

## Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	5
1. Wstęp .....	7
2. Analiza zagadnienia na podstawie literatury .....	9
2.1. Wprowadzenie .....	9
2.2. Istota naprężenia granicznego gleby .....	9
2.3. Metody wyznaczania naprężenia granicznego gleby .....	10
2.4. Doświadczalne metody wyznaczania zależności przebiegu zmiany zagęszczenia w funkcji nacisku.....	11
2.5. Podsumowanie stanu wiedzy i cel pracy .....	11
3. Założenia nowej metody .....	13
4. Badania teoretyczne .....	15
4.1. Analiza przebiegu wartości kąta $\alpha$ .....	15
4.2. Algorytm obliczeń wartości naprężenia granicznego.....	16
5. Badania doświadczalne .....	21
5.1. Przebieg badań doświadczalnych.....	21
5.2. Charakterystyka obiektu badań.....	22
5.3. Wyznaczanie niezbędnej liczby powtórzeń pomiarów.....	23
6. Metodyka weryfikacji nowej metody wyznaczania naprężenia granicznego gleby .....	25
7. Charakterystyka porównywanych metod wyznaczania naprężenia granicznego gleby .....	27
7.1. Wprowadzenie .....	27
7.2. Obliczanie naprężenia granicznego metodą regresji liniowej (klasyczną) .....	27
7.3. Obliczanie naprężenia granicznego metodą maksymalnej krzywizny .....	28
8. Analiza wyników .....	29
8.1. Wprowadzenie .....	29
8.2. Wartości naprężenia granicznego uzyskane w warunkach ograniczonej bocznej deformacji gleby .....	30
8.3. Wartości naprężenia granicznego uzyskane w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby.....	34
8.4. Wartości naprężenia granicznego uzyskane przy różnych wartościach prędkości odkształcania gleby .....	37
8.4.1. Wyniki uzyskane dla próbek wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej .....	37
8.4.2. Wyniki uzyskane dla próbek modelowych wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego.....	46
9. Podsumowanie.....	57
10. Wnioski .....	59

Załączniki .....	61
Załącznik A. Algorytm obliczania naprężenia granicznego gleby opracowany w programie Mathcad .....	63
Załącznik B. Wyniki badań .....	69
Piśmiennictwo .....	83
Summary .....	89
Zusammenfassung .....	91

## Streszczenie

W niniejszej rozprawie przedstawiono nową metodę obliczania naprężenia granicznego gleby. Założono w niej wyeliminowanie w możliwie największym zakresie subiektywnego wpływu badacza na uzyskiwane wyniki, a także zmniejszenie liczby niezbędnych danych wejściowych. Przyjęto również, że opracowywana metoda powinna być uniwersalna oraz możliwie prosta i łatwa w użyciu. Na podstawie tak określonego założenia opracowano algorytm, w którym do obliczeń wartości naprężenia granicznego wykorzystano analizę przebiegu wartości kąta  $\alpha$ , jaki z osią odkształceń gleby OX tworzy styczna do krzywej opisanej wielomianem  $W_k(x)$  aproksymującym zależność nacisku jednostkowego od osiadania stempla. Metoda ta różni się od innych, dotychczas stosowanych, w szczególności tym, że wyeliminowano w niej procedurę logarytmowania wartości nacisku jednostkowego, w związku z czym zmniejsza się wrażliwość metody na możliwe błędy w wyznaczaniu osiadania stempla.

Ze względu na charakter pracy badania doświadczalne, których zasadniczym celem było sprawdzenie poprawności opracowanego algorytmu, wykonywano w warunkach laboratoryjnych na próbkach modelowych dwóch gatunków gleb – glinie średniej pobranej z miejscowości Skarbimierzycy i piasku gliniastym lekkim pylastym pobranym z miejscowości Lipnik. Wilgotność gleby wynosiła 13% wag. w przypadku Skarbimierzycy i 11% wag. w przypadku Lipnika. Próbkę zagęszczano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej w warunkach ograniczonej oraz możliwej bocznej deformacji gleby.

Nowo opracowana metoda wyznaczania naprężenia granicznego gleby została zweryfikowana doświadczalnie na podstawie założenia, że obliczane wartości naprężenia granicznego powinny być podobne do naprężeń formujących, które wynosiły 50, 100, 150, 200 i 250 kPa i były wywierane w różnych warunkach. Różnicowano zarówno średnicę stempla jak i średnicę cylindra, w którym formowano próbki, a także prędkość przesuwu stempla. Weryfikacja polegała również na porównaniu wyników obliczanych nową metodą z wynikami uzyskiwanymi przy użyciu dwóch innych, często stosowanych metod – metody regresji oraz metody maksymalnej krzywizny.

Opracowana metoda charakteryzuje się dużą dokładnością i czułością oraz mniejszymi błędami względnymi, w odniesieniu do dwóch porównywanych z nią metod. Jest metodą bardziej „bezpieczną” w określaniu podatności gleby na zagęszczanie od metody regresji i metody maksymalnej krzywizny, co oznacza, że wyznaczane wartości naprężenia granicznego są zbliżone do wartości oczekiwanej, którą w prowadzonych doświadczeniach była wartość nacisku jednostkowego formowania próbek modelowych. Dzięki zastosowaniu w tej metodzie opracowanego algorytmu obliczeniowego opartego na automatycznym przetwarzaniu danych i wykonywaniu obliczeń, skraca się czas obliczania naprężenia granicznego gleby.

## Summary

### **The method of determining the pre-compaction stress of soil to prevent its excessive wheel compaction by agricultural machines**

In this paper, a new method for the calculation of soil pre-compaction stress has been presented. In this method, it was assumed that the subjective impact of the researcher on the results obtained shall be eliminated to a maximum degree, and the number of necessary input data reduced. It was also assumed that the method worked out shall be universal and as simple and easy in use as possible. Based on these assumptions, an algorithm was set out in which an analysis of  $\alpha$  angle value was used to calculate the values of pre-compaction stress, which together with the axis OX of soil deformation is created by the tangent to the curve, described by polynomial  $W_k(x)$ , approximating the dependency of the unit pressure on stamp setting. This method differs from all other applied up to now, in particular, by the fact that the logarithming of the value of unit pressure was eliminated, and therefore, the sensitivity of the method to possible errors while setting out stamp settling was reduced.

Because of the nature of the paper, the experiment tests whose crucial purpose was to check the correctness of the algorithm worked out, were carried out in the laboratory conditions, on model samples of two types of soil – medium heavy loam, collected from the locality of Skarbimierzyce and medium sand, lightly dusted, collected from the locality of Lipnik. The moisture of the soil was 13% of weight in the case of Skarbimierzyce and 11% of weight in the case of Lipnik. The samples were compacted with the use of a testing machine in the conditions of limited but possible lateral soil deformation.

The newly worked out method for the determination of soil pre-compaction stress has been verified experimentally, based on the assumption that the boundary stress values calculated shall be similar to the forming stress which amounted to 50, 100, 150, 200 kPa and that they shall be exerted in various conditions. Then, both the stamp diameter and the diameter of the cylinder in which the samples were formed were differentiated as well as the speed of stamp shifting. The verification also consisted in a comparison of results, calculated with a new method, to those obtained with the use of two other, frequently applied methods – the method of regression and the method of maximum curvilinearity.

The method worked out is characterised by high precision and sensitivity, as well as smaller relative errors with reference to two methods compared to. This method is safer to set out the soil susceptibility to compaction than the method of regression and the method of maximum curvilinearity, which means that the pre-compaction stress values set out approximate the expected value, which in the experiments conducted was the value of unit pressure while forming model samples. Owing to the application of worked out calculation algorithm in this method, based on an automatic data processing and performing calculations, the time for the computation of soil pre-compaction stress is shortened.

## **Zusammenfassung**

### **Methode der Bestimmung der Vorbelastung des Bodens zur Vermeidung dessen übermäßigen Verdichtung durch Fahrwerke von landwirtschaftlichen Maschinen**

In der vorliegenden Abhandlung wurde eine neue Methode der Berechnung der Vorbelastung des Bodens dargestellt. In dieser Methode wurde das Eliminieren im höchstmöglichen Maße eines subjektiven Einflusses des Forschers auf die erhaltenen Ergebnisse als auch die Reduzierung der Anzahl von erforderlichen Eingangsdaten vorausgesetzt. Es wurde auch angenommen, dass die entwickelte Methode universell und möglichst einfach und leicht in der Anwendung sein sollte. Auf Basis der so formulierten Prämissen wurde ein Algorithmus entwickelt, worin für die Berechnung des Vorbelastungswertes die Analyse des Verlaufs des Wertes des Winkels  $\alpha$  eingesetzt wurde, welchen die Tangente an der mit dem Polynom  $W_k(x)$  beschriebenen Kurve, das die Abhängigkeit des Einheitsdruckes von der Stempel-einsenkung approximiert, mit der Achse der Bodenverformung OX bildet. Diese Methode unterscheidet sich von den anderen bisher eingesetzten Methoden insbesondere dadurch, dass darin das Logarithmieren des Wertes des Einheitsdruckes eliminiert wurde, wodurch die Empfindlichkeit dieser Methode gegen mögliche Fehler bei der Bestimmung der Stempel-einsenkung geringer wird.

Aufgrund des Charakters der Arbeit wurden die experimentellen Untersuchungen, deren Ziel die Überprüfung der Richtigkeit des entwickelten Algorithmus war, unter Laborbedingungen an Modellprüflingen aus zwei Bodenarten durchgeführt: aus mittelschwerem Lehm – entnommen im Ort Skarbimierzycze und aus leichtem schluffigem Lehmsand – entnommen im Ort Lipnik. Die Feuchtigkeit des Bodens betrug 13 Gew.-% im Fall von Skarbimierzycze und 11% Gew.-% im Fall von Lipnik. Die Prüflinge wurden mit Hilfe einer Festigkeitsmaschine unter den Bedingungen beschränkter und möglicher Seitendeformation des Bodens verdichtet.

Die neuentwickelte Methode der Bestimmung der Vorbelastung des Bodens wurde experimentell auf Basis der Annahme verifiziert, dass die berechneten Werte der Vorbelastung ähnlich wie die formenden Spannungen sein sollten, die entsprechend 50, 100, 150, 200 und 250 kPa betragen und dass sie unter verschiedenen Bedingungen ausgeübt werden sollten. Differenziert wurden sowohl der Durchmesser des Stempels als auch der Durchmesser des Zylinders worin die Prüflinge geformt wurden, als auch die Vorschubgeschwindigkeit des Stempels. Die Verifizierung beruhte auch auf einem Vergleich der nach der neuen Methode berechneten Ergebnisse mit Ergebnissen, die mit zwei anderen oft eingesetzten Methoden erzielt wurden und zwar – mit der Regressionsmethode und der Methode der maximalen Krümmung.

Die entwickelte Methode kennzeichnet sich im Vergleich zu den beiden verglichenen Methoden durch hohe Genauigkeit und Empfindlichkeit und geringere relative Fehler. Es ist eine mehr "sichere" Methode für die Bestimmung der Bodennachgiebigkeit beim Verdichten als die Regressionsmethode und die Methode der maximalen Krümmung, welches bedeutet, dass die Werte der Vorbelastung dem erwarteten Wert, d.i. in den durchgeführten Versuchen dem Wert des Einheitsdruckes beim Formen von Modellprüflingen, annähernd gleich ist. Dank dem Einsatz in dieser Methode eines entwickelten Berechnungsalgorithmus, der auf automatischer Verarbeitung von Daten und Ausführung von Berechnungen basiert, verkürzt sich die Berechnungszeit der Vorbelastung des Bodens.