wheels (Walczyk, 1995; Jurga, 2009).

Multiple regression was firstly used for selection of equations for prediction of the unit stress ( $P_{\rho_{dp}}$ ) necessary for production of compaction equal to the dry density of solid particles obtained in the Proctor test ( $\rho_{dp}$ ) at specific moisture. By evaluation of independent variables of the obtained models it was found out that stress  $P_{\rho_{dp}}$  indispensable for production of  $\rho_{dp}$  does not significantly depend on this density ( $\rho_{dp}$ ). Then, for selection of equations for forecasting  $P_{\rho_{dp}}$  linear regression was applied by using sample moisture ( $w_s$ ) as an independent variable. The obtained equations were placed in table 4. Models are highly significant ( $p < 0.001$ ) and well adjusted for measurement points – coefficient of determination ( $r^2$ ) was within 0.91 to 0.98.

## Comparison of Proctor...

Table 3.

*Output parameters and Proctor test results and unit compression of model samples with a plate of 50 mm diameter*

| Object | Layer (cm) | $w_s$ (% w/w) | $\rho_{dp}$ (g·cm <sup>-3</sup> ) | $\rho_{dm}$ (g·cm <sup>-3</sup> ) | $P_m$ (kPa) | $P_{\rho dp}$ (kPa) |
|--------|------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------|---------------------|
| NP     | 35-40      | 8.1-19.2      | 1.58-1.74                         | 1.26-1.29                         | 55-364      | 250-881             |
|        | 45-50      | 9.9-19.8      | 1.64-1.79                         | 1.25-1.28                         | 45-334      | 173-688             |
|        | 55-60      | 9.3-19.7      | 1.65-1.79                         | 1.24-1.26                         | 29-280      | 136-891             |
| Ob     | 35-40      | 10.6-25.7     | 1.49-1.64                         | 1.28-1.30                         | 91-384      | 148-998             |
|        | 45-50      | 15.7-32.0     | 1.40-1.67                         | 1.25-1.28                         | 34-193      | 75-778              |
|        | 55-60      | 15.7-30.3     | 1.41-1.65                         | 1.24-1.28                         | 30-294      | 73-838              |
| Os     | 35-40      | 8.7-18.2      | 1.74-1.89                         | 1.48-1.52                         | 99-407      | 148-1194            |
|        | 45-50      | 9.9-19.7      | 1.67-1.78                         | 1.44-1.48                         | 128-559     | 201-1433            |
|        | 55-60      | 11.3-21.3     | 1.59-1.84                         | 1.43-1.46                         | 68-388      | 83-1031             |

Symbols:  $w_s$  – material moisture during Proctor test and uniaxial compression test,  $\rho_{dp}$  – dry density of solid particles obtained in Proctor test,  $\rho_{dm}$  – dry density of solid particles of model samples (after formation),  $P_m$  – formation stress of model samples,  $P_{\rho dp}$  – unit stress on a sample at which density equal to the dry density result obtained in Proctor test was obtained ( $\rho_{dp}$ )

Table 4.

*Regression equations for forecasting unit stress ( $P_{\rho dp}$ ) indispensable for production of compaction equal to dry density ( $\rho_{dp}$ ) obtained in Proctor apparatus and their statistical evaluation*

| Object | Layer (cm) | Equation                            | Statistical assessment of equation |       |
|--------|------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------|
|        |            |                                     | $p$                                | $r^2$ |
| NP     | 35-40      | $P_{\rho dp} = -40.2 w_s + 1023.8$  | <0.0001                            | 0.98  |
| NP     | 45-50      | $P_{\rho dp} = -49.2 w_s + 1151.0$  | <0.0001                            | 0.96  |
| NP     | 55-60      | $P_{\rho dp} = -53.3 w_s + 1238.6$  | <0.0001                            | 0.98  |
| Ob     | 35-40      | $P_{\rho dp} = -62.7 w_s + 1780.1$  | <0.0001                            | 0.98  |
| Ob     | 45-50      | $P_{\rho dp} = -55.2 w_s + 1626.2$  | <0.0001                            | 0.95  |
| Ob     | 55-60      | $P_{\rho dp} = -48.6 w_s + 1533.0$  | <0.0001                            | 0.91  |
| Os     | 35-40      | $P_{\rho dp} = -124.4 w_s + 2375.4$ | <0.0001                            | 0.98  |
| Os     | 45-50      | $P_{\rho dp} = -127.1 w_s + 2689.2$ | <0.0001                            | 0.98  |
| Os     | 55-60      | $P_{\rho dp} = -92.2 w_s + 1972.9$  | <0.0001                            | 0.95  |

Symbols:  $w_s$  – soil sample moisture,  $p$  – significance level ( $\alpha=0.05$ ),  $r^2$  – coefficient of linear regression determination

Equations of regression (table 4) were obtained on the produced model samples with uniform initial dry density ( $\rho_{dm}$ ) – distribution of values for particular layers did not exceed 0.05 g·cm<sup>-3</sup> (table 3). In field conditions, dry density of solid particles changes as a result of the impact of both natural and anthropological factors. Thus, further research should verify the impact of the initial density of the sample on the forecasted value of the unit stress indispensable for production of the specific soil density state.

## Conclusions

1. For the purposes of comparison of the unit compression tests with the soil compaction results in the Proctor apparatus in the context of testing the process of its compaction by agricultural tractors and machines, uniaxial deformation of samples should be carried out in conditions of their possible lateral expansion
2. In case of model samples with diameter of 100 and height of 30 mm using uniaxial test with possible lateral soil expansion value of the plate movement may be used for determination of the obtained compaction.
3. Value of the unit stress on the soil sample in the uniaxial stress test that enables obtaining dry density of solid particles obtained in the Proctor apparatus significantly depends on the sample moisture.

## References

- Aragón, A. , García, M.G. , Filgueira, R.R. , Pachepsky, Ya.A. (2000). Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test, The relationship with organic carbon and water content. *Soil&Tillage Research*, 56, 197-204.
- Błażejczak, D. (2010). *Prognozowanie naprężenia granicznego w warstwie podornej gleb ugniatanych kołami pojazdów rolniczych*. Wyd. ZUT w Szczecinie. ISBN 978-83-7663-050-2.
- Błażejczak, D., Dawidowski, J.B. (2013). Problem wykorzystania gęstości objętościowej gleby w ocenie jej zagęszczenia. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 58(1), 17-20.
- Błażejczak, D., Dawidowski, J.B. (2016). The impact of the plate diameter on the determined value of pre-compaction stress of samples made of silt soil. *Agricultural Engineering*, Vol. 20, No 2, 5-14.
- Błażejczak, D., Nowowiejski R., Dawidowski J.B. (2017). Impact of friction on the uniaxial soil sample copression proces. *Agricultural Engineering*, Vol. 21, No 2, 101-112.
- Hakansson, I., Lipiec, J. (2000). A revive of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research*, 53, 71-85.
- Jurga, J. (2009). The verification of mathematical model designed to determining the area of the contact surface as well as unit pressure exerted onto soil by wheels of the agricultural vehicles. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 54(1), 83-88.
- Krasowicz S., Oleszek, W., Horabik, J., Dębicki, R., Jankowiak, J., Stuczyński, T., Jadczyzsyn, J. (2011). Racjonalne gospodarowanie środowiskiem glebowym Polski. *Polish Journal of Agronomy*, 7, 43-58.
- Kumar, D., Bansal, M. L., Phogat, V. K. (2009). Compactability in relation to texture and organic matter content of alluvial soils. *Indian Journal of Agricultural Research*, 43(3), 180-186.
- Nhantumbo, A. B. J. C. , Cambule, A. H. (2006). Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. *Soil&Tillage Res.* 87, 231-239.
- Polskie Towarzystwo Gleboznawcze (2009). Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008. *Roczniki Gleboznawcze*, 60(2), 5-16.
- PN-88/B-04481 (1988). *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*.
- Szeptycki, A. (2003). Wpływ ciężkich maszyn rolniczych na fizykomechaniczne właściwości gleby. *Journal of Research and Application in Agricultural Engineering*, 48(3), 5-9.
- Śnieg, K., Błażejczak, D. (2017). Evaluation of subsoil compaction of plastic soils. *Agricultural Engineering*, Vol 21, No 1, pp. 85-94.
- Tarkiewicz, S., Nosalewicz, A. (2005). Effect of organic carbon content on the compactibility and penetration resistance of two soils formed from loess. *International Agrophysics*, 19, 345-350.

- Van den Akker, J. J. H., Arvidsson, J., Horn, R. (2003). Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil&Tillage Research*, 73, 1-8.
- Wagner, L. E., Ambe, N. M., Ding, D. (1994). Estimating a Proctor Density Curve from Intrinsic Soil Properties. *Transactions of the ASAE*, Vol. 37(4), 1121-1125.
- Walczyk, M. (1995). *Wybrane techniczne i technologiczne aspekty ugniatania gleb rolniczych agregatami ciągnikowymi*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, Rozpr. 202, ISSN 1233-4189.

## **PORÓWNANIE TESTÓW PROCTORA I JEDNOOSIOWEGO ŚCISKANIA DLA WYBRANYCH GLEB**

**Streszczenie.** Celem pracy było porównanie rezultatów zagęszczania materiału glebowego prowadzonego za pomocą testów Proctora i jednoosiowego ściskania, ukierunkowane na poszukiwanie zależności pomiędzy tymi metodami. Z warstwy leżącej na głębokości od 35 do 60 cm pobrano materiał glebowy w postaci luźnej masy celem oznaczenia jego typowych cech własnych (skład granulometryczny, gęstość fazy stałej, zawartość próchnicy, odczyn, granice plastyczności i płynności) i przeprowadzenia jego zagęszczania w aparacie Proctora oraz w teście jednoosiowego ściskania. Wyniki obu testów wykorzystano do budowy modeli regresji odwzorowujących przebieg nacisku jednostkowego ( $P_{\rho dp}$ ), niezbędnego do wytworzenia zagęszczenia równoważnego gęstości objętościowej uzyskiwanej w aparacie Proctora ( $\rho_{dp}$ ), w zależności od wilgotności próbki ( $w_s$ ). Stwierdzono, że wartość nacisku  $P_{\rho dp}$  wywieranego na próbkę gleby w teście jednoosiowego ściskania zależy istotnie od  $w_s$ . Wykazano, że do celów porównywania wyników obu testów jednoosiowe odkształcanie próbek należy wykonywać w warunkach możliwej ich bocznej rozszerzalności. Wykazano także, że stosując test jednoosiowy z możliwą boczną rozszerzalnością gleby, z zastosowaniem próbek modelowych o średnicy 100 i wysokości 30 mm, można do określenia uzyskiwanego zagęszczenia wykorzystać wartość przemieszczenia stempla.

**Słowa kluczowe:** gleba, zagęszczanie, test Proctora, test jednoosiowy

## PREDICTING UNIT PRESSURE INDISPENSABLE FOR GENERATION OF SPECIFIC COMPACTION OF A SOIL SAMPLE

Kinga Śnieg, Dariusz Błażejczak\*, Małgorzata Słowik

Department of Construction and Usage of Technical Devices, West Pomeranian University  
of Technology in Szczecin, Poland

\*Corresponding author: e-mail: [dariusz.blazejczak@zut.edu.pl](mailto:dariusz.blazejczak@zut.edu.pl)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: July 2018

Received in the revised form:

August 2018

Accepted: September 2018

#### Key words:

soil, compaction,

Proctor test,

uniaxial test

### ABSTRACT

The objective of the research was to construct an empirical model for prediction of a unit pressure indispensable for generation of a specific compaction of soil samples. Soil material in the form of loose mass was collected from the soil layer deposited in the depth from 35 to 40 cm and then its typical properties were determined (textural group, density of solid particles, humus content, reaction, plastic and liquid limits) and in order to compact it in Proctor apparatus and in the uniaxial compression test. Results of both tests were used for construction of regression models reflecting the course of the unit strength ( $P_{pd}$ ) necessary to generate compaction ( $\rho_{dj}$ ) equal to the dry bulk density obtained in Proctor apparatus ( $\rho_{dp}$ ), in relation to the sample moisture ( $\rho_{dm}$ ). Searching for relations was restricted to the scope of moisture between an optimal one acc. to Proctor and the soil plastic limit. It was stated that the pressure value  $P_{pdp}$  made on the soil sample in the uniaxial compression test depends significantly on  $w_s$  and  $\rho_{dm}$ , and for description of this relation the use of multiple regression is sufficient. It was found out that for model samples with a textural group of silt loam and loam, differences in dry bulk density obtained in Proctor apparatus are approximately up to  $0.15 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

## Introduction

Excessive soil compaction which results from the impact of wheels of machines and agricultural vehicles is one of the most serious problems of modern agriculture (van den Akker et al., 2003). Soils, which are particularly susceptible to compaction are as follows: heavy clays, clays, and sandy loams (Krasowicz et al., 2011). First of all, excessive compaction of subsoil is dangerous because the effects of compaction of this layer are long-lasting and its liquidation through deep loosening is energy consuming and often ineffective (Szeptycki, 2003). A rational approach to counteracting this phenomenon requires evaluation of the present soil density and identification of conditions in which it takes place.

From a practical point of view, determination of the range of admissible loads (unit pressures) made on the ground with moving mechanisms of tractors and agricultural machines which do not cause the increase of the soil compaction would be significant. Soil compaction increases when the soil compaction strength, which can be defined with a pre-

compaction stress, is exceeded. It is considered that knowing the value of the pre-compaction stress enables forecasting the loading of soil with driving mechanisms, exceeding of which poses a risk of the increase of its compaction (Horn and Fleige, 2003). An utilitarian meaning of the pre-compaction stress makes this parameter the object of research in many centres in the world. However, complexity of the soil environment and constant changes of its properties cause that no standard method of determination of this parameter has been yet developed (Błażejczak, 2010). Thus, it seems justified to search for another way of determination of admissible loads made on soil. Results of the research obtained during Proctor tests and uniaxial pressure test may be useful for development of such a procedure (Nawaz et al., 2013).

Błażejczak et al., (2018) stated that the value of uniaxial pressure made on the soil sample in the uniaxial compression test ( $P_{\rho dp}$ ), indispensable for generation of compaction equal to bulk density obtained in Proctor apparatus ( $\rho_{dp}$ ), depends significantly on the sample moisture ( $w_s$ ). Regression equations were obtained in model samples with uniform initial bulk density ( $\rho_{dm}$ ), thus authors found that the impact of the initial density of a sample on the predicted value of uniaxial pressure indispensable for generation of a specific state of soil compaction should be investigated. Searching for relations was carried out within the range of samples moisture resulting from Proctor's procedure; thus, from considerably low values of moisture, at which there is no threat of excessive compaction, to high soil moisture content, at which field works are impeded or impossible. Therefore, it seems to be justified to limit a discussion to the soil condition corresponding to soil moisture, within which field works are carried out and soil is susceptible to compaction. The scope between soil optimum moisture acc. to Proctor ( $w_{opt}$ ) and its plastic limit ( $P_L$ ) may be considered a moisture range.

In the field conditions, a relation between optimum moisture content of soil compaction and its plastic limit may be modified by various factors (Mosaddeghi et al., 2000). Mosaddeghi et al., (2009) found out that optimum moisture of compaction is similar to the optimum value of cultivation moisture content, understood as the water content at which strength of capillary connections between aggregates is minimal. Moreover, soil moisture, at which the best cultivation efficiency is obtained, may differ in relation to the applied tools and the working depth (Larson et al., 1994). In literature we may find various manners of determination of the optimum cultivation moisture, the scope of which is within the soil optimum moisture acc. to Proctor and the plastic limit (Mueller et al., 2003).

## Objective, scope and methods of research

The aim of the research was to develop an empirical model for prediction of uniaxial compression indispensable for generation of a specific soil sample compaction in relation to its moisture and dry bulk density. It was assumed that the ranges of the values of soil properties determined in field studies and results of soil material compaction measurements with Proctor apparatus should be the basis for designing an experiment.

Answers to the following questions were searched for:

1. Does the initial compaction of a sample affects the determined uniaxial pressure ( $P_{\rho dp}$ ) indispensable for generation in the uniaxial test of its bulk density ( $\rho_{dj}$ ) with the value equal to the one obtained in Proctor apparatus ( $\rho_{dp}$ )?

2. What is the scope of changes of soil density obtained in Proctor apparatus ( $\rho_{dp}$ ) during compaction of soil material with the water content between optimum moisture ( $w_{opt}$ ) and the plastic limit ( $P_L$ )?
3. How can we write down relations of the unit pressure ( $P_{pdp}$ ) necessary to generate in the uniaxial test dry bulk density of a sample ( $\rho_{dj}$ ) with the value equal to the one obtained in Proctor Apparatus ( $\rho_{dp}$ ) from the initial state of a soil sample?

While selecting material for research an assumption that was taken into consideration was that its properties should be variable mainly with regard to the grain size distribution. Based on the analysis of information included in soil and agricultural maps and results of the previous research (Śnieg, Błażejczak 2017) fields of rural areas edges were selected for collecting the material: Nowy Przylep (*NP*), Obojno (*Ob*) and Ostoja (*Os*) – the Szczecin Lowland (Nizina Szczecińska). Studies were carried out in the layer at the depth of 35-40 cm i.e. below a working depth of applied cultivation tools, but in case of ploughing, in the zone of direct impact of tractor wheels on soil - wheels movement in a furrow. Soil material in the form of loose mass was collected therefrom in order to determine typical soil properties and to carry out compaction in Proctor apparatus and the uniaxial compression test. A textural group was determined with Bouyoucosa-Casagrande's method in Prószyński's modification. A pycnometer method was used for determination of the density of solid particles. The humus content was determined with Tiurin's method and soil reaction with the electrometrical method. The plastic limit was measured with the rolling method and the liquid limit with the use of Cassagrande's apparatus.

Soil material dried in free air, designed for Proctor tests or uniaxial compression test, was sieved through a sieve with 6 mm diameter meshes and then divided into 5 parts. Each part was moistened with a varied amount of water according to PN-88/B-04481 and placed in separate containers. The aim was to place the obtained levels of moisture within moisture close to the optimal one acc. to Proctor and the plastic limit, the values of which were determined in the previous research (Błażejczak et al., 2018). The amount of material for each container (moisture level) was selected so as to be sufficient for compression in Proctor apparatus and for forming 4 model samples which were then uniaxially compressed. Compaction in Proctor apparatus was carried out acc. to PN-88/B-04481 with the use of a cylinder with volume of 1000 cm<sup>3</sup> with unit compaction energy which was 0.59 J·cm<sup>3</sup> of soil. Uniaxial test performance consisted in initial soil compaction in steel rings (cylinders - fig. 1a) to varied densities within the limit of values observed in the field conditions (Błażejczak and Dawidowski, 2013; Śnieg and Błażejczak, 2017). Internal diameter (*D*) and height of cylinders (*H*) were respectively 100 and 30 mm. Then, samples were subjected to secondary compaction with an electric press with continuous registration of the stress made and sample deformation (figure 1b). A plate with a diameter (*d*) 50 mm was applied.

Knowledge of uniaxial test parameters and initial dry density of model samples enabled calculation of changes of dry bulk density under the plate in relation to the unit stress on the sample. At the same time, assumption was made, that sample compaction changes linearly along with the increase of the plate depth (Błażejczak et al., 2018). Secondary compaction of samples was carried out until the plate depth of 10 mm was obtained. In such a case, final compaction of each sample exceeded the value of the maximum bulk density obtained in Proctor test.

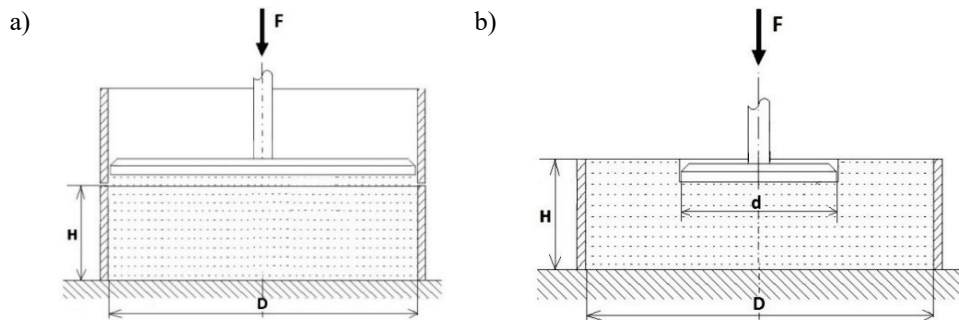


Figure 1. Stages of uniaxial samples compression test: a) formation, b) uniaxial deformation

Searching for an answer to the research question, the experiment was performed in two stages. In the first stage, samples were differentiated within each object with regard to dry bulk density. In the second stage, the condition of the produced samples was varied on account of moisture and dry bulk density and the obtained results were used for construction of a regression model for prediction of the unit compression necessary for production of compaction equal to bulk density obtained in Proctor apparatus. But, results of research on samples of the second stage were divided into two groups, i.e. basic for construction of models and validation which was used for assessment of the obtained equations. The level of significance of  $\alpha=0.05$  was obtained.

## Results of research and their analysis

Table 1 presents results of determination of own properties of the soil material. One may notice that soil material with varied textural group was used. The highest content of fractions: sand, silt and loamy one included material collected respectively from the following objects: Ostoja (*Os*), Nowy Przylep (*NP*) and Obojno (*Ob*). Moreover, considerable differences between the objects with regard to the humus content and values of liquid and plastic limits occurred. It was found out that material came from compact soils - difference between liquid and plastic limits was higher than 1.0% moisture content.

Table 1.

Average values of own properties of soils for the selected objects in the layer of 35-40 cm

| Object    | Textural group<br>acc. to USDA<br>(PTG 2009) | Fraction content acc. to<br>PTG (2009) |      |      | Specific<br>density<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | Reaction<br>(in KCI)<br>(pH) | Humus<br>content<br>(%) | $P_L$ | $L_L$ |
|-----------|----------------------------------------------|----------------------------------------|------|------|----------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------|-------|
|           |                                              | Sand                                   | Silt | Loam |                                                          |                              |                         |       |       |
|           |                                              | (%)                                    |      |      |                                                          |                              |                         |       |       |
| <i>NP</i> | <i>SL</i>                                    | 36.0                                   | 53.4 | 10.6 | 2.46                                                     | 6.34                         | 2.02                    | 21.3  | 31.2  |
| <i>Ob</i> | <i>L</i>                                     | 25.0                                   | 48.0 | 27.0 | 2.49                                                     | 6.84                         | 3.77                    | 28.0  | 47.9  |
| <i>Os</i> | <i>L</i>                                     | 45.0                                   | 40.3 | 14.7 | 2.66                                                     | 5.13                         | 0.61                    | 18.4  | 27.6  |

Symbols of textural groups: *SL* – sandy loam, *L* – loam,  $P_L$  – plasticity limit,  $L_L$  – liquidity limit

## Predicting unit pressure...

According to the assumed course of the procedure, firstly, an answer to the question concerning the impact of initial density of the compressed sample on the determined value of unit pressures ( $P_{\rho_{dp}}$ ) necessary for production of compaction ( $\rho_{dj}$ ) equal to the value obtained in Proctor apparatus ( $\rho_{dp}$ ), was searched for. Outcomes of a comparison of the pressure value  $P_{\rho_{dp}}$  for varied initial densities of model samples ( $\rho_{dm}$ ) at their identical water content ( $w_s$ ) was placed in table 2. It was found out that these values did differ significantly –  $p < 0.05$ . Higher values of pressure  $P_{\rho_{dp}}$  for samples with a higher initial dry bulk density ( $\rho_d$ ) may be justified with higher resistance of soil particles movement outside the zone of a direct impact of a plate and higher soil shearing strength by its edge.

Table 2.

*Results of comparison of uniaxial pressures ( $P_{\rho_{dp}}$ ) necessary for production of compaction in uniaxial test ( $\rho_{dj}$ ) equal to the value obtained in Proctor apparatus ( $\rho_{dp}$ ) for varied initial dry bulk density of a model soil sample ( $\rho_{dm}$ )*

| Object | $w_s$<br>(% w/w) | $\rho_{dm}$<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | $\rho_{dj} = \rho_{dp}$<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | $P_{\rho_{dp}}$<br>(kPa) | Value $p$<br>(for $P_{\rho_{dp}}$ ) |
|--------|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| NP     | 18.0 (0.1)       | 1.27 (0.03)                          | 1.71                                             | 317 (25)                 | < 0.001                             |
|        |                  | 1.48 (0.02)                          |                                                  | 487 (10)                 |                                     |
| Ob     | 23.3 (0.3)       | 1.29 (0.02)                          | 1.58                                             | 291 (5)                  | < 0.001                             |
|        |                  | 1.42 (0.02)                          |                                                  | 675 (21)                 |                                     |
| Os     | 15.7 (0.1)       | 1.48 (0.02)                          | 1.85                                             | 332 (3)                  | < 0.001                             |
|        |                  | 1.67 (0.01)                          |                                                  | 432 (14)                 |                                     |

Symbols:  $w_s$  – sample moisture,  $\rho_{dm}$  – initial dry bulk density of a model sample,  $p$  – probability level; Notice: the brackets include the standard deviation value

Table 3 includes the results of Proctor tests and unit compression test for a considered scope of soil moisture, i.e. approximately between optimal moisture ( $w_{opt}$ ) and plastic limit ( $P_L$  – Tab. 1). The range of values of densities obtained in Proctor apparatus ( $\rho_{dp}$ ) within the moisture of  $w_{opt}$  and  $P_L$  may be considered as significant, because it exceeds 0.1 g·cm<sup>-3</sup>. For the investigated objects NP, Ob and Os this scope was respectively: 1.61 – 1.73, 1.52 – 1.67 and 1.74–1.88 g·cm<sup>-3</sup>. It may be also noticed (Table 3) that the determined values of the unit pressures  $P_{\rho_{dp}}$  and  $P_{\rho_{ds}}$  indispensable for generation of densities respectively  $\rho_{dp}$  and  $\rho_{ds}$  are similar.

Table 3.

*Input parameters and results of Proctor test and uniaxial pressure of model samples*

| Object | $w_s$<br>(% w/w) | $\rho_{dm}$<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | $w_{opt}$<br>(% w/w) | $\rho_{ds}$<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | $\rho_{dp}$<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | $P_{\rho_{dp}}$<br>(kPa) | $P_{\rho_{ds}}$<br>(kPa) |
|--------|------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| NP     | 16.3 – 21.5      | 1.36 – 1.60                          | 15.7                 | 1.74                                 | 1.61 – 1.73                          | 159 - 685                | 175 - 706                |
| Ob     | 18.0 – 27.3      | 1.27 – 1.51                          | 17.7                 | 1.68                                 | 1.52 – 1.67                          | 135 - 695                | 182 - 712                |
| Os     | 13.7 – 18.4      | 1.46 – 1.71                          | 13.1                 | 1.88                                 | 1.74 – 1.88                          | 148 - 803                | 192 - 805                |

Symbols:  $w_{opt}$  – optimal moisture acc. to Proctor,  $\rho_{ds}$  – maximum bulk density acc. to Proctor,  $\rho_{dp}$  – bulk density obtained for particular values of moisture ( $w_s$ ),  $P_{\rho_{ds}}$  – unit pressure on a sample, at which density equal to the maximum density ( $\rho_{ds}$ ) determined in Proctor test was obtained; remaining symbols see table 2

Searching for an answer to the third research question, using the samples produced in the second stage of the experiment, the properties of which ( $w_s, \rho_{dm}$ ) were presented in table 3, a multiple regression was used. When assessing independent variables of the obtained models (Table 4) it was stated that pressure  $P_{\rho dp}$  necessary for generation of  $\rho_{dj} = \rho_{dp}$  depends significantly on moisture ( $w_s$ ) and dry bulk density ( $\rho_{dm}$ ) of a sample. The obtained equations are significant ( $p < 0.001$ ) and well adjusted for measurement points - coefficient of determination ( $R^2$ ) was within 0.92 to 0.97. Regression equations were subjected to assessment with cases included in the validation set. The calculated average values of relative errors of prediction ( $\delta_p$ ), understood as a difference of values measured and predicted divided into measured values were lower than 6% which should be considered as a very good result for the needs of estimation of pressure  $P_{\rho dp}$ . Taking into consideration a statistical evaluation of the obtained equations and values of prediction errors, it should be recognized that application of multiple regression equations for prediction of pressure values  $P_{\rho dp}$  is justified. Analysis of the values of regression equations coefficients makes us notice that their similar values were obtained for objects *NP* and *Ob*, which can be justified with similar properties of samples (Tab. 3) and different properties of *Os* object such as sand and humus fraction content (Tab. 1) which could have influenced registration of compaction resistance.

Table 4.

*Regression equations for prediction of unit stress ( $P_{\rho dp}$ ) indispensable for production of compaction ( $\rho_{dj}$ ) equal to dry bulk density ( $\rho_{dp}$ ) obtained in Proctor apparatus and their statistical evaluation*

| Object    | Equation                                             | Statistical assessment of the equation |       | $\delta_p$<br>(%) |
|-----------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------|-------------------|
|           |                                                      | $p$                                    | $R^2$ |                   |
| <i>NP</i> | $P_{\rho dp} = -71.9 w_s + 723.4 \rho_{dm} + 782.8$  | <0.0001                                | 0.92  | 5.6 (3.6)         |
| <i>Ob</i> | $P_{\rho dp} = -70.8 w_s + 675.2 \rho_{dm} + 1102.0$ | <0.0001                                | 0.92  | 4.4 (2.7)         |
| <i>Os</i> | $P_{\rho dp} = -79.9 w_s + 416.7 \rho_{dm} + 994.4$  | <0.0001                                | 0.97  | 4.7 (3.4)         |

Symbols:  $R^2$  – determination coefficient,  $\delta_p$  – relative error of prediction; remaining symbols see table 2: Notice: brackets include the value of standard deviation

Equations of regression (table 4) were obtained on produced samples in laboratory conditions, namely on material with lower strength than soil with a natural structure, which is proved by, inter alia, research results presented by Horn and Lebert (1994). Thus, the results obtained in this paper should be verified in the future in field conditions i.e. on samples with the so-called intact structure.

## Conclusions

1. Initial compaction of a soil sample influences the determined value of unit pressures necessary for production in the uniaxial compaction test of the equal value bulk density obtained in Proctor apparatus.

2. A difference in the maximum and minimum value of dry bulk density obtained in Proctor apparatus for soil material with granulation of silt loam or loam and its moisture within the optimum moisture and plastic limit, is between 0.12 and 0.15 g·cm<sup>-3</sup>.
3. For description of a relation unit pressure, necessary for generation in uniaxial test of compaction equal to the value of dry bulk density obtained in Proctor apparatus from the initial bulk density and samples moisture within optimal moisture and plastic limit, a multiple regression may be used. It is proved by high statistical assessment of the obtained regression equations ( $R^2 \geq 0.92$ ,  $p < 0.001$ ) and low values of relative errors of variable dependent prediction ( $\delta_p \leq 6\%$ ).

## References

- Błażejczak, D. (2010). *Prognozowanie naprężenia granicznego w warstwie podornej gleb ugniatanych kołami pojazdów rolniczych*. Wyd. ZUT w Szczecinie. ISBN 978-83-7663-050-2.
- Błażejczak, D., Dawidowski, J.B. (2013). Problem wykorzystania gęstości objętościowej gleby w ocenie jej zagęszczenia. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 58(1), 17-20.
- Błażejczak, D., Śnieg, K., Słowik, M. (2018). Comparison of Proctor and uniaxial compression tests for selected soils. *Agricultural Engineering*, Vol. 22, No 1, 5-13.
- Horn R., Fleige, H. (2003). A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil & Tillage Research*, 73, 89-99.
- Horn R., Lebert M. (1994). *Soil Compactability and Compressibility*. In: Soil Compaction in Crop Production, Soane B.D. and Ouwerkerk (Eds.), Elsevier Science B.V. s. 45-66. ISBN: 97804444882868.
- Krasowicz S., Oleszek W., Horabik J., Dębicki R., Jankowiak J., Stuczyński T., Jadczyński J. (2011). Racjonalne gospodarowanie środowiskiem glebowym Polski. *Polish Journal of Agronomy*, 7, 43-58.
- Larson, W.E., Eynard, A., Hadas, A., Lipiec, J., (1994). Control and Avoidance of Soil Compaction in Practice. In: *Soil Compaction in Crop Production*. 597-601.
- Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., Hemmat, A., Afyuni, M. (2000). Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil & Tillage Research*, 55, 87-97.
- Mosaddeghi, M.R., Morshedizad, M., Mahboubi, A.A., Dexter, A.R., Schulin, R. (2009). Laboratory evaluation of a model for soil crumbling for prediction of the optimum soil water content for tillage. *Soil & Tillage Research*, 105, 242-250.
- Mueller, L., Schindler, U., Fausey, N.R., Lal, R. (2003). Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. *Soil & Tillage Research*, 72, 9-20.
- Nawaz, M., F., Bourrié, G., Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 291-309.
- PN-88/B-04481 (1988). Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- Polskie Towarzystwo Gleboznawcze (2009). Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008. *Roczniki Gleboznawcze*, 60(2), 5-16.
- Szeptycki, A. (2003). Wpływ ciężkich maszyn rolniczych na fizykomechaniczne właściwości gleby. *Journal of Research and Application in Agricultural Engineering*, Vol. 48(3), 5-9.
- Śnieg, K., Błażejczak, D. (2017). Evaluation of subsoil compaction of plastic soils. *Agricultural Engineering*, Vol 21, No 1, 85-94.
- Van den Akker, J. J. H., Arvidsson, J., Horn, R. (2003). Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil & Tillage Research*, 73, 1-8.

## PROGNOZOWANIE NACISKU JEDNOSTKOWEGO NIEZBĘDNEGO DO WYTWORZENIA OKREŚLONEGO ZAGĘSZCZENIA PRÓBKİ GLEBOWEJ

**Streszczenie.** Celem badań było zbudowanie modelu empirycznego do prognozowania nacisku jednostkowego niezbędnego do wytworzenia określonego zagęszczenia próbki gleby. Z warstwy gleby leżącej na głębokości od 35 do 40 cm pobrano materiał glebowy w postaci luźnej masy, a następnie oznaczono jego typowe cechy własne (skład granulometryczny, gęstość fazy stałej, zawartość próchnicy, odczyn, granice plastyczności i płynności) i przeprowadzono testy zagęszczania w aparacie Proctora oraz jednoosiowego ściskania. Wyniki obu testów wykorzystano do budowy modeli regresji odwzorowujących przebieg nacisku jednostkowego ( $P_{pdp}$ ), niezbędnego do wytworzenia w teście jednoosiowym zagęszczenia ( $\rho_{dj}$ ) równoważnego gęstości objętościowej uzyskiwanej w aparacie Proctora ( $\rho_{dp}$ ), w zależności od wilgotności ( $w_s$ ) i początkowej gęstości objętościowej szkieletu próbki modelowej ( $\rho_{dm}$ ). Poszukiwanie zależności ograniczono do zakresu wilgotności pomiędzy optymalną wg Proctora a granicą plastyczności gleby. Stwierdzono, że wartość nacisku  $P_{pdp}$  wywieranego na próbkę gleby w teście jednoosiowego ściskania zależy istotnie od  $w_s$  i  $\rho_{dm}$ , a do opisu tej zależności wystarczające jest zastosowanie regresji wielorakiej. Uzyskano, że dla próbek modelowych o składach granulometrycznych pył gliniasty i glina zwykła, różnice gęstości objętościowych szkieletu uzyskiwanych w aparacie Proctora wynoszą do około  $0,15 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

**Słowa kluczowe:** gleba, zagęszczanie, test Proctora, test jednoosiowy

## PREDICTION OF PRE-COMPRESSION STRESS OF SOIL WITH UNIAXIAL TEST

Kinga Śnieg<sup>a</sup>, Dariusz Błażejczak<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Construction and Usage of Technical Devices,  
West Pomeranian University of Technology in Szczecin

\*Corresponding author: e-mail: [dariusz.blazejczak@zut.edu.pl](mailto:dariusz.blazejczak@zut.edu.pl)

### ARTICLE INFO

*Article history:*  
Received: January 2019  
Received in the revised form:  
February 2019  
Accepted: March 2019

*Key words:*  
soil,  
subsoil,  
uniaxial test,  
pre-compaction stress

### ABSTRACT

The paper presents a concept of determination of pre-compression stress. It assumes that the stress value is close to the unit pressure value which is indispensable to increase the initial degree of soil compaction. Thus, an attempt was made to develop an empirical model for predicting the value of stress at which the initial compaction of a soil sample increases by a determined value. Samples with the so-called intact structure (*NS*) and soil material in the form of loose mass were collected from subsoil, and they were used to form model samples. Both types of samples were uniaxially compressed. For the study, data on moisture and dry bulk density of model samples were used, as well as determined ratios (conversion factors) that present relations between the results of compaction of model samples and samples with the intact structure. It was reported that the pressure necessary for the increase of the initial compaction of the model samples with the value of  $+0.05$  or  $+0.10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  were higher than the formation pressure respectively by 1.03-1.11 and 1.42-1.93 times. It was proved that for determination of the pre-compression stress of the *NS* samples models of linear regression for prediction the pressure needed to increase the initial compaction of the model sample by the value of  $+0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , combined with a coefficient calculated for the present state of the soil properties, can be applied.

## Introduction

Excessive soil compaction which results from the impact of wheels of machines and agricultural vehicles is one of the most serious problem of modern agriculture (van den Akker et al., 2003). Soils, which are particularly susceptible to compaction are as follows: heavy clays, clays, and sandy loams (Krasowicz et al., 2011). Firstly, excessive compaction of subsoil is a threat because the effects of compaction of this layer are long-lasting and its liquidation through deep scarification is energy consuming and often ineffective (Szeptycki, 2003).

From the practical point of view, it would be significant to determine the scope of loads (unit pressure) made on the ground with moving mechanisms of tractors and agricultural machines that do not cause an increase of the soil compaction. Soil compaction particularly increases when the compressive strength limit which can be defined with the pre-

compression stress, is exceeded. It is considered that knowing the value of the stress enables predicting the pre-compaction loading of soil with driving mechanisms (Horn and Fleige, 2003). A utilitarian meaning of the pre-compression stress causes that this parameter is the object of research in many centres in the world. However, complexity of the soil environment and constant changes of its properties cause that no standard method of determination of this parameter has been yet developed (Błażejczak, 2010). Therefore, it seems justified to search for another method of determination of the pre-compression stress of soil with reference to the ones developed so far.

Results of the research obtained during the Proctor tests and uniaxial test may be useful for developing a procedure of determination of admissible loads on soil (Błażejczak et al., 2018; Nawaz et al., 2013; Śnieg et al., 2018). These results enable determination of conditions in which soil is susceptible to excessive compaction and searching for relations that facilitate selection of predictors indispensable for predicting admissible stresses. Parameters which describe the conditions of the maximum susceptibility on its compaction, are results of research obtained with the Proctor apparatus in the form of the maximum density and optimum water content of compaction (Wagner et al., 1994; Aragón et al., 2000; Nhamtumbo and Cambule, 2006; Tarkiewicz and Nosalewicz, 2005). The maximum value of dry bulk density obtained in the standard Proctor method is considered as the maximum possible to be obtained for given soil (Kumar et al., 2009). Śnieg et al., (2018) concluded that the value of the unit pressure on soil in the uniaxial test indispensable for formation of dry bulk density obtained in the Proctor unit significantly depends on the moisture and initial dry bulk density of a sample, and that it is enough to use multiple regression for description of this relation. Thus, one may assume that also in the uniaxial test, it is possible to predict values of the unit pressure that is identified with the pre-compression stress value on soil in order to produce its specific compression.

## Objective, scope and methods of research

The objective of the research was to develop an empirical model for predicting the value of the pre-compression stress based on determination of the unit pressure on soil, that increases initial compaction of the soil sample by an assumed value. Taking into consideration a practical precision of determination of the dry bulk density it was assumed that the studies should be carried out for the value of increase of the sample compaction equal to  $+0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (Wojtasik, 1995) or  $+0.10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (Komornicki and Zasoński, 1965).

By realization of the objective of the study, answers to the following questions were searched for:

1. What is the relation between the values of unit pressure ( $P_{\rho_{\text{m}}+0.05}$  or  $P_{\rho_{\text{m}}+0.10}$ ) that increase the initial compaction of the model sample ( $\rho_{\text{dm}}$ ) by the value of  $+0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  or  $+0.10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  with reference to the unit pressure ( $P_{\text{m}}$ ) applied to form samples?
2. What is the relation between the values of unit pressure ( $P_{\rho_{\text{d}}+0.05}$  or  $P_{\rho_{\text{d}}+0.10}$ ), indispensable to increase the initial compaction of a soil sample with the so-called intact structure ( $NS$ ) by the value of  $+0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  or  $+0.10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , with reference to the unit pressure made on soil by wheels of vehicles and agricultural machines?
3. How can values of unit stresses indispensable for the increase of the initial compaction of the  $NS$  sample be predicted by the assumed value?

Regarding the fact that this paper is a continuation of earlier research (Śnieg et al., 2018) material for the research was obtained from the layer that is at the depth of 35–40 cm from the fields of the following rural areas: Nowy Przylep (*NP*), Obojno (*Ob*) and Ostoja (*Os*) – the Szczecin Lowland (Nizina Szczecińska). Soil material in the form of loose mass was collected therefrom in order to determine typical soil properties and to carry out the uniaxial test. A textural group was determined with Bouyoucos-Casagrande's method in Prószyński's modification. A pycnometer method was used for determination of the density of solid particles. Humus content was determined with Tiurin's method and soil reaction with the electrometrical method. The plastic limit was measured with the rolling method and the liquid limit with the use of Cassagrande's apparatus.

Soil material dried in free air, designed for the Proctor or uniaxial tests, was sieved through a sieve with 6 mm diameter meshes and then divided into 5 parts. Each part was moistened with a varied amount of water PN-88/B-04481 and placed in separate containers. The aim was to place the obtained levels of moisture within the range between moisture close to the optimum one, according to Proctor, and the plasticity limit, the values of which were determined in the previous research (Błażejczak et al., 2018). The amount of material per one container (level of moisture) was selected to be enough to form 12 model samples (3 densities x 4 iterations). The total number of samples for each object was 60 items. The uniaxial test of compression consisted in the initial compression of soil in steel rings to varied density, as in the paper of Śnieg et al. (2018), within the values observed in field conditions (Błażejczak and Dawidowski, 2013; Śnieg and Błażejczak, 2017). Internal diameter (*D*) and height of cylinders (*H*) were respectively 100 and 30 mm. Then, samples were subjected to secondary compaction with an electric press with continuous registration of the stress made and sample deformation. A punch with a diameter (*d*) 50 mm was applied.

Realization of the objective of the paper required creation of the data set obtained in samples with the so-called intact structure (*NS*). Within the years 2014–2017 during spring and fall cultivation treatment, samples were collected from the investigated objects from the layer 35–40 cm with cylinders of the same dimensions as the ones applied in model tests. These samples were subjected to the uniaxial test as in the model samples. Moreover, present water content ( $w_a$ ) and dry bulk density ( $\rho_d$ ) of samples were calculated. At the same time limitation was assumed that the final set of data will be formed by samples for which the scope of changes  $w_a$  and  $\rho_d$  will be close to density ( $\rho_m$ ) and moisture ( $w_s$ ) of model samples.

## Research results and their analysis

Table 1 presents results of determination of own properties of the soil material. One may notice that the soil material with a varied textural group was used. The highest content of fractions: sand, dust and loamy included material collected respectively from the following objects: Ostoja (*Os*), Nowy Przylep (*NP*) and Obojno (*Ob*). Moreover, considerable differences between the objects regarding the content of humus and values of reaction and relative moisture occurred. It was found out that the material came from compact soils - difference between limits of liquidity and plasticity was higher than 1.0% moisture content

Table 1.

*Average values of own properties of soils for the selected objects in the layer of 35-40 cm*

| Object    | Textural group acc. to PTG/USDA (PTG 2009) | Content of fraction acc. to PTG/USDA (2009) |      |      | $\rho_s$ | Reaction (in KCl) | $Z_{pr}$ | $P_L$ | $L_L$ | $w_{opt}$ | $\rho_{ds}$ |
|-----------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|------|------|----------|-------------------|----------|-------|-------|-----------|-------------|
|           |                                            | Sand                                        | Silt | Clay |          |                   |          |       |       |           |             |
|           |                                            | (%)                                         |      |      |          |                   |          |       |       |           |             |
| <i>NP</i> | <i>SL</i>                                  | 36.0                                        | 53.4 | 10.6 | 2.46     | 6.34              | 2.02     | 21.3  | 31.2  | 15.7      | 1.74        |
| <i>Ob</i> | <i>L</i>                                   | 25.0                                        | 48.0 | 27.0 | 2.49     | 6.84              | 3.77     | 28.0  | 47.9  | 17.7      | 1.68        |
| <i>Os</i> | <i>L</i>                                   | 45.0                                        | 40.3 | 14.7 | 2.66     | 5.13              | 0.61     | 18.4  | 27.6  | 13.1      | 1.88        |

*Source: Śnieg et al., 2018*

Symbols: *SL* – sandy loam, *L* – loam,  $\rho_s$  – specific density,  $Z_{pr}$  – humus content,  $P_L$  – plastic limit,  $L_L$  – liquid limit,  $w_{opt}$  – optimum water content acc. to Proctor,  $\rho_{ds}$  – maximum density acc. to Proctor

Table 2 presents results of the tests on initial density ( $\rho_{dm}$ ) and moisture ( $w_s$ ) of the model samples and relations between the values of pressure  $P_{pm+0.05}$  and  $P_{pm+0.10}$  and unit pressure ( $P_m$ ) applied for their formation. One may notice that stresses  $P_{pm+0.05}$  indispensable to increase the initial compaction of the model sample ( $\rho_{dm}$ ) by the value +0.05 g·cm<sup>-3</sup> were higher than ca. 1.03 to 1.11 of the value  $P_m$ . Pressures  $P_{pm+0.10}$  essential to increase the initial compaction of the model sample ( $\rho_{dm}$ ) by the value +0.10 g·cm<sup>-3</sup> were higher than ca. 1.42 to 1.93 of the value  $P_m$ . The average values of samples deformation  $\Delta H_{+0.05}$  and  $\Delta H_{+0.10}$ , at which the increase of the value  $\rho_{dm}$  by +0.05 or +0.10 g·cm<sup>-3</sup> was increased, were respectively ca. 1 and 2 mm. It should be mentioned also that according to the previous research results, the value of the pre-compression stress was close to the value  $P_m$  (Błażejczak, 2010). Taking into consideration the above-mentioned relations, as well as the fact that the obtained values  $P_{pm+0.05}$  were close to  $P_{pm+0.05} P_m$ , one may conclude that the value of the pre-compression stress of model samples should be determined at the deformation which is between 0.84 to 1.20 mm.

Table 2.

*Initial parameters and results of uniaxial test of model samples*

| Object    | $w_s$       | $\rho_{dm}$           | $P_m$    | $P_{pm+0.05}$ | $P_{pm+0.10}$ | $\Delta H_{+0.05}$ | $\Delta H_{+0.10}$ |
|-----------|-------------|-----------------------|----------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|
|           | (% w/w)     | (g·cm <sup>-3</sup> ) | (kPa)    |               |               | (mm)               |                    |
| <i>NP</i> | 16.3 – 21.1 | 1.38 – 1.62           | 66 – 257 | 73 – 276      | 126 – 474     | 0.89 – 1.15        | 1.78 – 2.01        |
| <i>Ob</i> | 17.5 – 27.2 | 1.28 – 1.52           | 49 – 377 | 54 – 396      | 87 – 564      | 0.99 – 1.20        | 1.94 – 2.22        |
| <i>Os</i> | 13.4 – 18.5 | 1.47 – 1.68           | 68 – 321 | 74 – 332      | 112 – 502     | 0.84 – 1.06        | 1.71 – 1.96        |

Symbols:  $w_s$  – water content,  $\rho_{dm}$  – dry bulk density,  $P_m$  – sample formation pressure,  $P_{pm+0.05}$  – unit pressure on a sample at which density of  $\rho_{dm} + 0.05$  g·cm<sup>-3</sup> was obtained,  $P_{pm+0.10}$  – unit pressure on a sample at which density of  $\rho_{dm} + 0.10$  g·cm<sup>-3</sup> was obtained,  $\Delta H_{+0.05}$  – deformation of a sample at which density of  $\rho_{dm} + 0.05$  g·cm<sup>-3</sup> was obtained,  $\Delta H_{+0.10}$  – deformation of a sample at which density of  $\rho_{dm} + 0.10$  g·cm<sup>-3</sup>

Table 3 presents results of determination of water content ( $w_a$ ) and dry bulk density ( $\rho_d$ ) of the *NS* samples which were subjected to the uniaxial test identically as the model samples. One may notice that scopes of changes of the determined values  $w_a$  and  $\rho_d$  were close to the values of parameters of model samples ( $w_s$ ,  $\rho_{dm}$ ) placed in 2. Similar scopes of changes of the values of stresses  $P_{pd+0.05}$  and  $P_{pd+0.10}$  and deformation of samples  $\Delta H_{+0.05}$  and  $\Delta H_{+0.10}$  were like the values obtained in the investigated model samples (table 2). One may also notice that the values  $P_{pd+0.05}$  and  $P_{pd+0.10}$  are often higher than the determined average unit stresses on soil by wheels of vehicles and agricultural machines (Walczyk, 1995; Jurga, 2009; Filipovic et al., 2016). With reference to the investigated layer of soil, which is at the depth of 35-40 cm, values of  $P_{pd+0.10}$  should be considered as particularly diverging - the so-called beyond the range of the discussion. It results from the fact that along with the increase of depth, the values of stresses on the soil surface decrease (Pytko, 2005). For example, according to Filipovic et al., (2016) registered stresses at the depth of 30 cm constitute approximately 37% of the value registered at the depth of 10 cm. Thus, exceeding the value of pre-compression stress in the considered layer will be possible if the average unit stress on soil by a wheel will be considerably higher than the pre-compression stress. Taking the above into consideration, further discussions were carried out with reference to the unit stresses indispensable to increase the soil compaction by the value of  $0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Table 3.  
*Initial parameters and results of uniaxial test of samples with intact structure (NS)*

| Object    | $w_a$<br>(% w/w) | $\rho_d$    | $P_{pd+0.05}$<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $P_{pd+0.10}$<br>(kPa) | $\Delta H_{+0.05}$ | $\Delta H_{+0.10}$<br>(mm) |
|-----------|------------------|-------------|----------------------------------------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|
| <i>NP</i> | 18.9 – 21.6      | 1.36 – 1.59 | 75 – 371                                           | 124 – 530              | 0.84 – 1.10        | 1.70 – 2.06                |
| <i>Ob</i> | 18.0 – 26.5      | 1.35 – 1.58 | 50 – 488                                           | 115 – 714              | 0.92 – 1.04        | 1.80 – 1.94                |
| <i>Os</i> | 13.4 – 17.1      | 1.53 – 1.75 | 86 – 282                                           | 170 – 539              | 0.79 – 0.89        | 1.59 – 1.74                |

Symbols:  $w_a$  – water content,  $\rho_d$  – dry bulk density,  $P_{pd+0.05}$  – unit pressure on *NS* sample, at which density of  $\rho_d + 0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  obtained,  $P_{pd+0.10}$  – unit pressure on *NS* sample, at which density of  $\rho_d + 0.10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  obtained; other symbols see table 2.

Searching for the method of predicting the unit pressure indispensable to increase the initial compaction of *NS* samples by the value of  $0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  were made in stages. Data on *NS* samples were divided into two subsets i.e. *NS1* that serves for developing models and *NS2* which was used for verification.

In the first stage, data on values  $w_s$  and  $\rho_{dm}$  of model samples (Table 2) were used to construct multiple regression equations for predicting the values of  $P_{pm+0.05}$ . The obtained models (Table 4) were highly significant ( $p < 0.001$ ) and well-adjusted to measurement points - coefficient of determination ( $R^2$ ) was within 0.89 to 0.91.

Then, in the second stage, relations between unit pressure values  $P_{pd1+0.05}$ , measured on *NS1* samples and values  $P_{pm+0.05}$ , calculating the quotients (conversion factors)  $q = P_{pd1+0.05}/P_{pm+0.05}$  were investigated but values  $P_{pm+0.05}$  were determined with the regression equations (Table 4) assuming  $w_s = w_a$  and  $\rho_{dm} = \rho_d$ . One may notice that the average values of  $P_{pd1+0.05}$  measured on the model samples were higher from ca. 1.00 to 1.15 times than the predicted values  $P_{pm+0.05}$ , which complies with the results of Horn and Lebert (1994)

who say that samples with the so-called intact structure show bigger strength than the ones produced in laboratory conditions.

In the third stage a possibility of predicting unit pressure values ( $P_{pd2+0.05}$ ) necessary to increase the initial compaction of *NS* samples by the value of  $0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  was verified with the use of equations presented in table 4 using subset *NS2*. It was concluded that predicting stresses  $P_{pd2+0.05}$  with equations of the form of

$$P_{pd2+0.05} = (a \cdot w_s + b \cdot \rho_{dm} + c) \cdot q, \quad (1)$$

i.e. with the use of the obtained regression equation models for predicting  $P_{pm+0.05}$  and conversion factor  $q$  which increases the value of the predict by the result of the calculated quotient is flawed considerably. It is proved by calculated considerably high values of a relative error of the predict ( $\delta_p$ ) obtained for samples from the checking set (*NS2*) i.e. from 41 to 84% which resulted from big distribution of the value of the quotient  $q$ , whose standard deviations were within 0.27 to 0.69. Error  $\delta_p$  was calculated as a quotient of the values measured and predicted divided into the measured value.

Table 4.

*Regression equations for predicting unit pressure  $P_{pm+0.05}$  indispensable for generation of model sample compaction equal to  $\rho_{dm}$  increased by  $0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  and their statistical assessment and values of conversion factors  $q$  and average error of predict of unit pressure  $P_{pd2+0.05}$  of samples of subset *NS2**

| Object    | Equation                                            | Statistical assessment<br>of the equation |       | $N_{NS1}/N_{NS2}$ | $q$<br>(-)     | $\delta_p$<br>(%) |
|-----------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------|-------------------|----------------|-------------------|
|           |                                                     | $p$                                       | $R^2$ |                   |                |                   |
| <i>NP</i> | $P_{pdp} = -24.1 w_s + 593.7 \rho_{dm} + 236.3$     | <0.001                                    | 0.89  | 37/30             | 1.15<br>(0.33) | 58                |
| <i>Ob</i> | $P_{pm+0.05} = -37.9 w_s + 853.0 \rho_{dm} - 125.9$ | <0.001                                    | 0.91  | 43/28             | 1.14<br>(0.69) | 84                |
| <i>Os</i> | $P_{pm+0.05} = -20.0 w_s + 458.8 \rho_{dm} - 256.1$ | <0.001                                    | 0.90  | 40/29             | 1.02<br>(0.27) | 41                |

Symbols:  $p$  - probability,  $R^2$  - coefficient of determination,  $N_{NS1}$  and  $N_{NS2}$  - number of samples,  $q$  - value of quotient  $P_{pd1+0.05} / P_{pm+0.05}$ ,  $\delta_p$  - relative error of predict  $P_{pd2+0.05}$ , remaining symbols see tab.2; Notice: brackets include the value of standard deviation

Due to unsatisfactory results of predicting the value of  $P_{pd2+0.05}$ , with multiple regression equations and values of quotients  $q$  (table 4) further works were aimed at a search for linear regression equations (Table 5). Equations were selected for a narrow range of variability of dry bulk density of model samples, i.e. value  $\rho_{dm} \pm 0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  which is justified in the light of Wojtasik's research (1995). Values  $w_s$  were predictors. The obtained models were highly significant ( $p < 0.001$ ) and well adjusted for measurement points - coefficient of determination ( $R^2$ ) was within 0.91 to 0.98. One may notice that the obtained (Table 5) values of quotients  $q$  ( $P_{pd1+0.05}/P_{pm+0.05}$ ) were varied within objects and decreased along with the increase of samples compaction. Predicting of pressures  $P_{pd2+0.05}$  with regression equations presented in table 5 with the calculated quotient  $q$  were considerably flawed with error taking into consideration variability of the soil environment. The average values of error  $\delta_p$ ,

obtained for samples of the checking set ( $NS2$ ) were within 7 to 26%. Values of standard deviations of quotients  $q$  were within 0.04 to 0.22.

Table 5.

*Regression equations for predicting unit pressure ( $P_{\rho m+0.05}$ ) indispensable for production of compaction of the model sample equal to  $\rho_{dm}$  increased by  $0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  and their statistical assessment and values of conversion factors  $q$  and the average predict error of unit pressure  $P_{pd+0.05}$  of the subset samples  $NS2$*

| Ob-<br>ject | Scope $\rho_{dm}$<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | Equation                               | Statistical assessment<br>of the equation |       | $N_{NS1}/N_{NS2}$ | $q$<br>(-)     | $\delta_p$<br>(%) |
|-------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|-------|-------------------|----------------|-------------------|
|             |                                                        |                                        | $p$                                       | $R^2$ |                   |                |                   |
| $NP$        | (1.35-1.45)                                            | $P_{\rho m+0.05} = -14.37w_s + 395.8$  | <0.001                                    | 0.92  | 11/10             | 1.27<br>(0.17) | 19                |
|             | <1.45-1.55)                                            | $P_{\rho m+0.05} = -32.30w_s + 811.5$  | <0.001                                    | 0.96  | 12/8              | 1.24<br>(0.21) | 17                |
|             | <1.55-1.65)                                            | $P_{\rho m+0.05} = -58.58w_s + 1392.6$ | <0.001                                    | 0.94  | 14/12             | 1.10<br>(0.04) | 12                |
| $Ob$        | (1.30-1.40)                                            | $P_{\rho m+0.05} = -15.86w_s + 484.6$  | <0.001                                    | 0.98  | 16/8              | 1.36<br>(0.11) | 26                |
|             | <1.40-1.50)                                            | $P_{\rho m+0.05} = -25.66w_s + 803.2$  | <0.001                                    | 0.93  | 14/9              | 1.24<br>(0.19) | 18                |
|             | <1.50-1.60)                                            | $P_{\rho m+0.05} = -36.25w_s + 1076.3$ | <0.001                                    | 0.97  | 13/11             | 1.07<br>(0.22) | 14                |
| $Os$        | (1.40-1.50)                                            | $P_{\rho m+0.05} = -16.24w_s + 356.6$  | <0.001                                    | 0.91  | 14/11             | 1.29<br>(0.09) | 22                |
|             | <1.50-1.60)                                            | $P_{\rho m+0.05} = -24.41w_s + 507.8$  | <0.001                                    | 0.91  | 12/8              | 1.14<br>(0.17) | 12                |
|             | <1.60-1.70)                                            | $P_{\rho m+0.05} = -60.76w_s + 1177.7$ | <0.001                                    | 0.98  | 14/10             | 1.04<br>(0.08) | 7                 |

Symbols:  $R^2$  – coefficient of determination of linear regression, remaining symbols see table 4.

## Conclusions

1. Pressure indispensable to increase the initial compaction of the model sample with the value of  $+0.05$  or  $+0.10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  were higher than the formation pressure ( $P_m$ ) respectively by 1.03-1.11 and 1.42-1.93 times.
2. Predicting the values of pre-compression stress in the subsoil of the investigated soil based on the information on the unit pressure ( $P_{pd+0.10}$ ), necessary to increase the initial compaction of the sample by the value of  $+0.10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  is not justified. The calculated values of  $P_{pd+0.10}$  were often higher than the determined average unit stresses made on soil by wheels of vehicles and farming machines which is contrary to the theory of distribution of stresses in soil.
3. In order to search for a manner of predicting the value of pre-compression stress in a subsoil of the investigated soil, it is justified to use information on unit pressure ( $P_{\rho m+0.05}$ ), necessary to increase the initial compaction of a sample by the value of  $+0.05$

- $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . The calculated values of  $P_{\text{pm}+0.05}$  were like the stresses of formation of model samples which corresponds approximately to the pre-compression stress value.
4. For predicting the value of unit stresses, indispensable to increase the initial compaction of the soil sample with the intact structure by the value of  $+0.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , namely, approximately to the pre-compression stress value, models of linear regression can be used for predicting  $P_{\text{pm}+0.05}$  of the model sample and the conversion factor  $q$  calculated for the present condition.

## References

- Aragón, A., García, M.G., Filgueira, R.R., Pachepsky, Ya.A. (2000). Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; The relationship with organic carbon and water content. *Soil & Tillage Research*, 56, 197-204.
- Błażejczak, D. (2010). Prognozowanie naprężenia granicznego w warstwie podornej gleb ugniatających kołami pojazdów rolniczych. Wyd. ZUT w Szczecinie. ISBN 978-83-7663-050-2.
- Błażejczak, D., Śnieg, K., Słowik, M. (2018). Comparison of Proctor and uniaxial compression tests for selected soils. *Agricultural Engineering*, Vol. 22, No 1, 5-13, DOI: 10.1515/agriceng-2018-0001.
- Błażejczak, D., Dawidowski, J.B. (2013). Problem wykorzystania gęstości objętościowej gleby w ocenie jej zagęszczenia. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 58(1), 17-20.
- Filipovic, D., Kovacev, I., Copek, K., Fabijanic, G., Kosutic, S., Husnjak, S. (2016). Effect of tractor bias-ply tyre inflation pressure on stress distribution in silty loam soil. *Soil & Water Research*, 11 (3), 190-195.
- Horn, R., Fleige, H. (2003). A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil & Tillage Research*, 73, 89-99.
- Horn, R., Lebert, M. (1994). Soil Compactability and Compressibility. In: Soil Compaction in Crop Production, Soane B.D. and Ouwerkerk (Eds.), Elsevier Science B.V. 45-66. ISBN: 9780444882868.
- Jurga, J. (2009). The verification of mathematical model designed to determining the area of the contact surface as well as unit pressure exerted onto soil by wheels of the agricultural vehicles. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 54(1), 83-88.
- Komornicki, T., Zasoński, S. (1965). Powtarzalność wyników oznaczeń niektórych właściwości fizycznych gleb. *Roczniki Gleboznawcze*, T. XV, z. 2. PWN Warszawa, 315-330.
- Krasowicz, S., Oleszek, W., Horabik, J., Dębicki, R., Jankowiak, J., Stuczyński, T., Jadczyński, J. (2011). Racjonalne gospodarowanie środowiskiem glebowym Polski. *Polish Journal of Agronomy*, 7, 43-58.
- Kumar, D., Bansal, M. L., Phogat, V. K. (2009). Compactability in relation to texture and organic matter content of alluvial soils. *Indian Journal of Agricultural Research*, 43(3), 180-186.
- Nawaz, M., F., Bourrié, G., Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 291-309.
- Nhantumbo, A. B. J. C., Cambule, A. H. (2006). Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. *Soil & Tillage Research*, 87, 231-239.
- PN-88/B-04481 (1988). Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- Polskie Towarzystwo Gleboznawcze (2009). Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008. *Roczniki Gleboznawcze*, 60(2), 5-16.
- Pytko, J. (2005): Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. *Soil & Tillage Research*, 82, 77-88.

- Szeptycki, A. (2003). Wpływ ciężkich maszyn rolniczych na fizykomechaniczne właściwości gleby. *Journal of Research and Application in Agricultural Engineering*, Vol. 48(3), 5-9.
- Śnieg, K., Błażejczak, D. (2017). Evaluation of subsoil compaction of plastic soils. *Agricultural Engineering*, Vol 21, No 1, 85-94.
- Śnieg, K., Błażejczak, D., Słowik, M. (2018). Predicting unit pressure indispensable for generation of specific compaction of a soil sample. *Agricultural Engineering*, Vol 22, No 3, 85-92, DOI: 10.1515/agriceng-2018-0030.
- Tarkiewicz, S., Nosalewicz, A. (2005). Effect of organic carbon content on the compactibility and penetration resistance of two soils formed from loess. *International Agrophysics*, 19, 345-350.
- Van den Akker, J. J. H., Arvidsson, J., Horn, R. (2003). Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil & Tillage Research*, 73, 1-8.
- Wagner, L. E., Ambe, N. M., Ding, D. (1994). Estimating a Proctor Density Curve from Intrinsic Soil Properties. *Transactions of the ASAE*, Vol. 37(4), 1121-1125.
- Walczyk, M. (1995). Wybrane techniczne i technologiczne aspekty ugniatania gleb rolniczych agregatami ciągnikowymi. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie*, Rozpr. 202, ISSN 1233-4189.
- Wojtasik, M. (1995). *Gęstość naturalna gleb mineralnych*. Wydawnictwo Uczelniane WSP Bydgoszcz, pp. 120. ISBN 83-7096-076-6.

## PROGNOZOWANIE NAPRĘŻENIA GRANICZNEGO GLEBY Z WYKORZYSTANIEM TESTU JEDNOOSIOWEGO

**Streszczenie.** Przedstawiono koncepcję wyznaczania naprężenia granicznego opartą na założeniu, że wartość tego naprężenia jest zbliżona do wartości nacisku jednostkowego, niezbędnego do zwiększenia początkowego stanu zagęszczenia gleby. W tym celu podjęto próbę opracowania modelu empirycznego do prognozowania wartości nacisku, przy którym następuje zwiększenie początkowego zagęszczenia próbki glebowej o określoną wartość. Z warstwy podornej gleby pobrano próbki o tzw. nienaruszonej strukturze (NS) oraz materiał glebowy w postaci luźnej masy, z którego formowano próbki modelowe. Oba rodzaje próbek odkształcano jednoosiowo. Do opracowania modelu wykorzystano dane o wilgotności i gęstości objętościowej próbek modelowych oraz wyznaczone współczynniki (przeliczniki), przedstawiające relacje pomiędzy wynikami ugniatania próbek modelowych i próbek o nienaruszonej strukturze. Stwierdzono, że naciski niezbędne do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki modelowej o wartości +0,05 lub +0,10 g·cm<sup>-3</sup> były większe od nacisku formowania odpowiednio o 1,03-1,11 oraz 1,42-1,93 razy. Wykazano, że do wyznaczania wartości naprężenia granicznego próbek NS można wykorzystać modele regresji liniowej do prognozowania nacisku jednostkowego niezbędnego do zwiększenia początkowego zagęszczenia próbki modelowej o wartość +0,05 g·cm<sup>-3</sup> oraz obliczony dla aktualnego stanu gleby przelicznik.

**Słowa kluczowe:** gleba, warstwa podorna, test jednoosiowy, naprężenie graniczne

Identification data Authors:

Kinga Śnieg  
Dariusz Błażejczak

ORCID: 0000-0002-2350-7985  
ORCID: 0000-0002-2532-5704