

RESEARCH ON INDIVIDUAL STRESS DISTRIBUTION IN THE SOIL WITH REGARD TO THE OCCURRENCE OF PLOUGH PAN

Summary

Multiple passes of traction and agricultural machinery on the track cause the formation of very pressed soil. The depth of its placement is variable and dependable not only on the kind and condition of the soil, but also on the value of stresses that are exerted on it by traction machinery. This also refers to the soil thickness. The occurrence of local soil density seems to be unbeneficial for the reasons relating to the technique of field-crop production. What is more, it has a great influence on yielding crops and plants growing.

BADANIE ROZKŁADU NACISKÓW JEDNOSTKOWYCH W GLEBIE Z UWZGLĘDNIENIEM WYSTĘPOWANIA PODESZWY PŁUŻNEJ

Streszczenie

Wielokrotne przejazdy mechanizmów jezdnych, maszyn i urządzeń rolniczych po tym samym śladzie powodują powstanie warstwy bardzo ugniezionej gleby. Głębokość jej usytuowania jest zmienna i zależna zarówno od rodzaju i stanu gleby jak również od wielkości nacisków wywieranych na nią przez mechanizmy jezdne. To samo zagadnienie dotyczy również jej grubości. Występowanie miejscowego zagęszczenia gleby jest bardzo niekorzystne ze względów agrotechnicznych, a tym samym ma duży wpływ na plonowanie i uprawy roślin.

1. Wprowadzenie

Dotychczasowe modele opisujące propagację nacisków w głąb gleby, generowanych przez oponę nie uwzględniają zjawiska występowania warstwy ugniezionej gleby, tzw. podeszwy płużnej [1].

Aby można było zamodelować zagadnienie rozprzestrzeniania się nacisków w głąb gleby z uwzględnieniem ich przejścia przez podeszwę płużną, należy najpierw określić głębokość jej usytuowania względem warstwy wierzchniej gleby oraz jej grubość.

Te dwa parametry, o których wspomniano są wielkościami zmiennymi i trudnymi do uogólnienia. Konieczne jest zatem dla każdego badanego pola określanie ich w wyniku eksperymentalnych badań polowych.

Ponieważ prowadzenie badań polowych w różnych warunkach glebowych z zastosowaniem dużego asortymentu opon, związane jest z wysokimi kosztami oraz bardzo czasochłonne ze względu na przygotowanie sprzętu jak również pola badawczego, jedynym perspektywicznym rozwiązaniem wydaje się wykorzystanie techniki komputerowej, a w szczególności symulacji komputerowej.

W celu przeprowadzenia symulacji rozprzestrzeniania się nacisków niezbędne są dane wyjściowe, takie jak:

- głębokość położenia tzw. podeszwy płużnej względem wierzchniej warstwy,
- grubość tej miejscowo zagęszczonej gleby,
- zagłębienie opony w czasie przejazdu,
- ciśnienie w oponie,
- ugięci opony pod zadaniem obciążeniem,
- wartość nacisków na styku opony z gleba,
- wartość nacisków w miejscu osiągnięcia położenia podeszwy płużnej,
- wartość nacisków po przejściu przez ww. podeszwę,
- parametry geometryczne opony.

Dane te są poza tym konieczne do przeprowadzenia weryfikacji wyników obliczeń modelowych z wynikami badań polowych.

2. Podeszwa płużna

Do określania położenia i grubości tzw. podeszwy płużnej posłużył GEORADAR (FAL, Braunschweig) [2]. Jest to urządzenie, które przy pomocy emisji fal określa zmianę struktury gleby oraz głębokość jej położenia. Rys. 1. pokazuje umieszczenie sondy georadaru na ciągniku operacyjnym do badań polowych. Antena radarowa została przymocowana nad konstrukcją drewnianą z pewnym odstępem od ciągnika, aby zminimalizować możliwe zakłócenia sygnału wywieranie przez masę metalu ciągnika.



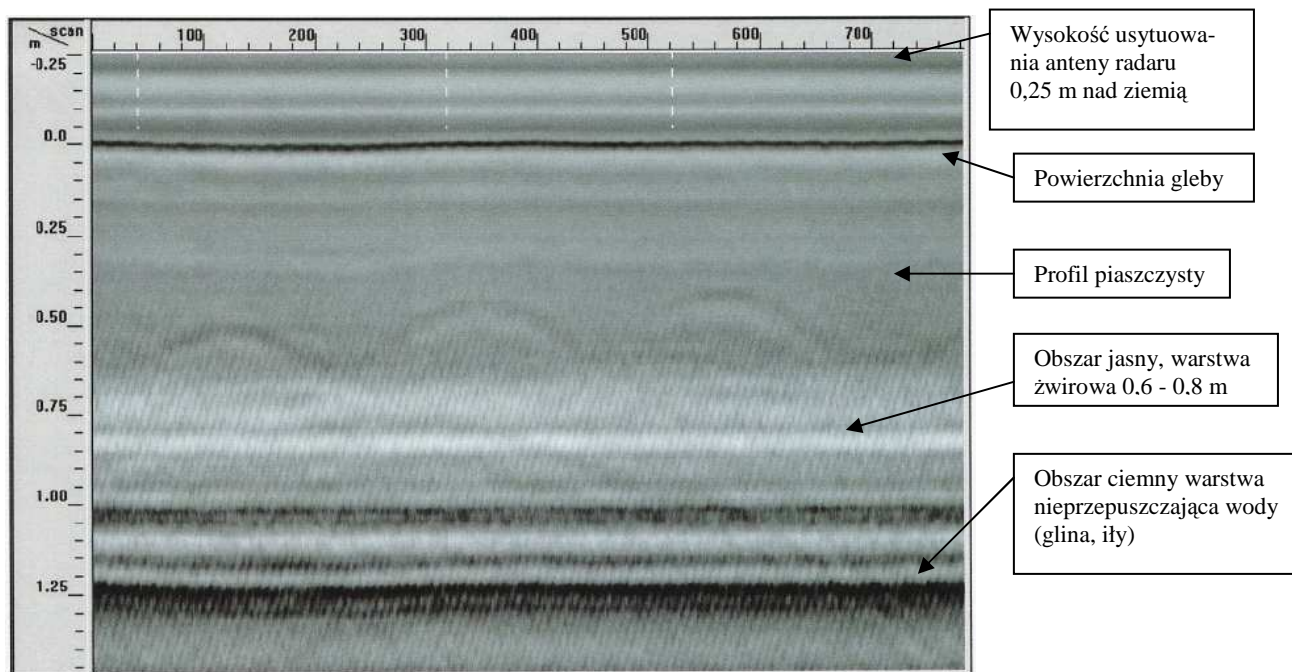
Rys. 1. Umieszczenie anteny radarowej na ciągniku
Fig. 1. Placement of radar antenna on the tractor

Aby sprawdzić w pierwszej próbie sposób funkcjonowania georadaru i możliwości określenia głębi, pomiar był przeprowadzony na gliniastym piasku o znanym profilu poprzecznym gleby. Na rys. 2. przedstawiono diagram rada-

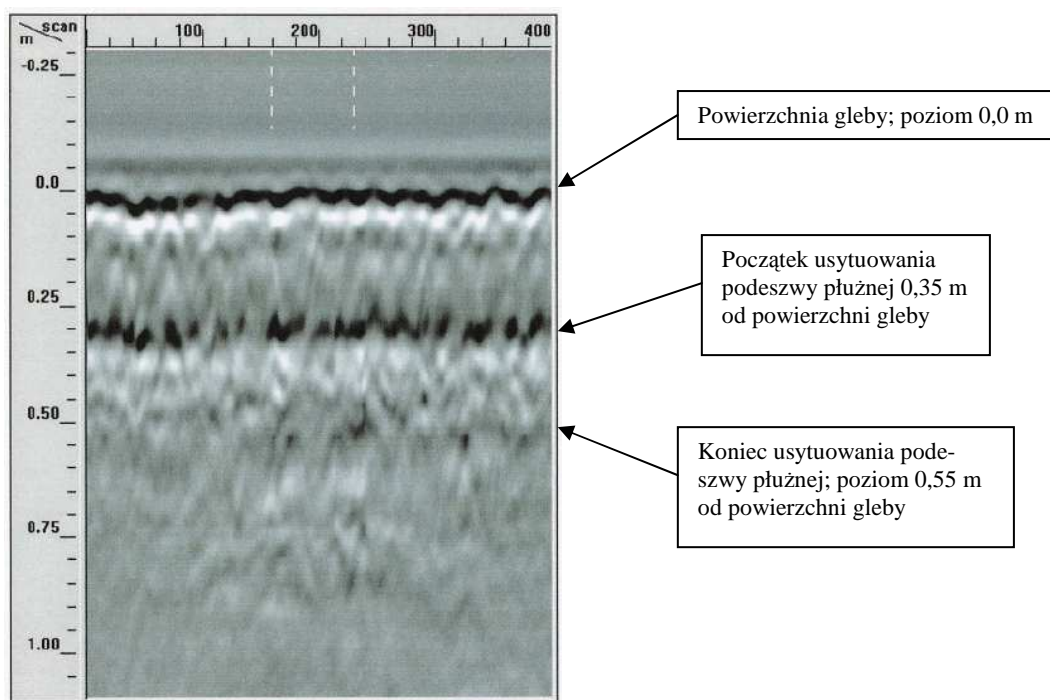
rowy przekroju gleby nie ugnieconej i porównano go z obrazem przekroju podłoża uzyskanym w miejscu wykopu do celów porównawczych. Wyraźnie widać poszczególne warstwy i na jakiej głębokości występują. Intensywność odcieni uzyskuje się wzmocnieniem sygnału i komputerowym przetwarzaniem obrazu.

Rys. 3 pokazuje diagram radarowy mierzenia w poprzek do pasa ruchu na ilastym poletku pod płodozmianem bur-

ka cukrowego. Do trochę niejasnego poruszonego obrazu przyczynił się ruch anteny przy przejeździe przez nierówności. Jednak wyraźnie można zaobserwować na głębokości ok. 35 cm strefę skroplenia pary wodnej, co wskazuje na początek warstwy ugnieconej gleby. To dzieje się także przy strefie od 0 cm (wyraźnie ciemna) i oznacza zmiany przy wejściu elektromagnetycznej fali z powietrza do ziemi.



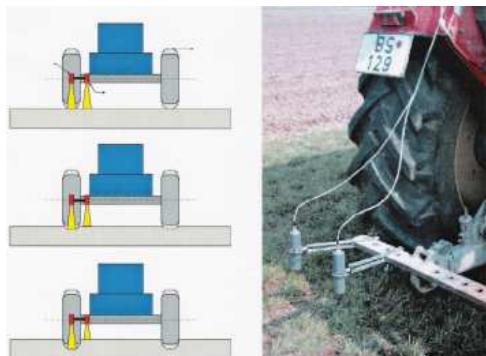
Rys. 2. Diagram radarowy z pomiaru na gliniastym piasku o znanym profilu
 Fig. 2. Radar diagram of the measurement on clay sand of known profile



Rys. 3. Diagram radarowy przekroju gleby uzyskany w poprzek koleiny dla gleby uprawnej
 Fig. 3. Radar diagram of soil section obtained across the rut of cultivated soil

3. Zagłębienie opony w czasie przejazdu

Pomiar zagłębienia opony w glebie został zrealizowany przy zastosowaniu bezstykowych czujników ultradźwiękowych pracujących w układzie różnicowym. Uproszczony schemat pomiaru przedstawiono na rys. 4 [3].



Rys. 4. Pomiar głębokości śladów dwiema sondami ultradźwiękowymi, (FAL; Braunschweig).

Fig. 4. Measurement of tracks depth with two ultrasonic probes

4. Pomiar nacisków w glebie

Do pomiaru nacisków wykorzystano hydrauliczne czujniki pomiarowe. Usytuowane były one na różnych głębokościach względem wierzchniej warstwy gleby. Głębokość ich ułożenia wynosiła: 0.2 m i 0.5 m (rys. 5) [2].



Rys. 5. Usytuowanie czujników pomiarowych w glebie

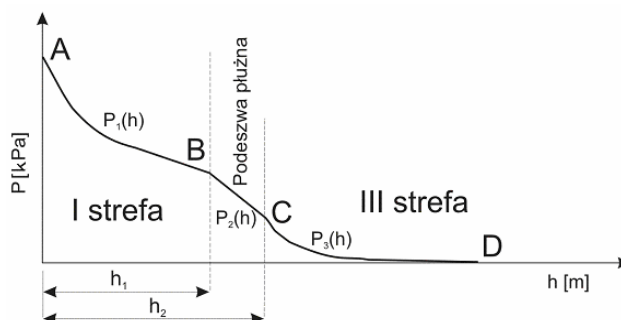
Fig. 5. Placement of measuring sensors in the soil

Mierzone były także wartości nacisków poniżej tzw. podeszwy płuznej, której położenie ustalono za pomocą wspomnianego już georadaru. Z otrzymanych wyników pomiarów wynika, że po przejściu przez tę warstwę zagęszczoną miejscowo gleby, następuje bardzo znaczny spadek wartości rejestrowanych nacisków nawet do wartości równo zero.

5. Model matematyczny propagacji nacisków

Zaproponowany w opracowaniu model matematyczny pozwala na prowadzenie symulacji komputerowej rozkładu nacisków z uwzględnieniem ich przejścia przez tzw. podeszwę płuzną przy zmiennych warunkach i parametrach badań. Ponieważ sam problem zamodelowania położenia wspomnianej podeszwy, wydaje się zagadnieniem bardzo skomplikowanym i zależnym od tak różnorodnych czynników, że jedynym rozsądnym rozwiązaniem wydaje się określanie go każdorazowo na podstawie przeprowadzonych, w danych warunkach badań polowych z wykorzystaniem wspomnianego już georadaru.

Przedstawioną w opracowaniu symulację przebiegu rozkładu nacisków w glebie (rys. 6), przeprowadzono dla danych otrzymanych z pomiarów w badaniach polowych. Pomiary te prowadzone były w latach 2004 i 2005 w Federalnym Instytucie Techniki Rolniczej w Braunschweigu. W badaniach stosowano oponę typu Michelin 20.8R38xM108.



Rys. 6. Teoretyczny przebieg propagacji nacisków w glebie

Fig. 6. Theoretical course of stress distribution in the soil

W przedstawionym modelu możemy wyodrębnić trzy strefy:

- pierwsza obejmuje zakres od warstwy wierzchniej gleby do poziomu pojawienia się podeszwy płuznej; jest to odcinek A-B (rys. 6.),
- druga strefa obejmuje swym zakresem przejście przez warstwę miejscowo zagęszczoną gleby; odcinek B-C,
- trzecia strefa odnosi się do warstw gleby leżących poniżej tzw. podeszwy płuznej; odcinek C-D.

Równanie to jest równaniem trójczłonowym [4]. W przedstawionym modelu przyjęto, że zgodnie z danymi literaturowymi i wynikami przeprowadzonych badań, faza początkowa propagacji nacisków przebiega zgodnie z przebiegiem funkcji wykładniczej. Kolejna faza to przejście przez tzw. podeszwę płuzną. Ponieważ brak jest danych literaturowych na ten temat, w modelu przyjęto, przebieg funkcji liniowej. Odcinek C-D określający rozkład nacisków po przejściu przez lokalne zagęszczenie gleby, przyjęto jako funkcję wykładniczą, asymptotycznie dążącą do zera. Podobnie jak w strefie pierwszej.

Przedstawiony w opracowaniu model jest modelem empiryczno-doświadczalnym. Oznacza to, że do jego opracowania jak i praktycznego wykorzystania, nieodzowne są określone dane wyjściowe, takie jak:

- h_1 – początek położenia tzw. podeszwy płuznej względem wierzchniej warstwy
- h_2 – koniec położenia podeszwy płuznej względem wierzchniej warstwy,
- p_0 – ciśnienie w oponie,
- G – obciążenie opony,
- O_k – obszar kontaktu z podłożem przy obciążeniu G (dane katalogowe),
- p_k – ciśnienie kontaktu opony z glebą = G/O_k
- z – zagłębienie opony w glebie,
- u – ugięcie opony w glebie,
- s – poślizg,
- x – stała opony, (dane katalogowe) H_p/B_p
- H_p - wysokość pneumatyczna opony,
- B_p – szerokość pneumatyczna opony

Dane te są konieczne do przeprowadzenia weryfikacji wyników obliczeń modelowych z wynikami badań polowych.

Model propagacji nacisków przedstawia równanie:

$$p(h) = \begin{cases} p_1(h) = C_1 \cdot e^{c_2 \cdot h^2 + c_3 \cdot h + c_4} + C_5 \\ p_2(h) = \frac{p_3(h_2) - p_1(h_1)}{h_2 - h_1} \cdot (h - h_1) + p_1(h_1) \\ p_3(h) = C_5 \cdot e^{c_6 \cdot h^2} \end{cases}$$

$$\text{dla } h \in (0, h_1) \quad (1a)$$

$$\text{dla } h \in \langle h_1, h_2 \rangle \quad (1b) \quad (1)$$

$$\text{dla } h > h_2 \quad (1c)$$

gdzie:

$$C_1 = \frac{p_o + 2 \cdot p_k}{2,75} \quad C_2 = s \cdot C_3 \quad C_3 = -x \quad (2)$$

$$C_4 = z - u \quad C_5 = \frac{p_k}{2} \quad C_6 = (h_2 - h_1) \cdot C_2$$

Rozwiązanie trójczłonowego równania (1) do obliczania przebiegu rozkładu nacisków składa się z trzech etapów obliczeniowych. Równanie (1a) wyznacza przebieg w zakresie AB - rys.6, równanie (1b) określa obszar przejścia przez podszwę płuzną - odcinek BC, równanie (1c) wyznacza rozkład nacisków po przejściu przez miejscowe ugniecenie gleby – odcinek CD na rys. 6.

Stałe $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ równania (1) określono zależnościami (2).

W celu uzyskania ciągłości przebiegu obliczonych wartości rozkładu nacisków równanie trójczłonowe przedstawiono w postaci (3). Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem programu Mathcad 2000.

$$P(h) := \text{if}(h < h_1, p_1(h), \text{if}(h > h_2, p_3(h), p_2(h))) \quad (3)$$

Do weryfikacji modelu matematycznego wykorzystano między innymi serię pomiarów przeprowadzonych w FAL w Braunschweigu, z wykorzystaniem urządzenia badawczego zamontowanego na kombajnie zbożowym typu Claas (rys. 7) [5].



Rys. 7. Widok urządzenia pomiarowego z zamontowaną oponą Michelin 20.8R38xH108

Fig. 7. View of tyre Michelin 20.8R38xH108 with the installed measuring device

6. Symulacja rozprzestrzeniania się nacisków

Wyniki pomiarów wielkości nacisków na różnych głębokościach uzyskanych przy wykorzystaniu hydraulicznych czujników pomiarowych (rys. 5 i 7) zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Wyniki pomiarów nacisków na różnych głębokościach uzyskanych przy wykorzystaniu hydraulicznych czujników pomiarowych

Table 1. Results of stresses measurements on various depths obtained with using hydraulic sensors

Numer czujnika	1	2	3	4	5	6
Zagłębienie czujników [m]	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,60
Wartość ciśnienia [bar]	1,74	1,50	1,28	1,09	0,79	0,30

Pomiary wykonano przy następujących parametrach badań:

- G – obciążenie opony 5,8 T
- h_1 – początek położenia podszwy płuznej 0,35 m
- h_2 – koniec położenia podszwy płuznej 0,55 m,
- p_o – ciśnienie w oponie 2,2 bar,
- O_k – obszar kontaktu z podłożem 5095 cm²,
- p_k – ciśnienie kontaktu opony z glebą $G/O_k = 1,117$ bar
- z – średnie zagłębienie opony w glebie 0,12 m,
- u – średnie ugięcie opony 0,10 m
- s – poślizg 10%,
- x – stała opony zależna od typu „no” = 1

Katalogi producentów opon, oznaczają tzw. grupy opon w zależności od stosunku jej wysokości pneumatycznej do szerokości pneumatycznej. Poszczególne typy wraz z ich oznaczeniami i wskaźnikami współczynnika x przedstawiono poniżej

Typ opony:

„no” normalny profil opony: wysokość pneumatyczna /szerokość pneumatyczna $\geq 0,8$

„ni” niski profil opony: wysokość pneum./szerokość pneum. pomiędzy 0,6 a 0,8

„tr” terra opona: wysokość pneum./szerokość pneum. $\leq 0,6$

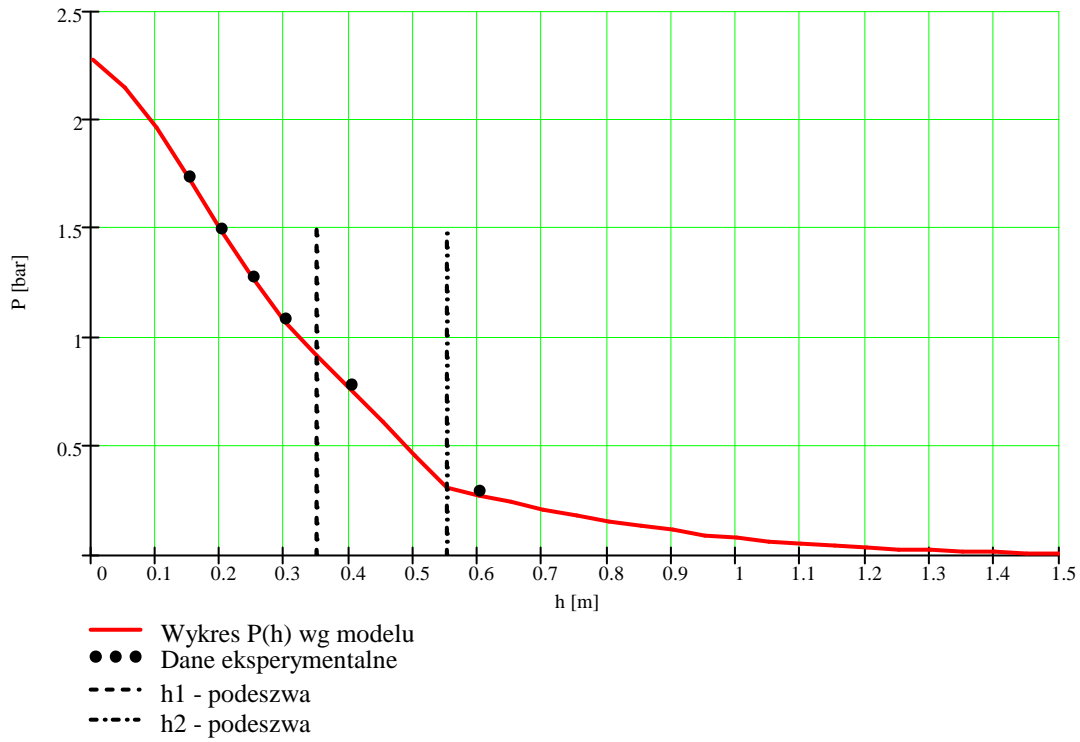
Wyniki pomiarów oraz krzywą według modelu matematycznego (1) przedstawiono na rys. 8.

Symulacja rozprzestrzeniania się nacisków została również wykonana dla zmiennych parametrów badań takich jak ciśnienie powietrza w oponie p_o , obciążenie zewnętrzne opony G, poślizgu s, przy stałym położeniu podszwy płuznej. Wartości tych wielkości i uzyskane przebiegi zestawiono w tab. 2 i 3, 4 i 5, 6 i 7, oraz przedstawiono graficznie na rys. 9, 10, 11.

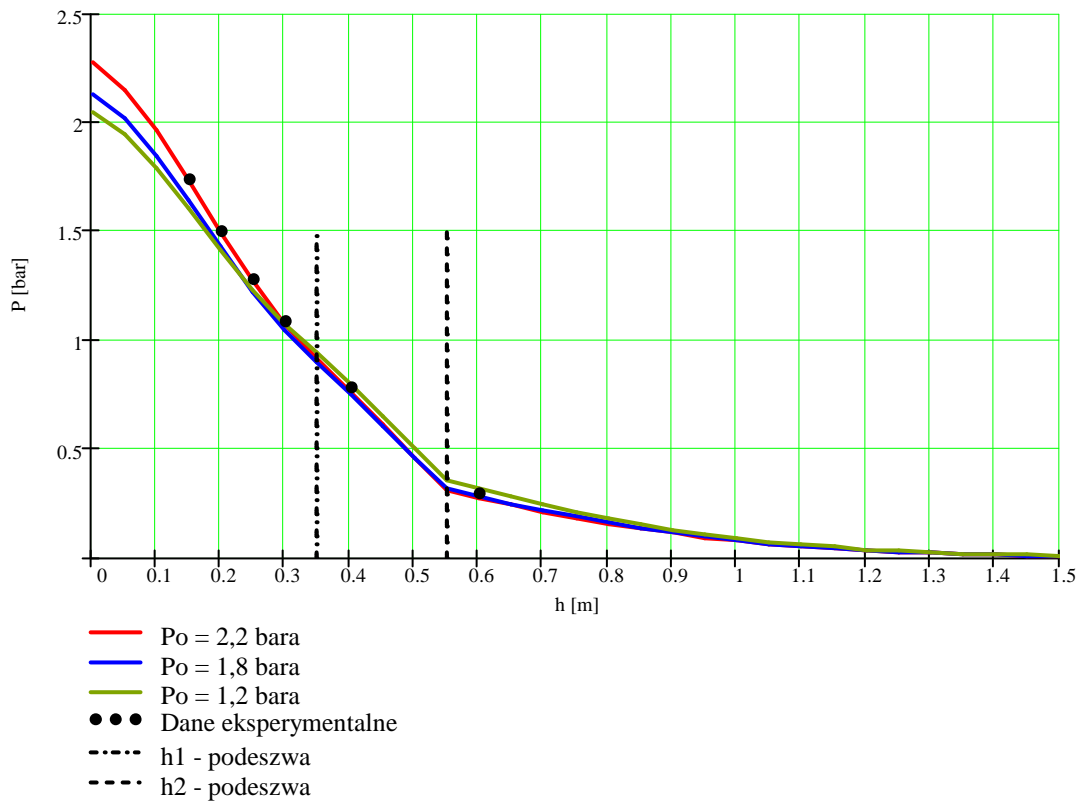
Tab. 2. Wartości zmiennego i stałego parametru badań

Table 2. Values of variable and constant research parameter

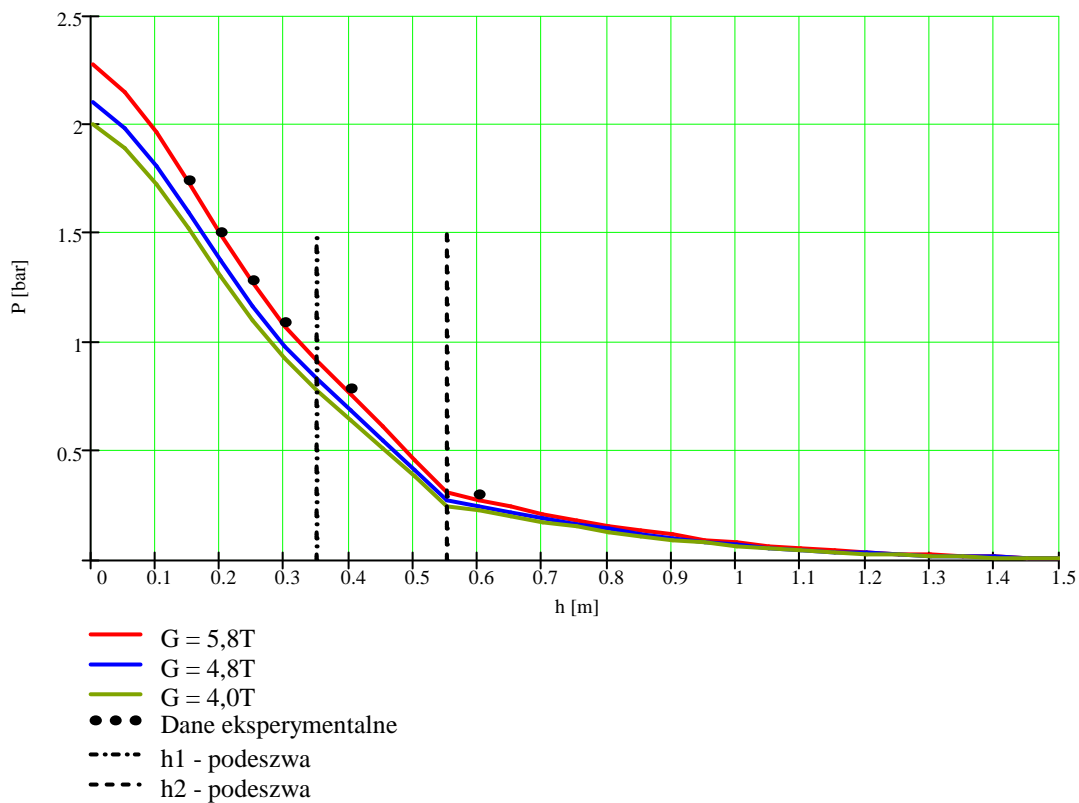
Zmienny parametr		Stały parametr	
p_o [bar]	O_k [cm ²]	G [T]	s [%]
2,2	5095	5,8	10
1,8	5214		
1,2	5391		



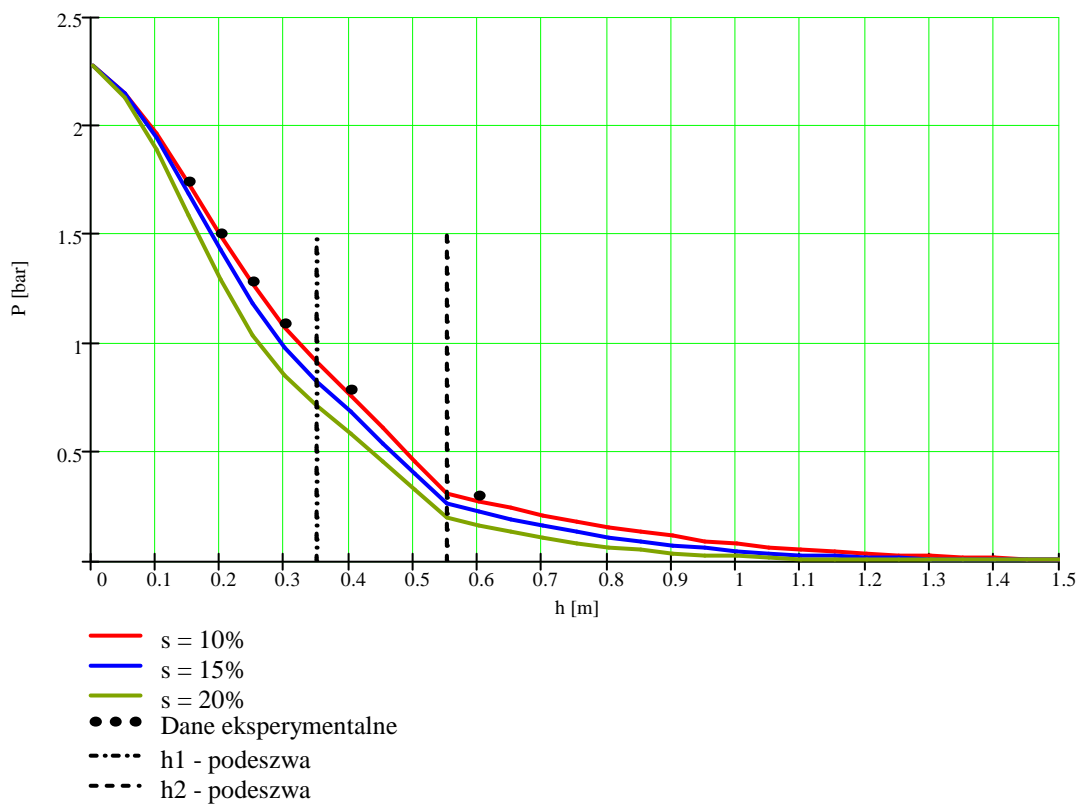
Rys. 8. Graficzne przedstawienie wyników pomiarów i krzywej wg modelu symulacji $P(h)$.
 Fig. 8. Graphical illustration of the curve from measurement results according to the simulation model $P(h)$



Rys. 9. Symulacja rozprzestrzeniania się nacisków dla danych z tab. 2
 Fig. 9. Simulation of stress distribution for data from table 2



Rys. 10. Symulacja rozprzestrzeniania się nacisków dla danych z tab. 4
 Fig. 10. Simulation of stress distribution for data from table 4



Rys. 11. Symulacja rozprzestrzeniania się nacisków dla danych z tab. 6
 Fig. 11. Simulation of stress distribution for data from table 6

W wyniku przeprowadzonej symulacji dla stałego obciążenia i poślizgu otrzymano zmienne wartości rozkładu nacisków w poszczególnych warstwach gleby w zakresie przedstawionym w tab. 2 i 3.

Tab. 3. Wyniki symulacji dla stałego obciążenia i poślizgu
Table 3. Simulation results for constant load and slip

Głębokość h [m]	Ciśnienie powietrza w oponie p_o [bar]		
	$p_o = 2,2$	$p_o = 1,8$	$p_o = 1,2$
Naciski w glebie P(h) [bar]			
0	2,270	2,125	2,043
0,10	1,960	1,844	1,791
0,20	1,498	1,426	1,414
0,35	0,913	0,913	0,895
0,55	0,305	0,302	0,298
0,60	0,272	0,270	0,268

Tab. 4. Wartości zmiennego i stałego parametru badań
Table 4. Conditions of constant and variable research parameter

Zmienny parametr		Stały parametr	
G [T]	O_k [cm ²]	p_o [bar]	s [%]
5,8	5095	2,2	10
4,8	4539		
4,0	4095		

W wyniku przeprowadzonej symulacji dla stałego ciśnienia w oponie i poślizgu otrzymano zmienne wartości rozkładu nacisków w poszczególnych warstwach gleby w zakresie przedstawionym w tab. 4 i 5.

Tab. 5. Wyniki symulacji dla stałego ciśnienia i poślizgu
Table 5. Simulation results for constant pressure and slip

Głębokość h [m]	Obciążenie opony G [T]		
	G = 5,8	G = 4,8	G = 4,0
Naciski w glebie P(h) [bar]			
0	2,270	2,097	2,003
0,10	1,960	1,807	1,722
0,20	1,498	1,375	1,304
0,35	0,913	0,828	0,774
0,55	0,305	0,271	0,248
0,60	0,272	0,242	0,221

Tab. 6. Wartości zmiennego i stałego parametru badań
Table 6. Values of variable and constant research parameter

Zmienny parametr	Stały parametr		
s [%]	G [T]	p_o [bar]	O_k [cm ²]
10	5,8	2,2	5095
15			
20			

W wyniku przeprowadzonej symulacji dla stałego obciążenia i ciśnienia w oponie otrzymano zmienne wartości rozkładu nacisków w poszczególnych warstwach gleby w zakresie przedstawionym w tab. 6 i 7.

Tab. 7. Wyniki symulacji dla stałego obciążenia i ciśnienia
Table 7. Simulation results for constant load and pressure

Głębokość	Poślizg s [%]		
	s = 10	s = 15	s = 20
Naciski w glebie P(h) [bar]			
0	2,270	2,270	2,270
0,10	1,960	1,943	1,885
0,20	1,498	1,426	1,290
0,35	0,913	0,828	0,774
0,55	0,305	0,258	0,200
0,60	0,272	0,223	0,164

7. Wnioski

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można wykonać następujące wnioski.

- Przeprowadzone obliczenia rozkładu nacisków według modelu (1) oraz analiza porównawcza wyników obliczeń z wynikami badań polowych potwierdza słuszność przyjętych założeń modelowych i stanowi podstawę do przeprowadzenia symulacji komputerowej badanych zjawisk.
- Symulację komputerową przeprowadzono dla zmiennych wartości ciśnienia powietrza w oponie p_o przy zachowaniu stałych wartości takich jak: obciążenie G, poślizg s i usytuowaniu grubości podeszwy płuznej. W wyniku przeprowadzonych obliczeń zmiany wielkości nacisków w poszczególnych warstwach wahały się w granicach: na powierzchni 2,270 – 2,043 bar, na głębokości 0,35 m (początek podeszwy płuznej) 0,913 – 0,895 bar, oraz głębokości 0,6 m 0,272 – 0,268 bar.
- Kolejnym wariantem symulacji było przyjęcie stałego ciśnienia p_o , poślizgu s przy zmiennych wartościach obciążenia G. W wyniku przeprowadzonych obliczeń zmiany wielkości nacisków w poszczególnych warstwach wahały się w granicach: na powierzchni 2,270 – 2,003 bar, na głębokości 0,35 m (początek podeszwy płuznej) 0,913 – 0,774 bar, oraz głębokości 0,6 m 0,272 – 0,221 bar.
- Ponadto przeprowadzono obliczenia przy stałych wartościach G i p_o , a zmiennym poślizgu s. W wyniku przeprowadzonych obliczeń zmiany wielkości nacisków w poszczególnych warstwach wahały się w granicach: na powierzchni 2,270 bar, na głębokości 0,35 m (początek podeszwy płuznej) 0,913 – 0,717 bar, oraz głębokości 0,6 m 0,272 – 0,164 bar.

8. Literatura

- Jakliński L.: Modele propagacji i oddziaływania koła pneumatycznego na glebę. Część 3a: Modelowanie wybranych procesów. Rozdział 7, s. 93-106. Płock-2007.
- Jakliński L., Pilarczyk S.: Modele i symulacja rozprzestrzeniania się nacisków z uwzględnieniem przejścia przez podeszwę płuzną. PW, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Płock 2006, s. 225-231.
- Zwischenbericht zum BMBF - Projekt 03300316. Projektbericht 2005. Entwicklung eines Online - Sensorsystems zur Erkennung der aktuellen Befahrbarkeit von Ackerböden. Braunschweig 2005.
- Jakliński L.: Modele propagacji nacisków uwzględniających podeszwę płuzną. Problemy Eksploatacji 3/2006 (62), s. 165-172. Radom 2006.
- Jakliński L., Pilarczyk S.: Analiza propagacji nacisków wybranych opon rolniczych. X Międzynarodowe Sympozjum Inżynierii Systemów Bioagrotechnicznych, Płock 2007, zeszyt 6(15), s. 29-34.