

**Marek
Śnieg**

**METODA WYZNACZANIA
NAPRĘŻENIA
GRANICZNEGO GLEBY
W CELU ZAPOBIEGANIA
JEJ NADMIERNEMU
ZAGĘSZCZANIU
MECHANIZMAMI JEZDNYMI
POJAZDÓW ROLNICZYCH**

Szczecin 2012

99529

br.

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

13 8662

Marek Śnieg —

OP1+

Metoda wyznaczania naprężenia granicznego gleby w celu zapobiegania jej nadmiernemu zagęszczaniu mechanizmami jezdnyymi pojazdów rolniczych

Szczecin 2012

Recenzenci

ANDRZEJ BOCHAT

ZDZISŁAW KOŚMICKI



CZ. 55529

Opracowanie redakcyjne

ALICJA BERNER

WYDANO ZA ZGODĄ

REKTORA ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIwersYTETU TECHNOLOGICZNEGO
W SZCZECINIE

ISBN 978-83-7663-134-9

WYDAWNICTWO UCZELNIANE ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIwersYTETU TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE
70-311 Szczecin, al. Piastów 50, tel. 91 449 47 60, e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl
Druk PPH „Zapol” Dmochowski, Sobczyk Sp.j., 71-062 Szczecin, al. Piastów 42, tel. 91 434 10 21
e-mail: zarzad@zapol.com

D. 824/2012

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 α	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

Wykaz oznaczeń

gs	– glina średnia
pglp	– piasek gliniasty lekki pylasty
OX	– oś odkształceń gleby
$W_k(x)$	– wielomian aproksymujący dane pomiarowe
α	– wartość kąta jaki tworzy styczna do wykresu funkcji $W_k(x)$, a osią OX (rad)
$\alpha(x)$	– przebieg wartości kąta α między styczną do wykresu funkcji $W_k(x)$ a osią OX
$p1\alpha(x)$	– pierwsza pochodna funkcji $\alpha(x)$
$p2\alpha(x)$	– druga pochodna funkcji $\alpha(x)$
σ	– nacisk jednostkowy [kPa]
σ_f	– napężenie formowania – wartość maksymalnego nacisku jednostkowego stosowanego podczas wytwarzania modelowych próbek glebowych [kPa]
σ_g	– napężenie graniczne [kPa]
x_r	– punkt odpowiadający odkształceniu, przy którym występuje napężenie graniczne
A	– punkt przegięcia krzywej $\alpha(x)$
r^2	– współczynnik determinacji

1. Wstęp

Wzrost poziomu wyposażenia technicznego gospodarstw rolnych powoduje, że na polach pracują coraz bardziej wydajne pojazdy oraz maszyny rolnicze, często większe i o większej masie. Negatywne są tego skutki dla środowiska glebowego. Jednym z nich jest nadmierne zagęszczenie gleby wywołane bardzo dużymi naciskami kół maszyn rolniczych na glebę (Van den Akker i in. 2003).

O problemie nadmiernego zagęszczenia gleby pisali już Davies i in. w 1972 roku. Jednak problem ten jest ciągle aktualny i bardzo ważny dla nauki oraz praktyki rolniczej (Błażejczak 2010). Brany jest też pod uwagę przez konstruktorów, producentów i użytkowników maszyn rolniczych (Kośmicki 2008).

W zagęszczonej glebie pogarszają się właściwości filtracyjne oraz zmniejszają się jej zdolności do magazynowania wody i składników odżywczych (Poniatowska 2003). Powoduje to zmniejszenie wielkości plonów oraz ich jakości, szczególnie w okresie suszy (Hadas i in. 1990, Wojtasik 1995). Wraz ze wzrostem zagęszczenia gleby rośnie zapotrzebowanie na niezbędną energię do pracy maszyn i narzędzi rolniczych (Oskoui i Voorhees 1991). Zagęszczenie gleby powoduje zwiększenie ryzyka wystąpienia erozji wodnej, zanieczyszczenia wód powierzchniowych nawozami oraz środkami ochrony roślin (Alakukku 1996). Zagęszczona gleba dłużej wysycha, co może powodować opóźnienia w wykonywaniu prac polowych, szczególnie w okresie wiosennym.

W wielu opracowaniach naukowych wskazuje się, że nadmierne zagęszczanie gleby jest szczególnie niekorzystne w warstwie podornej (Soane 1994, Walkowiak 2000, Błażejczak 2010). W warstwie tej może dochodzić, pod wpływem oddziaływania maszyn i pojazdów rolniczych, do skumulowanego zagęszczenia gleby, które często jest długotrwałe i nieodwracalne (Hakansson 1994, Hakansson i Reeder 1994, Febo i in. 2000). Usuwanie zagęszczenia jest czasochłonne i energochłonne, przy czym może być nieskuteczne, ponieważ w niektórych warunkach glebowych i atmosferycznych może powodować większe szkody niż korzyści (Kozicz 1996, Szeptycki 2003).

Van den Akker (2000) podaje, że ok. 32% gleb w Europie jest podatnych na zagęszczenie warstwy podornej w stopniu wysokim, a 18% w stopniu umiarkowanym. Obszar gleby zdegradowanej wskutek jej zagęszczenia w Europie według tego autora wynosi 33 miliony hektarów. Natomiast zmiany zagęszczenia zachodzące w warstwie ornej, która jest poddawana zabiegom uprawowym, mają inny charakter, albowiem zmienia się jej struktura i zagęszczenie (Hakansson i in. 1994, Alakukku 1996).

Aktualny poziom zagęszczenia gleby jest wynikiem oddziaływania wielu różnych czynników, a w szczególności największych naprężeń, jakim była ona poddana w przeszłości. Przebieg zmian zagęszczenia ugniatanej gleby uzależniony jest od wartości wywieranego nacisku i jego relacji do tego naprężenia, nazywanego w mechanice gruntu naprężeniem pre-

konsolidacyjnym lub uplastyczniającym. Jeżeli wartość nacisku będzie większa od wartości naprężenia prekonsolidacyjnego, to – zgodnie z dotychczasową wiedzą – tempo przyrostu zagęszczenia będzie większe niż w przypadku nacisków mniejszych. Jedną z najczęściej wykorzystywanych w praktyce inżynierskiej metod określania stanu prekonsolidacji gruntu jest metoda Casagrande'a (1936). Pozwala ona wyznaczyć charakterystyczną wartość naprężenia granicznego (prekonsolidacyjnego), którego przekroczenie oznacza, że proces zagęszczenia ma charakter odkształcania pierwotnego, co oznacza, że zachodzi w warunkach naprężeń większych od naprężeń, jakim gleba była poddawana w przeszłości, w związku z czym – jak wspomniano wyżej – zwiększa się zagrożenie nadmiernego zagęszczenia gleby. Metoda Casagrande'a jest często stosowana w badaniach podatności gleb rolniczych na ugniatanie. Świadczą o tym badania przeprowadzone przez Horna (1981), Koolena (1982), Koolena i Kuipersa (1989), Craiga (1992), Dawidowskiego i Koolena (1994).

Wyznaczanie naprężenia granicznego gleby nie jest zadaniem łatwym, wymaga bowiem sporego doświadczenia osoby przeprowadzającej badania. Ponadto wynik uzależniony jest od wielu czynników (Dawidowski i in. 2003, Izbicki i Stróżyk 2008), a w szczególności od:

- stopnia naruszenia struktury badanej gleby,
- wybranej metody pozyskiwania danych (szybkości zagęszczania gleby i warunków jej odkształcania),
- wybranej metody obliczania naprężenia granicznego gleby.

Podjęto zatem próbę opracowania metody umożliwiającej uproszczenie i zobiektywizowanie procedury obliczania wartości naprężenia granicznego gleby na użytek praktyki rolniczej, a zwłaszcza w celu zapobiegania nadmiernemu zagęszczaniu gleby kołami maszyn i pojazdów rolniczych.

2. Analiza zagadnienia na podstawie literatury

2.1. Wprowadzenie

Napężenie graniczne, jako parametr wyznaczający odporność gleby na naciski, jest coraz częściej wykorzystywane w praktyce rolniczej w różnych celach, zwłaszcza w prognozowaniu podatności gleby na zagęszczanie (Śnieg 1999, Poodt i in. 2003, Horn i in. 2005, Tobias i Tietje 2007, Błażejczak 2010). W kontekście przepisów prawnych, dotyczących ochrony gleb, pojawiły się również propozycje wykorzystania napężenia granicznego jako jednego z elementów oceny poziomu ryzyka nadmiernego zagęszczenia gleby, zagrażającego jej właściwemu funkcjonowaniu (Lebert i in. 2007).

Opracowano wiele metod wyznaczania napężenia granicznego, które różnią się sposobami pozyskiwania danych oraz procedurami obliczeniowymi. Uzyskiwane wyniki są bardzo często zróżnicowane w zależności od tego, jakie metody obliczeniowe i techniki badawcze zastosowano (Izbicki i Stróżyk 2008). Wpływa na to wiele elementów, wśród których istotną rolę odgrywa metoda obliczania, która może być obciążona w różnym stopniu czynnikiem subiektywnym.

2.2. Istota napężenia granicznego gleby

Napężenie graniczne określa stan aktualnej wytrzymałości gleby, na którą składa się całokształt oddziaływania czynników naturalnych oraz związanych z działalnością człowieka. Odzwierciedla więc ono historię wpływu tych czynników na powiązania wytworzone między cząsteczkami fazy stałej i fazy płynnej. Wyniki wielu badań (Horn 1981, Lebert 1989, Dawidowski 1994, Alexandrou i Earl 1995, Dawidowski 1995, Keller i Arvidsson 2003, Schäffer i in. 2007, Krummelbein i in. 2008) wskazują, że przy naprężeniach większych od aktualnego naprężenia granicznego powiązania te zostają naruszone, co prowadzi do niekorzystnych (często nieodwracalnych) zmian w zagęszczeniu i strukturze gleby. Zmienia się zatem również struktura porów, zwiększa udział porów o mniejszej średnicy, co prowadzi do pogorszenia warunków, które wpływają na wzrost i rozwój korzeni roślin (Horn 1981, Lebert 1989, Dawidowski 1994, Alexandrou i Earl 1995, Dawidowski 1995, Alexandrou i Earl 1998, Schäffer i in. 2007).

Napężenie graniczne w literaturze naukowej jest różnie nazywane. Trudności z ujednoliceniem nazewnictwa wynikają – być może – z tego, że parametrem tym posługują się zarówno geotechnicy, jak i rolnicy. Wiłun (2003) używa nazwy „napężenie prekonsolidacyjne”, natomiast Izbicki i Stróżyk (2008) używają nazwy „napężenie uplastyczniające”. Koolen i Kuipers (1989) napężenie graniczne nazywają „wytrzymałością pierwotną” lub „nośnością pierwotną”, rozumianą jako zdolność gleby do przenoszenia obciążeń pionowych niepowodujących jej odkształceń pierwotnych. Używają także terminu „nośność ekwiwalentna pierwotna” dla podkreślenia, że uwzględniane jest nie tylko oddziaływanie obciążenia

pierwotnego, ale również oddziaływanie czynników naturalnych, takich jak osiadanie, utwardzanie się gleby. W polskiej nomenklaturze technicznej, związanej z badaniem gleby, najczęściej stosowanym terminem jest „naprężenie graniczne gleby” (Dawidowski 1993, 1994, Dawidowski i Błażejczak 1998, Młynkowiak i in. 1999, Błażejczak 2010).

2.3. Metody wyznaczania naprężenia granicznego gleby

W gruntoznawstwie naprężenie graniczne wyznacza się, korzystając najczęściej z metody wykreślnej opracowanej przez Casagrande'a (1936). W metodzie tej wykorzystuje się zależność wskaźnika porowatości od pionowego nacisku.

Wadą metody Casagrande'a jest przedstawianie wartości wywieranego nacisku w skali logarytmicznej, co może powodować, przy niewielkim błędzie pomiaru odkształcenia gleby, zwiększenie niedokładności wyznaczenia naprężenia granicznego (Mosaddeghi i in. 2006). Problematiczny jest również sposób wyznaczania punktu, w którym krzywa ściśliwości gleby ma najmniejszy promień zakrzywienia. Podejmowano różne próby zobiektywizowania procedury wyboru tego punktu poprzez zastosowanie metod numerycznych (Dawidowski 1993). Dawidowski i Koolen (1994) opracowali program do obliczania wartości naprężenia granicznego, skonstruowany na bazie arkusza kalkulacyjnego Lotus 123. Metoda ta umożliwia wyeliminowanie trudności związanej z wyborem punktu maksymalnego zakrzywienia krzywej odkształcalności. Jednak ma ona pewien mankament – wygładzanie danych pomiarowych powoduje, że krzywa aproksymująca dane doświadczalne zmienia na wykresie swoje położenie.

Opracowane zostały również metody analityczne (Fritton 2001, Assouline 2002, Gregory i in. 2006). Jednak metody te nie dają zadowalających rezultatów, zwłaszcza gdy uzyskiwane na podstawie doświadczenia krzywe nie mają wyraźnego zakrzywienia (punktu przejścia z zakresu naprężeń wtórnych w naprężenia pierwotne) – Baumgartl i Köck (2004), Cavalieri i in. (2008).

W metodzie regresji linowej, nazywanej w geotechnice również metodą klasyczną, wartość naprężenia granicznego wyznaczana jest poprzez określenie miejsca, w którym przecinają się linie regresji obciążeń pierwotnych i wtórnych; pojawia się problem wyboru zakresów obciążeń wtórnych i pierwotnych, które mają być poddane analizie regresji (Dias i Pierce 1995, Dawidowski i in. 2003, Arvidsson i Keller 2004, Błażejczak 2009). Arvidsson i Keller (2004) oraz Keller i in. (2004) wykazali, że wartości naprężenia granicznego gleby wyznaczone metodą Casagrande'a są większe od wartości wyznaczanych metodą regresji. Niektórzy badacze stwierdzają, że metodę regresji i metodę Casagrande'a można stosować zamiennie (Dias i Pierce 1995).

Istnieją także inne metody wyznaczania naprężenia granicznego, wykorzystywane głównie w geotechnice. W metodach opracowanych przez Tavenasa (cyt. za Izbiński i Stróżyk 2008) do wyznaczania tego parametru wykorzystywany jest wykres zależności energii odkształcania od pionowego naprężenia efektywnego. Janbu (cyt. za: Izbiński i Stróżyk 2008) zaproponował metodę wyznaczania naprężenia granicznego na podstawie wykresu zależności edometrycznego modułu ściśliwości od naprężenia pionowego. Izbiński i Stróżyk (2008) uważają, że dotychczas opracowane metody wyznaczania naprężenia granicznego gleby obarczone są błędami, które nie pozwalają uzyskiwać w pełni wiarygodnych wyników.

2.4. Doświadczalne metody wyznaczania zależności przebiegu zmiany zagęszczenia w funkcji nacisku

Pomiary, w celu pozyskiwania danych do wyznaczania naprężenia granicznego, wykonywane są najczęściej w laboratorium. Gleba zagęszczana jest przy użyciu maszyny wytrzymałościowej (Dawidowski i Koolen 1994, Młynkowiak i in. 1999) lub przy wykorzystaniu edometru (Horn 1981, Lebert i Horn 1992, Fritton 2001, Arvidsson i Keller 2004, Berli i in. 2004, Keller i Arvidson 2004, Rucknagel i in. 2007, Krummelbein i in. 2008). Eksperymenty przeprowadzane są zazwyczaj na próbkach glebowych o nienaruszonej strukturze, w warunkach ograniczonej bocznej deformacji gleby (Horn 1981, Młynkowiak i in. 1999) albo możliwej bocznej deformacji (Dawidowski i Błażejczak 1998). Badania zależności naprężenia granicznego od wybranych parametrów wykonywane są również na modelowych próbkach glebowych. Przygotowanie takich próbek polega na zagęszczaniu luźnej masy gleby w stalowych pierścieniach, w warunkach ograniczonej bocznej deformacji, do określonego poziomu nacisku lub gęstości objętościowej (Błażejczak i Dawidowski 2002, Dawidowski i in. 2003, Mosaddeghi i in. 2007).

Możliwe jest też prowadzenie badań bezpośrednio na polu przy wykorzystaniu specjalnie skonstruowanych penetrometrów (Alexandrou i Earl 1995, Dawidowski i in. 2001, Mosaddeghi i in. 2006). W badaniach tych występują jednak trudności z uzyskaniem wystarczającej precyzji utrzymywania kierunku wywieranego na glebę nacisku (Dawidowski i in. 2003) lub dopasowania powierzchni stempla do ugniatanej powierzchni gleby. Alexandrou i in. (2002) wyznaczali wartości naprężenia granicznego przy znacznym odkształceniu gleby (7–13 mm). Sprzeczne jest to z teorią odkształceń gleby, albowiem charakteryzuje się ona małym zakresem odkształceń sprężystych i nie można jej traktować jako ciała sprężyste Hooke'a (cyt. za: Konstankiewicz 1987).

Na przebieg krzywej doświadczalnej mogą wpływać także warunki przeprowadzania procesu ugniatania gleby, np. możliwość wystąpienia deformacji bocznej w trakcie obciążania (Śnieg 1999, Mosaddeghi i in. 2006). Stwierdzono, że wartość naprężenia granicznego wyznaczonego na podstawie analizy krzywej zgęszczania gleby, uzyskanej w warunkach możliwej deformacji bocznej, jest większa od wartości wyznaczonej w warunkach ograniczonej deformacji bocznej (Śnieg 1999).

Przeprowadzone badania porównawcze nie wykazały istotnych różnic pomiędzy tymi dwoma podejściami, co oznacza, że obydwa sposoby mogą być stosowane w praktyce inżynierskiej.

Do rozwiązania pozostaje problem opracowania szybkiej i bardziej obiektywnej procedury obliczania wartości naprężenia granicznego, co stanowi również cel niniejszej pracy.

2.5. Podsumowanie stanu wiedzy i cel pracy

Znajomość naprężenia granicznego ma duże znaczenie dla współczesnego rolnictwa, o czym świadczy fakt, że badania nad tym parametrem gleby prowadzone są w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie (Horn 1981, Lebert 1989, Dawidowski 1994, Alexandrou i Earl 1995, Dawidowski 1995, Earl 1997, Arvidsson i Keller 2004, Gregory i in. 2006, Mosaddeghi i in. 2007, Rücknagel i in. 2007, Shäffer i in. 2007, Cavalieri i in. 2008,

Krummelbein i in. 2008, Błażejczak 2010), przy czym wyniki tych badań są wykorzystywane do różnych celów, w tym do określania i klasyfikacji gleb ze względu na ich podatność na ugniatanie (Horn i in. 2005). Opracowano wiele metod obliczania tego parametru, jednak nadal brakuje standardowej, ogólnie zaakceptowanej, metody. Istnieje więc potrzeba prowadzenia dalszych badań metodycznych, ukierunkowanych na opracowanie takiej metody. Trudności związane z wyznaczaniem wartości naprężenia granicznego powodują, że stosowanie tego parametru w nauce i praktyce rolniczej nie jest powszechne (Błażejczak 2010), choć – jak wskazują liczne wyniki badań – jego potencjał aplikacyjny jest bardzo duży (Van den Akker 2004, Horn i in. 2005, Horn i Fleige 2009).

Na podstawie analizy dotychczasowej wiedzy i studiów literaturowych można wyodrębnić dwa zasadnicze zadania związane z wyznaczaniem naprężenia granicznego gleby (Dawidowski i in. 2003, Izbiński i Stróżyk 2008):

- przeprowadzanie różnymi sposobami doświadczeń identyfikujących naprężenia graniczne oraz sposoby archiwizacji i przetwarzania danych,

- obliczanie wartości naprężenia granicznego w sytuacji, gdy kształt uzyskiwanej krzywej zależności nacisku od odkształcenia gleby nie spełnia kryteriów określonych dla metod opartych na teorii Casagrande’a.

Tak określone zadania stały się punktem wyjścia do sformułowania celu pracy, którym było opracowanie, szczególnie na potrzeby praktyki rolniczej, metody obliczania naprężenia granicznego gleby, wykorzystującej zautomatyzowaną procedurę obliczeniową przyspieszającą generowanie wyników w formie możliwej do natychmiastowego zastosowania.

3. Założenia nowej metody

Przystępując do opracowania nowej metody wyznaczania naprężenia granicznego gleby, założono wyeliminowanie w możliwie największym zakresie subiektywnego wpływu badającego na uzyskiwane wyniki. Przyjęto również, że opracowywana metoda powinna być uniwersalna oraz możliwie prosta i łatwa w użyciu.

Na potrzeby niniejszej pracy przyjęto, że nowo opracowana metoda będzie nazywana metodą numeryczną.

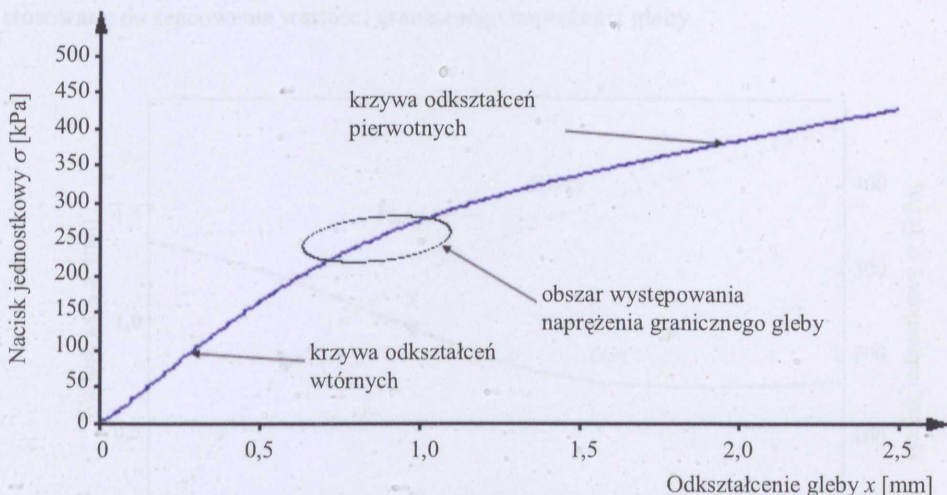
Na podstawie własnych badań wstępnych oraz wyników innych autorów (Arvidsson i Keller 2004, Gregory i in. 2006, Keller i Arvidsson 2007, Cavalieri i in. 2008) przyjęto, że empiryczną zależność nacisku jednostkowego σ od odkształcenia próbki gleby x , wykorzystywaną do wyznaczania naprężenia granicznego (rys. 1), można aproksymować wielomianem:

$$W_k(x) = a_1x^k + a_2x^{k-1} + a_3x^{k-2} + \dots + a_{k-1}x + a_k \quad (1)$$

gdzie:

k – stopień wielomianu,

a – współczynnik wielomianu.



Rys. 1. Empiryczna zależność nacisku jednostkowego σ od odkształcenia próbki gleby x
Źródło: opracowanie własne.

Wyboru stopnia wielomianu k dokonywano poprzez minimalizację odchylenia standardowego reszt k_0 . Stopień wielomianu jest optymalny wtedy, gdy k_0 spełnia warunek (Brandt 2002):

$$S_{k_0} = \min_k \{S_k\} \quad (2)$$

$$S_k = \sqrt{\frac{1}{n-k-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

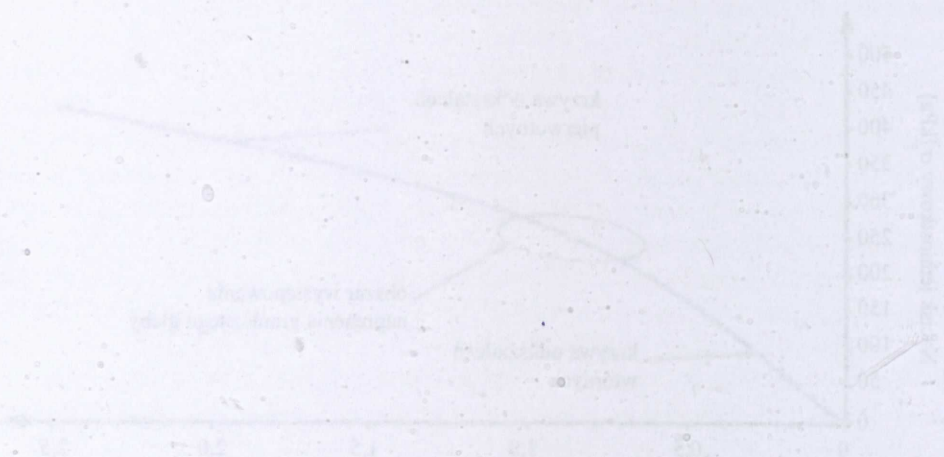
gdzie:

y_i – wartość empiryczna,

$\hat{y}_i$ – wartość teoretyczna,

n – liczebność próby.

Założono, że do obliczania naprężenia granicznego gleby można wykorzystać analizę przebiegu wartości kąta α , który z osią OX (osią odkształceń gleby) tworzy styczna do krzywej opisanej wielomianem $W_k(x)$ aproksymującym zależność nacisku jednostkowego od osiadania stempla.



4. Badania teoretyczne

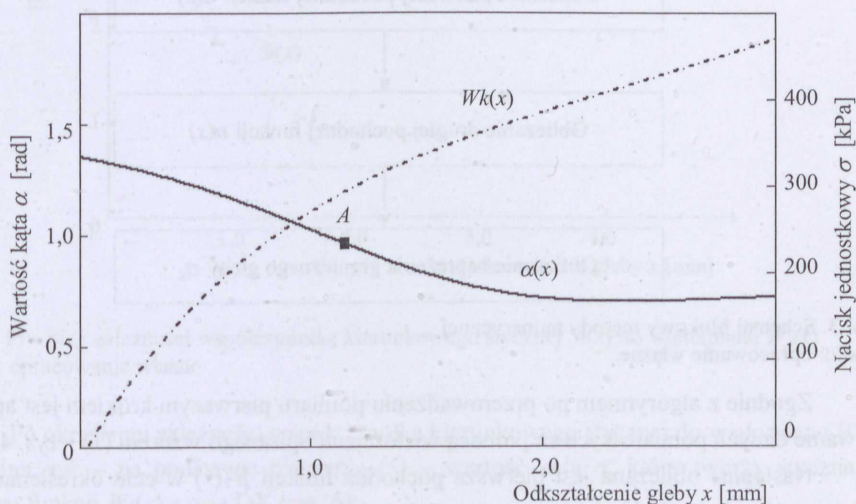
4.1. Analiza przebiegu wartości kąta α

Badania teoretyczne obejmowały:

- przeprowadzenie analizy przebiegu wartości kąta α , który z osią odkształceń gleby tworzy styczną do krzywej opisanej wielomianem $W_k(x)$ aproksymującym zależność nacisku jednostkowego od osiadania śtempla;

- opracowanie algorytmu obliczeń wartości naprężenia granicznego σ_g .

Na podstawie analizy wcześniejszych wyników badań własnych stwierdzono, że wartości kąta α maleją wraz ze wzrostem odkształcenia gleby (rys. 2) – Dawidowski i in. (2001). Początkowo po rozpoczęciu procesu zagęszczania gleby kąt α maleje o coraz większe wartości (wygięcie opadającego wykresu $\alpha(x)$ w dół). Tendencja taka utrzymuje się aż do punktu A przegięcia krzywej $\alpha(x)$. Dalszemu zagęszczaniu gleby towarzyszą redukcje kąta o coraz mniejsze wartości (prawa strony krzywej opada coraz wolniej). Wartości naprężenia odpowiadające punktowi przegięcia A porównywano z wartościami formowana próbek zastosowanych we wcześniejszych eksperymentach (Dawidowski i in. 2001). Z powodu małych różnic pomiędzy uzyskiwanymi wartościami przyjęto, że charakterystyczny dla przebiegu zagęszczania gleby punkt A przegięcia krzywej $\alpha(x)$ może być stosowany do szacowania wartości granicznego naprężenia gleby.

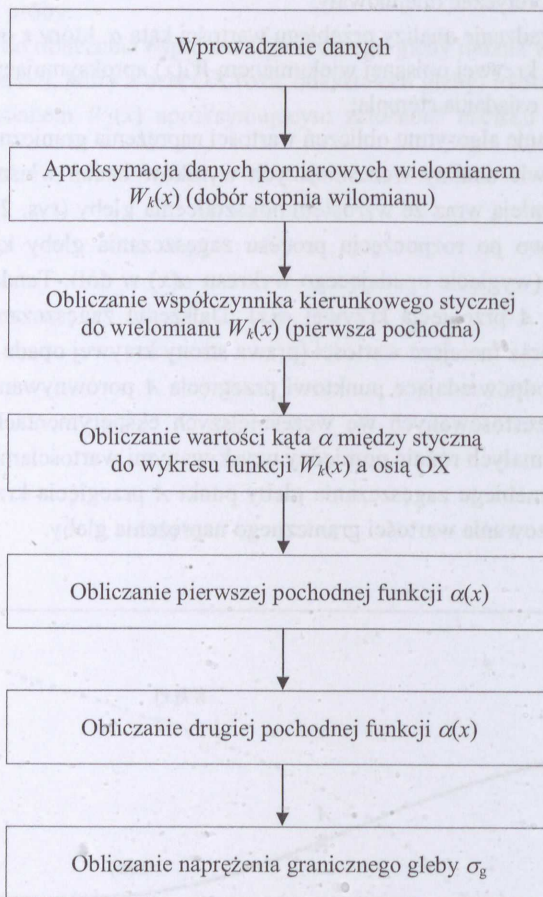


Rys 2. Przebieg przykładowej funkcji $W_k(x)$ oraz zależności $\alpha(x)$ w odniesieniu do odkształcenia gleby x

Źródło: opracowanie własne.

4.2. Algorytm obliczeń wartości naprężenia granicznego

Na podstawie powyższej analizy opracowano własną numeryczną metodę wyznaczania wartości naprężenia granicznego, uwzględniającą przyjęte założenia. Poniżej zamieszczono schemat blokowy opracowanego algorytmu obliczeń (rys. 3). Do obliczeń wykorzystano arkusz obliczeniowy programu komputerowego Mathcad 14.0. Szczegółowy arkusz obliczeń zamieszczono w zał. A.



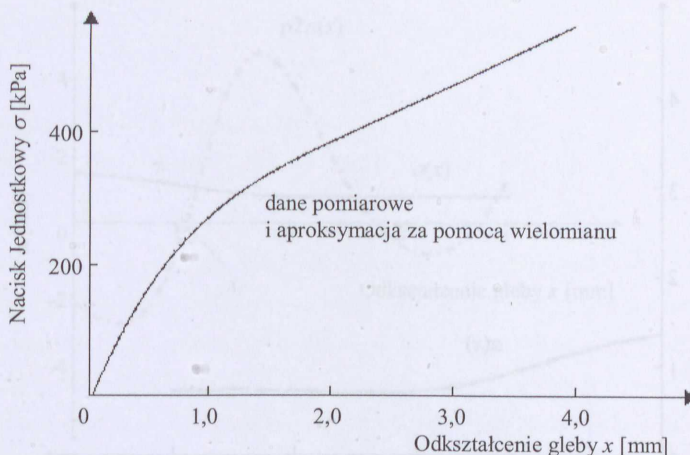
Rys. 3. Schemat blokowy metody numerycznej

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z algorytmem po przeprowadzeniu pomiaru pierwszym krokiem jest aproksymowanie danych pomiarowych za pomocą wielomianu opisanego wzorem (1) – rys. 4.

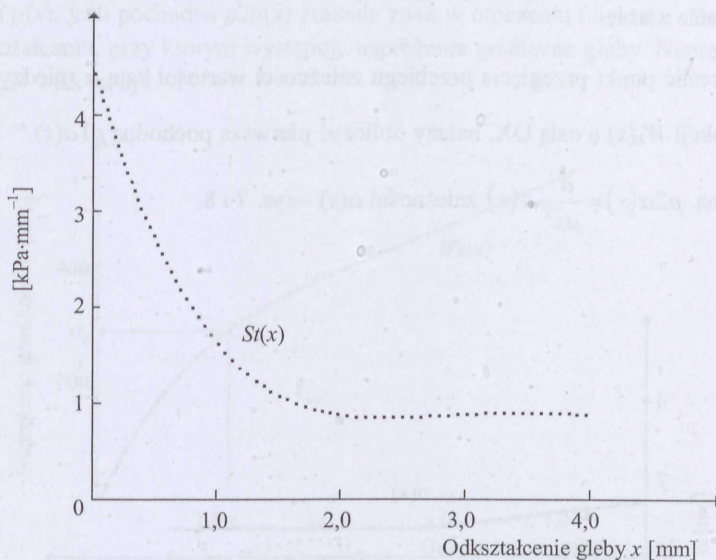
Następnie obliczana jest pierwsza pochodna funkcji $W_k(x)$ w celu określenia zależności współczynnika kierunkowego stycznej do wielomianu $W_k(x)$ – rys. 5.

$$\operatorname{tg} \alpha(x) = \frac{d}{dx} W_k(x) \quad (4)$$



Rys. 4. Aproksymacja danych pomiarowych za pomocą wielomianu $W_k(x)$ – metodą najmniejszych kwadratów

Źródło: opracowanie własne.

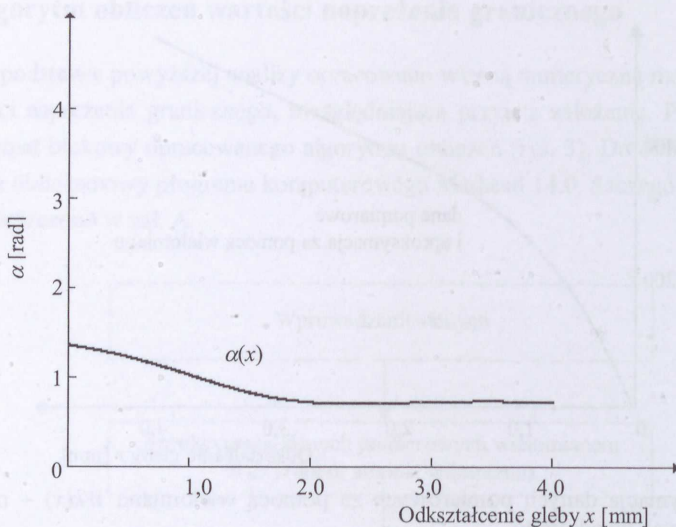


Rys. 5. Przebieg zależności współczynnika kierunkowego stycznej $St(x)$ do wielomianu $W_k(x)$

Źródło: opracowanie własne.

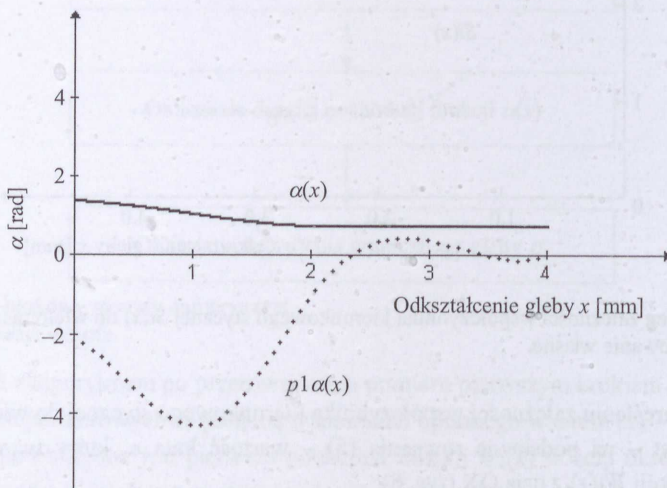
Po określeniu zależności współczynnika kierunkowego stycznej do wielomianu $W_k(x)$ obliczana jest – na podstawie równania (5) – wartość kąta α , który tworzy styczna do wykresu funkcji $W_k(x)$ z osią OX (rys. 6):

$$\alpha(x) = \arctan\left(\frac{d}{dx}W_k(x)\right) \quad (5)$$

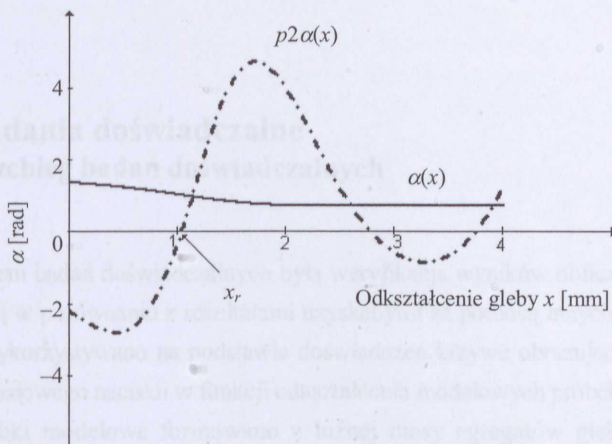


Rys. 6. Przebieg wartości kąta α między styczną do wykresu funkcji $W_k(x)$ a osią OX
Źródło: opracowanie własne.

Aby określić punkt przegięcia przebiegu zależności wartości kąta α między styczną do wykresu funkcji $W_k(x)$ a osią OX, należy obliczyć pierwszą pochodną $p1\alpha(x) = \frac{d}{dx}\alpha(x)$ i drugą pochodną $p2\alpha(x) = \frac{d^2}{dx^2}\alpha(x)$ zależności $\alpha(x)$ – rys. 7 i 8.



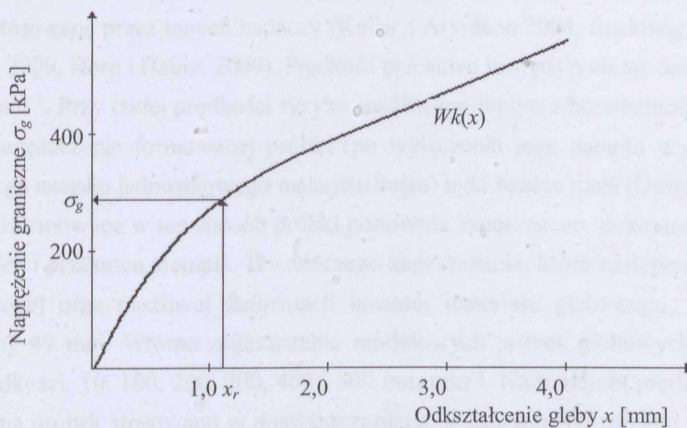
Rys. 7. Przebieg zależności $\alpha(x)$ i pierwszej pochodnej $p1\alpha(x)$
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8. Przebieg zależności $\alpha(x)$ i drugiej pochodnej $p2\alpha(x)$

Źródło: opracowanie własne.

Pierwsza wartość x_r , spełniająca równanie $p2\alpha(x) = 0$, wyznacza punkt przecięcia krzywej $\alpha(x)$, jeśli pochodna $p2\alpha(x)$ zmienia znak w otoczeniu punktu x_r . Punkt x_r odpowiada odkształceniu, przy którym występuje naprężenie graniczne gleby. Naprężenie graniczne $\sigma_g = W(x_r)$ – jak na rys. 9.



Rys. 9. Sposób obliczania naprężenia granicznego gleby

Źródło: opracowanie własne.

5. Badania doświadczalne

5.1. Przebieg badań doświadczalnych

Celem badań doświadczalnych była weryfikacja wyników obliczeń uzyskanych metodą numeryczną w porównaniu z rezultatami uzyskanymi za pomocą innych wybranych metod. Do obliczeń wykorzystywano na podstawie doświadczeń krzywe obrazujące przebieg zmian wartości jednoosiowego nacisku w funkcji odkształcenia modelowych próbek glebowych.

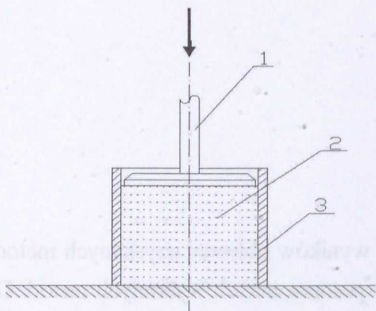
Próbki modelowe formowano z luźnej masy agregatów glebowych, umieszczanej w stalowych cylindkach, którą zagęszczano na maszynie wytrzymałościowej Instron 5582 za pomocą stempla, w warunkach ograniczonej rozszerzalności bocznej gleby (średnica stempla była zbliżona do średnicy cylindra). Do formowania próbek używano dwóch rodzajów cylindrków – o średnicy 50 i 100 mm i jednakowej wysokości $h = 50$ mm, a także dwóch stempli – o średnicy odpowiednio 49 i 99 mm. Formowane próbki były zróżnicowane pod względem wartości nacisku jednostkowego maksymalnego, który wynosiły: 50, 100, 150, 200 i 250 kPa. Przyjęte wartości jednostkowych nacisków maksymalnych były takie same jak stosowane przez innych badaczy (Keller i Arvidson 2004, Rucknagel i in. 2007, Hemmat i in. 2009, Horn i Heiner 2009). Prędkość przesuwu stempla podczas formowania wynosiła $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Przy takiej prędkości ryzyko możliwego wpływu bezwładności przesuwu stempla na zagęszczenie formowanej próbki (po wyłączeniu jego napędu w chwili osiągnięcia założonego nacisku jednostkowego maksymalnego) było bardzo małe (Dawidowski 1995).

Uformowane w ten sposób próbki ponownie zagęszczano, dokonując ciągłej rejestracji nacisku i przesuwu stempla. Do wtórnego zagęszczania, które następowało w warunkach ograniczonej oraz możliwej deformacji bocznej materiału glebowego, używano stempla o średnicy 49 mm. Wtórne zagęszczanie modelowych próbek glebowych przeprowadzono przy prędkości: 10, 100, 200, 300, 400 i $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Najmniejszą prędkość wtórnego zagęszczania próbek stosowano w doświadczeniach, w których sprawdzano wpływ warunków odkształcania gleby, tzn. przy ograniczonej lub możliwej jej bocznej deformacji, na wyznaczaną wartość naprężenia granicznego. Większe prędkości wykorzystywano w doświadczeniach, w których badano wpływ prędkości wtórnego zagęszczania próbek na wyznaczaną wartość naprężenia granicznego gleby.

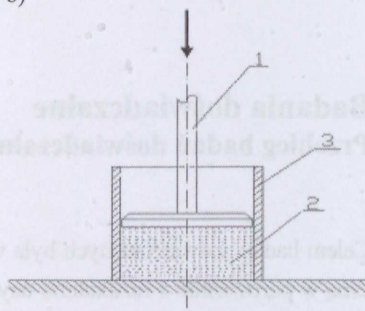
Pomiary prowadzono do osiągnięcia 500 kPa nacisku jednostkowego lub do wartości odkształcenia próbki pod stemplem równej 10 mm.

Przykłady wstępnego i wtórnego zagęszczania modelowych próbek glebowych przedstawiono graficznie na rys. 10 i 11.

a)



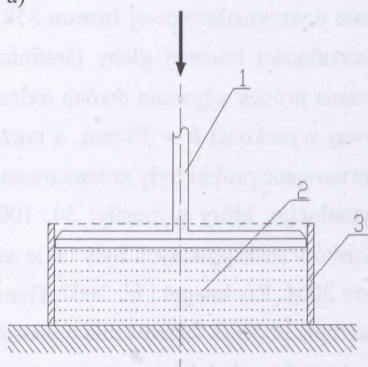
b)



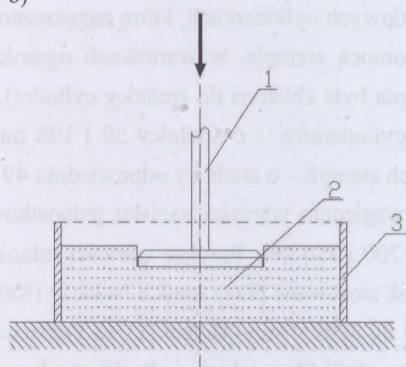
Rys. 10. Schematy zagęszczania wstępnego (a) oraz wtórnego (b) w warunkach ograniczonej bocznej deformacji materiału glebowego, 1 – stempel, 2 – materiał glebowy, 3 – cylinder

Źródło: opracowanie własne.

a)



b)



Rys. 11. Schematy zagęszczania wstępnego (a) oraz wtórnego (b) w warunkach możliwej bocznej deformacji materiału glebowego, 1 – stempel, 2 – materiał glebowy, 3 – cylinder

Źródło: opracowanie własne.

5.2. Charakterystyka obiektu badań

Materiał glebowy, z którego formowano próbko modelowe, pobierano z warstwy ornej. Pochodził on z pola położonego w miejscowości Skarbimierz koło Szczecina oraz z pola położonego w miejscowości Lipnik koło Stargardu Szczecińskiego.

Pobrany materiał glebowy został przesiany przez sito o średnicy oczek wynoszącej 6 mm. Do badań użyto materiału glebowego o wielkości agregatów mniejszych od 6 mm. W tabeli 1 przedstawiono jego charakterystykę.

Oznaczenia odczynu, zawartości próchnicy i składu granulometrycznego wykonane zostały w Katedrze Eroзии i Rekultywacji Gleb Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Odczyn gleby określano metodą elektrometryczną. Zawartość próchnicy oznaczano metodą Tiurina, a skład granulometryczny – metodą Bouyoucosa-Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego.

Gęstość gleby próbek modelowych obliczano po wysuszeniu próbek w temperaturze 105°C, zgodnie z PN-88/B-04481. Była to gęstość objętościowa szkieletu ρ_d , która w naukach rolniczych często nazywana jest gęstością objętościową. Wilgotność gleby oznaczano metodą

suszarkowo-wagową, zgodnie z PN-88/B-04481. Wyniki oznaczeń wilgotności gleby wyrażano w tzw. procentach wagowych. Granice plastyczności oznaczano zgodnie z PN-88/B-04481 na próbkach glebowych przesianych przez sito o średnicy oczek równej 1 mm. Połową pojemność wodną gleby obliczano na podstawie wzoru Trzeckiego (1974).

Analizy wykazały, że pobrane do badań gleby to glina średnia (gs) z obiektu Skarbimierzce oraz piasek gliniasty lekki pylasty (pglp) z obiektu Lipnik (tab. 1).

Tabela 1. Charakterystyka badanych gleb według Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego (1989)

Obiekt	Odczyn [pH]	Zawartość próchnicy [%]	Zawartość frakcji wg PTG [%]									Gleba
			$> 1,00$	$1,00-0,50$	$0,5-0,25$	$0,25-0,10$	$0,10-0,05$	$0,05-0,02$	$0,02-0,005$	$0,005-0,002$	$< 0,002$	
Skarbimierzce	6,23	1,78	5,44	6,38	11,75	23,13	11,75	8,00	9,00	8,00	22,00	gs
Lipnik	4,71	1,01	5,60	6,90	18,20	34,30	20,60	8,00	5,00	2,00	5,00	pglp

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z Katedry Erozji i Rekultywacji Gleb ZUT w Szczecinie.

Przyjęty poziom wilgotności gleb odpowiadał ich optymalnej wilgotności uprawowej. Wilgotność gleby wynosiła 13% wag. dla Skarbimierzyc i była niższa od granicy jej plastyczności, która dla badanej gleby wynosiła 15,7% wag. Wartość 11% wag. dla Lipnika odpowiadała jej połowej pojemności wodnej.

5.3. Wyznaczanie niezbędnej liczby powtórzeń pomiarów

Ponieważ nie jest znana wariancja σ^2 żadnej z badanych populacji o rozkładzie $N(m, \sigma)$, niezbędną liczbę powtórzeń wyznaczono na podstawie znanej wartości statystyki s^2 , uzyskanej na podstawie małej próby wstępnej o liczebności n_0 (PN-90/P-04870). Średnią m populacji szacowano metodą przedziałową ze współczynnikiem ufności $1 - \alpha$, przy założeniu, że oczekiwany błąd względny szacunku nie przekroczy liczby δ_x^- .

Niezbędną liczbę próby właściwej n ustalono z zależności:

$$n = \frac{\hat{t}_\alpha^2 \cdot \hat{s}^2}{\bar{x} \cdot \delta_x^2} \quad (6)$$

w której

$$\hat{s}^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \cdot \sum_{i=1}^{n_0} (x_i - \bar{x})^2 \quad (7)$$

jest wariancją z małej próby wstępnej o liczebności n_0 , natomiast t_α jest wartością zmiennej t -Studenta, odczytaną z tablicy tego rozkładu dla współczynnika ufności $1 - \alpha$ i dla $n_0 - 1$ stopni swobody w taki sposób, że $P \{ -t_\alpha < t < t_\alpha \} = 1 - \alpha$. Do obliczeń przyjmowano poziom istotności $\alpha = 0,05$ i błąd względny $\delta_x^- = 5\%$.

6. Metodyka weryfikacji nowej metody wyznaczania naprężenia granicznego gleby

Ocenę opracowanej metody numerycznej wyznaczania naprężenia granicznego gleby przeprowadzono na podstawie analizy porównawczej wyników obliczeń wykonanych przy użyciu metody własnej i wyników uzyskanych innymi, szeroko stosowanymi, metodami. Zastosowano przy tym rachunek korelacji i regresji, wyznaczając krzywe ufności obliczone przy poziomie ufności $1 - \alpha = 0,99$ oraz współczynniki determinacji r^2 . Krzywe ufności zaznaczono na rysunkach, zamieszczonych w rozdz. 8, liniami przerywanymi; obliczono również błąd względny metody.

Poprawność uzyskiwanych równań regresji oceniano za pomocą współczynnika determinacji, testu F -Snedecora, wykresów zmiennych resztowych, w zależności od zmiennej zależnej, zależności wartości obliczonych od wartości założonych, czyli wartości nacisku formowania próbek modelowych.

Na podstawie zależności wartości obliczonych od nacisku formowania próbek modelowych oceniano dokładność i czułość porównywanych metod (Gawęcki i Wagner 1988). W przypadku, gdy zależności te mają charakter liniowy, miarą dokładności metody jest bezwzględna wartość współczynnika a (wyrazu wolnego) w równaniu regresji liniowej $y = a + bx$. Dokładność metody jest tym większa, im mniejsza jest ta wartość. Natomiast miarą czułości metody jest wartość współczynnika kierunkowego b . Za bardziej czułą uważa się tę metodę, w której współczynnik b przyjmuje wartość większą.

Obliczenia wykonywano za pomocą pakietu statystycznego Statistica® 10.0 (StatSoft Inc., USA).

Błąd względny metody obliczano z zależności:

$$\delta_m = \frac{|\sigma_f - \sigma_{gr}|}{\sigma_f} \cdot 100\% \quad (8)$$

gdzie:

σ_f – wartość naprężenia formowania gleby [kPa],

σ_{gr} – obliczona wartość naprężenia granicznego gleby [kPa].

Statystyki testu t -Studenta obliczono na podstawie (Rudnicki 1992):

a) statystyki testu t -Studenta dla współczynnika a z równania

$$t = \frac{|a_1 - a_2|}{S_{a_1 - a_2}} \quad (9)$$

b) statystyki testu t -Studenta dla współczynnika b z równania

$$t = \frac{|b_1 - b_2|}{S_{b_1 - b_2}}$$

(10)

Zmienna t ma rozkład t -Studenta z $\nu = n_1 + n_2 - 4$ stopnie swobody,

gdzie:

$b_1 - b_2$ – współczynniki kierunkowe,

$a_1 - a_2$ – wyrazy wolne,

$S_{b_1 - b_2}$ – błąd standardowy różnicy współczynników kierunkowych,

$S_{a_1 - a_2}$ – błąd standardowy różnicy wyrazów wolnych.

7. Charakterystyka porównywanych metod wyznaczania naprężenia granicznego gleby

7.1. Wprowadzenie

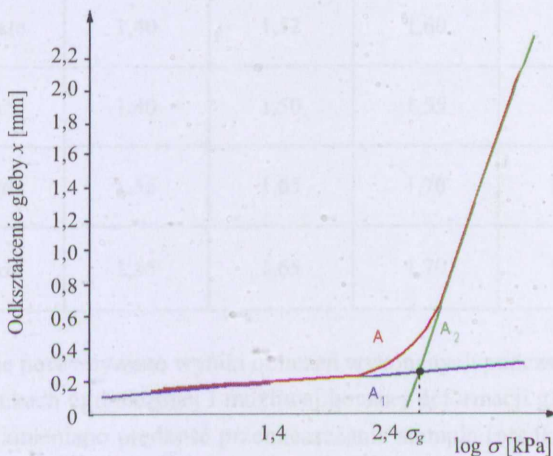
Wyniki obliczeń wartości naprężenia granicznego, przeprowadzonych za pomocą własnej metody numerycznej, porównywano z wynikami obliczeń wykonanych za pomocą dwóch innych wybranych metod – metody regresji liniowej oraz zmodyfikowanej metody maksymalnej krzywizny.

Metoda regresji liniowej została wybrana, ponieważ jest powszechnie stosowana w badaniach rolniczych w ośrodkach naukowych w Niemczech, Holandii, Szwecji oraz ze względu na duże doświadczenie autora w jej stosowaniu.

Metoda maksymalnej krzywizny, zaproponowana przez Gregory'ego i in. (2006), została wybrana, ponieważ jest to jedna z najnowszych metod opracowanych w ostatnim czasie (Tomás i in. 2007, Cavalieri i in. 2008), a także ponieważ – podobnie jak własna metoda – jest metodą obliczeniową. Modyfikacja tej metody, wprowadzona na potrzeby weryfikacji metody własnej, polegała na różniczkowaniu naprężenia od odkształcenia zamiast różniczkowania zależności wskaźnika porowatości od dziesiętnego logarytmu nacisku. W niniejszej pracy pozwoliło to na jej bezpośrednie porównanie z opracowaną metodą numeryczną.

7.2. Obliczanie naprężenia granicznego metodą regresji liniowej (klasyczną)

W metodzie regresji liniowej naprężenie graniczne gleby wyznaczane jest w miejscu przecięcia linii regresji A_1 , opisującej odkształcenia wtórne gleby, z linią regresji A_2 , przedstawiającą odkształcenia pierwotne gleby (rys. 12).



Rys. 12. Metoda regresji (klasyczna) wyznaczania naprężenia granicznego gleby, A – dane pomiarowe, A_1 – linia regresji odkształceń wtórnych, A_2 – linia regresji odkształceń pierwotnych

Źródło: opracowanie własne.

Punkt, w którym przecinają się te dwie linie, zostaje zrzucony na oś OX i odczytywana jest wartość naprężenia granicznego gleby. Na podstawie badań własnych do wyznaczenia naprężenia granicznego przyjęto zakres odkształceń (naprężeń) wtórnych próbki gleby na krzywej zagęszczenia od 0 do 0,5 mm, natomiast zakres odkształceń (naprężeń) pierwotnych próbki gleby – od 2 do 5 mm.

7.3. Obliczanie naprężenia granicznego metodą maksymalnej krzywizny

Wyznaczanie naprężenia granicznego metodą maksymalnej krzywizny zostało opracowane przez Gregory'ego i in. w 2006 roku.

Pierwszym krokiem w tej metodzie jest aproksymacja danych pomiarowych za pomocą wielomianu $W_k(x)$ na podstawie wzoru (1). Po czym wyznacza się funkcję opisującą krzywiznę wielomianu $W_k(x)$ na podstawie równania:

$$K(x) = \frac{\left| \frac{d^2}{dx^2} W_k(x) \right|}{\left[1 + \left(\frac{d}{dx} W_k(x) \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (11)$$

Ostatnim krokiem jest obliczenie naprężenia granicznego gleby poprzez znalezienie maksimum funkcji $K(x)$ na podstawie równania:

$$\frac{d}{dx} K(x) = 0 \quad (12)$$

8. Analiza wyników

8.1. Wprowadzenie

Wyniki obliczeń wartości naprężenia granicznego gleby, uzyskane przy wykorzystaniu opracowanej własnej metody numerycznej, opisanej w rozdz. 4, przeanalizowano, porównując je z wynikami uzyskanymi za pomocą metody regresji, opisanej w rozdz. 7.2, oraz metody maksymalnej krzywizny, opisanej w rozdz. 7.3.

Do obliczeń wykorzystano krzywe zależności nacisku od odkształcenia, uzyskane w doświadczeniu opisanym w rozdz. 5.

Obliczone wartości naprężenia granicznego porównywano w grupach różniących się warunkami wywierania obciążeń podczas pozyskiwania danych doświadczalnych (rozdz. 5.1). W tabeli 2 podano ogólną charakterystykę modelowych próbek glebowych pod względem ich gęstości objętościowej, z podziałem na poszczególne grupy. Szczegółowe zestawienie danych opisujących próbki modelowe zamieszczono w zał. B.

Tabela 2. Średnie wartości gęstości objętościowej modelowych próbek glebowych uzyskiwane podczas ich formowania

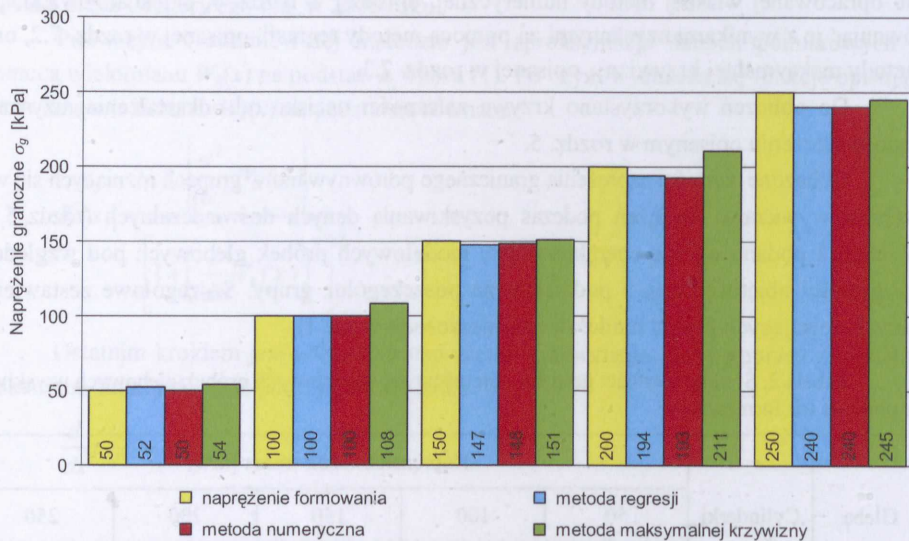
Gleba	Cylinderki	Napężenie formowania [kPa]				
		50	100	150	200	250
		gęstość objętościowa próbek modelowych [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]				
Gлина średnia (gs)	małe	1,40	1,52	1,60	1,62	1,70
	duże	1,40	1,50	1,55	1,60	1,65
Piasek gliniasty lekki pylasty (pglp)	małe	1,55	1,65	1,70	1,75	1,79
	duże	1,55	1,65	1,70	1,75	1,80

Oddzielnie porównywano wyniki obliczeń wykonanych podczas doświadczeń prowadzonych w warunkach ograniczonej i możliwej bocznej deformacji gleby, a także doświadczeń, w których zmieniano prędkość przemieszczania stempla (prędkość odkształcania gleby). W każdej grupie dodatkowo różnicowane były stany zagęszczenia próbek modelowych. Na potrzeby oceny dokładności oraz czułości zastosowanych metod obliczeniowych przeprowadzono analizę współczynnika a (wyrazu wolnego) i współczynnika kierunkowego b

równania linii regresji, opisaną w rozdz. 6. Istotność różnic pomiędzy metodami sprawdzano za pomocą testu *t*-Studenta. Otrzymane wyniki zestawiono w tab. 17.

8.2. Wartości naprężenia granicznego uzyskane w warunkach ograniczonej bocznej deformacji gleby

Zestawione wartości naprężenia formowania i naprężeń granicznych, obliczone dla próbek wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), przedstawiono na rys. 13.



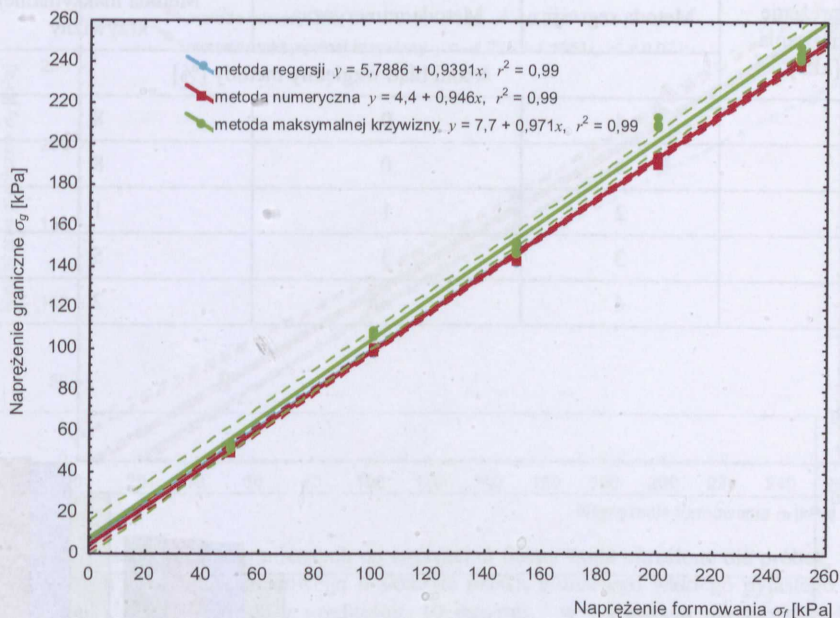
Rys. 13. Wartości naprężenia formowania i średnie wartości naprężenia granicznego gleby obliczone dla próbek wytworzonych z materiału o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach ograniczonej bocznej deformacji

Można zauważyć (rys. 13), że największe wartości uzyskiwano, wyznaczając naprężenie graniczne metodą maksymalnej krzywizny. Natomiast wartości naprężenia granicznego wyznaczone metodą regresji i metodą numeryczną są bardzo zbliżone.

Wszystkie trzy metody umożliwiły uzyskanie, zgodnie z oczekiwaniami (Dawidowski 1993 a), wartości naprężeń granicznych zbliżonych do naprężeń formujących. Przy czym nieco mniejsze wartości naprężeń granicznych od naprężeń formowania uzyskano w przypadku, gdy próbki glebowe były formowane pod wpływem nacisku jednostkowego wynoszącego 150, 200 i 250 kPa.

Przedstawione na rys. 14 zależności obliczonych wartości naprężenia granicznego od nacisku jednostkowego formowania wykorzystano do oceny dokładności oraz czułości zastosowanych metod obliczeniowych. W analizowanym przypadku wszystkie trzy metody mają bardzo zbliżone wartości współczynników *a* równań regresji, przy czym największą dokładnością cechuje się metoda numeryczna (najmniejszą wartością współczynnika *a*). Przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 17) wykazała jednak brak istotnych różnic w do-

kładności porównywanych metod, czyli pomiędzy metodą regresji a metodą numeryczną. Istotne różnice stwierdzono pomiędzy metodą regresji a metodą maksymalnej krzywizny oraz między metodą numeryczną a metodą maksymalnej krzywizny.



Rys. 14. Zależności naprężeń granicznych od naprężenia formowania określone dla próbek wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach ograniczonej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

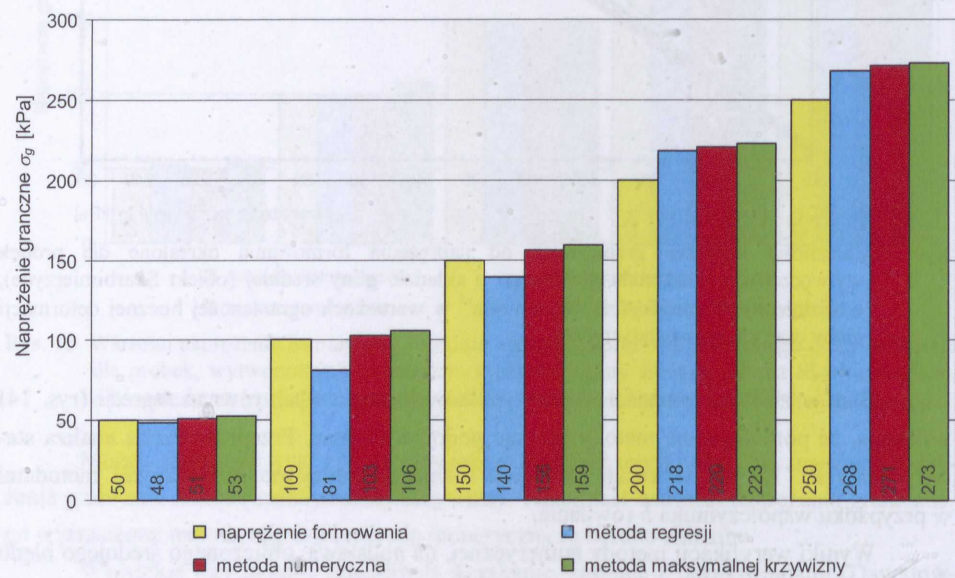
Bardzo zbliżone wartości współczynników kierunkowych równań regresji (rys. 14) wskazują, że porównywane metody cechuje podobna czułość. Przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 17) nie wykazała istotnych różnic pomiędzy porównywanymi metodami w przypadku współczynnika b równania.

Wyniki weryfikacji metody numerycznej, na podstawie obliczonego średniego błędu względnego metody, przedstawiono w tab. 3. Przy odkształcaniu wtórnym gleby z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, w warunkach ograniczonej bocznej deformacji, obliczony średni błąd względny metody był bardzo mały. Jego maksymalna wartość wynosiła 8%, a minimalna – 0%. Błąd opracowanej metody numerycznej w dwóch przypadkach, gdy próbki były formowane pod naciskiem jednostkowym 50 i 100 kPa, wynosił 0%.

Na rysunku 15 przedstawiono średnie wartości naprężenia granicznego wyznaczonego dla próbek glebowych formowanych z piasku gliniastego lekkiego pylastego. Wartości naprężenia granicznego uzyskiwane z wykorzystaniem nowo opracowanej metody numerycznej były większe od wartości obliczanych metodą regresji. Największe wartości naprężenia granicznego uzyskiwano, stosując metodę maksymalnej krzywizny.

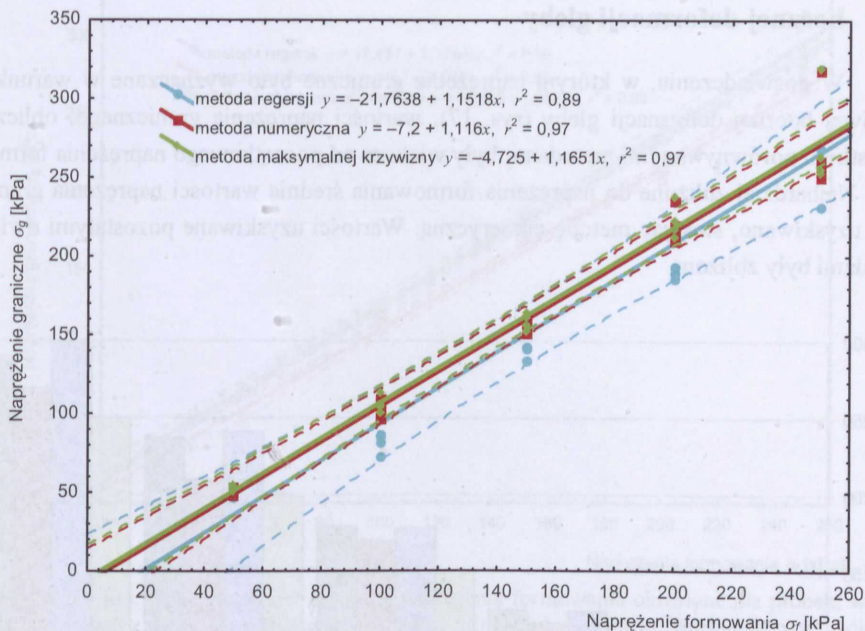
Tabela 3. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształcanych z prędkością 10 mm·min⁻¹ w warunkach ograniczonej bocznej deformacji gleby

Naprężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	4	0	8
100	0	0	8
150	2	1	1
200	3	3	5
250	4	4	2



Rys. 15. Wartości naprężenia formowania i średnie wartości naprężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością 10 mm·min⁻¹ w warunkach ograniczonej bocznej deformacji

Metoda numeryczna oraz metoda maksymalnej krzywizny są bardziej dokładne od metody regresji (rys. 16) – mniejsze są wartości współczynnika *a*. Przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 17) wykazała jednak brak różnic istotnych pomiędzy porównywanymi metodami. Wartości współczynników kierunkowych są natomiast bardzo zbliżone co pozwala stwierdzić, że wszystkie trzy metody są jednakowo czułe, co potwierdza przeprowadzony test *t*-Studenta (tab. 17).



Rys. 16. Zależności naprężeń granicznych od naprężenia formowania określone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylistego (obiekt Lipnik), odkształczanych z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach ograniczonej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

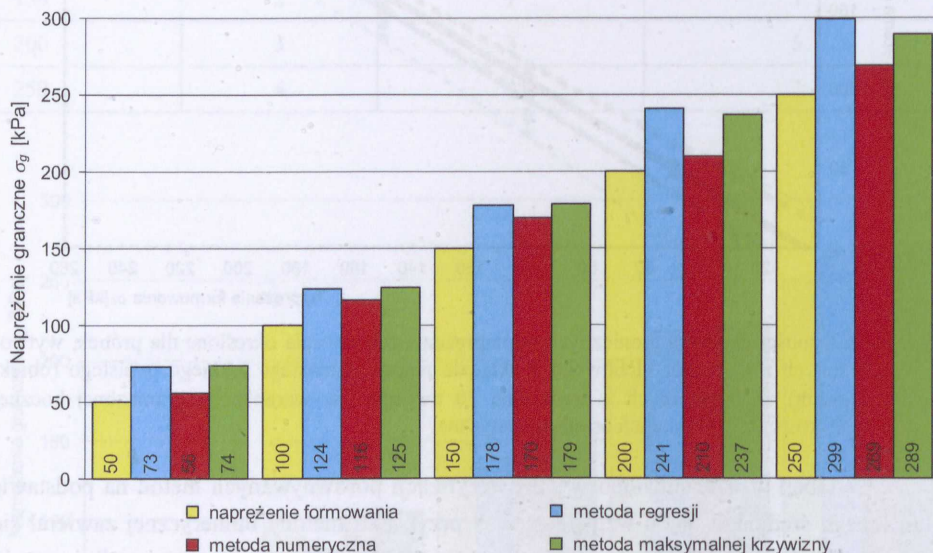
W tabeli 4 przedstawiono wyniki weryfikacji porównywanych metod na podstawie obliczonego średniego błędu względnego. W przypadku metody numerycznej zawierał się on w przedziale od 2 do 10%. Największą wartość (19%) odnotowano w przypadku metody regresji liniowej, gdy próbki glebowe były formowane pod naciskiem jednostkowym wynoszącym 100 kPa.

Tabela 4. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylistego (obiekt Lipnik), odkształczanych z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach ograniczonej bocznej deformacji gleby

Napężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	4	2	6
100	19	3	6
150	6	4	6
200	9	10	11
250	7	8	9

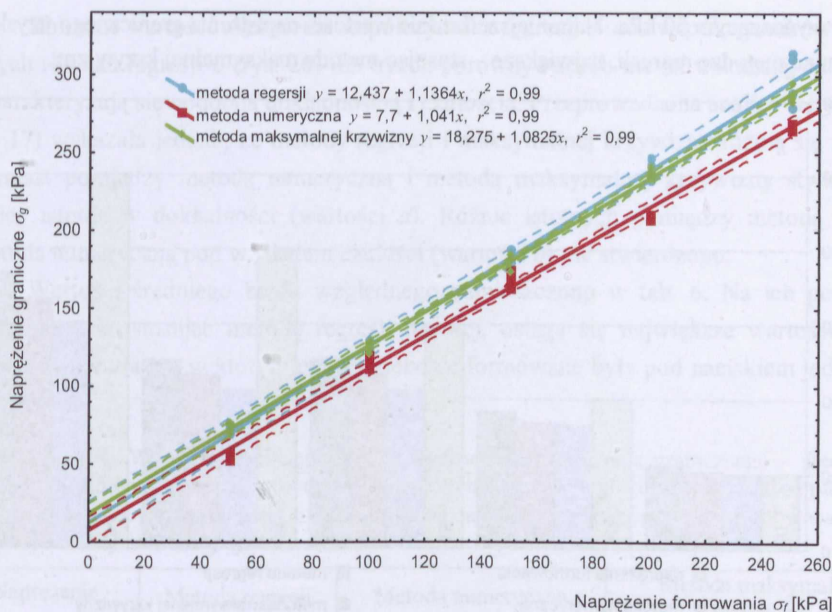
8.3. Wartości naprężenia granicznego uzyskane w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby

W doświadczeniu, w którym naprężenie graniczne było wyznaczane w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby (rys. 17), wartości naprężenia granicznego, obliczane wszystkimi porównywanymi metodami, były większe od początkowego naprężenia formującego. Najbardziej zbliżone do naprężenia formowania średnie wartości naprężenia granicznego uzyskiwano, stosując metodę numeryczną. Wartości uzyskiwane pozostałymi dwiema metodami były zbliżone.



Rys. 17. Wartości naprężenia formowania i średnie wartości naprężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierz), odkształczanych z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji

Wyniki badań przedstawione na rys. 18 pozwalają ocenić trzy porównywane metody wyznaczania naprężenia granicznego gleby. W zakresie nacisków jednostkowych od 50 do 150 kPa porównywane metody nie różnią się między sobą. Różnice pomiędzy metodą numeryczną a pozostałymi dwoma metodami występują w zakresie od 150 do 250 kPa. Metoda numeryczna jest jednak najbardziej dokładna, o czym świadczy stała równania regresji a . Przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 17) wykazała, że nowo opracowana metoda jest istotnie bardziej dokładna od dwóch pozostałych porównywanych z nią metod. Współczynniki kierunkowe dla wszystkich trzech metod są bardzo podobne (rys. 18), jednak przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 17) wykazała, że pomiędzy metodą numeryczną a metodą regresji występują różnice istotne. Różnic takich nie stwierdzono pomiędzy metodą maksymalnej krzywizny a metodą numeryczną oraz pomiędzy metodą maksymalnej krzywizny a metodą regresji.



Rys. 18. Zależności naprężeń granicznych od naprężenia formowania określone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

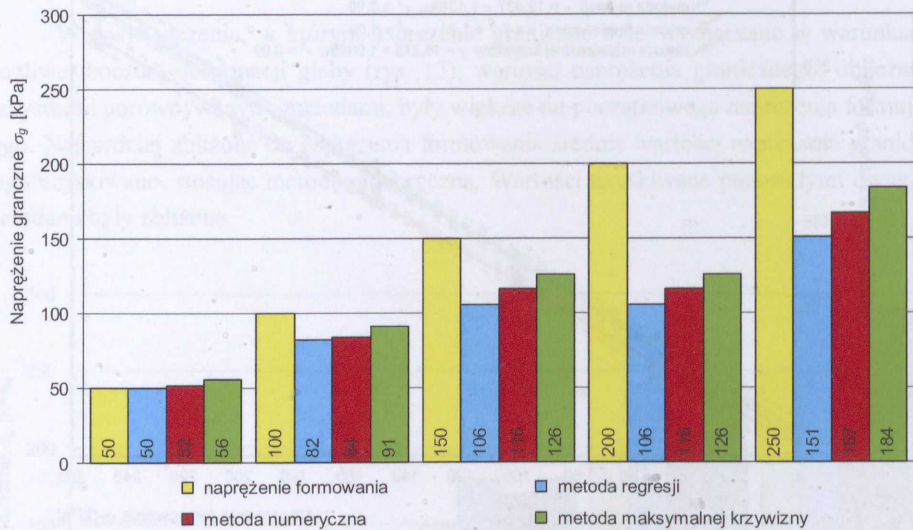
Obliczone dla porównywanych metod średnie błędy względne zamieszczono w tab. 5. Wskazują one również na to, że metoda numeryczna jest metodą najdokładniejszą. Stosując tę metodę, uzyskiwano mniejsze wartości błędu niż stosując porównywane z nią metody.

Tabela 5. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby

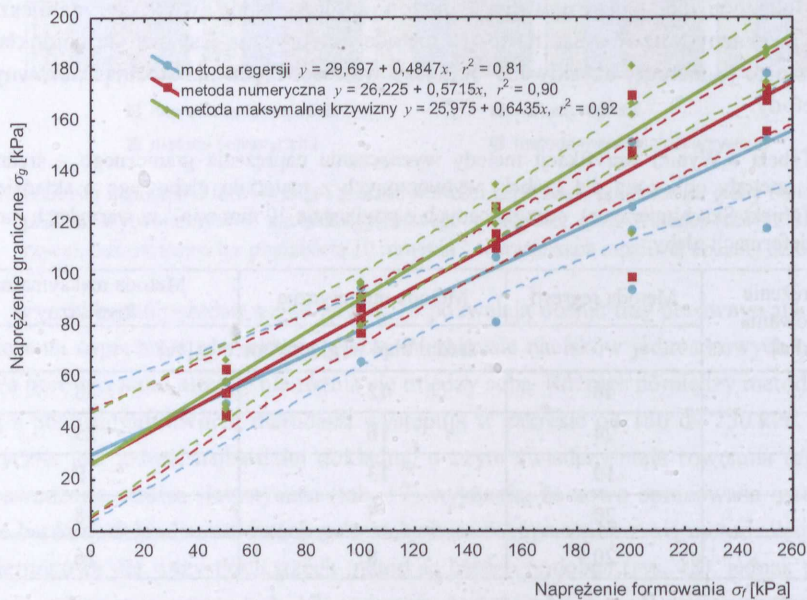
Napężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	46	12	48
100	24	16	25
150	19	13	19
200	20	5	18
250	20	8	16

Uzyskiwane trzema metodami średnie wartości naprężenia granicznego gleby w warunkach możliwej jej bocznej deformacji (rys. 19) są mniejsze od wartości naprężenia formowania. Wyjątkiem jest wariant, w którym próbki glebowe formowano pod naciskiem jednost-

kowym wynoszącym 50 kPa. Najmniejsze średnie wartości naprężenia granicznego uzyskiwano, stosując metodę regresji, największe – stosując metodę maksymalnej krzywizny.



Rys. 19. Wartości naprężenia formowania i średnie wartości naprężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością 10 mm·min⁻¹ w warunkach możliwej bocznej deformacji



Rys. 20. Zależności naprężeń granicznych od naprężenia formowania określone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością 10 mm·min⁻¹ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

Zbliżone wartości odchylenia współczynnika regresji a oraz współczynników kierunkowych równań regresji b (rys. 20) dla trzech porównywanych metod wskazują, że metody te charakteryzują się podobną dokładnością i czułością. Przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 17) wykazała jednak, że metody regresji i maksymalnej krzywizny różnią się istotnie, natomiast pomiędzy metodą numeryczną i metodą maksymalnej krzywizny stwierdzono różnice istotne w dokładności (wartości a). Różnic istotnych pomiędzy metodą regresji a metodą numeryczną pod względem czułości (wartości b) nie stwierdzono.

Wartości średniego błędu względnego zamieszczono w tab. 6. Na ich podstawie stwierdzono, że stosując metodę regresji linowej, osiąga się największe wartości błędu, z wyjątkiem wariantu, w którym próbki glebowe formowane były pod naciskiem jednostkowym 50 kPa.

Tabela 6. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby

Naprężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	0	4	12
100	18	16	9
150	29	23	16
200	39	29	22
250	40	33	26

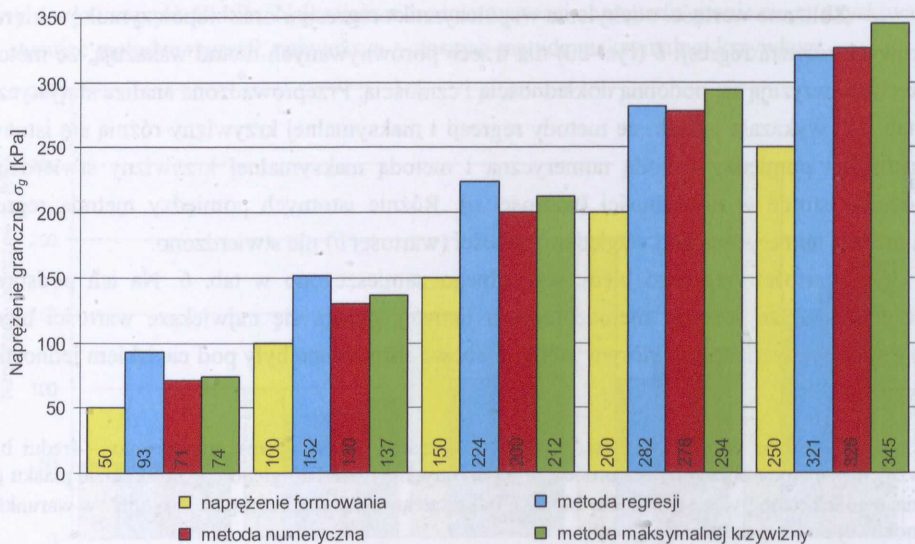
8.4. Wartości naprężenia granicznego uzyskane przy różnych wartościach prędkości odkształcania gleby

8.4.1. Wyniki uzyskane dla próbek wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej

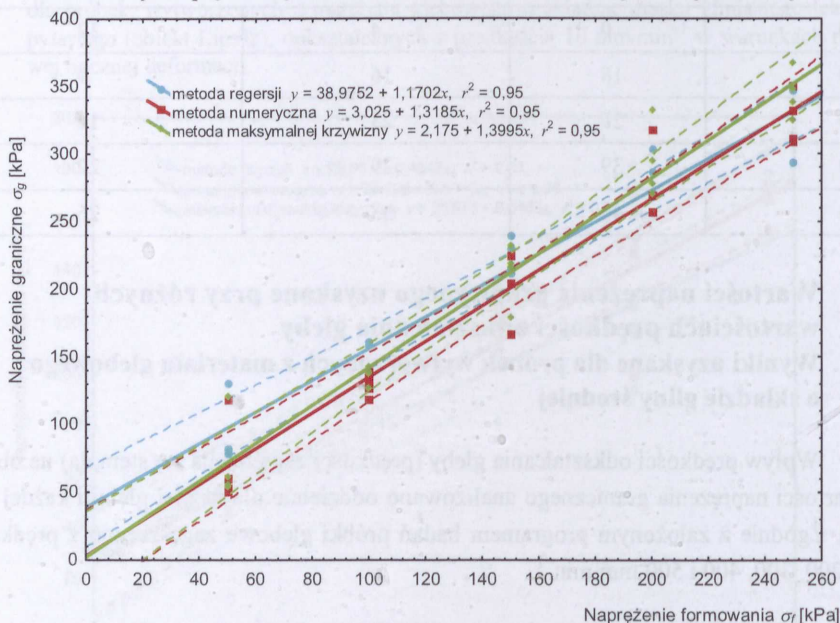
Wpływ prędkości odkształcania gleby (prędkości zagłębiania się stempla) na obliczanie wartości naprężenia granicznego analizowano oddzielnie dla każdej gleby i każdej prędkości. Zgodnie z założonym programem badań próbki glebowe zagęszczano z prędkością: 100, 200, 300, 400 i $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Naprężenie graniczne przy prędkości $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Prawie we wszystkich przypadkach średnie wartości naprężenia granicznego, obliczane metodą numeryczną, są mniejsze i bardziej zbliżone do wartości naprężenia formowania niż w dwóch pozostałych metodach (rys. 21). Średnie wartości naprężenia granicznego, wyznaczone przy prędkości zagęszczania gleby $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, uzyskiwane trzema metodami były większe od wartości naprężenia formowania próbek glebowych.



Rys. 21. Wartości napężenia formowania i średnie wartości napężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierz), odkształczanych z prędkością $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji



Rys. 22. Zależności naprężeń granicznych od napężenia formowania określone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierz), odkształczanych z prędkością $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji oraz ich ocena statystyczna

Uzyskane wyniki (rys. 22) pozwalają stwierdzić, że metoda regresji jest najmniej dokładna od dwóch pozostałych porównywanych metod (wartości a). Przeprowadzona analiza

statystyczna (tab. 17) wykazała istotne różnice pomiędzy metodą regresji a metodą numeryczną. Wartości współczynników kierunkowych równań regresji wskazują, że metoda regresji jest również mniej czuła od metody numerycznej i metody maksymalnej krzywizny. Analiza statystyczna (tab. 17) wykazała istotne różnice pomiędzy metodą regresji a metodą maksymalnej krzywizny.

Na podstawie obliczonych wartości średnich błędów względnych (tab. 7) stwierdzono, że stosując metodę numeryczną, uzyskuje się najmniejsze wartości, z wyjątkiem wariantu, w którym próbki modelowe formowano pod naciskiem jednostkowym wynoszącym 250 kPa.

Tabela 7. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji

Naprężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	86	42	48
100	52	30	37
150	49	33	41
200	41	39	47
250	28	30	38

Podobny rozkład wyników, jak przy prędkości wtórnego odkształcania wynoszącej $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, uzyskiwano przy prędkości: 200, 300, 400 i $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (rys. 23, 25, 27 i 29). Średnie wartości wyznaczanych naprężeń granicznych, uzyskiwane za pomocą trzech porównywanych metod, wzrastały wraz ze wzrostem prędkości odkształcania; są one zgodne z wcześniej uzyskanymi wynikami badań (Śnieg i in. 1999, Mosaddehi i in. 2007b).

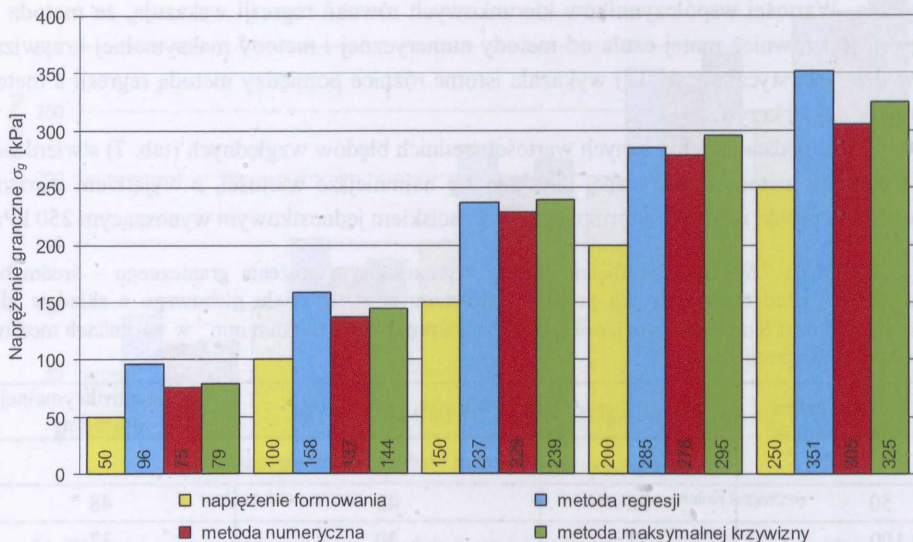
Wyniki analizy statystycznej porównywanych metod wyznaczania naprężenia granicznego gleby, przy różnych wartościach prędkości jej wtórnego zagęszczania, przedstawiono graficznie na rys. 24, 26, 28 oraz 30.

Naprężenie graniczne przy prędkości $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

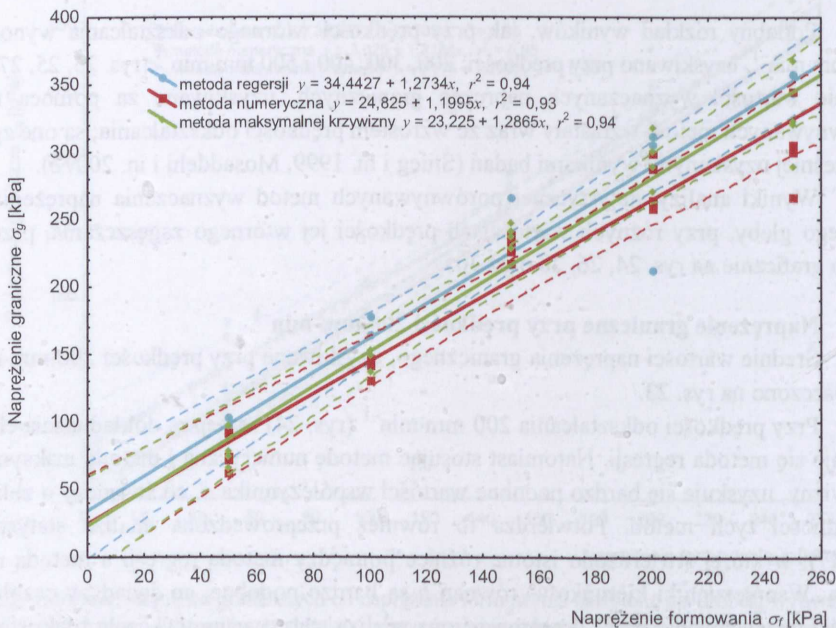
Średnie wartości naprężenia granicznego, uzyskiwane przy prędkości $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, zamieszczono na rys. 23.

Przy prędkości odkształcania $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (rys. 24) mniejszą dokładnością charakteryzuje się metoda regresji. Natomiast stosując metodę numeryczną i metodę maksymalnej krzywizny, uzyskuje się bardzo podobne wartości współczynnika a , co świadczy o zbliżonej dokładności tych metod. Potwierdza to również przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 17), w której stwierdzono istotne różnice pomiędzy metodą regresji a metodą numeryczną. Współczynniki kierunkowe równań b są bardzo podobne, co świadczy o zbliżonej czułości testowanych metod. Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała brak istotnych różnic pomiędzy weryfikowanymi metodami wyznaczania naprężenia granicznego gleby.

W doświadczeniu, w którym próbki modelowe gliny średniej odkształcano z prędkością $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji, średnie błędy względne metody były najmniejsze wówczas, gdy wartości naprężenia granicznego obliczano metodą numeryczną (tab. 8).



Rys. 23. Wartości naprężenia formowania i średnie wartości naprężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji



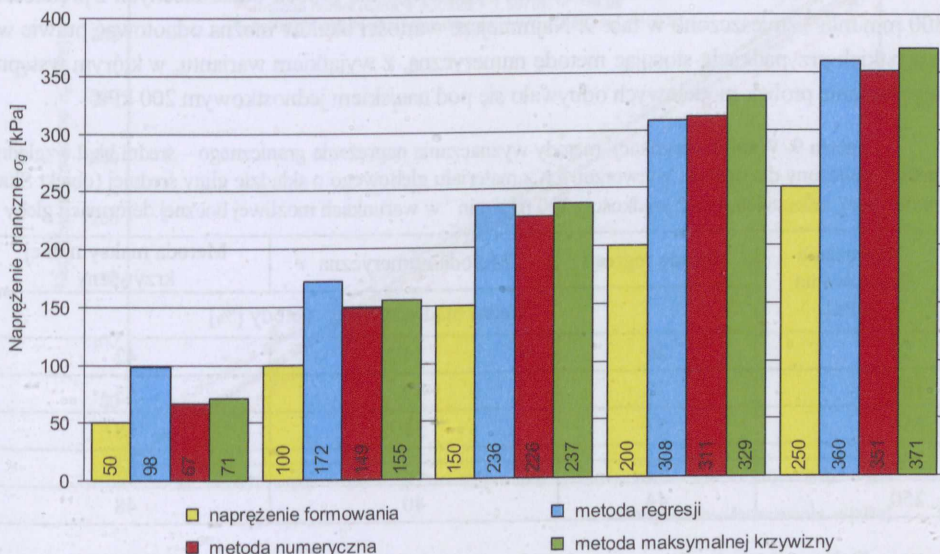
Rys. 24. Zależności naprężeń granicznych, określonych trzema metodami, od naprężenia formowania obliczonego dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

Tabela 8. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji

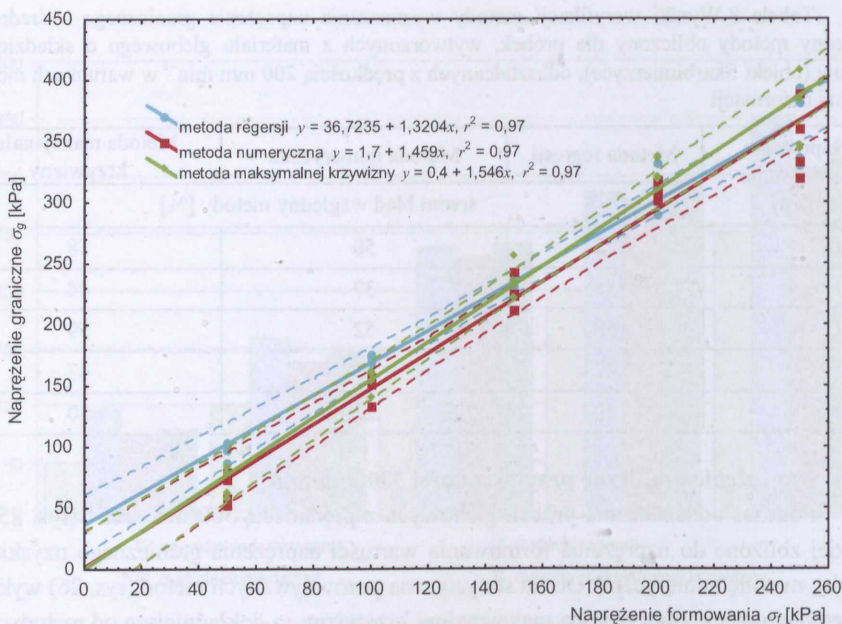
Naprężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	92	50	58
100	58	37	44
150	58	52	59
200	42	39	47
250	40	22	30

Naprężenie graniczne przy prędkości $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Podczas odkształcania próbek glebowych z prędkością $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (rys. 25) najbardziej zbliżone do naprężenia formowania wartości naprężenia granicznego uzyskiwano, stosując metodę numeryczną. Ocena statystyczna porównywanych metod (rys. 26) wykazała, że metoda numeryczna i metoda maksymalnej krzywizny są dokładniejsze od metody regresji. Analiza statystyczna, przeprowadzona za pomocą testu *t*-Studenta (tab. 17), wykazała, że występują różnice istotne w dokładności pomiędzy metodą numeryczną a metodą regresji oraz że metoda maksymalnej krzywizny jest bardziej czuła od metody regresji. Nie stwierdzono różnic istotnych pomiędzy metodą maksymalnej krzywizny a metodą numeryczną.



Rys. 25. Wartości naprężenia formowania i średnie wartości naprężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji



Rys. 26. Zależności naprężeń granicznych od naprężenia formowania określone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształcanych z prędkością $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

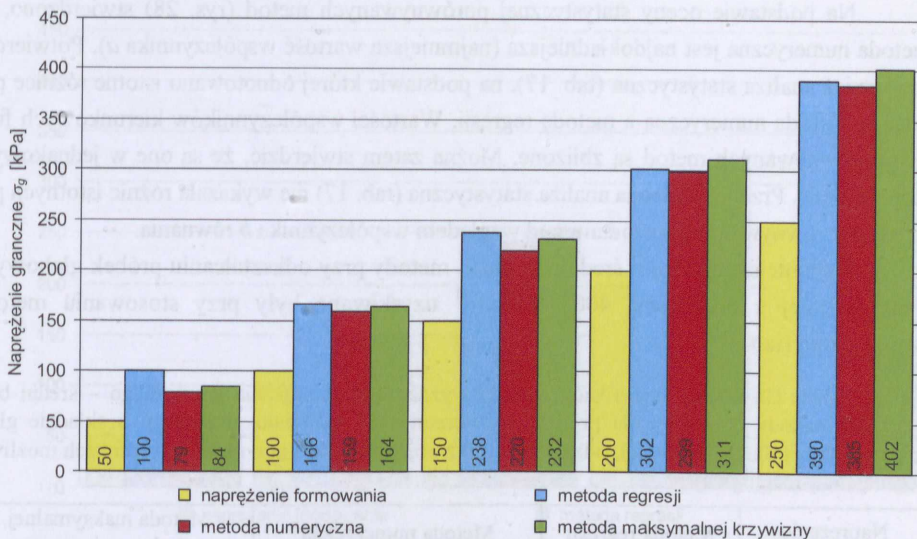
Obliczone wartości średniego błędu względnego dla próbek odkształcanych z prędkością $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ zmieszczono w tab. 9. Najmniejsze wartości błędów można odnotować prawie we wszystkich przypadkach, stosując metodę numeryczną, z wyjątkiem wariantu, w którym wstępne zagęszczanie próbek modelowych odbywało się pod naciskiem jednostkowym 200 kPa.

Tabela 9. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształcanych z prędkością $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby

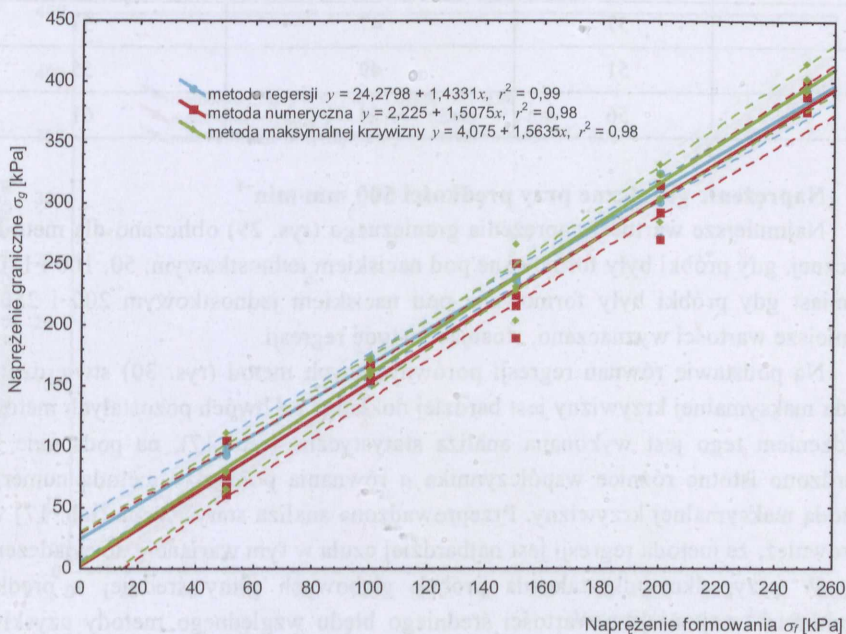
Napężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	96	34	42
100	72	49	55
150	57	51	58
200	54	55	64
250	44	40	48

Naprężenie graniczne przy prędkości $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Również w przypadku odkształcania próbek glebowych z prędkością $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (rys. 27), stosując metodę numeryczną do obliczania naprężenia granicznego, uzyskiwano wyniki najbardziej zbliżone do naprężenia formowania.



Rys. 27. Wartości napężenia formowania i średnie wartości napężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształcanych z prędkością $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji



Rys. 28. Zależności naprężeń granicznych od napężenia formowania określone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształcanych z prędkością $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

Na podstawie oceny statystycznej porównywanych metod (rys. 28) stwierdzono, że metoda numeryczna jest najdokładniejsza (najmniejsza wartość współczynnika a). Potwierdza to również analiza statystyczna (tab. 17), na podstawie której odnotowano istotne różnice pomiędzy metodą numeryczną a metodą regresji. Wartości współczynników kierunkowych funkcji porównywanych metod są zbliżone. Można zatem stwierdzić, że są one w jednakowym stopniu czułe. Przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 17) nie wykazała różnic istotnych pomiędzy porównywanymi metodami pod względem współczynnika b równania.

Najmniejsze wartości średniego błędu metody przy odkształcaniu próbek glebowych gliny średniej z prędkością $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ uzyskiwane były przy stosowaniu metody numerycznej (tab. 10).

Tabela 10. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby

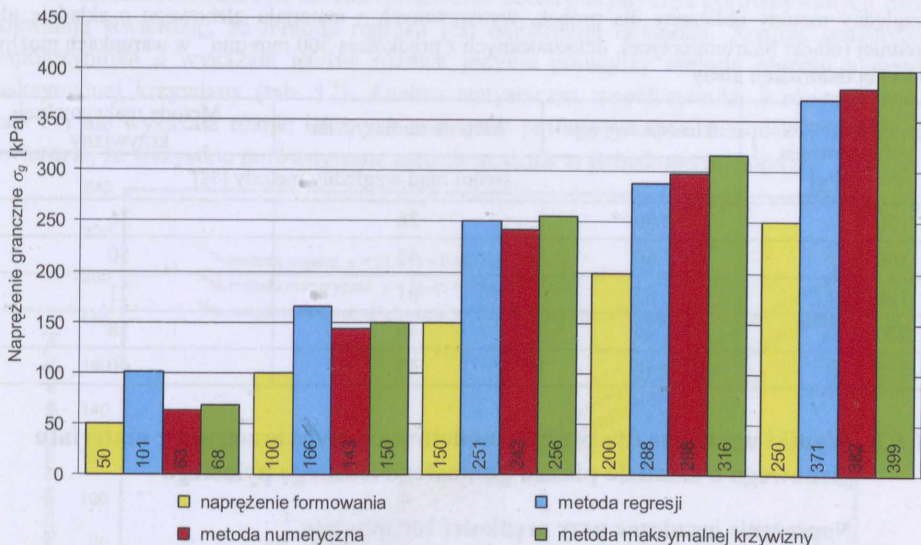
Naprężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	100	58	68
100	66	59	64
150	57	47	57
200	51	49	55
250	56	54	61

Naprężenie graniczne przy prędkości $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

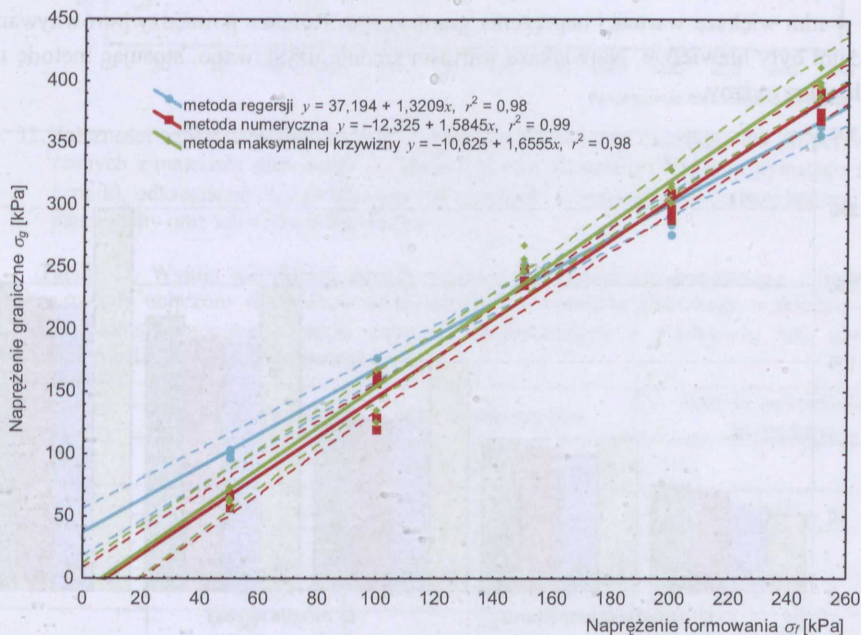
Najmniejsze wartości naprężenia granicznego (rys. 29) obliczano dla metody numerycznej, gdy próbki były formowane pod naciskiem jednostkowym: 50, 100 i 150 kPa. Natomiast gdy próbki były formowane pod naciskiem jednostkowym 200 i 250 kPa, najmniejsze wartości wyznaczano, stosując metodę regresji.

Na podstawie równań regresji porównywanych metod (rys. 30) stwierdzono, że metoda maksymalnej krzywizny jest bardziej dokładna od dwóch pozostałych metod. Potwierdzeniem tego jest wykonana analiza statystyczna (tab. 17), na podstawie której stwierdzono istotne różnice współczynnika a równania pomiędzy metodą numeryczną a metodą maksymalnej krzywizny. Przeprowadzona analiza statystyczna (tab. 17) wykazała również, że metoda regresji jest najbardziej czuła w tym wariancie doświadczenia.

W przypadku odkształcania próbek glebowych gliny średniej z prędkością $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ najmniejsze wartości średniego błędu względnego metody uzyskiwano, stosując metodę numeryczną, w której próbki były formowane pod naciskiem jednostkowym: 50, 100 i 150 kPa. Z kolei przy formowaniu próbek pod naciskiem jednostkowym 200 i 250 kPa najmniejsze wartości błędu względnego notowano, stosując metodę regresji liniowej (tab. 11).



Rys. 29. Wartości napężenia formowania i średnie wartości napężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji



Rys. 30. Zależności naprężeń granicznych od napężenia formowania określone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształczanych z prędkością $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

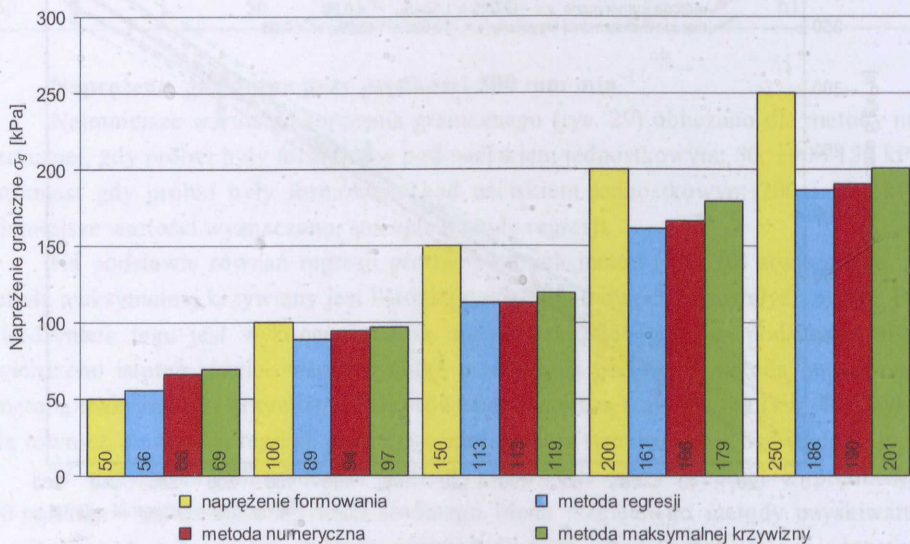
Tabela 11. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie gliny średniej (obiekt Skarbimierzyce), odkształcanych z prędkością $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby

Naprężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	100	26	36
100	66	43	50
150	67	61	71
200	44	49	58
250	48	53	60

8.4.2. Wyniki uzyskane dla próbek modelowych wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego

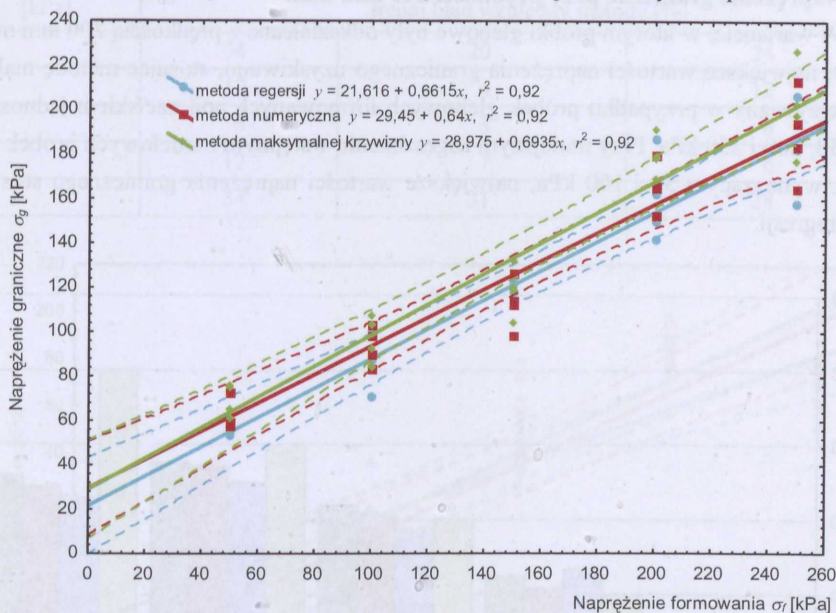
Naprężenie graniczne przy prędkości $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Inne wyniki uzyskiwano w przypadku próbek glebowych z piasku gliniastego lekkiego pylastego (rys. 31). Średnie wartości badanego parametru prawie we wszystkich przypadkach były mniejsze od wartości naprężenia wywieranego podczas formowania próbek glebowych. Wyjątkiem był wariant, w którym naprężenie formowania wynosiło 50 kPa; uzyskiwano w nim większe wartości naprężenia granicznego. Różnice pomiędzy porównywanymi metodami były niewielkie. Największe wartości średnie uzyskiwano, stosując metodę maksymalnej krzywizny.



Rys. 31. Wartości naprężenia formowania i średnie wartości naprężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji

Przedstawione na rys. 32 zależności oraz ocena statystyczna porównywanych metod pozwalają stwierdzić, że metoda regresji jest najbardziej dokładna. Analiza statystyczna współczynnika a wykazała istotne różnice jedynie pomiędzy metodą regresji a metodą maksymalnej krzywizny (tab. 17). Analiza statystyczna współczynnika b równań regresji (tab. 17) nie wykazała różnic istotnych pomiędzy porównywanymi metodami, co pozwala stwierdzić, że wszystkie porównywane metody są czułe w jednakowym stopniu.



Rys. 32. Zależności naprężeń granicznych od naprężenia formowania określone dla próbek wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pyłastego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

Tabela 12. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pyłastego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby

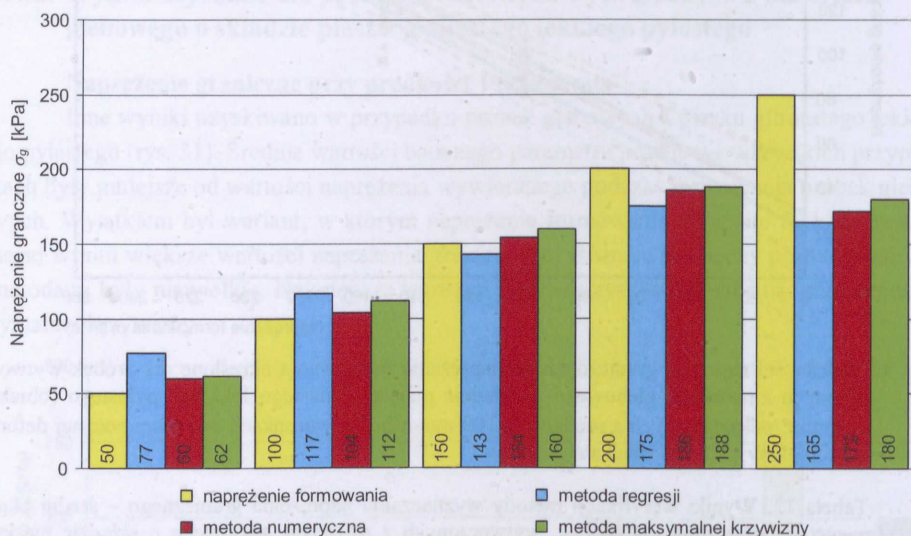
Naprężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	12	32	38
100	11	6	3
150	25	25	21
200	19	17	10
250	26	24	20

Uzyskany średni błąd względny w przypadku odkształcania piasku gliniastego lekkiego pyłastego z prędkością $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (tab. 12) nie wskazuje jednoznacznie, która

z porównywanych metod obarczona jest najmniejszymi błędami. Na korzyść metody numerycznej można zaliczyć to, że tylko w jednym wariancie, w którym próbki modelowe były formowane pod naciskiem jednostkowym 150 kPa, uzyskała ona największą wartość średniego błędu – tak jak metoda regresji.

Naprężenie graniczne przy prędkości $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

W wariancie, w którym próbki glebowe były odkształcane z prędkością $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (rys. 33), największe wartości naprężenia granicznego uzyskiwano, stosując metodę maksymalnej krzywizny w przypadku próbek glebowych formowanych pod naciskiem jednostkowym: 150, 200 i 250 kPa. Przy mniejszym zagęszczeniu wstępnym modelowych próbek glebowych, wynoszącym 50 i 100 kPa, największe wartości naprężenia granicznego stosując metodę regresji.

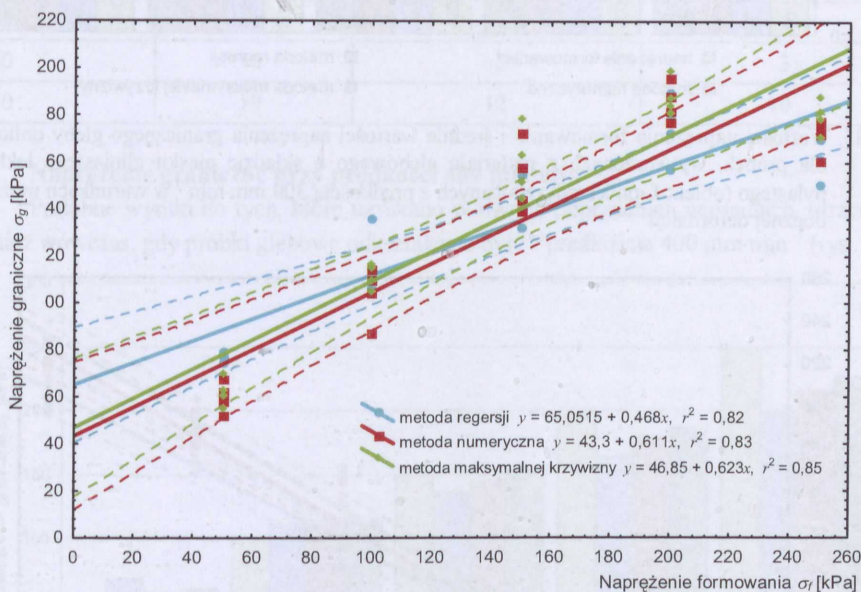


Rys. 33. Wartości naprężenia formowania i średnie wartości naprężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji

Ocena statystyczna weryfikowanych metod (rys. 34) wykazała, że metoda numeryczna oraz metoda maksymalnej krzywizny są metodami bardziej dokładnymi (mniejsza wartość a) od metody regresji. Wszystkie trzy metody charakteryzowały się podobną czułością. Przeprowadzony test statystyczny (tab. 17) wykazał brak istotnych różnic pomiędzy badanymi metodami. Obliczone średnie błędy względne zamieszczono w tab. 13. Dla próbek glebowych formowanych pod naciskiem jednostkowym: 50, 100 i 150 kPa najmniejsze wartości średniego błędu względnie metody uzyskiwano, stosując metodę numeryczną, natomiast w przypadku próbek formowanych pod naciskiem jednostkowym 200 i 250 kPa najmniejszą wartość błędu uzyskiwano, stosując metodę maksymalnej krzywizny.

Tabela 13. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylistego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji

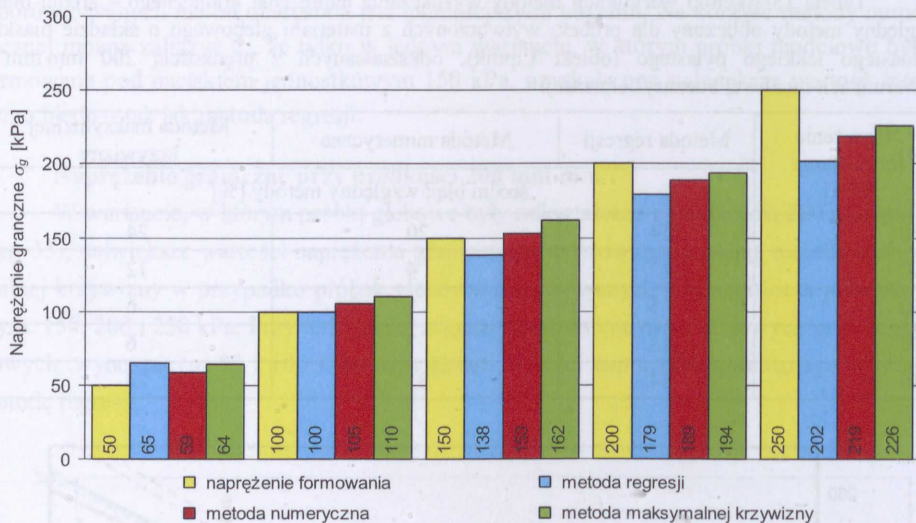
Naprężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	54	20	24
100	17	4	12
150	5	3	6
200	12	7	6
250	34	31	28



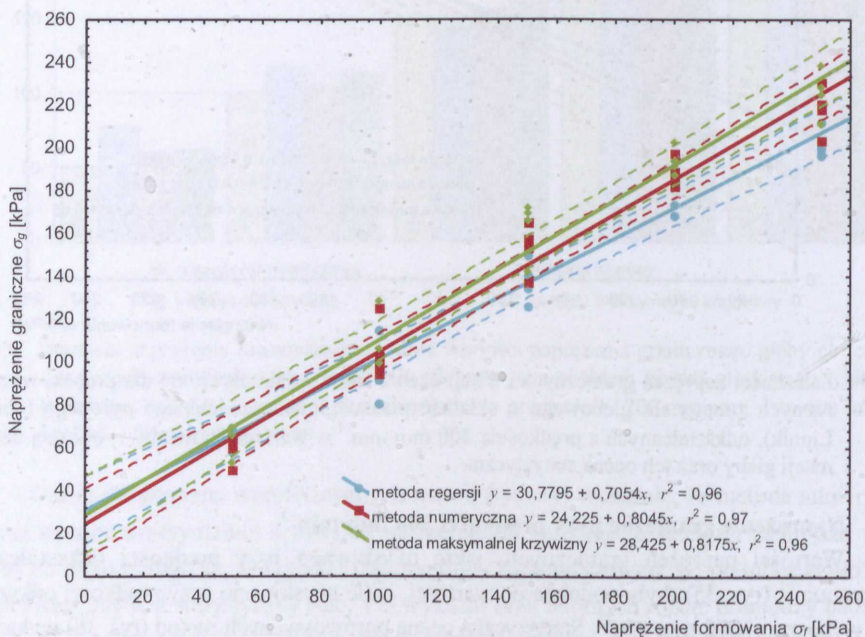
Rys. 34. Zależności naprężeń granicznych od naprężenia formowania określone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylistego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

Naprężenie graniczne przy prędkości $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Wartości naprężeń granicznych, jakie uzyskiwano przy prędkości odkształcania $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (rys. 35), były podobne do wartości, jakie uzyskiwano przy prędkości odkształcania wynoszącej $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Statystyczna ocena porównywanych metod (rys. 36) wykazała największą dokładność metody numerycznej oraz podobną czułość porównywanych metod. Test istotności (tab. 17) wykazał różnice istotne pomiędzy metodą numeryczną a metodą regresji pod względem dokładności porównywanych metod oraz różnice istotne pomiędzy metodą regresji a metodą maksymalnej krzywizny pod względem ich dokładności i czułości.



Rys. 35. Wartości napężenia formowania i średnie wartości napężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształczanych z prędkością $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji



Rys. 36. Zależności naprężeń granicznych od napężenia formowania określone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształczanych z prędkością $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

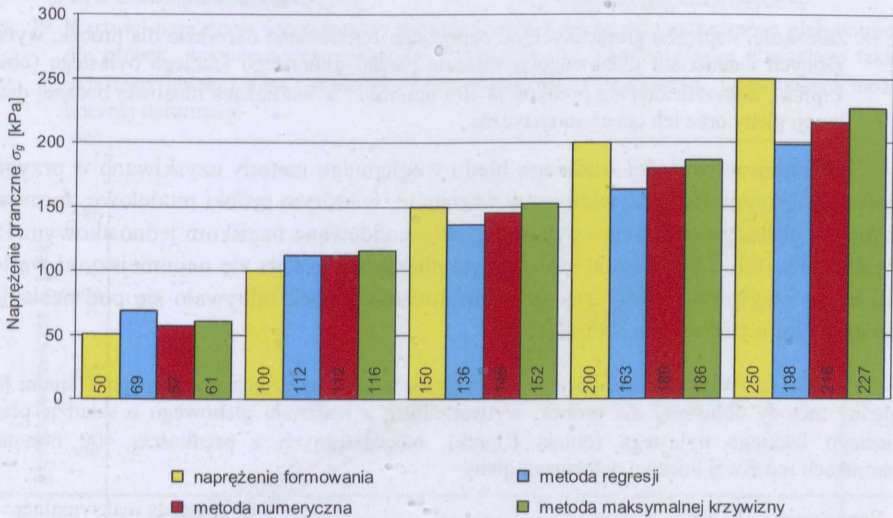
Analizując tab. 14, stwierdzono, że średni błąd względny obliczony dla metody numerycznej w żadnym z rozpatrywanych przypadków nie osiągał największych wartości, w odniesieniu do dwóch porównywanych z nią metod.

Tabela 14. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylistego (obiekt Lipnik), odesktałanych z prędkością 300 mm·min⁻¹ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby

Naprężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	30	18	28
100	0	5	10
150	8	2	8
200	10	5	3
250	19	12	10

Naprężenie graniczne przy prędkości 400 mm·min⁻¹

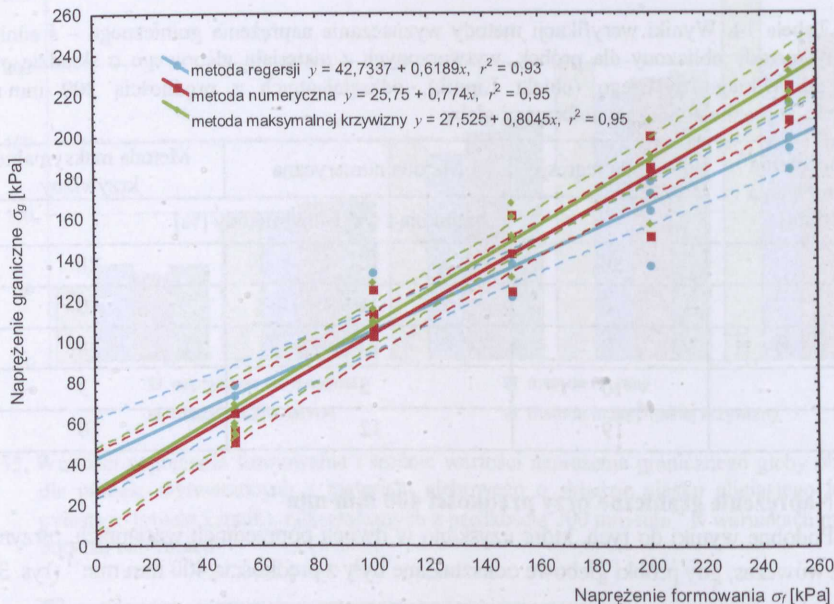
Podobne wyniki do tych, które uzyskano w dwóch poprzednich wariantach, otrzymano również wówczas, gdy próbki glebowe odesktałane były z prędkością 400 mm·min⁻¹ (rys. 37).



Rys. 37. Wartości naprężenia formowania i średnie wartości naprężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylistego (obiekt Lipnik), odesktałanych z prędkością 400 mm·min⁻¹ w warunkach możliwej bocznej deformacji

Podobnie jak w przypadku odesktałania próbek glebowy z prędkością 300 mm·min⁻¹, metoda numeryczna charakteryzuje się największą dokładnością i czułością – porównywalną z metodą maksymalnej krzywizny (rys. 38). Analiza statystyczna (tab. 17) wykazała istotne

różnice pomiędzy metodą regresji a metodą numeryczną pod względem czułości. Wykazano również występowanie różnic istotnych pomiędzy metodą regresji a metodą maksymalnej krzywizny pod względem dokładności oraz czułości.



Rys. 38. Zależności naprężeń granicznych od napężenia formowania określone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształczanych z prędkością 400 mm·min⁻¹ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

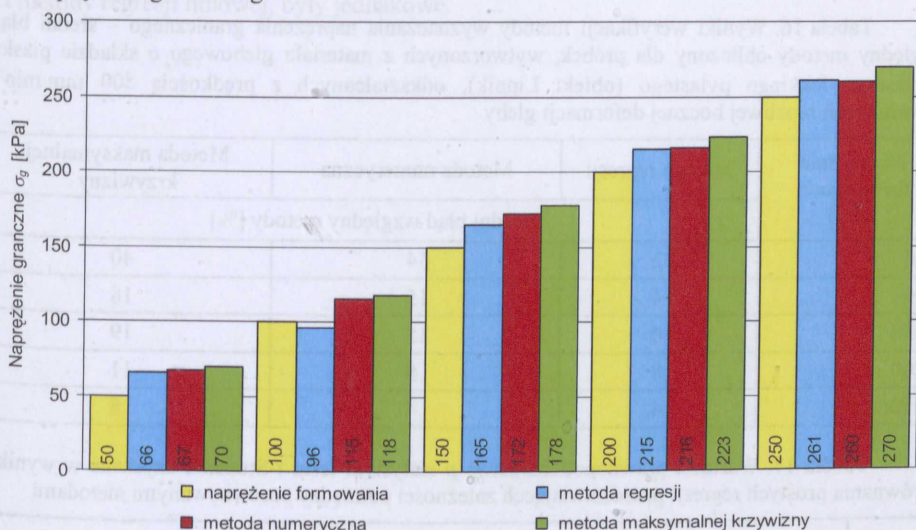
Najmniejsze wartości średniego błędu względnego metody uzyskiwano w przypadku metody maksymalnej krzywizny – w wariancie, w którym próbki modelowe, formowane z piasku gliniastego lekkiego pylastego, były poddawane naciskom jednostkowym: 150, 200 i 250 kPa (tab. 15). Metoda numeryczna charakteryzowała się najmniejszymi wartościami błędu względnego wówczas, gdy formowanie próbek odbywało się pod naciskiem jednostkowym wynoszącym 50 i 100 kPa.

Tabela 15. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania napężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształczanych z prędkością 400 mm·min⁻¹ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby

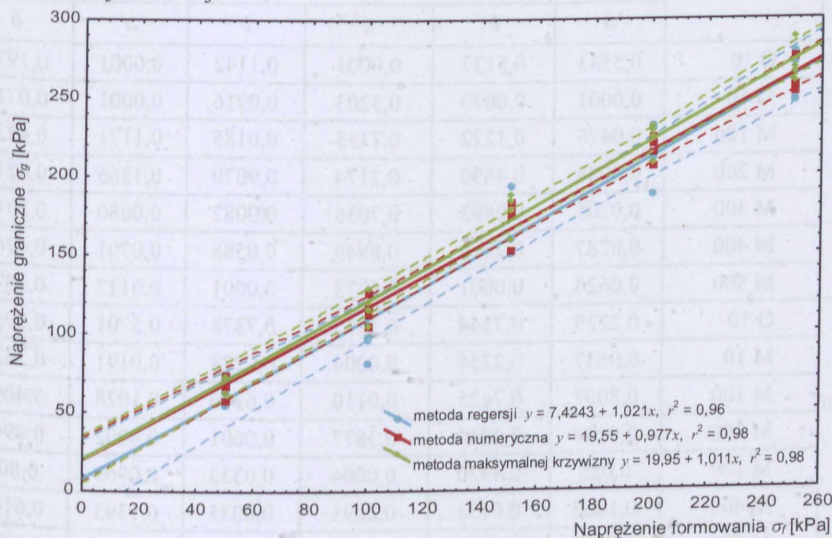
Napężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	38	14	22
100	12	12	16
150	9	3	1
200	18	10	7
250	21	14	9

Napężenie graniczne przy prędkości 500 mm·min⁻¹

W przypadku odkształcania próbek glebowych z prędkością 500 mm·min⁻¹ (rys. 39) prawie wszystkie średnie wartości obliczonych naprężeń granicznych były większe od wartości naprężeń formowania próbek. Jedynie wyznaczając napężenie graniczne metodą regresji, przy napężeniu formowania wynoszącym 100 kPa, uzyskano mniejszą średnią wartość naprężenia granicznego.



Rys. 39. Wartości naprężenia formowania i średnie wartości naprężenia granicznego gleby obliczone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością 500 mm·min⁻¹ w warunkach możliwej bocznej deformacji



Rys. 40. Zależności naprężeń granicznych od naprężenia formowania określone dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością 500 mm·min⁻¹ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby oraz ich ocena statystyczna

Ocena statystyczna weryfikowanych metod (rys. 40) wykazała, że metoda regresji jest najdokładniejsza. Wszystkie trzy porównywane metody charakteryzują się bardzo podobną czułością. Przeprowadzony test statystyczny istotności (tab. 17) wykazał różnice istotne tylko w przypadku dokładności porównywanych metod – pomiędzy metodą regresji a metodą maksymalnej krzywizny.

Tabela 16. Wyniki weryfikacji metody wyznaczania naprężenia granicznego – średni błąd względny metody obliczony dla próbek, wytworzonych z materiału glebowego o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego (obiekt Lipnik), odkształcanych z prędkością 500 mm·min⁻¹ w warunkach możliwej bocznej deformacji gleby

Naprężenie formowania [kPa]	Metoda regresji	Metoda numeryczna	Metoda maksymalnej krzywizny
	średni błąd względny metody [%]		
50	32	34	40
100	4	15	18
150	10	15	19
200	8	8	11
250	4	4	8

Tabela 17. Wartości prawdopodobieństwa p statystyki testu t -Studenta uzyskane w wyniku porównania prostych regresji przedstawiających zależności pomiędzy porównywanymi metodami

Gleba	Wariant doświadczeń	Metody					
		R–N		R–K		N–K	
		współczynniki równania prostej					
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Gлина średnia (gs)	O 10	0,5533	0,5137	0,0001	0,1142	0,0001	0,1970
	M 10	0,0001	0,0070	0,3203	0,0916	0,0001	0,0717
	M 100	0,0478	0,1222	0,7135	0,0185	0,1171	0,4235
	M 200	0,0088	0,4899	0,2174	0,9070	0,1366	0,4211
	M 300	0,0205	0,0893	0,7036	0,0082	0,0680	0,3318
	M 400	0,0287	0,2806	0,8949	0,0588	0,0701	0,4788
	M 500	0,0626	0,0001	0,6773	0,0001	0,0117	0,2872
Piasek gliniasty lekki pylasty (pglp)	O 10	0,2239	0,7344	0,1215	0,7378	0,5701	0,9938
	M 10	0,0637	0,2254	0,0004	0,0278	0,0191	0,2422
	M 100	0,3007	0,7425	0,0110	0,6206	0,1028	0,4093
	M 200	0,9737	0,0934	0,3877	0,0601	0,4002	0,8948
	M 300	0,025	0,4920	0,0004	0,0332	0,0969	0,803
	M 400	0,1662	0,0133	0,0095	0,0035	0,1393	0,6145
	M 500	0,2000	0,4731	0,0140	0,8773	0,0821	0,4422

O – ograniczona deformacja boczna, M – możliwa deformacja boczna, R – metoda regresji, N – metoda numeryczna, K – metoda maksymalnej krzywizny.

$p \leq 0,05$ oznacza, że w przypadku współczynników równań (a , b) różnice są istotne.

Metoda regresji liniowej w przypadku odkształcania modelowych próbek glebowych z prędkością $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ charakteryzowała się najmniejszymi wartościami średniego błędu względnego (tab. 16). Największe wartości błędu względnego odnotowano, stosując metodę maksymalnej krzywizny. Natomiast przy formowaniu próbek glebowych pod naciskiem jednostkowym 200 i 250 kPa średnie błędy względne, wyznaczone dla metody numerycznej i metody regresji liniowej, były jednakowe.

9. Podsumowanie

W niniejszej pracy skoncentrowano się głównie nad opracowaniem nowej metody obliczania wartości naprężenia granicznego gleby. Przyjęto, że można określać ten parametr na podstawie analizy przebiegu zależności kąta α , jaki tworzy styczna wielomianu aproksymującego doświadczalne dane pomiarowe z osią poziomą odkształcania gleby OX. Wyniki uzyskiwane przy użyciu nowej metody obliczania naprężenia granicznego gleby są zbliżone z wynikami uzyskiwanymi przez innych badaczy (Dawidowski i in. 2001, Gregory i in. 2006, Błażejczak 2010). Opracowana metoda wyznaczania naprężenia granicznego gleby została zweryfikowana doświadczalnie na podstawie założenia, że obliczane wartości naprężenia granicznego powinny być podobne do wartości nacisków jednostkowych wstępnych, które wynosiły 50, 100, 150, 200 i 250 kPa. Weryfikacja polegała również na porównaniu wyników uzyskiwanych metodą numeryczną z wynikami uzyskiwanymi przy użyciu dwóch innych metod – metody regresji oraz metody maksymalnej krzywizny.

Porównanie metod wyznaczania naprężenia granicznego gleby w warunkach ograniczonej bocznej deformacji, uzyskiwanych w przypadku próbek glebowych o składzie granulometrycznym gliny średniej, wykazało, że metoda numeryczna jest dokładniejsza od metody regresji i metody maksymalnej krzywizny. Natomiast wyniki, uzyskane dla próbek glebowych o składzie piasku gliniastego lekkiego pylastego, wykazały, że metoda numeryczna i metoda maksymalnej krzywizny są znacznie dokładniejsze od metody regresji. Analizując wyniki naprężenia granicznego, wyznaczanego w warunkach, w których zagęszczana gleba ma możliwość przemieszczania się na boki, stwierdzono, że w przypadku gliny średniej metoda numeryczna jest najdokładniejsza oraz porównywalnie czuła jak w przypadku stosowania pozostałych metod. Wyniki, które uzyskiwano w tych warunkach w przypadku próbek modelowych z piasku gliniastego lekkiego pylastego, wykazały, że wszystkie trzy metody są mało dokładne. Należy jednak zauważyć, że metoda numeryczna i metoda maksymalnej krzywizny charakteryzują się podobną dokładnością – większą niż metoda regresji.

W wariancie, w którym próbki glebowe utworzone z gliny średniej zagęszczano wtórnie z różną prędkością, w warunkach możliwej bocznej deformacji, wykazano, że dokładność metody numerycznej była zbliżona do dokładności metody maksymalnej krzywizny, przy czym czułość obu tych metod była prawie jednakowa. Metoda regresji liniowej, przy wszystkich stosowanych wartościach prędkości odkształcania (od 100 do 500 mm·min⁻¹), okazała się metodą najmniej dokładną.

Porównując wyniki naprężenia granicznego, uzyskanego metodą numeryczną, z wynikami uzyskanymi przy stosowaniu dwóch pozostałych metod, stwierdzono, że w przypadku zagęszczania piasku gliniastego lekkiego pylastego metoda numeryczna oraz metoda maksymalnej krzywizny charakteryzują się bardzo podobną dokładnością i czułością. Zaznaczyć należy jednak, że metoda numeryczna w większości przypadków była bardziej dokładna od metody

maksymalnej krzywizny. W dwóch wariantach, wówczas gdy wtórne odkształcanie odbywało się z prędkością 100 oraz 500 mm·min⁻¹, bardziej dokładna była metoda regresji.

Należy również zwrócić uwagę na bardzo duże wartości współczynnika determinacji uzyskiwanych wyników, który zawierał się w przedziale od 0,81 do 0,99; najczęściej przyjmował on wartość powyżej 0,90.

Metodę numeryczną porównywano również z metodą regresji liniowej oraz metodą maksymalnej krzywizny na podstawie obliczonych wartości średniego błędu względnego metody. Prawie we wszystkich rozpatrywanych wariantach doświadczeń średni błąd względny, wyznaczony dla metody numerycznej, nie uzyskiwał największych wartości, w odniesieniu do pozostałych dwóch porównywanych metod. Na podstawie równania (10) stwierdzono, że w przypadku 83% próbek wytworzonych z gliny średniej najmniejszy błąd średni uzyskiwano, stosując metodę numeryczną, w przypadku 14% próbek – stosując metodę maksymalnej krzywizny, a tylko w przypadku 3% próbek – stosując metodę regresji liniowej. Dla próbek wytworzonych z piasku gliniastego lekkiego pylastego najmniejszy błąd średni uzyskano w przypadku 34% próbek, stosując metodę numeryczną, w przypadku 43% próbek – stosując metodę maksymalnej krzywizny, a w przypadku 23% próbek – stosując metodę regresji liniowej. Należy jednak zaznaczyć, że wartości naprężenia granicznego, obliczane metodą maksymalnej krzywizny, zawsze były większe niż w przypadku stosowania metody numerycznej. Wartości naprężenia granicznego, uzyskane dla próbek modelowych formowanych z piasku gliniastego lekkiego pylastego (pglp) i odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, były prawie zawsze mniejsze od wartości naprężenia formowania, niezależnie od zastosowanej metody obliczeń, czego można było się spodziewać. Gleba o takim składzie, w porównaniu z pozostałym używanym w badaniach materiałem, cechuje się stosunkowo dużą przepuszczalnością wodną, przy czym wraz ze wzrostem zdolności filtracyjnych zmniejsza się opór gleby na zagęszczanie (Wiłun 2003). Podczas wtórnego odkształcania uformowanych z takiego materiału próbek modelowych, w warunkach możliwej bocznej deformacji, wpływ oddziaływania wody na opór zagęszczania próbek mógł być zatem mniejszy, ponieważ przepływała ona w obrębie materiału glebowego.

10. Wnioski

1. Opracowana metoda wyznaczania naprężenia granicznego gleby charakteryzuje się dużą obiektywnością, prostą technologią pomiaru i może być w przyszłości stosowana w zautomatyzowanych urządzeniach pomiarowych.

2. Wyniki uzyskane za pomocą opracowanej metody kształtują się podobnie pod względem tendencji zmian jak wyniki uzyskane za pomocą porównywanych z nią metod. Metoda numeryczna charakteryzuje się podobną dokładnością i czułością jak metoda maksymalnej krzywizny oraz większą dokładnością niż metoda regresji liniowej.

3. Niezależnie od gatunku gleby, jaki był używany w doświadczeniach, a także niezależnie od warunków i prędkości odkształcania próbek opracowana metoda pozwala na uzyskiwanie wartości naprężenia granicznego bardziej zbliżonych do wartości naprężenia formowania próbek – wartości oczekiwanych, w większości mniejszych od wartości wyznaczanych przy użyciu pozostałych dwóch metod. W porównaniu z często stosowaną klasyczną metodą regresji liniowej oraz z metodą maksymalnej krzywizny naprężenie graniczne badanych gleb, obliczane przy zastosowaniu metody numerycznej, było obciążone w około 60% najmniejszym średnim błędem względnym.

4. Szczególnie korzystne okazało się stosowanie metody numerycznej do oceny wartości naprężenia granicznego gliny średniej, która jest bardzo podatna na trwałe zagęszczenie. Ponad 85% wyników obliczeń naprężenia granicznego, wykonanych przy użyciu metody numerycznej, było najbardziej zbliżonych do wartości naprężeń formujących. Można na tej podstawie sądzić, że metoda ta będzie skuteczna również w przypadku innych gatunków gleb, o podobnej lub większej zawartości cząstek spławialnych, charakteryzujących ciężkość składu granulometrycznego.

Załącznik A. Algorytm obliczania naprężeń granicznego gleby opracowany w programie Matlab

Wprowadzić dane do tabeli danych (x – w pierwszej kolumnie, y – w drugiej kolumnie).

data =

0.01	1.60
0.02	5.83
0.03	1.75
0.04	

J = size

[Y = J(2)

n = rows(data) /

W tabeli dane dotyczącej obciążenia (naprężenia) podziału, natomiast, natomiast / 100 – czyli do razy większe.

Załączniki

Wprowadzić dane do tabeli danych.

1. 1. 1.

Wage k = 4 – i domać tak, aby na początku wykreślić wykresy były jak najmniej (zależy o bieżącej).

Liczba par danych

n = 598

Z = regress(X,Y,4)

Wykresy linii trendu (wielomian stopnia 4).

fitz = fit(x,X',y,x)

coef = coeffs(n,3,'angle(2) = 1,5,0)

Wielomianki wielomiany

coef = [1.39e-13 1.35e-022 6.92e-10 -4.76e-10 -3.32e-10 2.41e-10]

Obliczenie kątów $\alpha = \alpha(x)$

$$\alpha = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = 1.617$$

Algorytm obliczeniowy dla naprężeń granicznych podanego opracowano w programie Matlab

Załącznik A. Algorytm obliczania naprężenia granicznego gleby opracowany w programie Mathcad ¹

Wstawić dane do tabeli *data* (x – w pierwszej kolumnie, y – w drugiej kolumnie)

data: =

0.01	3.60
0.02	5.83
0.03	7.78
0.04	...

$J := data^{(0)}$

$Y := data^{(1)}$

$n := \text{rows}(\text{data})$

W tabeli dane dotyczące odkształcenia (J) podano w setnych milimetra, natomiast $J \cdot 100$ – czyli sto razy większe.

Wstawić stopień wielomianu:

$k := 6$

Uwaga: $k = 4 - 7$ dobrać tak, aby na poniższym wykresie reszty były jak najmniejsze i aby R^2 był równy 1.

Liczba par danych:

$n = 598$

$z := \text{regress}(X, Y, k)$

Polynomial fitting function: (wielomian aproksymujący)

$\text{fit}(x) := \text{interp}(z, X, Y, x)$

$\text{coeffs} := \text{submatrix}(z, 3, \text{lenght}(z) - 1, 0, 0)$

Współczynniki wielomianu

$\text{coeffs}^T = (-13.496 \quad 4.539 \quad -0.022 \quad 5.802 \times 10^{-5} \quad -4.769 \times 10^{-8} \quad -5.152 \times 10^{-11} \quad 8.141 \times 10^{-14})$

Odchylenie standardowe reszt

$$\sqrt{\frac{1}{n - k - 1} \cdot \sum (Y - \text{fit}(X))^2} = 1.619$$

¹ Algorytm obliczeniowy dla stopnia wielomianu równego 6 wygenerowano w programie Mathcad.

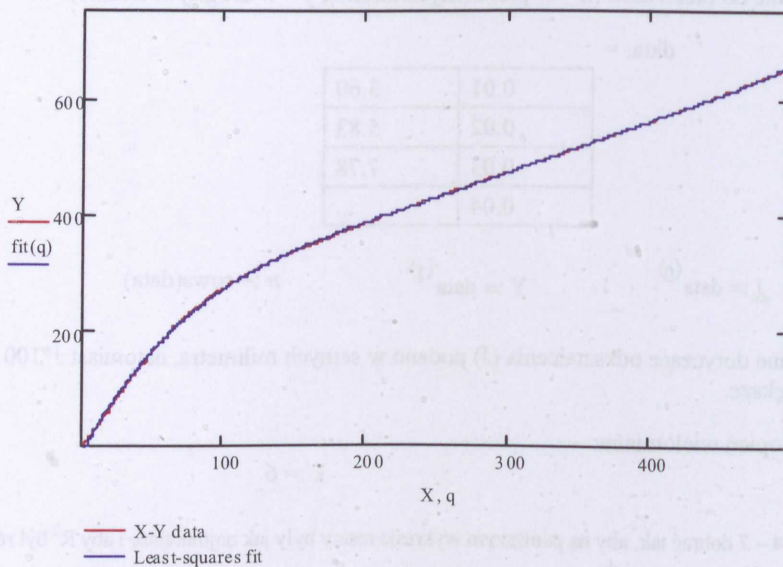
$$R^2 = \frac{\sum (\text{fit}(X) - \text{mean}(Y))^2}{\sum (Y - \text{mean}(Y))^2} = 1$$

$$\text{scale} := \max(|\text{fit}(X) - Y|) \cdot 1.1$$

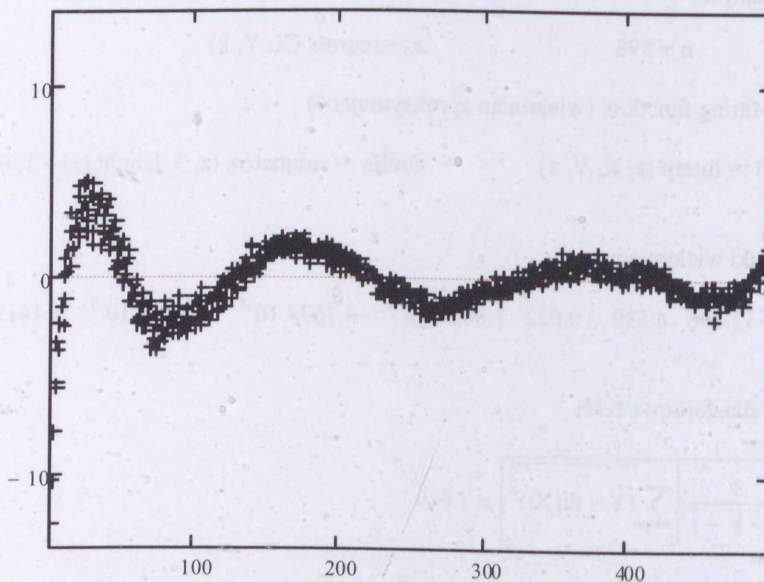
Liczba stopni swobody:

$$n - k - 1 = 591$$

Polynomial Regression of Y on X



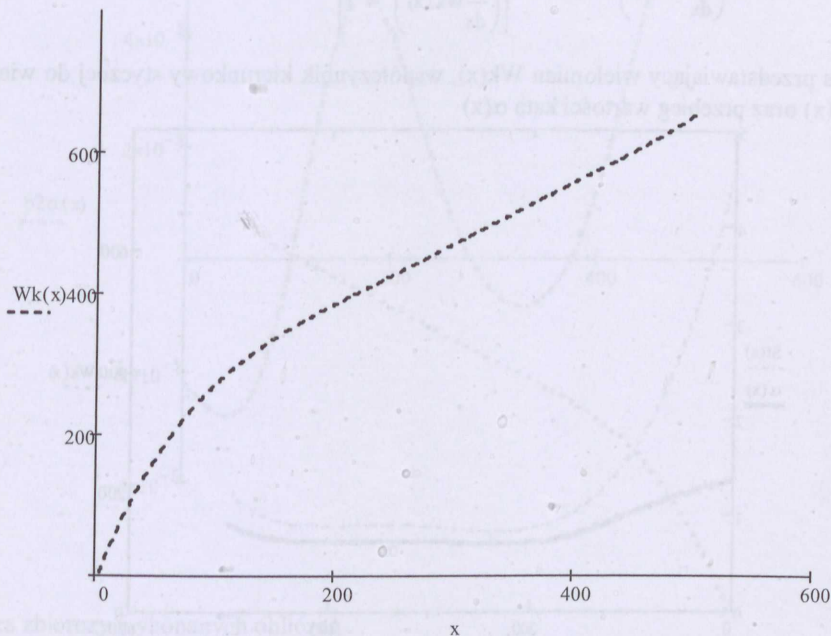
Residual Plot



Wielomian aproksymujący

$$W_k(x) := \text{fit}(x)$$

$$x := 0, 1..501$$



Współczynnik kierunkowy stycznej do wielomianu (pierwsza pochodna):

$$St(x) := \frac{d}{dx} W_k(x)$$

Kąt pomiędzy styczną a osią O-X:

$$\alpha(x) := \text{atan}\left(\frac{d}{dx} W_k(x)\right)$$

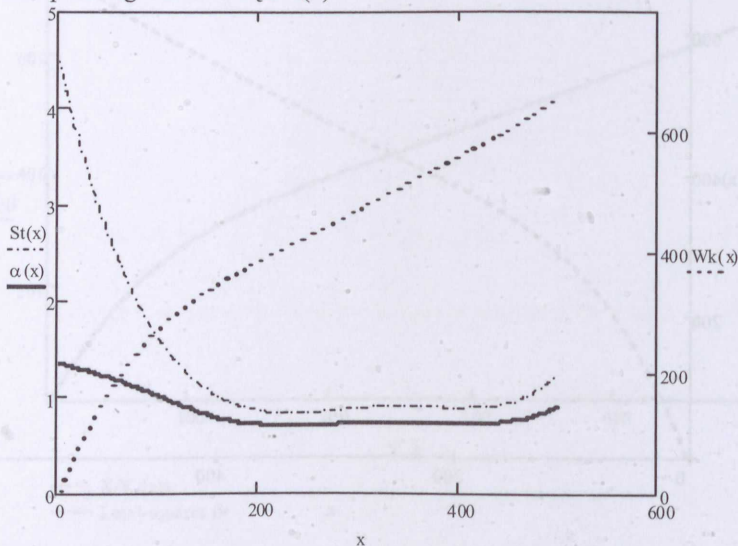
Współczynnik kierunkowy stycznej do krzywej $\alpha(x)$ (pierwsza pochodna funkcji $\alpha(x)$):

$$p1\alpha(x) := \frac{\frac{d^2}{dx^2} W_k(x)}{\left(\frac{d}{dx} W_k(x)\right)^2 + 1}$$

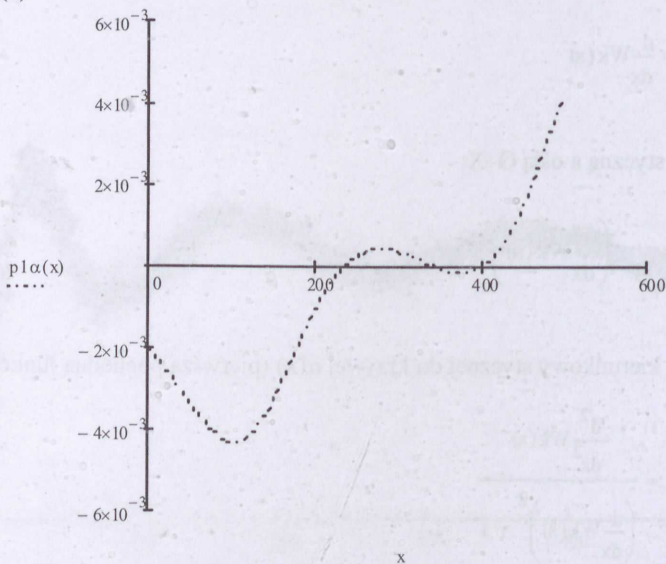
Druaga pochodna funkcji $\alpha(x)$

$$p2\alpha(x) := \frac{\frac{d^3}{dx^3} Wk(x)}{\left(\frac{d}{dx} Wk(x)\right)^2 + 1} - \frac{2 \cdot \frac{d}{dx} Wk(x) \cdot \left(\frac{d^2}{dx^2} Wk(x)\right)^2}{\left[\left(\frac{d}{dx} Wk(x)\right)^2 + 1\right]^2}$$

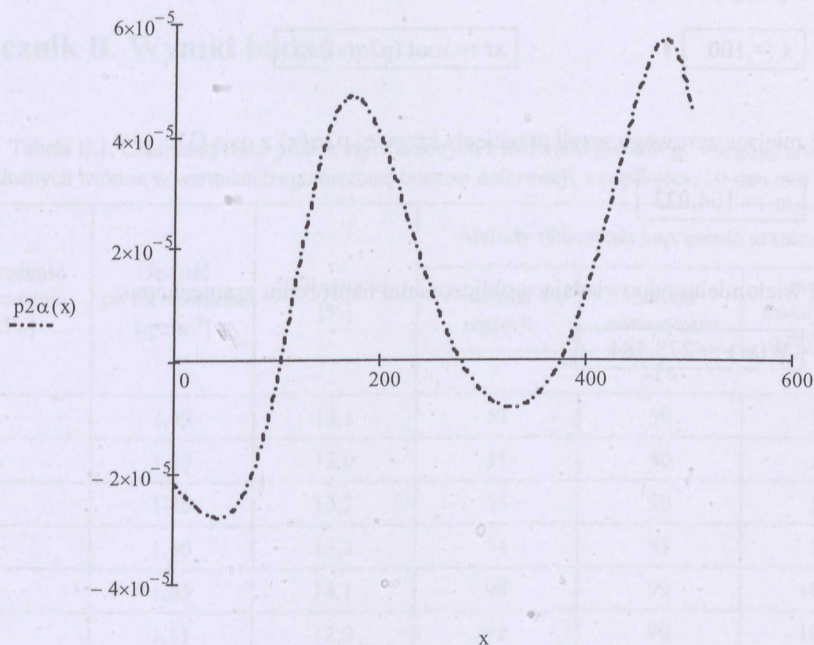
Wykres przedstawiający wielomian $Wk(x)$, współczynnik kierunkowy stycznej do wielomianu $Wk(x)$ oraz przebieg wartości kąta $\alpha(x)$



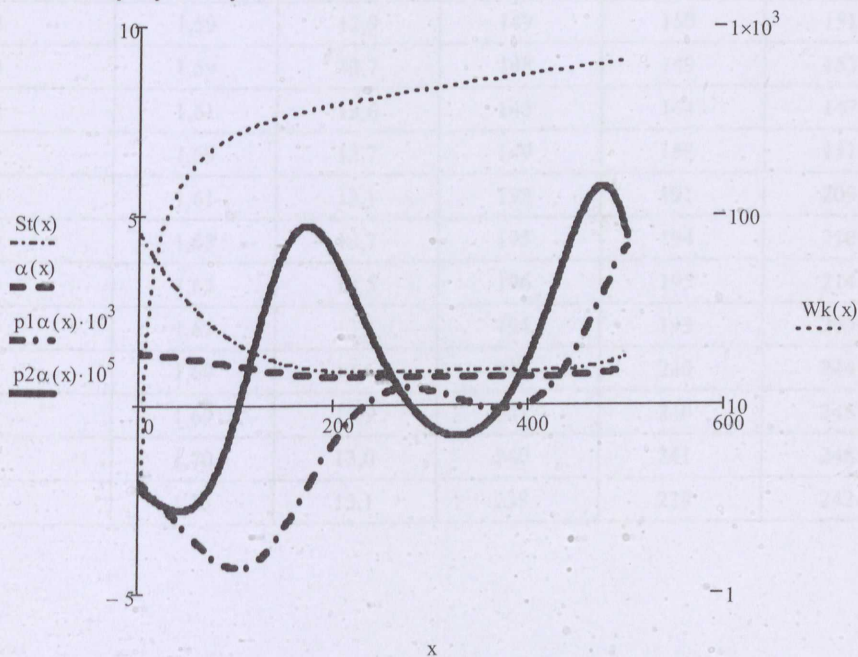
Wykres przedstawiający współczynnik kierunkowy stycznej do wykresu funkcji $\alpha(x)$ – pierwsza pochodna $p1\alpha(x)$



Wykres przedstawiający drugą pochodną funkcji $\alpha(x) - p2\alpha(x)$



Wykres zbiorczy wykonanych obliczeń



Wartość inicjująca szukanie miejsca zerowego, czyli przecięcia krzywej $p2\alpha(x)$ z osią OX. Odpowiada to położeniu ekstremum funkcji $p1\alpha(x)$ (należy wstawić wartość bliską miejsca przecięcia $p2\alpha(x)$ z osią OX):

$$x := 100$$

$$xr := \text{root}(p2\alpha(x), x)$$

Wartość miejsca zerowego, czyli przecięcia krzywej $p2\alpha(x)$ z osią OX:

$$xr := 104,023$$

Wartość wielomianu odpowiadająca obliczonemu naprężeniu granicznemu:

$$W(xr) := 278,384$$

Załącznik B. Wyniki badań

Tabela B.1. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z gliny średniej (gs), odkształcanych wtórnie w warunkach ograniczonej bocznej deformacji, z prędkością 10 mm·min⁻¹

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [g·cm ⁻³]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,39	13,1	51	50	52
50	1,39	13,0	51	50	53
50	1,40	13,2	53	50	54
50	1,40	13,3	54	51	55
100	1,53	13,1	98	99	106
100	1,51	12,9	99	99	107
100	1,51	13,2	100	101	108
100	1,50	13,4	101	100	109
150	1,59	12,9	149	150	151
150	1,59	13,7	148	149	153
150	1,61	13,6	143	144	147
150	1,59	13,7	149	150	151
200	1,61	13,1	192	191	209
200	1,63	13,7	195	194	210
200	1,62	13,5	196	195	214
200	1,67	13,1	194	193	209
250	1,69	13,6	241	240	244
250	1,69	12,9	241	240	245
250	1,70	13,0	240	241	248
250	1,73	13,1	238	239	242

Tabela B.2. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z piasku gliniastego lekkiego pylistego (pglp), odkształcanych wtórnie w warunkach ograniczonej bocznej deformacji, z prędkością 10 mm·min⁻¹

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [g·cm ⁻³]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,56	11,4	52	51	53
50	1,54	10,9	47	50	52
50	1,56	11,6	48	53	55
50	1,55	10,9	47	49	51
100	1,64	10,6	72	97	101
100	1,66	10,8	81	109	113
100	1,65	11,0	87	103	105
100	1,66	10,4	85	102	104
150	1,67	10,6	141	151	153
150	1,74	10,3	141	155	157
150	1,77	11,0	134	158	162
150	1,72	10,5	143	161	164
200	1,80	10,6	185	236	238
200	1,76	10,7	303	210	213
200	1,82	10,7	194	220	223
200	1,80	10,9	189	215	218
250	1,86	10,5	269	261	264
250	1,81	11,1	320	318	320
250	1,81	11,3	232	254	256
250	1,79	11,2	252	251	253

Tabela B.3. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z gliny średniej (gs), odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,41	12,7	74	56	76
50	1,39	12,8	72	55	72
50	1,39	12,7	69	53	70
50	1,37	12,7	76	58	77
100	1,48	12,7	121	112	121
100	1,50	12,7	125	118	127
100	1,49	12,7	130	120	129
100	1,48	12,8	121	113	124
150	1,56	12,8	176	167	174
150	1,56	13,0	189	175	185
150	1,55	12,7	180	172	182
150	1,54	12,7	168	164	174
200	1,59	12,8	248	211	241
200	1,59	12,7	243	212	238
200	1,58	12,8	238	208	235
200	1,59	12,7	234	208	234
250	1,64	12,7	315	270	288
250	1,64	12,7	289	268	284
250	1,62	12,8	280	266	286
250	1,65	12,8	311	271	296

Tabela B.4. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z piasku gliniastego lekkiego pylistego (pglp), odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością 10 mm·min⁻¹

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [g·cm ⁻³]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,56	11,1	46	46	48
50	1,56	11,3	45	45	49
50	1,57	11,2	58	63	67
50	1,55	11,1	50	54	58
100	1,62	11,4	95	91	97
100	1,68	11,5	66	77	80
100	1,67	11,0	90	87	96
100	1,67	11,6	79	82	91
150	1,75	11,5	111	110	119
150	1,76	11,5	107	116	126
150	1,74	11,5	126	126	135
150	1,76	11,6	81	112	124
200	1,74	11,6	94	99	116
200	1,77	11,7	152	147	166
200	1,76	11,5	117	170	181
200	1,78	11,8	126	148	162
250	1,83	11,8	178	156	175
250	1,85	11,6	156	169	187
250	1,83	11,6	152	168	185
250	1,80	11,6	118	173	188

Tabela B.5. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z gliny średniej (gs), odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,39	12,5	131	118	121
50	1,38	12,5	81	60	62
50	1,40	12,5	78	51	55
50	1,41	12,6	83	53	56
100	1,50	12,5	159	139	143
100	1,49	12,5	161	133	138
100	1,49	12,6	132	119	127
100	1,47	12,6	159	127	139
150	1,57	12,3	240	204	216
150	1,56	12,3	216	167	179
150	1,54	12,4	211	225	232
150	1,55	12,4	230	204	219
200	1,58	12,4	269	257	271
200	1,60	12,5	287	269	295
200	1,58	12,5	271	269	278
200	1,60	12,5	303	318	332
250	1,63	12,5	294	309	325
250	1,64	12,5	333	332	348
250	1,68	12,6	347	312	338
250	1,64	12,6	309	350	368

Tabela B.6. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z gliny średniej (gs), odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością 200 mm·min⁻¹

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [g·cm ⁻³]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,38	13,0	103	92	97
50	1,37	12,9	97	75	78
50	1,37	12,9	91	72	74
50	1,40	12,9	92	62	66
100	1,47	13,1	148	130	137
100	1,48	13,1	164	142	149
100	1,50	13,1	145	130	137
100	1,49	13,1	177	146	153
150	1,57	13,1	216	239	241
150	1,56	13,2	238	226	237
150	1,57	13,2	266	234	247
150	1,55	13,2	229	217	229
200	1,61	13,0	312	300	318
200	1,61	13,1	212	288	301
200	1,59	13,1	311	265	289
200	1,62	13,0	305	258	271
250	1,68	13,1	358	301	320
250	1,69	13,1	358	345	368
250	1,68	13,1	344	267	289
250	1,68	12,4	344	306	323

Tabela B.7. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z gliny średniej (gs), odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością 300 mm·min⁻¹

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [g·cm ⁻³]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,37	12,5	101	74	79
50	1,37	12,7	98	53	59
50	1,39	12,7	88	80	84
50	1,37	12,7	104	59	63
100	1,45	12,6	170	134	141
100	1,47	12,7	175	158	155
100	1,48	12,7	174	153	162
100	1,45	12,8	170	152	160
150	1,53	12,7	240	225	236
150	1,58	12,7	237	243	256
150	1,54	12,7	231	211	222
150	1,54	12,8	236	224	232
200	1,61	12,8	289	318	336
200	1,61	12,8	312	308	321
200	1,60	12,8	300	316	338
200	1,62	12,7	331	301	319
250	1,65	12,8	392	389	408
250	1,65	12,8	335	333	347
250	1,65	12,9	330	320	344
250	1,64	12,9	381	360	384

Tabela B.8. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z gliny średniej (gs), odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością 400 mm·min⁻¹

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [g·cm ⁻³]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,36	12,6	106	106	111
50	1,36	12,6	94	62	66
50	1,37	12,6	97	77	79
50	1,37	12,7	104	69	81
100	1,48	12,7	172	156	163
100	1,48	12,7	174	167	172
100	1,47	12,6	164	158	162
100	1,46	12,7	152	154	159
150	1,53	12,8	240	225	231
150	1,56	12,8	236	189	203
150	1,55	12,9	238	216	229
150	1,56	12,7	238	251	266
200	1,60	12,8	272	271	284
200	1,59	12,8	312	293	304
200	1,59	13,0	325	315	323
200	1,60	13,0	300	317	332
250	1,64	12,8	391	376	393
250	1,63	12,9	393	389	403
250	1,64	12,9	387	400	415
250	1,62	12,9	390	376	396

Tabela B.9. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z gliny średniej (gs), odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością 500 mm·min⁻¹

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [g·cm ⁻³]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,35	12,6	102	57	62
50	1,35	12,5	104	69	74
50	1,36	12,6	97	67	72
50	1,37	12,7	102	58	64
100	1,46	12,7	162	164	169
100	1,46	12,7	177	120	126
100	1,49	12,6	162	130	135
100	1,47	12,7	163	158	169
150	1,55	12,8	253	251	268
150	1,56	12,9	250	241	257
150	1,53	12,9	251	237	248
150	1,54	12,7	248	238	252
200	1,62	12,9	285	298	314
200	1,61	12,9	276	288	302
200	1,60	13,0	297	295	318
200	1,59	13,0	294	310	328
250	1,64	12,9	390	392	412
250	1,64	12,9	371	376	399
250	1,65	12,9	364	388	397
250	1,65	12,9	357	370	388

Tabela B.10. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z piasku glinianego lekkiego pylastego (pglp), odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,55	11,2	54	59	61
50	1,55	11,2	58	73	76
50	1,55	11,3	55	58	65
50	1,55	11,3	57	73	75
100	1,65	11,4	71	83	84
100	1,67	11,2	101	103	107
100	1,67	11,5	98	98	103
100	1,64	11,4	87	90	92
150	1,72	11,4	122	126	132
150	1,71	11,3	118	114	120
150	1,71	11,3	113	112	119
150	1,70	11,3	98	98	104
200	1,76	11,2	187	180	191
200	1,77	11,1	142	166	178
200	1,76	11,1	162	165	179
200	1,78	11,1	150	153	169
250	1,80	11,2	159	165	177
250	1,80	11,2	207	214	227
250	1,80	11,1	183	195	203
250	1,81	11,1	194	184	198

Tabela B.11. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z piasku gliniastego lekkiego pylastego (pglp), odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością 200 mm·min⁻¹

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [g·cm ⁻³]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,50	10,6	79	58	61
50	1,54	10,9	77	52	55
50	1,53	10,7	75	68	70
50	1,53	10,7	77	62	63
100	1,62	10,6	136	114	117
100	1,64	10,7	112	87	110
100	1,67	11,6	106	104	105
100	1,67	12,0	112	110	115
150	1,71	12,0	132	139	145
150	1,72	11,9	155	173	179
150	1,77	11,3	140	144	152
150	1,75	10,9	145	158	163
200	1,75	11,7	179	182	187
200	1,78	11,8	189	196	199
200	1,79	11,8	173	188	184
200	1,76	11,8	157	177	181
250	1,78	11,7	161	178	182
250	1,80	11,6	177	173	179
250	1,82	11,8	151	161	171
250	1,80	11,8	170	175	188

Tabela B.12. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z piasku gliniastego lekkiego pylastego (pglp), odkształczanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością 300 mm·min⁻¹

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [g·cm ⁻³]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,58	10,9	70	64	66
50	1,60	10,8	63	50	53
50	1,58	10,8	58	60	66
50	1,57	10,9	68	63	69
100	1,65	10,8	115	98	106
100	1,65	10,8	80	125	128
100	1,66	10,6	91	94	99
100	1,66	10,7	114	103	106
150	1,72	10,6	150	165	172
150	1,72	10,9	134	153	169
150	1,71	10,7	140	157	166
150	1,73	10,7	126	137	142
200	1,76	10,8	174	189	194
200	1,74	10,7	187	182	187
200	1,76	10,2	168	186	192
200	1,77	10,7	186	198	203
250	1,80	10,7	200	204	211
250	1,79	10,7	198	221	228
250	1,80	10,7	212	218	225
250	1,80	10,6	197	231	239

Tabela B.13. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z piasku gliniastego lekkiego pylastego (pglp), odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością 400 mm·min⁻¹

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [g·cm ⁻³]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,55	10,1	78	51	55
50	1,58	10,2	73	57	58
50	1,55	10,2	67	65	69
50	1,56	10,1	56	55	60
100	1,64	10,2	106	102	109
100	1,65	10,1	103	113	116
100	1,65	10,3	107	106	110
100	1,66	10,2	133	125	128
150	1,66	10,3	142	161	167
150	1,69	11,6	137	150	160
150	1,76	10,4	142	143	151
150	1,73	11,3	122	124	131
200	1,76	11,5	164	200	208
200	1,74	11,9	137	151	157
200	1,76	11,4	178	184	188
200	1,75	11,5	172	185	191
250	1,79	11,7	194	208	217
250	1,76	11,3	199	225	231
250	1,79	11,2	216	224	237
250	1,80	11,3	184	208	221

Tabela B.14. Charakterystyka próbek wytworzonych z materiału glebowego – z piasku gliniastego lekkiego pylistego (pglp), odkształcanych wtórnie w warunkach możliwej bocznej deformacji, z prędkością 500 mm·min⁻¹

Napężenie formowania [kPa]	Gęstość po formowaniu [g·cm ⁻³]	Wilgotność [%]	Metody obliczania napężenia granicznego		
			metoda regresji	metoda numeryczna	metoda maksymalnej krzywizny
			kPa		
50	1,55	11,1	69	67	71
50	1,56	11,2	64	58	63
50	1,55	11,1	55	74	72
50	1,56	11,0	75	67	73
100	1,64	11,1	97	113	116
100	1,65	11,1	81	126	129
100	1,65	11,1	107	105	105
100	1,65	11,2	99	117	121
150	1,67	11,1	151	153	160
150	1,71	11,0	153	175	179
150	1,74	11,1	161	178	184
150	1,74	11,0	194	183	188
200	1,74	10,9	230	220	228
200	1,75	11,0	232	215	224
200	1,76	11,0	211	206	208
200	1,76	10,9	188	224	231
250	1,81	10,8	247	275	288
250	1,80	10,8	248	256	268
250	1,80	10,9	278	257	265
250	1,79	10,8	272	253	259

Piśmiennictwo

- Alakukku L. 1996. Persistence of soil compaction due to high loads traffic. II Long-term effect on the properties of fine – textured and organic soils. *Soil Tillage Res.* 37 (4), 223–238.
- Alexandrou A., Earl R. 1995. In situ determination of the pre-compaction stress of a soil. *J. Agric. Eng. Res.* 61, 67–72.
- Alexandrou A., Earl R. 1998. The relations ship among the pre-compaction stress, volumetric water content and initial dry bulk density of soil. *J. Agric. Eng. Res.* 71, 75–80.
- Alexandrou A., Earl R., Gemtos T.A. 2002. In situ assessment of soil compactibility, in: *ASAE Meeting Paper No. 021088. ASAE Annual International Meeting/CIGR World Congress*, Chicago, Illinois, USA, July 28–July 31, 2002. [b.w.], 1–13.
- Arvidsson J., Keller T. 2004. Soil precompaction stress. Part 1. A survey of Swedish arable soils. *Soil Tillage Res.* 77, 85–95.
- Assouline S. 2002. Modeling soil compaction under uniaxial compression. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 66, 1784–1787.
- Baumgartl Th., Köck B. 2004. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 57–65.
- Berli M., Kulli B., Attinger W., Keller M., Leuenberger J., Fluhler H., Springman S.M., Schulim R. 2004. Compaction of agricultural and forest subsoils by tracked heavy construction machinery. *Soil Tillage Res.* 75, 37–52.
- Błażejczak D. 2009. Analiza zależności naprężeń pierwotnych od wtórnych i stanu początkowego próbki gleby. *Inż. Rol.* 1 (110), 29–35.
- Błażejczak D., 2010. *Prognostowanie naprężenia granicznego w warstwie podornej gleb ugniatanych kołami pojazdów rolniczych*. Szczecin, ZUT. ISBN 978-83-7663-050-2.
- Błażejczak D., Dawidowski J.B. 2002. The influence of the age-hardening of silty loamy sand on its strength determining by pre-compaction stress. *Electron. J. Pol. Agric. Univ., Ser. Agric. Eng.* 5 (2), <http://www.ejpau.media.pl/series/volume5/issue2/engineering/art-02.html>.
- Brandt S. 2002. *Analiza danych*. Warszawa, Wydaw. Nauk. PWN.
- Casagrande A. 1936. The determination of preconsolidation load and its practical significance, in: *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, June 22–26, 1936, Vol. 3. Cambridge, MA, 60–64.
- Cavaliere K.M.V., Arvidsson J., Silva A.P. da, Keller T. 2008. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil Tillage Res.* 98, 17–26.
- Craig R.F. 1992. *Soil mechanics*. London, Chapman and Hall.
- Davies B., Finney D., Eagle B. 1972. *Soil management*. Ipswich, Farming Press.
- Dawidowski B. 1993 a. Badania zależności między naprężeniem pierwotnym a naprężeniem granicznym przy wtórnym jednoosiowym odkształceniu gleby. *Zesz. Nauk. AR Szczec., Ser. Rolnictwo* 159 (56), 111–115.

- Dawidowski B. 1993b. Zastosowanie programu lotus 123 do obliczania wartości naprężenia granicznego. *Zesz. Nauk. AR w Szczec., Ser. Rolnictwo* 159 (56), 117–122.
- Dawidowski B. 1994. Metoda obliczeń wartości naprężenia granicznego w jednoosiowo odkształcanych próbkach gleby. *Probl. Inż. Rol.* 1, 29–35.
- Dawidowski B. 1995. Proces ugniatania gleby i metoda prognozowania jej zagęszczenia w zmechanizowanych technologiach prac polowych. *Rozpr. AR Szczec.* 163. ISBN 83–86521–85–6.
- Dawidowski J.B., Błażejczak D. 1998. Badania wstępne wpływu prędkości odkształcania na graniczne naprężenia gleby. *Pr. PIMR* 43 (3), 40–43.
- Dawidowski J.B., Koolen A.J. 1994. Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. *Soil Tillage Res.* 31, 277–282.
- 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.
- Dawidowski J.B., Śnieg M., Błażejczak D., Morrison, J.E. Jr. 2003. Procedure on indicated values of soil precompaction stress, in: *Proceedings of 16th Triennial Conference of International Soil Tillage Organisation. Soil management for sustainability*, Brisbane, Australia, July 13–18, 2003. Brisbane, Australia, The University of Queensland, 344–350.
- Dias M.S. Jr., Pierce F.J. 1995. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technol.* 8, 139–151.
- Earl R. 1997. Assessment of the behaviour of field soils during compression. *J. Agric. Eng. Res.* 68, 147–157.
- Febo P., Pessina D., Vallone M. 2000. Soil-tyre/track interaction. A review of the last ten years studies from the soil compaction point of view, in: *Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community. The 3rd workshop*, Uppsala, Sweden, June 14–16, 2000. [b.w.], 1–20.
- Fritton D.D. 2001. An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 678–684.
- Gawęcki J., Wagner W. 1988. *Podstawy doświadczałnictwa w nauce o żywieniu i żywności*. Poznań, AR.
- Gregory A.S., Whalley W.R., Watts C.W., Bird N.R.A., Hallett P.D., Whitmore A.P. 2006. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil Tillage Res.* 89, 45–57.
- 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.
- Hakansson I. 1994. Subsoil compaction caused by heavy vehicles – a long-term threat to soil productivity. *Soil Tillage Res.* 29, 105–110.
- Hakansson I., Reeder R.C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent, persistence and crop response. *Soil Tillage Res.* 29, 277–304.
- Hemmat A., Tahmasebi M., Vafaeian M., Mosaddeghi M.R. 2009. Relationship between precompaction stress and shear strength under confined and semi-confined loadings for a sandy loam soil. *Biosystem Eng.* 102, 219–226.
- Horn R. 1981. Eine methode zur ermittlung der druckbelastung von böden anhand von drucksetzungsversuchen. *Z.f. Kulturtechnik und Landentwicklung* 22, 20–26.

- Horn R., Fleige H. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil Tillage Res.* 102, 201–208.
- Horn R., Fleige H., Richter F.-H., Czyz E.A., Dexter A., Diaz-Pereira E., Dumitru E., Enache R., Mayol F., Rajkai K., Rosa D. de la, Simota C. 2005. SIDASS project. Part 5. Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. *Soil Tillage Res.* 82, 47–56.
- Izbicki R., Stróżyk J. 2008. Wpływ zastosowanej metody interpretacji wyników badań na wartość naprężenia uplastyczniającego σ_y oraz stopnia YSR, <http://www.teberia.pl/bibliografia.php?a=showarticle&ArticleID=11341>, dostęp 26 lutego 2008 r.
- Keller T., Arvidsson J. 2003. Some remarks on the use of the soil precompression stress as a limit for applied stress to reduce soil compaction, in: *Proceedings of the Workshop on Soil Physical Quality*, Puławy, Poland, October 2–4, 2003. [b.w.], 83–86.
- 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 Res.* 79, 191–205.
- Keller T., Arvidsson J. 2007. Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression test. *Europ. J. Soil Sci.* 58, 1373–1381.
- Keller T., Arvidsson J., Dawidowski J.B., Koolen A.J. 2004. Soil precompression stress. Part 2: A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil Tillage Res.* 77, 97–108.
- Konstankiewicz K. 1987. Wpływ prędkości odkształceń na charakterystyki mechaniczne gleb. *Probl. Agrofiz.* 51. ISBN 83–04–02587–6.
- Koolen A.J. 1982. Precompaction stress determination on precompacted soil, in: *Proceedings of the 9th Conference of the International Soil Tillage Research Organisation*, Osijek, 21–25 June, 1982. [b.w.], 225–230.
- Koolen A.J., Kuipers H. 1989. Soil deformation under compressive forces, in: *Mechanics and related processes in structured agricultural soils. Proceedings of Second Workshop*. Red. W.E. Larson, G.R. Blake, R.R. Allmaras, W.B. Voorhees, S.C. Gupta. St. Paul, Kluwer Dordrecht Academic Publishers, Netherlands. ISBN 0–7923–0342–3.
- Kośmicki Z., 2008. Kierunki rozwoju techniki rolniczej. *Tech. Rol. Ograd. Leś.* 1, 2–6.
- Kozicz J. 1996. Ugniatanie gleb mechanizmami jezdnyimi agregatów przy uprawie roślin zbożowych i okopowych. *Post. Nauk Rol.* 4, 51–64.
- Krummelbein J., Peth S., Horn R. 2008. Determination of pre-compression stress of variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. *Soil Tillage Res.* 99, 139–148.
- Lebert M. 1989. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. *Bayereuther Bodenkundliche Berichte*. 12. ISSN 0931–6442.
- 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. *J. Environ. Manag.* 82, 388–397.
- Lebert M., Horn R. 1992. Ein verfahren zur flächendeckenden erfassung der bodenstabilität in hinblick auf die beurteilung der mechanischen belastbarkeit von ackerböden. *Z.f. Kulturtechnik und Landentwicklung* 33, 85–99.
- Młynkowiak W., Błażejczak D., Dawidowski J.B., Śnieg M. 1999. Utwardzanie się gleby a wartość naprężenia granicznego. *Inż. Rol.* 5, 195–200.

- 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.
- Mosaddeghi M.R., Hemmat A., Hajabbasi M.A., Alexandrou A. 2003. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. *Soil Tillage Res.* 70, 53–64.
- Mosaddeghi M.R., Koolen A.J., Hajabbasi M.A., Hemmat A., Keller T. 2007a. Suitability of pre-compression stress as the real critical stress of unsaturated agricultural soils. *Biosystems Eng.* 98, 90–101.
- Mosaddeghi M.R., Koolen A.J., Hemmat A., Hajabbasi M.A., Lerink P. 2007b. Comparisons of different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structured soils. *J. Terramech.* 44, 53–63.
- Oskoui K.E., Voorheers W.B. 1991. Economical consequences of soil compaction. *Trans. ASAE* 34 (6), 2317–2323.
- PN-88/B-04481. *Gruntty budowlane. Badanie próbek gruntu.*
- PN-90/P-04870. *Analiza statystyczna wyników pomiarów.*
- Polskie Towarzystwo Gleboznawcze. 1989. Systematyka gleb Polski. *Rocz. Gleboznaw.* 40 (3/4), 132–133.
- Poniatowska J. 2003. Gęstość objętościowa gleb mineralnych i jej znaczenie dla warunków rozwoju roślin. *Rocz. Gleboznaw.* 54 (4), 103–113.
- Poodt M.P., Koolen A.J., Linden J.P. van der. 2003. FEM analysis of subsoil reaction on heavy wheel loads with emphasis on soil precompaction stress and cohesion. *Soil Tillage Res.* 73, 67–76.
- Rücknagel J., Hofmann B., Paul R., Christen O., Hulsbergen K.-J. 2007. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil Tillage Res.* 92, 213–220.
- Rudnicki F. 1992. *Doświadczalnictwo rolnicze.* Bydgoszcz, ATR, 210.
- Schäffer B., Attinger W., Schulin R. 2007. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery—Soil physical and mechanical aspects. *Soil Tillage Res.* 93, 28–43.
- Szeptycki A. 2003. Wpływ ciężkich maszyn rolniczych na fizykomechaniczne właściwości gleby. *J. Res. Appl. Agricult. Eng.* 48 (3), 5–9.
- Śnieg M. 1999. *Metoda wyznaczania podatności gleby na ugniatanie.* Rozprawa doktorska. Szczecin, AR (maszynopis).
- Śnieg M., Dawidowski J.B., Młynkowiak W., Błażejczak D. 1999. Wpływ prędkości zadawania obciążeń na wartość naprężenia granicznego gleby. *Inż. Rol.* 5 (11), 2, 243–247.
- Tobias S., Tietje 2007. Modelling experts' judgments on soil compaction to derive decision rules for soil protection – A case study from Switzerland. *Soil Tillage Res.* 92, 129–143.
- Tomás R., Domenech C., Mira A., Cuenca A., Delgado J. 2007. Preconsolidation stress in the Vega Baja and Media areas of the River Segura (SE Spain): Cause and relationship with piezometric level changes. *Eng. Geol.* 91, 135–151.
- Trzecki S. 1974. Determination of water capacity of soils on the basis of their mechanical composition. *Rocz. Gleboznaw.* 25 (dodatek), 33–44.
- Van den Akker J.J.H. 2004. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stress and the subsoil carrying capacity. *Soil Tillage Res.* 79, 113–127.
- Van den Akker J.J.H., 2000. Two concerted actions on subsoil compaction, in: *ISTRO 2000 Conference*, Forth Worth July 2–7, 2000. USDA, Temple, Texas, USA.

- 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 Res.* 73, 1–8.
- Walkowiak R. 2000. Modele matematyczne zależności gęstości objętościowej od wilgotności zagęszczania, nacisku jednostkowego i jednostkowej energii zagęszczania dla gleb o różnym rozkładzie granulometrycznym. *Rocz. AR Poznań, Ser. Rozpr.* PL ISSN 0208–8436.
- Wiłun Z. 2003. *Zarys geotechniki*. Warszawa, WKiŁ. ISBN 83–206–1354–X.

by agricultural machines

In this paper, a new method for the calculation of soil pressure on the tyre has been presented. In this method, it was assumed that the subjective impact of the soil on the tyre of the vehicle obtained shall be eliminated as a matter of degree, and the number of samples of data reduced. It was also assumed that the method worked out shall be not too complicated and as simple and easy in use as possible. Based on these assumptions, an algorithm was set up, in which an analysis of a single value was used to calculate the value of pre-compaction stress, which together with the area of contact of the tyre with the soil is the tangent to the curve, described by polynomial $W(x)$, representing the dependence of the soil pressure on depth setting. This method differs from all other applied up to now, in particular, by the fact that the logarithmizing of the value of soil pressure was eliminated, and therefore the sensitivity of the method to possible errors while setting out measuring tool was reduced.

Because of the nature of the paper, the experimental work, whose results were used to check the correctness of the algorithm worked out, was carried out in the laboratory conditions, on vertical samples of two types of soil – medium heavy loam followed later by loess. The samples were of Skarżyski and medium sand, highly erodible, collected from the locality of Łódź. The moisture of the soil was 0.06 of weight in the case of Skarżyski and 0.11 of weight in the case of Łódź. The samples were prepared with the use of a rotating machine in the conditions of higher but probably almost full saturation.

The newly worked out method for the determination of soil pressure on the tyre has been verified experimentally, based on the dependence of the boundary force values calculated, shall be similar to the values of pressure which were obtained by 20, 40, 60, 80, 100, and that they shall be similar to values calculated, based on the known diameter of the cylinder in which the samples were formed, and of the force as well as the speed of pump shifting. The verification also consisted in a comparison of results calculated with a new method of work, designed with the use of two methods – logarithmic method, and method of logarithmizing and the method of maximum correlation.

The method worked out, which was based on the pressure on the tyre, as well as on the determination of errors with reference to the method proposed by the author, is able to set out the soil pressure on the tyre of a tractor, based on the method of the force on the cylinder of maximum correlation, which means that the pre-compaction stress, which is an approximate the expected value, which is the result of the calculation, was calculated, and therefore shall be a good enough approximation. This is the application of the method designed, in the conditions, based on an experimental procedure, and it is a good example of the work for the application of soil pressure on the tyre of a tractor.

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 α 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 Skarbimierz and medium sand, lightly dusted, collected from the locality of Lipnik. The moisture of the soil was 13% of weight in the case of Skarbimierz 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 α 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 Skarbimierz und aus leichtem schluffigem Lehmsand – entnommen im Ort Lipnik. Die Feuchtigkeit des Bodens betrug 13 Gew.-% im Fall von Skarbimierz 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 betrugen 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.



Biblioteka Główna
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego w Szczecinie

CZ.55529



001-055529-00-0

CZ 19.03

ISBN 978-83-7663-134-9